انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز

Iranian Hydraulic Association

علوم و مهندسی آبیاری

(علمی)

ISSN 2588-5952

بهار ۱۴۰۵ | جلد چهل و نهم شماره ۱

عنوان	نویسندگان	صفحه
بررسی تأثیر پوشش‌های بلند درختی روی تغییرات نیروی امواج ساحلی منفرد شکنا و ناشکنا	پریسا آذین فر، منوچهر فتحی مقدم و جواد احدیان	۱
امکان سنجی پایش تنش آبی گیاه گوجه‌فرنگی با استفاده از شاخص¬های طیفی در شرایط گلخانه‌ای	آناهیتا هادی قنوات، عبدالرحیم هوشمند، پروانه تیشه‌زن، ناصر عالم‌زاده انصاری و کاظم رنگزن	۲۳
ارزیابی تغییرات زمانی-مکانی مشخصه‌های کیفی آب رودخانه عباس‌آباد با استفاده از مدل شبیه‌ساز QUAL2Kw	عاطفه نورعلیئی، صفر معروفی و امید بابامیری	۴۳
تحلیل فراوانی توأم مدت و سختی خشکسالی هواشناسی مبتنی بر داده‌های بازتحلیل حاصل از پایگاه ERA5-Land	آمنه میان‌آبادی، محمد ناظری تهرودی و محسن پوررضا بیلندی	۵۹
بررسی اجزاء ردپای آب برای محصولات غالب در دشت دزفول	زینب نادری، علی محمد آخوندعلی و مهدی قمشی	۸۵
تحلیل هیدرولیکی بلانکت رسی سد خاکی با مدل‌سازی عددی	ابراهیم اسدی، مهدی سلطانی ستوبادی و توحید امیدپور علویان	۹۵
پایش و ارزیابی زمانی و مکانی خشکسالی هواشناسی و کشاورزی استان هرمزگان با استفاده سنجش از دور	هادی سیاسر و مریم حیدرزاده	۱۱۱
کاربردهای نوین هوش مصنوعی در کنترل و کاهش آلودگی‌های محیط زیستی	فاطمه کافی و الهام یوسفی	۱۳۳

علوم و مهندسی آبیاری

(علمی)

جلد چهل و نهم شماره۱ **بهار ۱۴۰۵**

مدیر مسؤول: سعید برومندنسب

سردبیر: سیدمحمود کاشفی‌پور

مدیر داخلی: مهدی دریایی

تایپ و صفحه آرایی: ندا یزدانی

ویراستار: ندا یزدانی

هیأت تحریریه :

آخوندعلی، علی‌محمد	استاد	هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز
حیدرپور، منوچهر	استاد	آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
زندپارسا، شاهرخ	استاد	آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
قمشی، مهدی	استاد	سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز
کاشفی‌پور، سیدمحمود	استاد	سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز
لیاقت، عبدالمجید	استاد	آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران
حسین زاده دلیر، علی	استاد	گروه مهندسی آب- دانشکده کشاورزی- دانشگاه تبریز.
ناصری، عبد علی	استاد	آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز
استفانو پالیارا	استاد	گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیزا،ایتالیا
لای سای هین	دانشیار	گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه مالایا،مالزی.
رضا احمدیان	استاد	گروه مهندسی عمران،دانشکده مهندسی، دانشگاه کاردیف، انگلستان
هِنک ریتزما	دانشیار	گروه مدیریت منابع آب، گروه علوم محیط زیست،دانشگاه واگنینگن و پژوهش، هلند

صاحب امتیاز: دانشگاه شهید چمران اهواز ـ دانشکده مهندسی آب و محیط زیست

کلیه مکاتبات از طریق سردبیر مجله به نشانی اهواز ـ دانشگاه شهید چمران اهواز ـ دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دفتر مجله علمی علوم و مهندسی آبیاری تلفن ۰۹۰۴۶۳۰۵۶۴۸ و دورنگار ۳۳۶۵۶۷۰۳ (۰۶۱) صورت گیرد.

این مجله در سایت **http://jise.scu.ac.ir** نمایه می شود.

نشانی پست الکترونیکی: **JISE.Water@scu.ac.ir** و **JISE.Water@yahoo.com**

مجوز انتشار از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی ۱۲۴/۱۰۳۶۲ به تاریخ ۷۷/۱۰/۸ و مجوز دفتر بررسی نشریات وزارت علوم، تحقیقات و فناوری ۳/۱۱/۱۲۶۴ به تاریخ ۲۹ /۸۸/۷ برای مجله علوم و مهندسی آبیاری

بسم الله الرحمن الرحيم

اسامی بررسی کنندگان مقالات این شماره

ادیب	آرش
اسلامیان	سعید
اصغری پری	سید امین
اولی پور	مسعود
بذرافشان	جواد
بهرامی یاراحمدی	محمد
بهمنی	امید
چراغی	میترا
بیژنوند	سجاد
خرمیان	محمد
دشتی	سیده سولماز
دیوبند هفشجانی	لاله
زایری	محمدرضا
ساسانی	حسین
سالاری	امیر
سبزقبائی	غلامرضا
سجادی	سید محسن
صمدی	امیر
لشکرآرا	بابک
میرعباسی	رسول
ویسی	شادمان

پیشگفتار

سپاس و ستایش پروردگار متعال که بر ما منت گذاشت تا با همت و پشتکار اعضاء هیأت تحریریه، کارکنان مجله، همکاری داوران و ویراستاران، جلد ۴۹، شماره ۱ مجله علمی علوم و مهندسی آبیاری با خرسندی فراوان به علاقه‌مندان علوم مهندسی آب تقدیم گردد.

مجله علوم و مهندسی آبیاری یک سابقه حدود ۴۳ ساله دارد و وزارت علوم و تحقیقات و فناوری مجوز این مجله علمی- پژوهشی در شکل حاضر در سال ۱۳۸۸ صادر کرد. این مجله در سایت های بین المللی ISC و Doaj نیز نمایه شده است. امتیاز این مجله متعلق به دانشگاه شهید چمران اهواز است.

هیأت تحریریه مجله علمی- پژوهشی علوم و مهندسی آبیاری امیدوار است که همکاران محترم در کلیه مراکز علمی و پژوهشی با ارسال مقالات ارزنده علمی و کاربردی خود در تخصص‌های مهندسی آب، آبیاری و زهکشی، منابع آب، سازه های آبی، هیدرولیک رسوب، محیط زیست آبی، آبخیزداری، آب- هواشناسی (هیدرومتئورولوژی)، هیدرولوژی، آب های زیرزمینی، اقتصاد آب و علوم وابسته به آنها، با این مجله همکاری نموده و در فراهم ساختن زمینه‌ی استمرار و پیوستگی چاپ و انتشار مجله و ارائه خدمات بیشتر و ارزنده تر در نشر علوم مهندسی آب و آبیاری ما را همراهی نمایند. از کلیه بررسی کنندگان مقالات و صاحب نظران که در فرصت های گوناگون با ارائه نظرات اصلاحی خود در بهبود کیفیت مجله نقشی به عهده گرفته اند، صمیمانه سپاسگزاری می نماید.

از همکاران گرامی که نتیجه مطالعات و تحقیقات خود را جهت چاپ و انتشار به این مجله ارسال می نمایند تقاضا می شود که ضوابط تعیین شده (راهنمای تهیه مقاله) را دقیقاً رعایت فرمایند. توجه به ضوابط مجله و رعایت آن از جانب صاحبان مقاله، ضمن جلوگیری از دوباره کارهای زیاد و وقت گیر، موجب تسریع و بهبود کیفیت چاپ مقالات نیز خواهد گردید.

سردبیر

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
بررسی تأثیر پوشش‌های بلند درختی روی تغییرات نیروی امواج ساحلی منفرد شکنا و ناشکنا پریسا آذین فر، منوچهر فتحی مقدم و جواد احدیان	۱
امکان سنجی پایش تنش آبی گیاه گوجه‌فرنگی با استفاده از شاخص‌های طیفی در شرایط گلخانه‌ای آناهیتا هادی قنوات، عبدالرحیم هوشمند، پروانه تیشه‌زن، ناصر عالم‌زاده انصاری و کاظم رنگزن	۲۳
ارزیابی تغییرات زمانی-مکانی مشخصه‌های کیفی آب رودخانه عباس‌آباد با استفاده از مدل شبیه‌ساز QUAL2Kw عاطفه نورعلیئی، صفر معروفی و امید بابامیری	۴۳
تحلیل فراوانی توأم مدت و سختی خشکسالی هواشناسی مبتنی بر داده‌های بازتحلیل حاصل از پایگاه ERA5-Land آمنه میان‌آبادی، محمد ناظری تهرودی و محسن پوررضا بیلندی	۵۹
بررسی اجزاء ردپای آب برای محصولات غالب در دشت دزفول زینب نادری، علی محمد آخوندعلی و مهدی قمشی	۸۵
تحلیل هیدرولیکی بلانکت رسی سد خاکی با مدل‌سازی عددی ابراهیم اسدی، مهدی سلطانی ستوبادی و توحید امیدپور علویان	۹۵
پایش و ارزیابی زمانی و مکانی خشکسالی هواشناسی و کشاورزی استان هرمزگان با استفاده سنجش از دور هادی سیاسر و مریم حیدرزاده	۱۱۱
کاربردهای نوین هوش مصنوعی در کنترل و کاهش آلودگی‌های محیط زیستی فاطمه کافی و الهام یوسفی	۱۳۳

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 1, Spring 2026, p. 1-21

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

Research Paper

EXTENDED ABSTRACT

the Impact of Long Tree Canopy on Changes in the Force of Solitary Breaking and Non-breaking Coastal waves

P. Azinfar[1], M. Fathi-Moghadam[*2] and J. Ahadiyan [*3]

1-Ph.D. of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
2*-Corresponding Author, Professor of Hydraulic, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. (fathi49@gmail.com)
3- Professor of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran; and Center of Excellence of the Irrigation and Drainage Networks Improvement and Maintenance, Ahvaz 61357-43311, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 25 April 2020
Revised: 20 December 2020
Accepted: 03 January 2021
Available online: 05 May 2026

Keywords: Breaking and Non-Breaking Waves, Coastal Protections, Wave Damping, Destructive Force of Waves.

TO CITE THIS ARTICLE:

Azinfar, P., Fathi Moghadam, M., Ahadiyan, J. 2026. 'the Impact of Long Tree Canopy on Changes in the Force of Solitary Breaking and Non-breaking Coastal waves', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(1), pp. 1-21. doi: 10.22055/jise.2021.32311.1904

Abstract

Coastal vegetation belts, depending on their capacity, can play a significant role in reducing coastal hazards or restoring the coast by attenuating waves, trapping and accumulating sediments, and rehabilitating the soil. Therefore, the role of coastal vegetation in modifying coastal characteristics and reducing the severity of damage through wave damping is of great importance. This study aims to investigate the effects of density, width of tall tree vegetation, and wave propagation velocity, as well as to determine the significance of these factors on the changes in the destructive force of breaking and non-breaking waves. To model tree trunks, non-flexible wooden stems with a diameter of 1 cm and a height of 30 cm were used. These cylindrical stems were installed on the beach section of the flume, and the force exerted on the obstacles by the waves was recorded using a direct measurement method with an electronic load cell installed beneath the movable section of the flume. The experiments were conducted with a fixed parallel arrangement, varying spacings of 5×5 and 10×10 cm, different vegetation widths of 10, 20, and 40 cm, and a constant bed slope of zero. Considering 40 different wave heights and control tests without vegetation, a total of 280 different conditions were examined. According to the experimental data, for a fixed vegetation width, the highest increase in force absorption occurred at a density of 5×5, which was 1.81 times greater than that at a density of 10×10. Finally, based on the experimental data, an empirical relationship between the drag coefficient and the Reynolds number was proposed.

Introduction

Floods that occur suddenly in watersheds can generate sudden waves. Investigating energy dissipation and constructing structures suitable for such conditions is of great importance (Sajjadi et al., 2024; Ahadiyan et al., 2024). Forests as a green belt reduce the height and energy of waves passing through them, reducing their ability to erode sediments and to cause damage to structures such as dikes and sea walls. As this happens, waves lose their ability to scour the seabed and carry away sediments (Mclvor et all.,2012). Such waves can easily destroy coastal dikes through a specific process. The destruction of these embankments, which are built to protect urban and rural

areas, leads to economic and sometimes human losses (Ahadiyan et al., 2022; Sadeghi-Hardangi and Ahadiyan, 2018). One of the strategies used, aside from creating roughness through vegetation cover to control such failures, is the application of in-phase and out-of-phase submerged jets to generate secondary flow or absorb the momentum of the opposing current (Maleki et al., 2025; Tamoradi and Ahadiyan, 2022). It is well-accepted that wave attenuation by emergent and submerged vegetation is a function of plant characteristics (geometry, stem density, spatial coverage, buoyancy, stiffness) as well as hydrodynamic conditions, including water depth (h), wave period (T), and wave height (H) (Augustin et al., 2009). Fathi-Moghadam et al. (2018) showed that the depth of inundation by flexible coastal canopies was reduced by 14, 18, and 29% for the coastal vegetation density of 30, 50, and 100%, respectively. Hirashi and Harada (2003) showed that the pressure difference on the sides of the green belt is mainly due to drag resistance. Azinfar et al. (2020) conducted various experiments in a wave channel to evaluate the effect of submerged and non-submerged tree vegetation on breaking wave damping, simulating wooden tree stems with a diameter of 1 cm as a green belt. Their laboratory results showed that for waves generated with identical characteristics, when the obstacles change from a non-submerged to a submerged state, the absorbed wave force decreases significantly. Salahi et al. (2024) experimentally investigated the simultaneous effect of bed roughness and vegetation on momentum absorption and drag coefficient. Their experimental results indicated that increasing the discharge directly affects the drag force. On average, with a twofold increase in flow depth, momentum absorption due to particle roughness can reach up to 60%, while under the same conditions, momentum absorption for vegetation is less than 30%. Their results provide an effective method for understanding the performance of different arrangements within the scope of the study.

Salmanzade et al. (2022) experimentally investigated the effect of tree type as vegetation cover on momentum absorption. They modeled the hydraulic conditions of river flow and the morphological conditions of vegetation along the river and floodplain. Their experiments were conducted in a 'sharp-edged flume' with a length of 8.3 m, a width of 0.8 m, and a height of 0.55 m. They found that vegetation density varied with the spacing and leaf area of the models. The density results can serve as a useful criterion for estimating the resistance caused by the presence of vegetation roughness in rivers. In this regard, Salmanzade et al. (2024a) in another study determined the physical properties of tree species and their response to external loads induced by water flow. They proposed an index to describe the physical properties of tree species. This index was derived based on the resonance frequency of the first vibration mode of the trees and a fundamental relationship for homogeneous beams. Furthermore, Salmanzade et al. (2024b) in a study investigating the effect of vegetation in waterways, modeled rigid and flexible vegetation using artificial specimens. Their results showed that in both rigid and flexible models, as the vegetation density index and relative depth increase, the drag force absorption increases. Therefore, it can be explained that when the sea waves head toward the shore, with the green belt, the waves pass through the canopies and the wave force, as a drag force, is absorbed by the trees, thus decreases its height.

In this study, a new and unique method based on the principle of momentum and direct force measurement has been used to measure wave energy decay simulated by the Green Belt. In this research, the effect of density and width of the canopy, as well as different heights of waves and still water, on the Attenuation of the force of the solitary breaking and Non-breaking waves has been investigated. The importance of wave propagation velocity will also be examined through how it affects wave force changes.

Methodology

Experiments were conducted in the Hydraulic Modeling Laboratory of the Faculty of Water Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, in an 8.3×0.8×0.55 rectangular flume called Knife Edge Flume (Lashkar-Ara, 2010). Flume has Plexiglas sidewalls and a bed and is designed to measure the force exerted by the wave force on the cylindrical barrier at its shore by means of a dynamic load cell installed between the movable and fixed parts of the flume. At the beginning of the experiments, wooden circular cylinders 1 cm in diameter with fixed spacing and parallel arrangement were fixed in the moving part of the flume, whose slope was constant and zero. Then,

by generating single solitary waves with different heights, the absorption force by the canopies was monitored via an electrical display connected to the dynamic load cell.

Results and Discussion

Investigation of the maximum force with wave height

In order to better understand the effect of force with wave height, first, the changes in inlet wave height and inundation depth with different elevations of reservoir water depth (P) and initial still water depth (h) are examined. when the initial downstream still water depth is kept constant as the reservoir water height increases, the wave height increases. Also, at a fixed depth of reservoir, when the still water depth is increased, the wave height decreases. Another result is that when downstream water depth increases, although wave height decreases, masses resulting from breaking and non-breaking waves create more inundation depth at the obstacle's location. As the density increases (width and distance of the circular cylinders), the force-absorbing area increases too; as a result, the resistance due to drag form is increased, and more force is absorbed by the canopies (Fig.1).

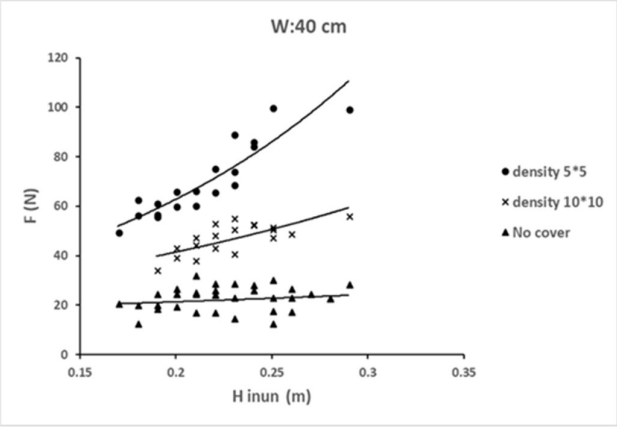
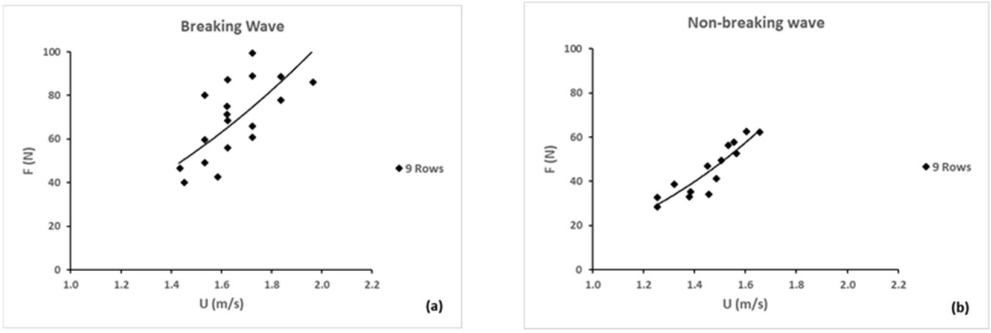


Fig 1- Variation of Force at different Inundation depths at different densities of canopy

The effect of propagation velocity on the force of waves

The results show that as the propagation speed increases, the amount of wave force increases at a higher rate, and this shows the importance of the propagation velocity on the wave force, or in other words, the wave strength (Fig 2). These results are in good agreement with the initial wave energy theory (Sorensen, 1997).



.

Fig 2- Variation of Force with Velocity at Constant Density of 5×5 in (a): breaking Waves; (b): non-breaking waves

Drag force coefficient

In this study, after plotting the drag coefficient values obtained from the force measured in the laboratory against the stem Reynolds number and fitting the data (Fig 3), the general trend of drag coefficient changes with the stem Reynolds number was obtained.

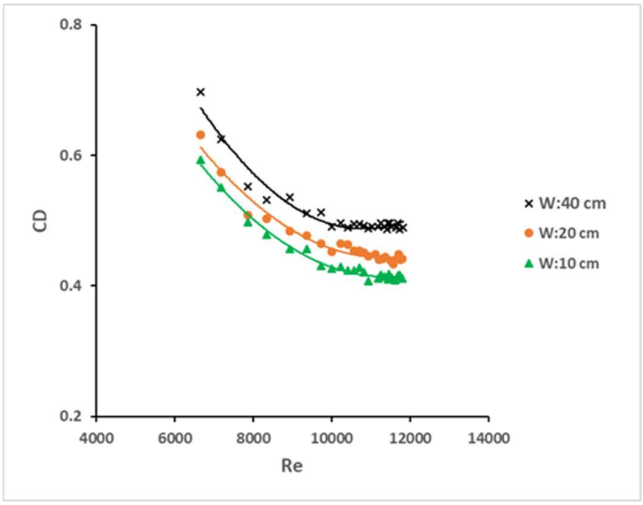


Fig 3- Drag Coefficient Values for Reynolds Stems at Different Widths of Canopy

Conclusions

- As the density and width of circular cylinders increase, the amount of force absorbed increases.
- As the propagation velocity increases, the amount of wave force increases at a very high rate.
- Finally, based on laboratory data, the general trend of drag coefficient changes with the stem Reynolds number was obtained. The range of Reynolds numbers varies from 6000 to 12000.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding

The financial support of this research has been provided by Grant number SCU-2018.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution

First Author: Parisa Azinfar, Conducting experiments, preliminary data analysis, drafting the initial version of the manuscript.

Second Author: Manoochehr Fathi-Moghadam, Topic selection, research design, planning and supervision of experiments, final review of results, approval of the final version of the manuscript.

Third Author: Javad Ahadiyan, Research design, planning, and supervision of experiments, final review of results, final revision of the manuscript.

Acknowledgement

The development, planning, and preparation of the experimental equipment and materials required for conducting the research were funded by the research grants of the second and third

authors. Therefore, we extend our gratitude to the Vice Chancellor for Research of Shahid Chamran University of Ahvaz for allocating a grant to this research subject.

References

1- Ahadiyan, J., Abbasi Chenari, S., Azizi Nadian, H., Katopodis, C., Valipour, M., Sajjadi, S. M., & Omidvarinia, M. 2024. Sustainable systems engineering by CFD modeling of lateral intake flow with flexible gate operations to improve efficient water supply. *International Journal of Sediment Research*, 39(4), 629-642. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.05.003.

2- Ahadiyan, J., Bahmanpouri, F., Adeli, A., Gaultieri, C., Khoshkonesh, A. 2022. Riprap Effect on Hydraulic Fracturing Process of Cohesive and Non-cohesive Protective Levees. *Water Resource Managemen*t 36, 625–639 (2022). https://doi.org/10.1007/s11269-021-03044-6.

3- Augustin, L.N., Irish, J.L., Lynett, P. 2009. Laboratory and numerical studies of wave damping by emergent and near-emergent wetland vegetation. *Journal of Coastal Engineering*, 56(3), pp.332-340. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.09.004.

4- Azinfar, P., Fathi-Moghadam, M., Ahadiyan, J. 2020. 'Laboratory Study of Broken Wave Force Damping by Submerged and Emergent Long Tree Canopies', *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 21(80), pp. 99-114. doi: 10.22092/idser.2020.342708.1430.

5- Fathi-Moghadam, M., Davoudi, L., & Motamedi-Nezhad, A. 2018. Modeling of solitary-breaking-wave force absorption by coastal trees. *Ocean Engineering*, *169*, 87-98. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.09.021.

6- Hirashi, T, Harada, K., 2003. Green belt tsunami prevention in the South Pacific region. *Port and Airport Research Institute*, 42(2), pp.23. https://www.researchgate.net/publication/238077579_Greenbelt_Tsunami_Prevention_in_South-Pacific_Region.

7- Lashkar-Ara, B., 2010, Determination of shear stress in rectangular channel using momentum and energy approaches, *PhD. Thesis*, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran, p. 52- 62.

8- Maleki, P., Ahadiyan, J., Aleixo, R., Azizi Nadian, H., Tamoradi, Z., Kashefipour, S. M., Schleiss, A. J., & Fathi Moghadam, M. 2025. Scour Control in a 90° Bend by Means of an Air Bubble Screen. *Water*, *17*(18), 2693. https://doi.org/10.3390/w17182693.

9- Mclvor, Al, Moller, L., Spencer, T., Spalding, M., 2012. Reduction of wind and Swell Waves by Mangroves. Natural Coastal Protection Series: Report. Cambridge Coastal Research Unit Working Paper 40. Published by the *Nature Conservancy and Wetlands International*. file:///C:/Users/Asus/Downloads/reduction-of-wind-and-swell-waves-by-mangroves%20(1).pdf.

10- Sajjadi, S. M., Barihi, S., Ahadiyan, J., Azizi Nadian, H., Valipour, M., Bahmanpouri, F., & Khedri, P. 2024. Redesigning the Fuse Plug, Emergency Spillway, and Flood Warning System: An Application of Flood Management. *Water*, *16*(24), 3694. https://doi.org/10.3390/w16243694.

11- Sadeghi-Hardangi, E., Ahadiyan, J. (2018). 'Hydraulically Failure Mechanism of non-Cohesive Homogenous Protective Embankments by Overtopping', *Irrigation Sciences and Engineering*, 41(1), pp. 115-131. doi: 10.22055/jise.2018.13575.

12- Salahi, K., Ahadiyan, J., Yu-hong Zeng, Azizi, H. N., Sajjadi, S. M. 2024. Laboratory Investigation of the Effect of Particle and Vegetation Roughness on Changes in Drag Force in an Open Channel, *Journal of Environmental Accounting and Management*, Vol. 12, No.3, pp.221-230. DOI:10.5890/JEAM 2024.0 https://www.lhscientificpublishing.com/Journals/articles/DOI-10.5890-JEAM.2024.09.001.aspx.

13- Salmanzadeh, S., Fathi-Moghadam, M., Ahadiyan, J., Sajjadi, M. 2024a. Laboratory study of the effect of vegetation arrangement and density on flow resistance coefficient, Journal of Water Science & Engineering. 2022;11(4):16-7. https://sanad.iau.ir/Journal/wsej/Article/921928

14-Salmanzadeh, S., Fathi-Moghadam, M., Ahadiyan, J., Sajjadi, M. 2024a. An Index to Determine Reaction of Vegetation Canopies to River Flow, *Journal of Hydraulic and Water Engineering*, 1(2), pp. 41-50. doi: 10.22044/jhwe.2023.13441.1027.

15-Salmanzadeh, S., Fathi-Moghadam, M., Ahadiyan, J., Sajjadi, S. M. 2024b. Investigation of the Effective Parameters on the Drag Coefficient in Rigid and Flexible Vegetation, *Irrigation Sciences and Engineering*, 47(1), pp. 15-31. doi: 10.22055/jise.2022.41559.2035.

16-Sorensen, R.M. 1997. Basic Coastal Engineering. *Springer Science*. New York. https://link.springer.com/book/10.1007/b101261.

17-Tamoradi, Z.; Ahadiyan, J. 2021. Effect of water and air injection on the reduction of bend scour. *Canadian Journal of Civil Engineering,* 2021, 48, 740–748. https://doi.org/10.1139/cjce-2019-0429.

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۹، شماره‌ی ۱، بهار ۱۴۰۵، مقاله پژوهشی، ص. ۲۱-۱

بررسی تأثیر پوشش‌های بلند درختی روی تغییرات نیروی امواج ساحلی منفرد شکنا و ناشکنا

پریسا آذین فر[۱]، منوچهر فتحی مقدم[۲*] و جواد احدیان[۳]

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲*- نویسنده مسئول، استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز fathi49@gmail.com

۳- استاد گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز و عضو هسته قطب علمی بهسازی و بهره برداری از شبکه های آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۶ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۳۰ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۴ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵

چکیده

پوشش‌های ساحلی به‌عنوان کمربند سبز بسته به توانایی خود می‌توانند نقش مهمی در کاهش خطرات موجود در ساحل و یا بازسازی ساحل از طریق کاهش امواج، تجمع و انباشت رسوبات و بازسازی خاک ایفا کنند. بنابراین نقش پوشش‌های ساحلی در تغییر ویژگی‌های سواحل و کاهش شدت آسیب‌های وارده به آن از طریق میرایی امواج بسیار حائز اهمیت است. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر تراکم، عرض پوشش‌های بلند درختی و سرعت انتشار موج و تعیین درجهٔ اهمیت موارد مذکور بر میزان تغییرات نیروی مخرب امواج شکنا و ناشکنا می‌باشد. برای مدل کردن تنه درختان از ساقه‌های چوبی بدون انعطاف به قطر یک سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر استفاده شد. این ساقه‌های استوانه‌ای در قسمت ساحل فلوم نصب گردیدند و نیروی وارد شده به موانع ناشی از امواج با استفاده از روش اندازه‌گیری مستقیم و به کمک نیروسنج الکترونیکی (لودسل) نصب شده در زیر قسمت متحرک فلوم، ثبت می‌گردید. آزمایش‌ها با آرایش ثابت موازی و فواصل متغیر ۵×۵ و ۱۰×۱۰ و در عرض‌های متفاوت ۱۰، ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متر و شیب ثابت صفر انجام شد. با توجه به ۴۰ ارتفاع متفاوت موج و آزمایش‌های بدون حضور پوشش (شاهد) در مجموع ۲۸۰ حالت متفاوت بررسی شده است. با توجه به داده‌های آزمایشگاهی، در یک عرض پوشش ثابت بیشترین افزایش جذب نیرو در تراکم ۵×۵ ، ۱/۸۱ برابر نسبت به تراکم ۱۰×۱۰ بوده است. در انتها بر اساس داده‌های آزمایشگاهی یک رابطهٔ تجربی بین ضریب درگ و عدد رینولدز پیشنهاد گردید.

کلید واژه‌ها: امواج شکنا و ناشکنا، پوشش‌های ساحلی، میرایی امواج، نیروی مخرب امواج .

مقدمه

سیلابهایی که به صورت ناگهانی در حوضه‌های آبریز به وقوع می‌پیوندد می‌توانند امواج ناگهانی ایجاد نمایند. بررسی لازم در خصوص استهلاک انرژی و ایجاد سازه‌های متناسب با این شرایط از اهمیت بسزایی برخوردار است (Sajjadi et al., 2024، Ahadiyan et al., 2024). هنگامی‌که امواج از میان پوشش‌های ساحلی عبور می‌کنند انرژی و ارتفاع آن‌ها کاهش می‌یابد بنابراین توانایی امواج در فرسایش رسوب سواحل و میزان آسیب به سازه‌های ساحلی هم‌چون دایک‌ها و دیوارهای ساحلی کاهش می‌یابد. برای مثال کاهش ارتفاع موج ناشی از مد در برخورد با درختان بین ۱۳ تا ۶۶ درصد در طول ۱۰۰ متر از پوشش‌های درختی می‌باشد. هنگامی‌که این اتفاق رخ دهد، موج توانایی خود در آبشستگی بستر دریا را از دست داده و نمی‌تواند رسوبات را در فاصله‌ای دورتر حمل کند (Mclvor et all.,2012). چنین امواجی میتوانند به راحتی دایک‌های ساحلی را به فرآیندی مشخص تخریب نمایند. تخریب این خاکریزها که برای محافظت از مناطق شهری و روستایی احداث می‌شوند باعث مخاطرات اقتصادی و گاه جانی می‌گردد (Ahadiyan et al., 2022 Sadeghi-Hardangi and Ahadiyan, 2018). یکی از راهکارهایی که به غیر از ایجاد زبری با استفاده از پوشش گیاهی برای کنترل چنین تحریب‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، کاربرد جت‌های مستغرق همفاز و غیر همفاز برای ایجاد جریان ثانویه و یا جذب مومنتم جریان مقابل می‌باشد (Ahadiyan and Musavi-Jahromi, 2009، Maleki et al., 2025، Tamoradi and Ahadiyan, 2021). برای کنترل کشور ما ایران مرز دریایی بسیار طولانی دارد و اکثر مناطق ساحلی جز مراکز بازرگانی و تجاری می‌باشند، لذا حفاظت از این مناطق در مقابل امواج دریا بسیار حائز اهمیت است. نواحی ساحلی ایران در امتداد دریای عمان طی دو دهه اخیر توسعه و گسترش زیادی یافته است، بنابراین رشد جمعیت در این منطقه خطر تلفات جانی ناشی از هرگونه رویداد سونامی را افزایش می‌دهد (Mokhtari and Hajizadeh Zaker, 2005). به‌منظور حفاظت از سواحل در مقابل امواج، به‌کارگیری روش‌های سازه‌ای مانند انواع موج شکن در طولانی مدت باعث بروز مسائل محیط زیستی ساحلی هم‌چون تغییر توپوگرافی ساحل و انتقال فرآیند

DOI: 10.22055/jise.2021.32311.1904

بلوک‌های بزرگ شامل Tetrapods های به‌کار رفته در موج‌شکن‌ها توسط امواج سونامی می‌گردد و اثرات زیان‌باری را بر جای می‌گذارد (Thuy et al., 2009). بنابراین توانایی جنگل‌های ساحلی برای کاهش اثرات زیان‌بار امواج سونامی و طوفان‌های شدید توسط مهندسین و محققین به‌عنوان یکی از گزینه‌های کاهش میزان ریسک به‌طور منطقی مورد بررسی قرار گرفته است. پوشش‌های گیاهی جنگلی ساحلی هم‌چون حرا یا کاج‌های ساحلی تا حدی در برابر باد یا طوفان‌های شدید مقاومت می‌کنند. اگر چه توانایی و مقاومت جنگل‌های ساحلی در برابر سونامی‌های بسیار بزرگ همچنان مورد بحث است زیرا تاکنون هیچ‌گونه نتیجه قطعی در خصوص نقش جنگل‌های ساحلی به‌عنوان مانع طبیعی در برابر امواج سونامی وجود ندارد. هر چند گزارش‌ها و تحقیقات متعدد (مشاهدات میدانی، میزان ویرانی تجربه شده و عکس‌های ماهواره‌ای) به‌طور واضح نشان داده‌اند که جنگل‌های ساحلی ممکن است بتوانند در برابر امواج سونامی نقش حفاظت کنندهٔ طبیعی داشته باشند (Husrin et al., 2012). نقش حفاظتی پوشش‌های درختی بعد از سونامی ۲۰۰۴ اقیانوس هند مورد توجه بیشتری قرار گرفت. در آن زمان پنج روستا که دو روستا در ساحل و سه روستای دیگر پشت پوشش‌های درختی در جنوب شرقی هند بودند مورد مطالعه قرار گرفتند. دیده شد روستاهایی که در ساحل بودند کاملا تخریب شدند در حالی که سه روستای دیگر، با فاصله‌ای یکسان از ساحل نسبت به دو روستای قبلی، که با پوشش درختی محافظت شده بودند هیچ‌گونه تخریبی در آن‌ها مشاهده نشد. اتحادیه جهانی برای حفاظت از طبیعت و منابع طبیعی (IUCN) با مقایسهٔ سطح ویرانی در سریلانکا نیز گزارش داد در مناطقی با پوشش متراکم تنها دو نفر جان خود را از دست دادند در حالی که حدود ۶۰۰۰ نفر در مناطق ساحلی بدون پوشش جان باختند (Hashim and Catherine, 2013). در حال حاضر جنگل‌های ساحلی به‌عنوان شیوه‌ای مؤثر در کاهش خسارات ناشی از سونامی که علاوه بر بهبود شرایط محیط زیستی و حفظ جنبه زیبایی شناختی ساحل، صرفه اقتصادی نیز دارد، مورد توجه می‌باشند. گرایش‌های اخیر در مهندسی سواحل روی شکل‌های غیر تداخلی محافظت روی ساحل مانند پوشش‌های گیاهی که علاوه بر محافظت ساحل می‌تواند زیستگاه طبیعی برای بسیاری از گونه‌های جانوری ایجاد کند، متمرکز شده است (Augustin et al., 2009). پوشش‌های گیاهی سیل و آسیب‌های ناشی از ویرانی امواج را کاهش داده و هم‌چنین به‌صورت مستقیم پایداری خط ساحلی را از طریق ریشه افزایش داده و ذخیره ماسه در فرم دون را بالا می‌برد (Dean, 1978). کاهش اثر امواج توسط پوشش‌های غیرمستغرق و مستغرق تابعی از ویژگی‌های گیاه (تراکم، فاصله هم‌پوشانی، عرض پوشش، سختی و شناوری) و شرایط هیدردینامیکی همچون عمق جریان (h)، دوره تناوب (T) و ارتفاع موج (H) می باشد (Augustin et al., 2009). Ghanbari Adivi و Fathi-Moghadam (2015) در پژوهشی آزمایشگاهی با پوشش‌های صلب میزان استهلاک انرژی امواج توسط کمربند ساحلی را مورد تحقیق قرار دادند. بر اساس نتایج این تحقیق در عرض و تراکم بیشترین پوشش بیشترین کاهش نیرو و ارتفاع موج مشاهده گردید به‌طوری‌که نیروی مستهلک شده از امواج در تراکم بیشتر ۱/۳ برابر نیرو در تراکم کمتر بود. هر چند که در تحقیقات متعدد نشان داده شده که تراکم عاملی مؤثر در کاهش انرژی موج می‌باشد در مدلی آزمایشگاهی Ismail et al. (2012) نشان دادند که اثر تراکم در مقایسه با عرض پوشش قابل توجه نمی‌باشد. در مطالعه‌ای دیگر Fathi-Moghadam et al. (2018) با پوشش‌های انعطاف پذیر نشان دادند که میزان عمق آبگرفتگی توسط پوشش ساحلی در تراکم‌های ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد به‌ترتیب ۱۴، ۱۸ و ۲۹ درصد کاهش یافت. تخریب و ویرانی‌های ناشی از امواج سونامی به‌طور عمده‌ای به نیروی هیدرولیکی و سرعت آن‌ها بستگی دارد. اگر چه تخمین نیروی هیدرولیکی و سرعت امواج سونامی در مشاهده‌ها میدانی بسیار مشکل است به‌طوری‌که در تحقیقات میدانی بلافاصله بعد از وقوع یک سونامی، داده‌های بسیاری از عمق آبگرفتگی، سطح و ارتفاع موج می‌توان جمع‌آوری کرد اما داده‌های بسیار کمی از نیرو و سرعت امواج سونامی موجود هستند. بنابراین بدست آوردن دو پارامتر نیرو و سرعت امواج بسیار ضروری است (Imamura et al., 2007). البته باید توجه کرد بخش‌های قابل توجهی از جنگل‌های ساحلی در سراسر جهان پوشیده از درختان برگ‌ریز و گونه‌های درختچه‌ای بلند با تنه سفت و برگ‌های پهن انعطاف‌پذیر است. تخمین ضریب درگ و مقاومت در برابر جریان برای درختان برگ‌ریز در دشت‌های سیلابی جنگلی در شرایط غیر مستغرق بسیار احایز اهمیت است. این موضوع در تحقیق Fathi-Moghadam et al. (2024) انجام شده است و آنها مدل‌های صلب و انعطاف‌پذیر با اندازه و پیکربندی مشابه در یک فلوم آزمایشگاهی را آزمایش کردند تا اثرات انعطاف‌پذیری و تراکم پوشش گیاهی و سرعت و عمق جریان بر ضرایب زبری به وضوح مشخص نمایند. آنها معادلات ضریب زبری توسعه‌یافته برای تعیین تغییرات n مانینگ را بررسی نمودند. Azinfar et al. (2020) آزمایش‌های متنوعی در کانال موج برای ارزیابی تأثیر پوشش درختی در حالت استغراق و غیراستغراق بر میرایی امواج شکنا به اجرا درآوردند و ساقه های چوبی درختان با قطر ۱ سانتی‌متر به عنوان کمربند سبز را شبیه سازی نمودند. نتایج آزمایشگاهی آنها نشان داد در تولید امواج با ویژگی‌های یکسان، هنگامی که موانع از حالت غیراستغراق به حالت استغراق تغییر یابند، نیروی جذب شده موج بسیار کاهش می‌یابد. Salahi et al. (2024) در تحقیقی اثر زبری بستر و پوشش گیاهی را به طور همزمان بر جذب مومنتم و ضریب درگ به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های آنها نشان داد که افزایش دبی مستقیماً بر میزان نیروی درگ تأثیر می‌گذارد. به طور متوسط، با افزایش دوبرابری عمق جریان، جذب مومنتوم برای زبری ذرات می‌تواند به ۶۰٪ برسد. در حالی جذب مومنتوم در همین شرایط برای پوشش گیاهی، کمتر از ۳۰ درصد است. نتایج آنهاروش

موثری را برای شناخت عملکرد چیدمان‌های مختلف در محدوده تحقیق ارائه می‌دهد.

Salmanzade et al. (2022) نیز در فعالیت تحقیقاتی به صورت آزمایشگاهی اثر نوع درخت به عنوان پوشش برای جذب مومنتم را بررسی نمودند. آنها شرایط هیدرولیکی جریان رودخانه و شرایط مورفولوژیکی پوشش گیاهی در امتداد رودخانه و دشت سیلابی را مدل نمودند. آزمایش‌های آن‌ها در "فلوم لبه چاقویی" با طول ۸/۳ متر، عرض ۰/۸ متر و ارتفاع ۰/۵۵ متر انجام شد. آن‌ها فهمیدند، تراکم پوشش گیاهی با افزایش فاصله و سطح برگ مدل‌ها تغییر کرد. نتایج تراکم می‌تواند به عنوان معیار مفیدی در تخمین مقاومت ناشی از وجود زبری گیاه در رودخانه مورد استفاده قرار گیرد. در همین راستا Salmanzade et al. (2024a) در تحقیقی دیگر خواص فیزیکی گونه‌های درختی، واکنش آن‌ها را به بارهای خارجی ناشی از جریان آب را تعیین نمودند. آنها شاخصی برای توصیف خواص فیزیکی گونه‌های درختی پیشنهاد کردند. این شاخص بر اساس فرکانس رزونانس اولین مد ارتعاش درختان و یک رابطه اساسی برای تیرهای همگن استخراج شد. همچنین Salmanzade et al. (2024b) در تحقیقی به‌منظور بررسی اثر پوشش گیاهی در آبراهه‌ها، پوشش گیاهی صلب و انعطاف‌پذیر با نمونه‌های مصنوعی را مدل‌سازی نمودند. نتایج آنها نشان داد در هر دو مدل صلب و انعطاف پذیر، با افزایش شاخص تراکم پوشش گیاهی و عمق نسبی، میزان جذب نیروی درگ افزایش می‌یابد.

همان‌طور که پیشتر گفته شد زلزله زیردریایی عامل ایجاد سونامی به شمار می رود. در مرحله اول یک اغتشاش اولیه موضعی در نزدیکی محل وقوع زلزله رخ می دهد، سپس موج حاصل منتشر می‌شود و با نزدیک شدن به ساحل شکست، بالاروی و در نهایت آبگرفتگی اراضی ساحلی صورت می‌گیرد. با عبور موج از نواحی آب کم عمق که بر اساس تعریف نسبت عمق آب به طول موج کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد، تحت تأثیر خصوصیات بستر قرار گرفته و در نتیجه فرآیندهای ساحلی هم‌چون خزش، شکست و بالاروی موج به وقوع می پیوندد. به‌طور کلی یک موج بسته به میزان ارتفاع نسبی، عمق آب ساکن اولیه و شیب ساحل ممکن است پیش از رسیدن به خط ساحلی بشکند (موج شکنا)، و یا نسبت به موقعیت در نظر گرفته شده در قسمت ساحلی نشکند و موج ناشکنا قلمداد شود. از این می‌توان گفت حرکت اجزاء آب در یک موج، جریان ناپایدار پیوسته می‌باشد. وقتی این جریان ناپایدار با بدنه صلب یک سازه مستغرق برخورد می‌کند یک نیرو روی بدنه، به‌علت سرعت جریان و شتاب جریان اعمال می شود که معمولاً توسط فرمول زیر محاسبه می شود (Sorensen, 1997):

$$F_{hd} = \frac{1}{2}\rho C_D A u^2 + C_m \rho V \frac{du}{dt} \qquad (۱)$$

برای یک سطح گوشه دار و غیر مسطح (نظیر مقاطع مستطیلی و دایره ای)، A مساحت مقطع عمود بر سطح جریان می باشد. u سرعت موج تابیده شده به مانع، ρ چگالی مایع C_m ضریب اینرسی، ∀ حجم مانع روبروی جریان، $\frac{du}{dt}$ تغییرات سرعت با زمان و C_D ضریب درگ می باشد که به عنوان ضریب مقاومت سازه در مقابل جریان در نظر گرفته می شود. رابطهٔ (۱) که برای برآورد نیروهای ناشی از موج روی سازه مستغرق بکار می‌رود، معادله موریسون نامیده می‌شود. با بررسی عددی و شبیه سازی ریاضی پوشش گیاهی در ساحل مشخص شد که با استفاده از رابطه موریسون می‌توان نیروی موج وارد بر ساحل و سازه های ساحلی را برآورد نمود (Namdar and Nusrath, 2010). در این تحقیق اثر تراکم و عرض پوشش و هم‌چنین ارتفاع‌های متفاوت عمق جریان و موج در میزان کاهش نیروی امواج شکنا و ناشکنا مورد بررسی قرار گرفته است. هم‌چنین اهمیت سرعت انتشار موج از طریق نحوه‌ی اثر گذاری آن بر تغییرات نیروی موج بررسی خواهد شد. سپس با استفاده از نتایج داده‌ها درجهٔ اهمیت هر کدام از پارامترها بر تغییرات نیروی موج مشخص خواهد. مشاهده‌های مستقیم و اندازه‌گیری‌های میدانی نشان داده که برهم‌کنش تنهٔ درختان با امواج در پوشش‌های جنگلی متراکم نقش مهمی در نرخ کاهش امواج دارد (Mazda et al., 1997). بنابراین در این تحقیق مقاومت هیدرولیکی بخش صلب درختان که تنه درخت را شامل می‌شود مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش ها در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز و در فلوم مستطیل شکلی صورت گرفت. این فلوم با شیب ثابت که طول آن ۸/۳ متر، ارتفاع دیواره ۰/۵۵ متر و عرض کف آن ۰/۸ متر و دیواره ها و کف آن از جنس پلکسی گلاس می باشد به‌گونه‌ای طراحی گردیده که نیروی وارده از طرف موج شکنا بر موانع استوانه‌ای قرار گرفته در بخش ساحل آن از طریق نیرو سنجی که در زیر بخش میانی و متحرک آن متصل است اندازه‌گیری می‌شود. این فلوم را نخستین بار Lashkar-Ara (2010) به‌منظور تعیین تنش برشی در کانال مسنطیلی با استفاده از روش مومنتم ساخت و آن را فلوم لبه چاقویی (Knife Edge) نامید. در این فلوم طولی معادل یک متر که ۴/۱ متر از ابتدا و ۳/۲ متر از انتهای فلوم فاصله دارد از بقیه آن جدا شده در آستانه حرکت قرار داده شده است به‌طوریکه با کوچکترین نیرویی در آستانه سقوط قرار خواهد گرفت. در چنین حالتی یک نیروسنج دینامکی سبب ایجاد تعادل بخش جدا شده فلوم می گردد و امکان ثبت نیروی کششی وارده از طرف سیال به آن قابل ثبت می باشد (Lashkar-Ara and Fathi-Moghadam, 2014). نیروسنج مذکور بخش انتهایی فلوم لبه چاقویی یا بخش متحرک را به قسمت پایین دست فلوم وصل می‌کند و عکس‌العمل نیروی جریان بر ساحل در حالات با و بدون موانع استوانه‌ای را روی نشانگر الکتریکی دستگاه نشان می‌دهد.

DOI: 10.22055/jise.2021.32311.1904

شکل (۱) نمایی از فلوم لبه چاقویی را به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد که موانع استوانه‌ای چوبی در قسمت میانی فلوم قرار گرفته‌اند. به‌منظور تهیه جنگل ساحلی، از استوانه‌های چوبی انعطاف ناپذیر به قطر یک سانتی متر و ارتفاع ۳۰ سانتی متر استفاده گردید که در بخش متحرک فلوم به عنوان بخش ساحلی مستقر گردیدند. موانع مذکور در یک آرایش ثابت موازی ۵×۵ و ۱۰×۱۰ سانتی متر از هم قرار گرفتند.

شیوه انجام آزمایش

در ابتدای آزمایش‌ها موانع استوانه‌ای چوبی به قطر یک سانتی‌متر با فاصله مشخص و آرایش موازی در قسمت متحرک فلوم که شیب کف آن ثابت و صفر می‌باشد به طور ثابت قرار می‌گرفتند، سپس با ایجاد امواج منفرد شکنا و ناشکنا با ارتفاع‌های متفاوت میزان نیروی جذب شده توسط موانع از طریق نمایشگر الکتریکی متصل به حسگر بار دینامیکی قرائت می‌گردید. تولید موج منفرد بر اساس اختلاف ارتفاع سطح آب طرفین یک دریچه کشویی از جنس پلاکسی گلاس که در فاصله ۱/۴ متری از ابتدای فلوم ساخته شده بود و قابلیت حرکت آزادانه را دارد ایجاد می‌شد. رقوم سطح آب طرفین دریچه به گونه‌ای تنظیم می‌شد که موج حاصل یا پیش از رسیدن به بازه لبه چاقویی بشکند یا به‌صورت ناشکنا از موانع عبور کند بدین معنی که عمق آب مخزن (p) و عمق ساحل (h) بگونه‌ای تنظیم می‌گردید که هنگام باز شدن دریچه کشویی موج تشکیل شده به شکل شکنا یا ناشکنا به پوشش‌های درختی برسد. بدین ترتیب ارتفاع سطح آب ۲۸، ۳۱، ۳۴، ۳۷ و ۴۰ سانتی‌متر به‌عنوان سطح آب مخزن و عمق ساکن ساحل ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸، ۲۰ و ۲۱ سانتی‌متر مورد استفاده قرار گرفت.

دریچه به وسیله سیستم نخ و قرقره به یک وزنه متصل می‌شد و با سقوط وزنه از یک ارتفاع معلوم دریچه به سرعت باز و موج منفرد ناگهانی تشکیل می‌شد. موج تشکیل شدهٔ عبوری روی آب ساکن جلوی دریچه (عمق ساکن ساحل) حرکت نموده و در ادامه یک قله موج منفرد را به وجود می‌آورد. برای انجام هر آزمایش، ابتدا موانع استوانه‌ای با عرض پوشش و فواصل مشخص در قسمت میانی فلوم با چسب قرار گرفته شدند تا امکان ایجاد هرگونه حرکت به وجود نیاید. سپس دریچه کشویی مولد موج و شیر ورودی جریان به داخل فلوم باز شده و دریچه کشویی چوبی پایین دست بسته می‌شد تا عمق آب ساکن ساحل به اندازه مورد نظر برسد. در مرحله بعد دریچه کشویی بالادست به صورت آب بند کاملا بسته می‌شد تا ارتفاع آب در مخزن پشت دریچه نیز تا اندازه مورد نظر می‌رسید. در نهایت بعد از ساکن شدن سطح آب در دو طرف دریچه، ضامن دستی آزاد شده و با سقوط ناگهانی وزنه، دریچه به‌صورت سریع باز شده و موج منفرد تشکیل شده به سمت پوشش گیاهی حرکت می‌کرد. به دلیل حرکت سریع موج، به‌منظور برداشت داده‌های آزمایش از روش فیلم‌برداری استفاده شده است . بدین منظور از دو دوربین دیجیتال نصب شده روی سه پایه با هم‌پوشانی مناسب برای فیلم‌برداری استفاده شد. دوربین‌ها مقابل دیوارهٔ فلوم و در یک راستا قرار داشتند. بازهٔ برداشت شده در دوربین اول از محل دریچه تا شروع بخش لبه چاقویی و بازهٔ برداشت دوربین دوم از قبل از شروع بخش لبه چاقویی تا فاصله‌ای بعد از آن را برداشت می‌کرد. مترهای کاغذی مدرج در طول فلوم برای درک بهتر از تصاویر دوربین ها روی دیواره فلوم نصب شده بودند. در حین انجام هر آزمایش، نمایشگر الکتریکی متصل به حسگر بار دینامیک میزان نیروی وارده به سیستم متحرک لبه چاقویی را در واحد کیلوگرم-نیرو نمایش می داد. درشکل (۲) لودسل و آرایش استوانه های چوبی با تراکم متفاوت نشان داده شده است.

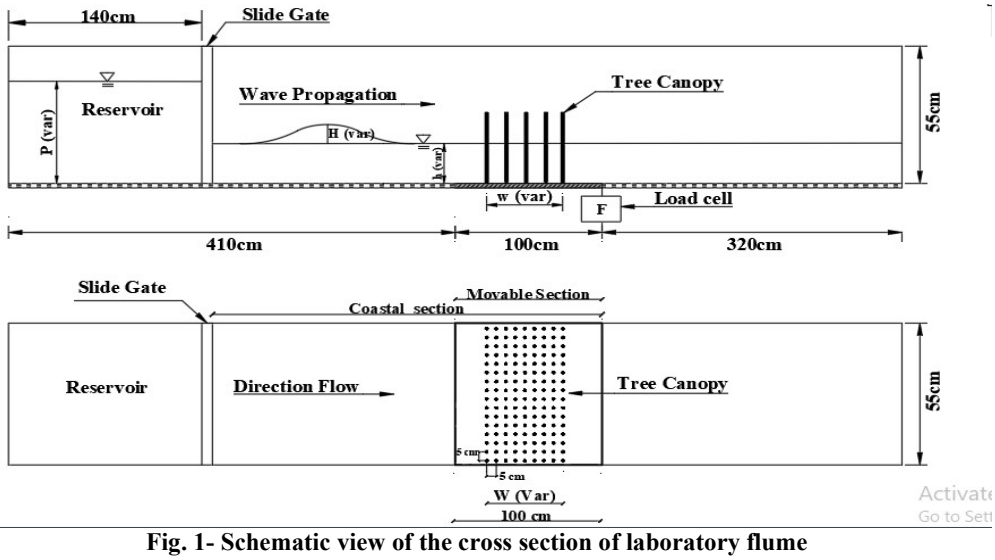


Fig. 1- Schematic view of the cross section of laboratory flume

شکل ۱- نمایی شماتیک از مقطع و پلان فلوم مستطیلی آزمایشگاهی



Fig. 2- Photograph of the Arrangement of circular cylinder with different density in the knife Edge section and electronic dynamometer (load cell)

شکل ۲- نمایی از چیدمان موانع با تراکم متفاوت در بخش لبه چاقویی فلوم به همراه نمایشگر حسگر بار دینامیک

جدول ۱- دامنه تغییرات پارامترهای اندازه گیری شده آزمایش

Table 1- Range of data collected in the present study

Parameters	Dimension	Range
The width of tree cover, W	Cm	10,20,40
Still Water depth, h	Cm	8,10,12,14,16,18,20,21
The height of the water tank, P	Cm	28,31,34,37,40
Circular cylinder height, Ls	Cm	30
Wave height, H	Cm	6-15
Force absorption by tree cover, F	N	Variable
Average wave velocity, u	m/s	1.25-1.96
Circular cylinder intervals, L	Cm	5×5,10×10
Circular cylinder diameter, D	Cm	1
Constant slope, S	%	0
arrangement		Parallel

پارامترها و آنالیز بعدی

با کمک آنالیز ابعادی پارامترهای موثر در فیزیک مسئله تشخیص داده می شوند سپس با تغییر هر متغیر و در نتیجه پارامتر موثر می‌توان تاثیر آن پارامتر را بر نتایج تحلیل کرد. متغیرهای مؤثر بر فیزیک پدیده به‌صورت رابطه (۲) می باشد:

$$f(F.H.\rho.g.U.\mu.D.S.h.l_s.W.L) = 0 \qquad (۲)$$

که در آن F: نیروی موج، H: ارتفاع موج، ρ: جرم واحد حجم سیال، g: شتاب ثقل، U: سرعت متوسط افقی ذرات، μ: لزجت دینامیکی، D: قطر موانع، S: شیب ساحل به درصد، h: عمق ساکن ساحل، l_s: ارتفاع پوشش، W: عرض پوشش، L_g: طول پوشش در راستای عرض فلوم و L: فاصله موانع از هم می باشند. نتیجه تحلیل ابعادی از طریق π باکینگهام به صورت تابع زیر است:

$$\left(\frac{F}{\rho AU^2}.\frac{\rho UL}{\mu}.\frac{U}{\sqrt{gH}}.\frac{H}{h}.\frac{H}{D}.\frac{H}{L}.\frac{H}{l_s}.\frac{H}{W}.\frac{H}{L_g}.S\%\right) = 0 \qquad (۳)$$

با توجه به هدف آزمایش و ثابت بودن قطر و ارتفاع موانع، طول پوشش در راستای عرض و شیب کف ساحل صفر در تمام آزمایش‌ها رابطه بالا به شکل زیر در خواهد آمد:

$$\frac{F}{\rho AU^2} = f\left(\frac{U}{\sqrt{gH}}.\frac{\rho UL}{\mu}.\frac{H}{W}.\frac{H}{h}.\frac{H}{L}\right) \qquad (۴)$$

سمت چپ معادله (۴) ضریب درگ (Cd) و پارامترهای اول و دوم در سمت راست به‌ترتیب اعداد فرود و رینولدز هستند. از آنجائی‌که جریان غیرماندگار و همراه با انتقال مومنتم زیاد بوده و ضمناً ثقلی نیست عدد فرود از بررسی حذف می‌شود (Novak et al., 2010). در نتیجه حرکت موج در ساحل و پارامترهای مؤثر روی ضریب درگ پوشش به بطور کلی به‌صورت زیر خواهد شد:

$$C_d = f\left(R_e.\frac{H}{W}.\frac{H}{h}.\frac{H}{L}\right) \qquad (۵)$$

لازم به توضیح است که بدلیل چیدمانهای خاص پوشش 10×10 cm و 5×5 cm در این تحقیق، مقدار W وابسته به مقدار L بوده و در نتیجه فقط از نسبت $\frac{H}{W}$ در ادامه جهت در نظر گرفتن اثر تراکم پوشش استفاده و $\frac{H}{L}$ در ادامه حذف می‌شود. در جدول (۱) دامنه پارامترهای ذکر شده ارائه شده است:

 DOI: 10.22055/jise.2021.32311.1904

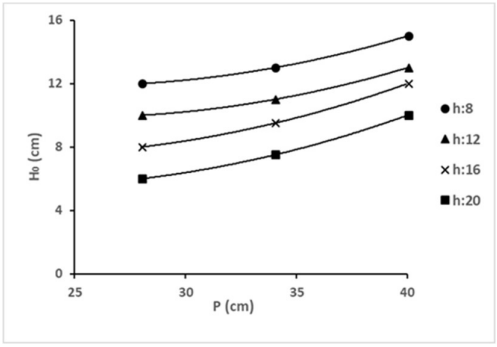


Fig 3- Variation of Wave height at differents Reservoir and Still Water depths
شکل ۳- تغییر ارتفاع موج با تغییرات ارتفاع آب مخزن و ارتفاع اولیه آب ساکن پایین‌دست

نتایج و بحث

همان‌طور که پیشتر گفته شد برای بررسی نیروی جذب شده موج توسط موانع از حسگر بار دینامیکی که در زیر بخش لبه چاقویی نصب شده بود استفاده گردید که این نیرو از طریق بخش لبه چاقویی به حسگر منتقل و عکس‌العمل این نیرو از طریق حسگر موجود از طریق نمایشگر الکترونیکی قابل رویت بود.

بررسی میزان نیروی بیشینه با ارتفاع موج ورودی

برای درک بهتر اثر نیرو با ارتفاع در ابتدا تغییر در ارتفاع موج ورودی و عمق آبگرفتگی موانع با ارتفاع های متفاوت سطح آب مخزن (P) و عمق ساکن اولیه (h) مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری ارتفاع موج ورودی در فاصله ۶۵ سانتی‌متری از دریچه صورت گرفته و آن هنگامی است که موج ورودی هنوز تحت تأثیر خزش قرار نگرفته است. شکل (۳) برای هر دو امواج شکنا و ناشکنا ارائه گردیده است. هنگامی‌که عمق ساکن پایین‌دست یا عمق ساحل (h) ثابت نگه داشته شود با افزایش ارتفاع آب مخزن (P)، ارتفاع موج (H) افزایش می‌یابد. هم‌چنین در شکل (۳) می‌توان دید در یک عمق ثابت مخزن هنگامی‌که عمق ساکن پایین دست افزایش یابد ارتفاع موج ورودی کاهش می‌یابد. در عمق ثابت مخزن (P) ۴۰ سانتی‌متر هنگامی‌که عمق ساحل (h) از هشت به ۲۰ سانتی‌متر افزایش یابد ارتفاع اولیهٔ موج از ۱۵ به ۱۰ سانتی‌متر کاهش می‌یابد وبه طور مشابه ارتفاع موج در عمق ثابت مخزن ۲۸ و عمق ساحل اشاره شده از ۱۲ به شش سانتی‌متر کاهش می‌یابد.

در این تحقیق مجموع عمق ساکن ساحل و ارتفاع موج رسیده به موانع استوانه‌ای به عنوان عمق آبگرفتگی (Hinun) در نظر گرفته شده است. اهمیت مقدار این پارامتر در میزان حجم تودهٔ برخورد کننده با موانع، تعیین میزان سطح جاذب مومنتم و میزان استغراق موانع استوانه‌ای می‌باشد. شکل (۴) تغییرات عمق آبگرفتگی موانع با عمق‌های متفاوت مخزن و عمق آب ساحل را به‌ترتیب برای امواج شکنا و ناشکنا نشان می‌دهد. همان‌گونه که در هر دو شکل نشان داده شده است در یک عمق ثابت مخزن هر چه عمق ساکن پایین‌دست بیشتر گردد در امواج شکنا میزان عمق آبگرفتگی نیز افزایش می‌یابد زیرا در چنین حالتی محل شکست موج به موانع استوانه‌ای نزدیک‌تر شده و فرصت کاهش ارتفاع موج بعد از شکست تا رسیدن به موانع استوانه‌ای کمتر است. در امواج ناشکنا نیز با افزایش عمق ساحل یا پایین دست میزان عمق آبگرفتگی موانع افزایش می‌یابد. بنابراین از اشکال (۳) و (۴) می‌توان نتیجه گرفت که هرچند با افزایش عمق ساکن پایین‌دست ارتفاع موج ورودی کاهش می‌یابد اما تودهٔ حاصل از شکست در امواج شکنا و ارتفاع موج رسیده در امواج ناشکنا عمق آبگرفتگی بیشتری را در محل پوشش ایجاد می‌کند که این نتایج با نتایج داده‌های Davoodi et al. (2017) در تطابق می‌باشد. در امواج شکنا و با عمق ثابت مخزن (P) ۴۰ سانتی‌متر هنگامی‌که عمق ساکن ساحل (h) از هشت به ۱۲ سانتی‌متر افزایش یابد عمق آبگرفتگی موانع (Hinun) از ۲۱ به ۲۵ سانتی‌متر افزایش می‌یابد که در عمق مخزن ۲۸ سانتی‌متری عمق آبگرفتگی برای اعداد مشابه عمق ساحل از ۱۷ به ۲۲ سانتی‌متر افزایش می‌یابد. در امواج ناشکنا افزایش عمق آبگرفتگی موانع به‌ترتیب و در دو عمق متفاوت مخزن ۴۰ و ۲۸ سانتی‌متر و افزایش عمق ساحل ۱۹ تا ۲۱ سانتی‌متر از ۳۲ به ۳۶ و ۲۵ به ۲۹ سانتی‌متر است.

تاثیر تراکم بر میزان نیروی جذب شده امواج منفرد

در شکل (۵) تأثیر تراکم موانع استوانه‌ای در عرض ثابت ۴۰ سانتی‌متر بر میزان نیروی قرائت شده توسط حسگر بار دینامیکی (لودسل) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است هنگامی‌که فاصله موانع استوانه‌ای در طول و عرض فلوم از ۱۰×۱۰ به ۵×۵ تغییر یابد، تراکم پوشش‌ها افزایش یافته و به تبع آن میزان نیروی بیشینه افزایش می‌یابد. بیشترین نیروی جذب شده در عمق آبگرفتگی ۲۹ سانتی‌متر در تراکم ۵×۵، ۱۰×۱۰ و حالت بدون پوشش به‌ترتیب ۹۹/۴۷، ۵۵ و ۳۱/۸۸ می‌باشد. همان‌گونه که نتایج نشان داده‌اند نیروی موج به شدت به تراکم وابسته است که این موضوع در مطالعه‌های پیشین نیز مورد تأئید قرار گرفته است (Massel et al., 1999; Mazda et al., 1997). پوشش‌های متراکم تر میزان نیروی بیشتری از امواج را جذب کرده که به تبع آن میرایی امواج از طریق کاهش ارتفاع امواج نیز بیشتر است.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در پوشش‌های متراکم‌تر برهم‌کنش موج با ساقه‌ی درختان بیشتر بوده که این مکانیزم تأثیر قابل توجهی در نرخ کاهش نیروی موج دارد.

تاثیر عرض پوشش بر میزان نیروی جذب شده امواج منفرد

در شکل (۶) تأثیر عرض پوشش (W) بر میزان جذب نیروی موج در دو تراکم متفاوت ۵×۵ و ۱۰×۱۰ نشان داده شده است. از نظر کمی برخی مقادیر مقایسه ای در جدول (۲) آمده است. از شکل مذکور می‌توان دریافت که با افزایش عرض موانع استوانه‌ای از ۱۰ به ۴۰ سانتی‌متر میزان جذب نیرو نیز افزایش می‌یابد. بطوری‌که در چیدمان ۵×۵ میزان نیروی بیشینه جذب شده در عرض ۴۰، ۲۰ و ۱۰ سانتی‌متر به‌ترتیب ۹۹/۴۷، ۷۰/۱۴ و ۶۵/۸۳ نیوتن و میزان این نیرو در حالت بدون پوشش ۳۱/۸۸ نیوتن می‌باشد. هنگامی‌که چیدمان موانع به ۱۰×۱۰ تغییر یابد میزان بیشینه نیروی جذب شده در همان ارتفاع موج و عرض ۴۰، ۲۰ و ۱۰ سانتی‌متر به‌ترتیب به ۵۵، ۵۱/۵۰ و ۴۸/۰۷ نیوتن تغییر می‌یابد. این پدیده را می‌توان بدین‌گونه توجیه کرد با افزایش عرض پوشش و کاهش فاصله درختان، سطح برخورد موانع با امواج افزایش یافته و در نتیجه مقاومت ناشی از نیروی درگ نیز افزایش یافته و نیروی بیشتری از موج جذب می گردد.

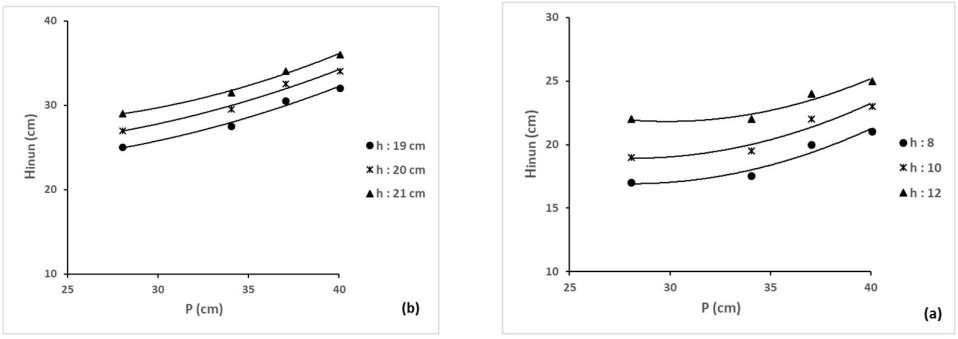


Fig. 4- Variation of Inundation height at different Reservoir Water depth and Still Water depth in (a): breaking waves (b): Non-breaking waves

شکل ٤- تغییر ارتفاع عمق آبگرفتگی با تغییرات ارتفاع آب مخزن و ارتفاع آب ساحل امواج شکنا و ناشکنا

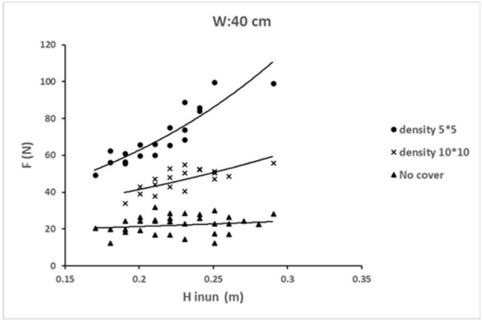


Fig. 5- Variation of Force at different Inundation depths at different density of canopy

شکل ٥- تغییرات بیشینه نیرو در برابر عمق آبگرفتگی موانع در تراکم های متفاوت پوشش

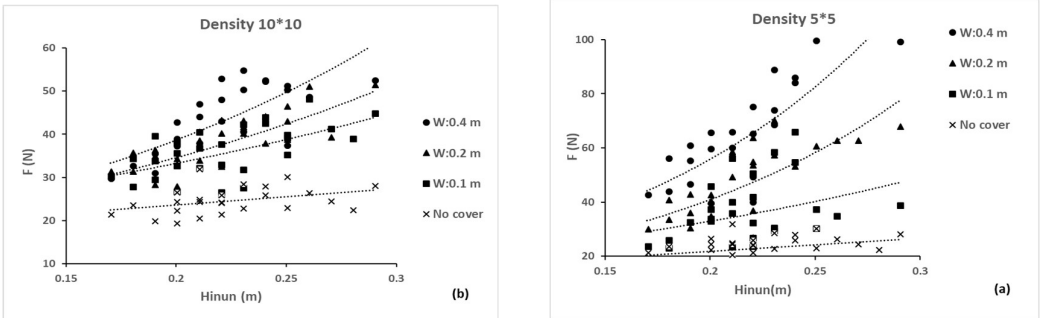


Fig. 6- Variation of Force at different Inundation depths with parallel arrangement and intervals of (a): 5×5; (b): 10×10 at different widths of 10, 20 and 40 cm

شکل ٦- تغییرات نیرو در برابر ارتفاع موج در چیدمان مستطیلی ٥×٥ و ١٠×١٠ با عرض‌های متفاوت ١٠، ٢٠ و ٤٠ سانتی متر

 DOI: 10.22055/jise.2021.32311.1904

جدول ۲- میزان افزایش نیروی جذب شده (نیوتن) در دو حالت ۵×۵ و ۱۰ ×۱۰

Table 2- Absorbed force by cover at the intervals of 5×5 and 10×10

Force (N)	W 10 cm	W 20 cm	W 40 cm	Ratio force W40 to W10
Force on the arrangement of 5×5	65.83	70.14	99.47	1.51
Force on the arrangement of 10×10	48.07	51.50	55	1.14
Ratio force 5×5 to 10×10	1.37	1.36	1.81	-

تغییرات سرعت انتشار موج

در این بخش ابتدا سرعت انتشار امواج ناشکنا در مقابل ارتفاع موج و عمق ساکن ساحل بررسی گردیده سپس با سرعت تئوری موج در آب کم عمق مقایسه می‌گردد. از آنجا که بزرگی نیرو عمدتاً ناشی از سرعت بالای امواج است بنابراین سرعت انتشار موج یکی از مشخصات مهم امواج منفرد می باشد. این سرعت در محاسبهٔ ضریب درگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. سرعت پیشروی، U، که در فواصل ۶۵ و ۱۶۵ سانتی‌متر از دریچه انداه‌گیری شده معادل خارج قسمت فاصله مکانی به فاصله زمانی عبور قله موج از این دو نقطه مشخص که به فاصله یک متر از یکدیگر قرار دارند بدست آمده است (Mohamed, 2008). در تحقیق حاضر نتایج حاصل از آزمایش‌ها در شکل (۷) نشان داده شده است. سرعت تئوری برای امواج آب کم عمق همان رابطه سرعت انتشار موج سطحی در آب ساکن و کانال‌ها است که طبق رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$C = \sqrt{g\ (h_0 + H_0)} \qquad (۶)$$

در رابطهٔ (۶)، g شتاب جاذبه، h_0 عمق ساکن ساحل یا پایین‌دست، H_0 ارتفاع اولیهٔ موج و C سرعت انتشار موج است. طبق رابطهٔ فوق سرعت امواج آب کم‌عمق با ریشه دوم مجموع عمق ساکن ساحل و ارتفاع موج متناسب است. همان‌طور که در شکل بالا نشان داده شده است با افزایش ارتفاع موج، سرعت آن نیز افزایش می‌یابد که این نتایج با تئوری انرژی اولیه موج به خوبی مطابقت دارد. طبق رابطه Sorensen $E = \frac{1}{8}\rho g H^2 L$ (1997) از آنجا که انرژی کل و در نتیجه انرژی جنبشی موج با ارتفاع موج متناسب است، بنابراین با افزایش ارتفاع موج انرژی جنبشی مقدار بزرگتری خواهد داشت و در نتیجه سرعت انتشار موج نیز بیشتر خواهد بود که نتایج حاصل در شکل (۷) مبین این موضوع می‌باشد. همچنین از شکل مذکور می‌توان دریافت، در یک عمق ثابت مخزن (P) هنگامی‌که عمق ساکن اولیه (h) از ۱۸ به ۲۱ سانتی‌متر افزایش یابد، سرعت انتشار موج کاهش می یابد.

در شکل (۸) نسبت بی‌بعد سرعت انتشار به سرعت تئوری موج در مقابل ارتفاع نسبی موج مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است مقادیر سرعت‌های اندازه‌گیری شده و آزمایشگاهی به سرعت‌های تئوری نزدیک به هم می‌باشند. البته نباید خطای ناشی از قرائت زمان در فیلم‌های ثبت شده را نیز فراموش کرد. در این شکل نشان داده شده است با افزایش ارتفاع نسبی موج نسبت سرعت‌ها به یک نزدیک می‌شود اما با کاهش ارتفاع نسبی سرعت تئوری امواج بر سرعت‌های آزمایشگاهی پیشی می‌گیرد. بنابراین به وضوح می‌توان تأثیر ارتفاع موج بر سرعت انتشار آن را دریافت.

تأثیر سرعت انتشار بر نیروی امواج

در شکل (۹) تغییرات نیروی جذب شده امواج در مقابل تغییرات سرعت انتشار امواج شکنا و ناشکنا در تراکم ثابت ۵×۵ و عرض پوشش نه ردیف نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند با افزایش سرعت انتشار میزان نیروی امواج با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد و این موضوع اهمیت سرعت انتشار بر نیروی موج و یا به عبارتی دیگر قدرت موج را نشان می‌دهد. در تراکم ثابت ۵×۵ و عرض ۴۰ سانتی‌متر تغییرات سرعت در امواج شکنا در محدوده‌ی ۴۳/۹۶-۱/۱ و در امواج ناشکنا ۱/۶۵- ۱/۲۵ متر بر ثانیه می‌باشد. در موج شکنا و در تراکم و عرض یاد شده به ازای حداقل و حداکثر میزان نیرو، سرعت انتشار موج به ترتیب برابر با ۱/۴۵ و ۱/۷۲ متر بر ثانیه می‌باشد. در شرایط مشابه و در امواج ناشکنا میزان سرعت برای حداقل و حداکثر نیرو به ۱/۲۵ و ۱/۶۰ متر بر ثانیه تغییر می‌یابد.

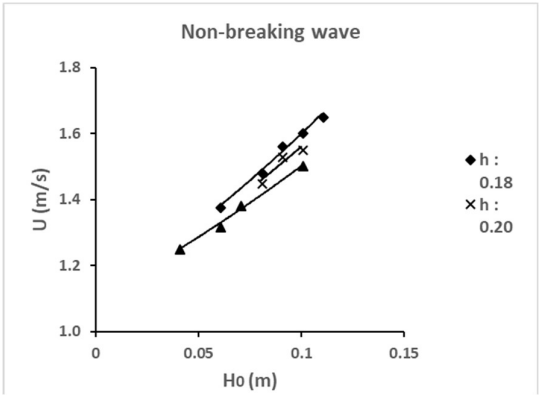


Fig. 7- Variation of Wave propagation Velocity for different Wave height and Still Water depth
شکل ۷- تغییرات سرعت انتشار موج بر عمق های مختلف در مقابل ارتفاع موج

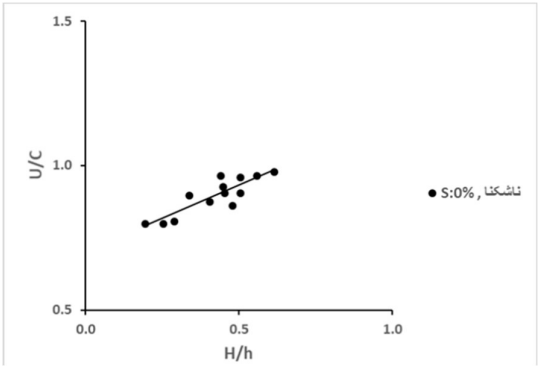


Fig. 8- Variation of Measured and Theoretical Velocities for different Relative Wave Height
شکل ۸- تغییرات سرعت آزمایشگاهی و سرعت تئوری با ارتفاع نسبی امواج

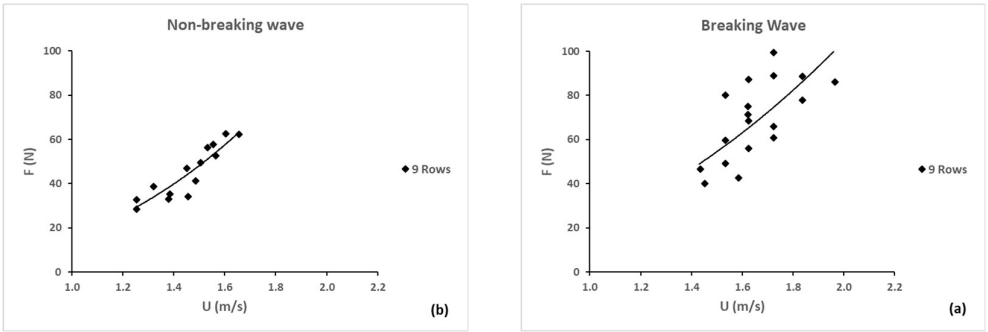


Fig. 9- Variation of Force with Velocity at Constant Density of 5×5 in (a): breaking Waves; (b): non-breaking waves
شکل ۹- تغییرات نیروبا سرعت انتشار امواج شکنا و ناشکنا در تراکم ثابت ۵×۵

ضریب نیروی دراگ

در مهندسی سواحل و مدل سازی اندرکنش موج با پوشش نیروی افقی وارده از سوی امواج بر پوشش گیاهی بر اساس رابطهٔ زیر است:

$$F_{hd} = \frac{1}{2}\rho C_D A u^2 + C_m \rho \forall \frac{du}{dt} \qquad (۷)$$

در رابطهٔ (۷) F_{hd} نیروی کل وارده بر پوشش گیاهی می‌باشد. عبارت اول در سمت راست تساوی نیروی درگ و عبارت دوم نیروی اینرسی است. برای یک سطح گوشه دار و غیر مسطح (نظیر مقاطع مستطیلی و دایره ای)، A مساحت مقطع عمود بر سطح جریان می باشد. u سرعت جریانی است که به جسم می‌رسد، ρ چگالی مایع، ∀ حجم مایع جابجا شده توسط جسم، C_m ضریب اینرسی، $\frac{du}{dt}$ تغییرات جزئی سرعت با زمان و C_D ضریب درگ می‌باشد که به شکل مقطع، جهت جریان، زبری سطح و عدد رینولدز جریان بستگی دارد و به عنوان ضریب مقاومت سازه در مقابل جریان در نظر گرفته می‌شود.

DOI: 10.22055/jise.2021.32311.1904

رابطه (۷) که برای برآورد نیروهای ناشی از موج روی سازه مستغرق به‌کار می‌رود، معادله موریسون نامیده می‌شود. با بررسی عددی و شبیه‌سازی ریاضی پوشش گیاهی در ساحل مشخص شد که با استفاده از رابطه موریسون می توان نیروی موج وارد بر ساحل و سازه‌های ساحلی را برآورد نمود،(Namdar and Nosrat, 2010). در ناحیه نزدیک ساحل و در شرایط آب کم عمق، با ورود موج منفرد به دلیل پیدایش تأثیر خزش ناشی از کاهش ژرفا و از بین رفتن تقارن موج و رفتارهای غیرخطی، اهمیت جزء اینرسی مکانی بیشتر از اینرسی زمانی می‌شود. در حقیقت در این شرایط اینرسی زمانی ($\frac{du}{dt}$)، ناچیز در نظر گرفته شده و نهایتاً از نیروی اینرسی صرف نظر می‌شود. در مطالعه‌ای آزمایشگاهی Hirashi و Harada (2003) نشان دادند که اختلاف فشار طرفین کمربند سبز عمدتاً ناشی از مقاومت درگ می‌باشد. بنابراین می‌توان این‌طور توجیه نمود هنگامی‌که امواج دریا به سمت ساحل پیش‌روی می‌کنند با وجود کمربند سبز، امواج وارد پوشش شده و نیروی امواج در قالب نیروی درگ بر روی درختان جذب شده که این امر باعث میرایی موج و در نتیجه کاهش ارتفاع آن می‌شود. با توجه به توضیحات بالا و رابطه (۷) ضریب نیروی کششی از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$C_d = \frac{2F}{\rho A u^2} \qquad (۸)$$

برای حل رابطه (۸) و محاسبه ضریب درگ باید مقادیر نیرو، سرعت و سطح جاذب نیرو در هر عمق آبگرفتگی موانع استوانه‌ای برای امواج متفاوت تعیین گردد. مقدار واقعی نیروی F از طریق انجام آزمایش بدست آمده و در معادله بالا جایگذاری شده است. این نیرو که حاصل برخورد موج با موانع استوانه‌ای می باشد با اندازه‌گیری مستقیم به کمک حسگر بار دینامیک و سیستم نیروسنجی فلوم لبه چاقویی استخراج شده است. شکل (۱۰) تغییرات ضریب بی بعد کششی در برابر عدد رینولدز و عرض‌های متفاوت پوشش ۱۰، ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متر نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل (۱۰) نشان داده شده است با کاهش عرض پوشش موانع ا ز پنج ردیف به سه و دو ردیف میزان ضریب درگ کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان تأثیر نیروی جذب شده توسط موانع استوانه‌ای در میزان ضریب درگ را بخوبی در شکل زیر مشاهده کرد. در شکل (۱۱) ضریب درگ به‌دست آمده با روابط پیشنهاد شده توسط سایر محققین مقایسه گردیده است. در این تحقیق اعداد رینالدز ساقه بدست آمده در محدوده‌ی کار Kobayashi et al. (1993) و Méndez et al (1999) تعریف شده توسط این محققین می‌باشد و رابطه به‌دست آمده بر اساس برازش رابطه توانی بین ضرایب درگ آزمایشگاهی و اعداد رینالدز ساقه آزمایش‌های انجام شده، تعیین شده است. Kobayashi et al. (1993) و هم‌چنین Méndez et al (1999) این آزمایش‌ها را در محدوده رینالدز مشابه انجام داده‌اند که تفاوت در مقادیر داده‌ها نیز به‌علت این تفاوت در شرایط آزمایشگاهی هیدرولیک جریان و خصوصیات پوشش می‌باشد.

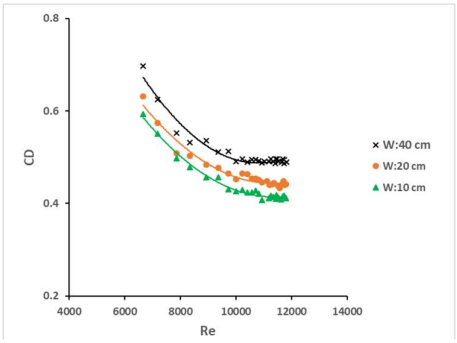


Fig. 10- Drag Coefficient Values for Reynolds Stem and different Widths of canopies
شکل ۱۰- مقادیر ضریب درگ به ازای عدد رینولدز ساقه و عرض‌های متفاوت پوشش

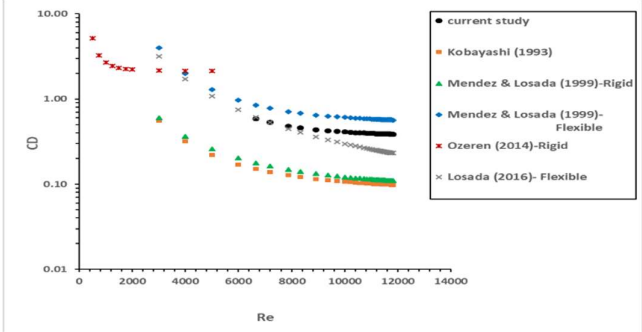


Fig. 11- Comparison of the Relationship Extracted from this Research with the Work of others.
شکل ۱۱- مقایسه رابطه استخراج شده از این تحقیق با سایر تحقیقات

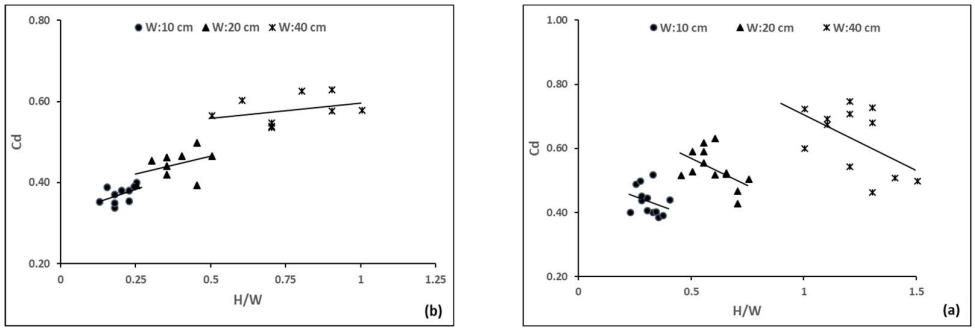


Fig. 12- Variation of drag coefficient with different wave height for different canopy widths: (a) breaking waves; (b) non-breaking waves

شکل ۱۲- تغییرات ضریب درگ در مقابل ارتفاع موج به عرض پوشش در امواج شکنا و ناشکنا

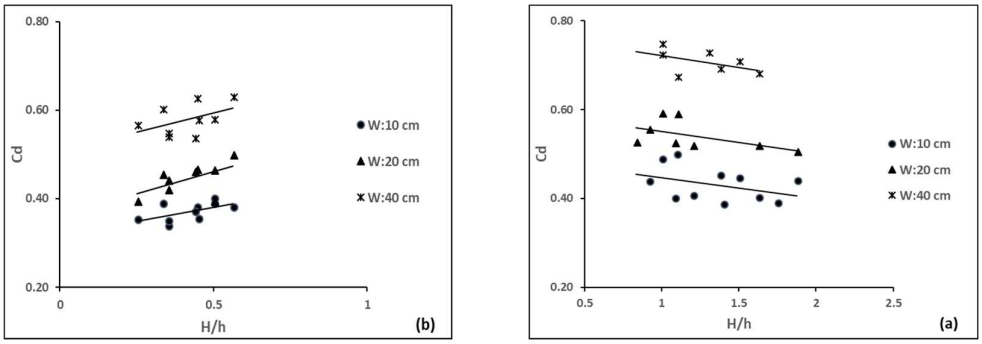


Fig. 13- Variation of drag coefficient with relative wave height for different canopy widths: (a) breaking waves; (b) non-breaking waves

شکل ۱۳- تغییرات ضریب درگ در مقابل ارتفاع نسبی امواج در عرض‌های پوشش متفاوت امواج شکنا و ناشکنا

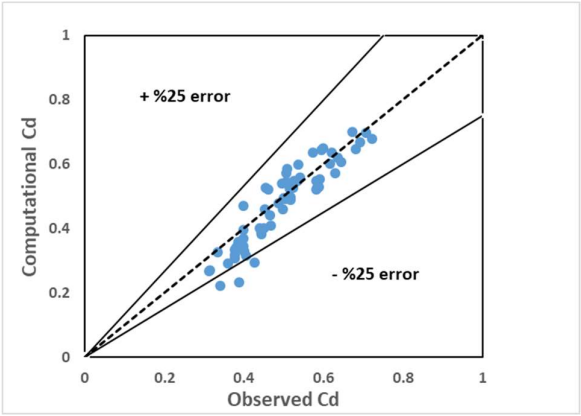


Fig. 14- Comparison between observational and computational drag coefficients using Equation (9)

شکل ١٤- مقایسه بین ضرایب درگ مشاهداتی و محاسباتی با استفاده از رابطه (۹)

شکل (۱۲) و (۱۳) به‌ترتیب تغییرات ضریب درگ را در مقابل عرض پوشش و ارتفاع نسبی (H/h) در امواج شکنا و ناشکنا نشان می‌دهند. با توجه به توضیحاتی که قبلاً داده شد، با افزایش عرض پوشش میزان جذب نیرو افزایش می‌یابد. به ازای یک ارتفاع موج، همواره جنگل با تراکم بیشتر مقاومت بیشتری در برابر جریان دارد، زیرا با افزایش تعداد مانع یا پوشش درختی تعداد ردیف‌های بیشتری در مقابل موج قرار گرفته و در نتیجه مقاومت ناشی از حضور جنگل در مقابل موج افزایش می‌یابد. با افزایش عرض پوشش، سطح جاذب بیشتر می‌شود و در امواج ناشکنا با افزایش ارتفاع موج ورودی و با وجود مستغرق بودن موانع به دلیل اینکه سطح جاذب ثابت است و نیروی درگ افزایش می‌یابد، ضریب درگ روند افزایشی دارد و در امواج شکنا که موانع در حالت غیر مستغرق هستند به دلیل افزایش سطح جاذب ضریب درگ روند کاهشی دارد. محدوده کاهش ضریب درگ در امواج شکنا در مقابل ارتفاع نسبی و تراکم پوشش متفاوت

DOI: 10.22055/jise.2021.32311.1904

در محدوده ۰/۴ تا ۰/۷۵ است. این محدوده در تحقیق Fathi-Moghadam et al. (2018) از ۰/۱ تا ۰/۳۳ گزارش شده که تفاوت حاصل ناشی از شرایط متفاوت آزمایشگاهی ناشی از شیب ساحل، نوع پوشش گیاهی و تراکم می‌باشد.

به‌منظور پیش‌بینی رابطه ریاضی بین متغیرهای ارائه شده در رابطه (۵) از روش رگرسیون غیرخطی در نرم افزار SPSS 17.0 استفاده شد و در نهایت رابطه زیر استخراج شد:

$$CD = -0.77 + EXP(-0.08\left(\frac{H}{h}\right) + 0.15\left(\frac{H}{W}\right) + \left(\frac{1210}{Re}\right)) \quad (۹)$$

رابطه (۹) با استفاده از ۸۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی برآورد شده و ضریب همبستگی ۰/۹۰۴ برای این رابطه به‌دست آمده است. مرحله صحت سنجی نیز با ۲۰ درصد باقی مانده داده‌های آزمایشگاهی انجام شده است. نتیجه به‌دست آمده از ضریب رگرسیون نشان از دقت مناسب مدل آماری است. شکل (۱۴) تغییرات مقادیر اندازه‌گیری شده ضریب درگ در مقابل محاسباتی آن با استفاده از رابطه (۹) را نمایش می‌دهد.

نتیجه گیری

– در عمق ثابت مخزن (P) ۴۰ سانتی‌متر هنگامیکه عمق ساحل (h) از ۸ به ۲۰ سانتی‌متر افزایش یابد ارتفاع اولیهٔ موج از ۱۵ به ۱۰ سانتی‌متر کاهش می‌یابد وبه طور مشابه ارتفاع موج در عمق ثابت مخزن ۲۸ و عمق ساحل اشاره شده از ۱۲ به شش سانتی‌متر کاهش می‌یابد.

– در امواج شکنا و با عمق ثابت مخزن (P) ۴۰ سانتی‌متر هنگامی‌که عمق ساکن ساحل (h) از هشت به ۱۲ سانتی‌متر افزایش یابد عمق آبگرفتگی موانع (Hinun) از ۲۱ به ۲۵ سانتی‌متر افزایش می‌یابد که در عمق مخزن ۲۸ سانتی‌متری عمق آبگرفتگی برای اعداد مشابه عمق ساحل از ۱۷ به ۲۲ سانتی‌متر افزایش می‌یابد. در امواج ناشکنا افزایش عمق آبگرفتگی موانع به‌ترتیب و در دو عمق متفاوت مخزن ۴۰ و ۲۸ سانتی‌متر و افزایش عمق ساحل ۱۹ تا ۲۱ سانتی‌متر از ۳۲ به ۳۶ و ۲۵ به ۲۹ سانتی‌متر است.

– با افزایش تراکم موانع استوانه‌ای میزان جذب نیرو افزایش می‌یابد. در چیدمان ۵×۵ میزان نیروی بیشینه جذب شده در عرض ۴۰، ۲۰ و ۱۰ سانتی‌متر به ترتیب ۹۹/۴۷، ۷۰/۱۴ و ۶۵/۸۳ نیوتن و میزان این نیرو در چیدمان ۱۰×۱۰ به ۵۵، ۵۱/۵۰ و ۴۸/۰۷ کاهش می‌یابد بطوریکه بیشینه نسبت نیروها در دو حالت چیدمان متفاوت ۱۰×۱۰ به ۵×۵ معادل ۱/۸۳ می باشد. میزان نیروی بیشینه اعمال شده توسط موج بر بخش متحرک فلوم در حالت بدون پوشش ۳۱/۸۸ نیوتن می‌باشد.

– رابطه سرعت انتشار موج با ارتفاع موج و عمق ساکن اولیه بدین صورت است که با افزایش ارتفاع موج، سرعت انتشار آن افزایش می‌یابد. و در امواج ناشکنا با افزایش عمق ساکن اولیه (h) از ۱۸ به ۲۱ سانتی‌متر، سرعت انتشار موج کاهش می یابد.

– با افزایش سرعت انتشار میزان نیروی امواج با نرخ بسیار زیادی افزایش می‌یابد. در تراکم ثابت ۵×۵ و عرض ۴۰ سانتی‌متر در موج شکنا به ازای حداقل و حداکثر میزان نیرو، سرعت انتشار موج به ترتیب برابر با ۱/۴۵ و ۱/۷۲ متر بر ثانیه می‌باشد. در شرایط مشابه و در امواج ناشکنا میزان سرعت برای حداقل و حداکثر نیرو به ۱/۲۵ و ۱/۶۰ متر بر ثانیه تغییر می‌یابد

–مقادیر ضریب درگ به‌دست آمده از نیروی اندازه‌گیری شده جریان در آزمایشگاه در مقابل عدد رینالدز ساقه و عرض‌های متفاوت پوشش ۱۰، ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متر ترسیم گردید.

– نمودار ضریب درگ در مقابل ارتفاع موج به عرض پوشش و ارتفاع نسبی در امواج شکنا که موانع غیرمستغرق بودند روند نزولی و در امواج شکنا که موانع مستغرق بودند روند صعودی داشت.

– محدوده تغییرات ضریب درگ در مقابل ارتفاع نسبی در امواج شکنا در محدوده ۰/۴ تا ۰/۷۵ و در امواج ناشکنا ۰/۳۵ تا ۰/۶۳ است.

–یک رابطه به شکل رگرسیون غیرخطی میان ضریب درگ موانع و پارامترهای نسبی (H/h)، (H/W) و عدد رینولدز با ضریب همبستگی ۰/۹۰۴ استخراج شد که مقدار ضرایب هر پارامتر در تابع نمایی متناسب با نحوه اثرگذاری آن در فیزیک پدیده و مقاومت موانع به نظر می‌رسد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

حمایت های مالی این تحقیق از محل اعتبار پژوهشی شماره پژوهانه SCU-2018 صورت گرفته است.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: پریسا آذین فر، انجام آزمایش‌ها، تجزیه و تحلیل اولیه داده‌ها، نگارش اولیه مقاله.

نویسنده دوم: منوچهر فتحی مقدم، انتخاب موضوع، برنامه تحقیق، برنامه ریزی انجام و کنترل آزمایش‌ها، بررسی نهایی نتایج، تایید نگارش نهایی مقاله.

نویسنده سوم: جواد احدیان، برنامه تحقیق، برنامه‌ریزی انجام و کنترل آزمایش‌ها، بررسی نهایی نتایج، اصلاح نهایی مقاله.

تقدیر و تشکر

تدوین، برنامه ریزی و مهیا نمودن وسایل آزمایشگاه و مواد اولیه مورد نیاز برای انجام تحقیق از پژوهانه نویسنده دوم و سوم مقاله تامین گردیده و از این رو از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز برای اختصاص گرنت به موضوع تقدیر و تشکر می‌گردد.

References

1- Ahadiyan, J., Musavi-Jahromi, S.H. 2009. Effects of Jet Hydraulic Properties on Geometry of Trajectory in Circular Buoyant Jets in the Static Ambient Flow. *Journal of Applied Sciences*, 9(21): 3843-3849. https://scialert.net/abstract/?doi=jas.2009.3843.3849.

2- Ahadiyan, J., Abbasi Chenari, S., Azizi Nadian, H., Katopodis, C., Valipour, M., Sajjadi, S. M., & Omidvarinia, M. 2024. Sustainable systems engineering by CFD modeling of lateral intake flow with flexible gate operations to improve efficient water supply. *International Journal of Sediment Research*, 39(4), 629-642. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.05.003.

3- Ahadiyan, J., Bahmanpouri, F., Adeli, A., Gaultieri, C., Khoshkonesh, A. 2022. Riprap Effect on Hydraulic Fracturing Process of Cohesive and Non-cohesive Protective Levees. *Water Resource Managemen*t 36, 625–639 (2022). https://doi.org/10.1007/s11269-021-03044-6.

4- Augustin, L.N., Irish, J.L., Lynett, P. 2009. Laboratory and numerical studies of wave damping by emergent and near-emergent wetland vegetation. *Journal of Coastal Engineering*, 56(3), pp.332-340. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.09.004.

5- Azinfar, P., Fathi-Moghadam, M., Ahadiyan, J. 2020. 'Laboratory Study of Broken Wave Force Damping by Submerged and Emergent Long Tree Canopies', *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 21(80), pp. 99-114. doi: 10.22092/idser.2020.342708.1430.

6- Davoodi, L., Fthi Moghadam, M., Ahadiyan, J., Khashefipour, S. M. 2017. 'The Effect of Coastal Forest on Variations of Broken Wave Force and Inundation Depth', *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(1-1), pp. 185-199. doi: 10.22055/jise.2017.12966. https://jise.scu.ac.ir/article_12966.html.

7- Dean, R. E., 1978. Effects of vegetation on shoreline erosional processes. Pages 415–426 in Wetland Functions and Values: The state of our understanding, *Proceedings of the National* Symposium on Wetlands.

8- Fathi-Moghadam, M., Salmanzadeh, S., Ahadiyan, J., Sajadi, M. 2024. Drag coefficient of rigid and flexible deciduous trees in riparian forests, *Journal of Hydraulic Engineering*. 150 (5), 04024027. https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-13709.

9- Fathi-Moghadam, M., Davoudi, L., & Motamedi-Nezhad, A. 2018. Modeling of solitary-breaking-wave force absorption by coastal trees. *Ocean Engineering*, *169*, 87-98. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.09.021.

10-Ghanbari Adivi, E., Fathi Moghadam, M. 2015. 'Vegetation impact on the drag coefficient and resistance of trees against shore waves', *Irrigation Sciences and Engineering*, 38(2), pp. 103-112. doi: 10.22055/jise.2015.11352.

11-Hashim, A. M., & Catherine, S. M. P. 2013. A Laboratory Study on Wave Reduction by Mangrove Forests. *APCBEE Procedia*, *5*, 27-32. https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2013.05.006.

12-Hirashi, T, Harada, K., 2003. Green belt tsunami prevention in the South Pacific region. *Port and Airport Research Institute*, 42(2), pp.23. https://www.researchgate.net/publication/238077579_Greenbelt_Tsunami_Prevention_in_South-Pacific_Region.

13-Husrin, S., Strusińska, A. & Oumeraci, H. 2012. Experimental study on tsunami attenuation by mangrove forest. *Journal of Earth Planet Sp* 64, 15 (2012). https://doi.org/10.5047/eps.2011.11.008.

14-Imamura, F., Goto, K., & Ohkubo, S. 2007. A numerical model for the transport of a boulder by a tsunami. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *113*(C1). https://doi.org/10.1029/2007JC004170.

15-Ismail, H., Abd Wahab, A.K. and Alias, N.E., 2012. Determination of mangrove forest performance in reducing tsunami run-up using physical models. *Natural hazards*, *63*(2), pp.939-963.https://doi.org/10.1007/s11069-012-0200-y.

16-Kobayashi, N., Raichlen, A. W., Asano, T. 1993. Wave attenuation by vegetation. Journal of Waterway, Port, *Coastal, and Ocean Engineering*. Vol 199. No 1. PP 30-48. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1993)119:1(30).

17-Lashkar-Ara, B., 2010, Determination of shear stress in rectangular channel using momentum and energy approaches, *PhD. Thesis*, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran, p. 52- 62.

18-Lashkar-Ara, B., and Fathi-Moghadam, M., 2014. Analysis of shear stress in Rectangular open channels using force balance method. *Journal of Hydraulic*, *Iranian Hydraulic Association*, 9(3), pp.33-44. Doi: 10.30482/jhyd.2014.10174.

19-Maleki, P., Ahadiyan, J., Aleixo, R., Azizi Nadian, H., Tamoradi, Z., Kashefipour, S. M., Schleiss, A. J., & Fathi Moghadam, M. 2025. Scour Control in a 90° Bend by Means of an Air Bubble Screen. *Water*, *17*(18), 2693. https://doi.org/10.3390/w17182693.

20-Massel, S., Furukawa, K., & Brinkman, R. 1999. Surface wave propagation in mangrove forests. *Fluid Dynamics Research*, *24*(4), 219-249. https://doi.org/10.1016/S0169-5983(98)00024-0.

21-Mazda, Y., Wolanski, E., King, B., Sase, A., Ohtsuka, D., Magi, M., 1997. Drag force due to vegetation in mangrove swamps. *Mangroves and Salt Marshes* 1, 193–199. https://doi.org/10.1023/A:1009949411068.

22-Mclvor, Al., Moller L., Spencer, T., Spalding, M., 2012. Reduction of wind and Swell Waves by Mangroves. Natural Coastal Protection Series: Report. Cambridge Coastal Research Unit Working Paper 40. Published by the *Nature Conservancy and Wetlands International*. file:///C:/Users/Asus/Downloads/reduction-of-wind-and-swell-waves-by-mangroves%20(1).pdf.

23-Méndez, F. J., Losada, I. J., & Losada, M. A. 1999. Hydrodynamics induced by wind waves in a vegetation field. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *104*(C8), 18383-18396. https://doi.org/10.1029/1999JC900119.

24-Mohamed, A., 2008. Characterization of tsunami-like bores in support of loading on structures, *M.Sc. Thesis*, University of Hawaii, p.93.

25-Mokhtari, M., and Hajizadeh Zaker, N., 2005. Makran (Sea of Oman) is a Tsunami-Prone Area for the Iranian Coasts. *6th A/O Regional Meeting of IAPH*, 1-4 Feb, Tehran, Iran.

26-Namdar, A., Nusrath, A., 2010. Tsunami numerical modeling and mitigation. *Journal of Frattura ed Integrità Strutturale* 12, pp.57-62. https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.12.06.

27-Novak, P., Guinot, V., Jeffery, A., Reeve, D.E. 2010. Hydraulic Modelling - an introduction. Routled 1st Edition (February 27, 2010). 616 pages. London. https://www.researchgate.net/publication/260134554_Hydraulic_Modelling_-_an_Introduction.

28-Sadeghi-Hardangi, E., Ahadiyan, J. 2018. 'Hydraulically Failure Mechanism of non-Cohesive Homogenous Protective Embankments by Overtopping', *Irrigation Sciences and Engineering*, 41(1), pp. 115-131. doi: 10.22055/jise.2018.13575.

29-Sajjadi, S. M., Barihi, S., Ahadiyan, J., Azizi Nadian, H., Valipour, M., Bahmanpouri, F., & Khedri, P. 2024. Redesigning the Fuse Plug, Emergency Spillway, and Flood Warning System: An Application of Flood Management. *Water*, *16*(24), 3694. https://doi.org/10.3390/w16243694.

30-Salahi, K., Ahadiyan, J., Yu-hong Zeng, Azizi, H. N., Sajjadi, S. M. 2024. Laboratory Investigation of the Effect of Particle and Vegetation Roughness on Changes in Drag Force in an Open Channel, *Journal of Environmental Accounting and Management*, Vol. 12, No.3, pp.221-230. DOI:10.5890/JEAM 2024.0 https://www.lhscientificpublishing.com/Journals/articles/DOI-10.5890-JEAM.2024.09.001.aspx.

31-Salmanzadeh, S., Fathi-Moghadam, M., Ahadiyan, J., Sajjadi, M. 2022. Laboratory study of the effect of vegetation arrangement and density on flow resistance coefficient, Journal of Water Science & Engineering. 2022;11(4):16-7. https://sanad.iau.ir/Journal/wsej/Article/921928

32-Salmanzadeh, S., Fathi-Moghadam, M., Ahadiyan, J., Sajjadi, M. 2024a. An Index to Determine Reaction of Vegetation Canopies to River Flow, *Journal of Hydraulic and Water Engineering*, 1(2), pp. 41-50. doi: 10.22044/jhwe.2023.13441.1027.

33-Salmanzadeh, S., Fathi-Moghadam, M., Ahadiyan, J., Sajjadi, S. M. 2024b. Investigation of the Effective Parameters on the Drag Coefficient in Rigid and Flexible Vegetation, *Irrigation Sciences and Engineering*, 47(1), pp. 15-31. doi: 10.22055/jise.2022.41559.2035.

34-Sorensen, R.M. 1997. Basic Coastal Engineering. *Springer Science*. New York. https://link.springer.com/book/10.1007/b101261.

35-Tamoradi, Z.; Ahadiyan, J. 2021. Effect of water and air injection on the reduction of bend scour. *Canadian Journal of Civil Engineering,* 2021, 48, 740–748. https://doi.org/10.1139/cjce-2019-0429.

36-Thuy, B. N., Tanimoto, K., Tanaka, N., Harada, K., Limura. 2009. Effect of open gap in coastal forest on tsunami run-up-investigations by experiment and numerical simulation. *Ocean Engineering*. 36, pp.1258-1264. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2009.07.006.

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 1, Spring 2026, p. 23-42

Research Paper

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Feasibility Assessment of Water Stress Monitoring in Tomato Plants Using Spectral Indices in Greenhouse Conditions

A. Hadighanavat[1], A. Hooshmand[2*], P. Tishehzan[3], N. Alemzadeansari[4] and K. Rangzan[5]

1- Ph.D. student, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
2- Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (Hooshmand_a@scu.ac.ir)*
3- Associatet Professor, Department of Environmental, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
4- Professor, Department of Horticulture and Crop Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
5- Professor of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 29 March 2024
Revised: 21 May 2024
Accepted: 10 June 2024
Available online: 05 May 2026

Keywords:
Plant Water Status, Relative Water Content, Remote sensing, Spectrometry.

TO CITE THIS ARTICLE:

Hadighanavat, A., Hooshmand, A., Tishehzan, P., Alemzadeh ansari, N., Rangzan, K. 2026. 'Feasibility Assessment of Water Stress Monitoring in Tomato Plants Using Spectral Indices in Greenhouse Conditions', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(1), pp. 23-42. doi: 10.22055/jise.2024.46568.2121

Abstract

Early detection of plant water status is crucial for effective water management planning. Remote sensing methods, particularly spectroscopy, offer a practical, reliable, rapid, and non-destructive approach to monitoring plant biochemical parameters, including water status. This study investigated the potential of several spectral water indices – WI1-4, NWI5, RDVI, NDVI, and OSAVI – for monitoring the water status of tomato plants grown in a greenhouse. The experiment involved treatments with silica nanoparticles at concentrations of 0 and 100 mg/L, combined with three irrigation regimes providing 80%, 100%, and 60% of the plants' water requirement. The findings indicated that relative leaf water content in tomato plants decreased with increasing water stress across different months and throughout the study. However, significant differences in relative leaf water content were only observed between the full irrigation treatment (100%) and the 60% irrigation treatment. Furthermore, plants treated with 100 mg/L silica nanoparticles generally exhibited higher relative leaf water content compared to those without nanoparticles. Among the spectral indices evaluated, NWI5 demonstrated the weakest correlation with relative leaf water content, while WI2 and WI1 showed the strongest. Overall, the results suggest that spectral indices can be effectively employed for rapid, non-destructive, and reliable assessment of tomato plant water status in greenhouse environments.

Introduction

Water stress is one of the most important factors reducing the production of agricultural products worldwide. Early detection of plant water status is essential to optimize crop water use, and implement water savings methods (Ballesteros et al. 2016). Remote sensing techniques, such as spectroscopy, are recognized for their practicality, reliability, speed, and non-destructiveness in studying the biochemical characteristics of plants, including the water status of plants (Ihuoma and Madramootoo, 2019). This study aimed to investigate the potential of plant water spectral indices, which include water indices 1–4 (WI1–4), normal water index 5(NWI5), spectral vegetation indices RDVI, NDVI, and OSAVI, to estimate water status in tomato plants.

Methodology

The experiment was performed in the research greenhouse of the Department of Water and Environmental Engineering Science, the Shahid Chamran University of Ahvaz, Khuzestan Province, Iran (31°18'13"N, 48°39'40"E, Elevation: 22.5 m a.s.l) during the growing season of 2021 from January to June. The experimental treatments involved silica nanoparticles with the concentrations of 0 and 100 mg/L, and three water regimes (100%, 80%, and 60% of crop water requirement). The split-plot was used as the experimental design arranged based on randomized complete design (RCD) with four replications (120 pots in total). Three irrigation regimes were identified as the primary determinants, whereas the two degrees of nanoparticle concentration were considered as the secondary ones. A total of 120 pots were used. RWC was used to describe the water status of Tomato leaves. RWC was determined by the procedure set out by SHlemmer et al. (2005). Concurrent with other measurements, spectral reflectance was measured using a portable spectrometer (ASD FieldSpec 3, Analytical Spectral Devices Inc, USA) operated in the spectral range of 350–2500 nm. The measured values of leaf reflectance were used for calculating the spectral indices (water indices 1–4 (WI1–4), normal water index 5(nwi5), spectral vegetation indices RDVI, NDVI, and OSAVI. The ability of spectral indices to assess such water status-related RWC of tomato leaves under different irrigation regimes was studied. An analysis of variance (ANOVA) was performed on the spectral indices and relative water content (RWC) using the split plot design. The PROC GLM technique of SAS software (version 9.4, SAS Institute, Inc., Cary, NC, USA) was used for this analysis. Then, the least significant difference (LSD) test was used to compare the means and determine if they were significantly different from each other at $p \leq .05$ level.

Findings

The results showed that the relative water content (RWC) of leaves in tomato plants under deficit irrigation treatments in different months, and throughout the study period decreased by increasing water stress. Nevertheless, the disparity in the magnitude of this index was only notable in the treatment including complete irrigation and meeting 60% of the plant's water needs. Besides, the relative water content of tomato leaves in the nanoparticles with the concentrations of 100 mg/l was higher than 0 mg/l. Spectral indices were closely and significantly associated with RWC Spectral indices had a close and significant relationship with RWC in an average of measurements (0.66 **$< R^2 < 0.78$**). Among all tested spectral indices, NWI5 and WI1, WI2 showed the least and greatest consistent association with relative water content, respectively. Among eight spectral indices, four satisfied most of the criteria used to determine the accuracy of the models to predict RWC The models based on WI2, WI3, WI4, WI1, OSAVI, and RDVI ،provided more accurate estimates of RWC the estimated values of parameters studied were always less than the measured ones over the entire set of measurements. In conclusion, spectral reflectance could be useful for fast, non-destructive, and reliable assessment of water status of tomato plants in greenhouse conditions.

Conclusions

The tomato plant is one of the strategic crops in the agricultural sector. Considering relatively high demand for tomatoes and the lack of water, there is a need for optimal management of water consumption, and irrigation planning for the sustainability of producing agricultural products, including tomato plants. The capability of water spectral indices, including water index 1-4 (WI1-4), normal water index 5 (NWI5), vegetation spectral indices RDVI, NDVI, and OSAVI in studying water stress status of tomato plants under the effect of irrigation regimes, and silica nanoparticles in greenhouse conditions by determining The relationship between spectral indices and relative water content index of plant leaves (RWC) was investigated. The potential for a rapid and non-destructive assessment of changes in the water status of tomato plants in greenhouse conditions has been demonstrated by the substantial correlation between the spectral indices and the relative leaf water content index. It can be a good measure to express the water status of plant. The work presented in this paper assessed the feasibility of using spectral indices to detect water stress in tomato plants. Water scarcity had an adverse effect on water status (RWC), and this parameter

decreased with the reduction of irrigation water. However, applying 100 mg/L of nanoparticles increased the water condition index (RWC). Our study showed that WI1-4, NWI5, OSAVI, RDVI, and NDVI were sensitive indicators for detecting water stress levels in greenhouse tomato plants. Consequently, the use of spectral data in crop monitoring enables the rapid, non-destructive, and dependable estimation of plant water status. The optimization of agricultural water use for increased crop yield can be achieved by analyzing these features in real-time and providing the producers with qualitative and quantitative information. Based on the findings of this study, it was difficult to select a single index for precise estimation of plant water status. Therefore, innovative data management techniques that would integrate various vegetation indices are needed to widen the scientific knowledge on crop stress monitoring and provide irrigators with precise indices for scheduling irrigation. Furthermore, future research efforts should be geared towards the integration of thermal and narrow-band spectral indices to provide more precise information about plant water status.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding

The financial support of this research has been provided by Grant number SCU.WI1402.144.

Data Availability Statements

Data Availability Statement: All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution

First Author: Anahita Hadighanavat, Done research, data analysis, participation in preparing the manuscript.
Second Author: Abdolrahim Hosshmand, supervision on the research , investigation of the results, participation in the preparation of the manuscript.
Third Author: Parvaneh Tishehzan, supervision on the research investigation of the results, and analysis of data, participation in the preparation of the manuscript.
Fourth Author: Naser Alemzadeansari, participation in done research at greenhouse.
Fifth Author: Kazem Rangzan, participation in the remote sensing technique.

Acknowledgmen

The authors would like to express their gratitude to Shahid Chamran University of Ahvaz Research and Technology for their financial support under Contract and Sepahan Royesh Company of Isfahan for providing tomato seeds is gratefully acknowledged to support the Ph.D. thesis in Irrigation and Drainage written at Shahid Chamran University of Ahvaz.

References

1- Ballesteros, R., Ortega, J.F. and Moreno, M.A., 2016. FORETo: new software for reference evapotranspiration forecasting. *Journal of Arid Environments*. *124*(3), pp.128–141. doi:10.1016/j.jaridenv.2015.08.006

2- Ihuoma, S.O. and Madramootoo, C.A., 2019. Sensitivity of spectral vegetation indices for monitoring water stress in tomato plants. *Journal Computers and Electronics in Agriculture. 163*(c), pp. doi.org/10.1016/j.compag.2019.104860

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۹، شماره‌ی ۱، بهار ۱۴۰۵، مقاله پژوهشی، ص. ۴۲-۲۳

امکان سنجی پایش تنش آبی گیاه گوجه‌فرنگی با استفاده از شاخص‌های طیفی در شرایط گلخانه‌ای

آناهیتا هادی قنوات[۱]، عبدالرحیم هوشمند[۲*]، پروانه تیشه زن[۳]، ناصر عالم‌زاده انصاری[۴] و کاظم رنگزن[۵]

۱- دانشجوی دکتری گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲*- نویسنده مسئول، استاد گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
Hooshmand_a@scu.ac.ir

۳- دانشیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۴- استاد گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۵- استاد گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۰ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۰۱ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۱ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵

چکیده

تشخیص زودهنگام وضعیت آب گیاه برای برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی مدیریت مصرف آب ضروری است. امروزه روش‌های سنجش از دور مانند طیف‌سنجی، به‌عنوان یک روش کاربردی، مطمئن، سریع و غیرمخرب در بررسی پارامترهای بیوشیمیایی گیاهان از جمله وضعیت آبی گیاه شناخته می‌شود. هدف از این پژوهش بررسی قابلیت شاخص‌های طیفی آب از جمله شاخص آب ۱-٤ (WI1-4)، شاخص نرمال آب ۵ (NWI5)، شاخص‌های طیفی سبزینگی RDVI، NDVI و OSAVI در پایش وضعیت آبی گیاه گوجه‌فرنگی بود. تیمارهای آزمایشی شامل نانو ذرات سیلیکا با غلظت‌های صفر و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و سه رژیم آبیاری (آبیاری برای تأمین ۱۰۰، ۸۰ و ٦۰ درصد از نیاز آبی گیاه) بود. نتایج نشان داد که مقادیر محتوای نسبی آب برگ در گیاه گوجه‌فرنگی تحت تیمارهای آبیاری در ماه‌های مختلف و در کل دوره‌ی تحقیق، با افزایش تنش آبی کاهش یافته‌است، با این حال تفاوت مقدار این شاخص تنها در تیمار آبیاری کامل و آبیاری برای تأمین ٦۰ درصد از نیاز آبی گیاه، معنی‌دار بود. علاوه بر این، به‌طور کلی محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی در نانو ذره با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نسبت به غلظت صفر میلی‌گرم بر لیتر بیش‌تر بود. در میان تمام شاخص های طیفی آزمایش شده، شاخص طیفی NWI5 کمترین و شاخص‌های WI2 و WI1 بیشترین ضریب تعیین را با شاخص محتوای نسبی آب برگ در طول اندازه‌گیری‌ها نشان داد. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان بیان کرد که شاخص‌های طیفی قابلیت استفاده برای ارزیابی سریع، غیرمخرب و مطمئن وضعیت آبی گیاه گوجه فرنگی در شرایط گلخانه‌ای را دارند.

کلید واژه‌ها: سنجش از دور، طیف‌سنجی، محتوای نسبی آب برگ، نانوذره، وضعیت آب گیاه.

مقدمه

تنش‌های محیطی به‌ویژه تنش آبی از مهمترین عوامل کاهش تولیدات محصولات کشاورزی در سطح جهان هستند. بهره‌وری محصولات کشاورزی با توجه به افزایش جمعیت، تغییرات آب و هوایی، کاهش بارندگی و افزیش دما با کاهش شدید مواجه شده و امنیت غذایی جهانی را به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا مورد تهدید قرار داده‌است (Lynch, 2019). در مقیاس جهانی بیشترین بخش آب مصرفی، به کشاورزی با مصرف چیزی حدود ۷۰ درصد از منابع آب شیرین اختصاص دارد. بنابراین مدیریت صحیح منابع آب و استفاده پایدار از آن، به‌ویژه در مناطقی که با بحران کم آبی مواجه هستند، به یک هدف مهم در کشاورزی تبدیل شده است (Ballesteros et al., 2016).

هنگامی که گیاه در شرایط تنش آبی قرار می‌گیرد، این کمبود آب به‌طور مستقیم بر وضعیت آب برگ و در نهایت بر عملکرد گیاه تأثیر منفی می‌گذارد. بنابراین برآورد و پایش دقیق شاخص وضعیت آب گیاه به منظور مدیریت صحیح و کارآمد آبیاری و حفظ عملکرد مطلوب ضروری است (Bohman et al., 2019 ; Elmetwalli et al., 2020).

در سال‌های اخیر با ورود فناوری‌های نوین در حوزه کشاورزی مانند نانوذرات، زمینه ورود به دروازه‌های جدیدی برای ایجاد مدیریت کارآمد و کشاورزی مدرن در این بخش گشوده شده‌است (Hashemi Dehkordi et al., 2017). استفاده از نانو ذرات به‌دلیل قابلیت آن‌ها در کاهش اثرات منفی تنش آبی و تأثیر مثبت بر صفات مورفولوژیکی گیاهان، مورد توجه زیادی قرار گرفته‌است (Tripathi et al., 2015). در این میان استفاده از نانوذرات به شکل SiO_2 به‌دلیل اینکه سیلیکون (Si) نقش اساسی در کاهش تنش‌های غیرزیستی (مانند شوری و خشکی) دارد، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌است (Maghsoudi et al., 2015). نانو ذرات SiO_2،

تحمل گیاهان در مقابل تنش خشکی و شوری را از طریق تنظیم فرایندهای مختلف فیزیولوژیک شامل افزایش دفاع آنتی اکسیدانت، تنظیم جذب آب توسط ریشه، ایجاد تعادل در جذب عناصر، تعدیل سرعت تعرق و افزایش فتوسنتز بهبود می‌بخشند (Alsaeedi et al., 2019). در نتیجه از این طریق تنش آبی را کنترل کرده و اثرات سوء ناشی از تنش خشکی را به حداقل می‌رسانند (Mahmoodi et al., 2020). برخی گزارش‌ها، اثر سودمند کاربرد نانو ذرات سیلیکا را در شرایط تنش آبی روی گیاهان گلخانه‌ای نشان می‌دهد (Haghighi et al., 2021 ; Shokri et al., 2021).

روش‌های سنتی مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری که به‌منظور بررسی تنش کم آبی درگیاه مورد استفاده قرار می‌گیرند، عمدتاً بر پایه نمونه برداری از خاک یا گیاه استوار است (Zhang et al., 2012). روش‌های مبتنی بر خاک با وجود اینکه نشان دهنده‌ی مقدار آب در منطقه ریشه هستند اما ممکن است ارتباط مستقیم با وضعیت آبی گیاه نداشته باشند. علاوه بر این برهم زدن خاک، عدم یکنواختی کافی نمونه‌ها در سطح وسیع برای دست‌یابی به وضعیت کلی گیاه و زمان‌بر بودن آزمایش‌ها، به‌عنوان دیگر معایب این روش می‌توان اشاره کرد (Ihuoma and Madramootoo, 2019). همچنین با وجود اینکه روش‌های گیاه مبنا ارتباط مستقیم با وضعیت آبی گیاه دارند ولی نمونه‌برداری مخرب از گیاه، منجر به ایجاد خطا با دخالت در فعالیت برگ هنگام آزمایش می‌شود (Ballester et al., 2013). بنابراین به‌منظور تشخیص به موقع، غیر مخرب و سریع تنش آبی در گیاه، نیازمند استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی نوین آبیاری مانند روش‌های بدون تماس (سنجش از راه دور) که نظارت مستقیم بر وضعیت آب گیاه را دارند، می‌باشیم (Inou et al., 2002).

امروزه در کشاورزی هوشمند با توجه به ضرورت بررسی تنش‌آبی گیاهان به منظور تدوین برنامه زمان‌بندی آبیاری و سپس به کاربردن تکنولوژی‌هایی مانند روش‌های آبیاری دقیق، استفاده از روش طیف‌سنجی به عنوان یکی از روش‌های سنجش بدون تماس و غیرمخرب، با تشخیص به موقع تنش‌های خشکی و با پایش مستمر گیاهان بخصوص در مناطق خشک و نیمه خشک مورد توجه محققان قرار گرفته‌است (Ihuoma and Madramootoo, 2019). .طیف سنجی با ثبت تغییرات طیف گیاه در محدوده ۳۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر مرتبط با پارامترهای گیاهی (از جمله محتوای نسبی آب برگ)، وضعیت آبی گیاه رو مورد بررسی قرار می‌دهد (Nguy-Robertson et al.,2012). طیف منعکس شده از گیاه در محدوده مادون قرمز نزدیک (۷۰۰ تا ۱۳۰۰ نانومتر) ارتباط نزدیکی با وضعیت آب گیاه دارد. شکل طیف در این محدوده تحت تأثیر رطوبت موجود در برگ است. زیرا در این محدوده نور رسیده به برگ تا عمق بیشتری در بافت برگ نفوذ کرده و امکان تخمین دقیق‌تر وضعیت آب گیاه را فراهم می‌کند (Romero et al., 2017 ; Elsayed et al., 2015). چگونگی انعکاس در محدوده مادون قرمز کوتاه (۱۳۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) بیشتر تحت تأثیر ساختار درونی برگ می‌باشد. با این حال طول موج‌های موجود در این محدوده برای نظارت بر تغییراتی که در وضعیت آب گیاه رخ می‌دهد مؤثر هستند (El-Hendawy et al., 2019) بنابراین توسط سنجش از دور می‌توان با ردیابی تغییراتی که در طیف بازتابی از گیاه رخ می‌دهد، مدیریت مؤثر در شرایط تنش آبی و اتخاذ سریع اقدامات آبیاری را اعمال کرد. طیف‌سنجی امکان دستیابی سریع و دقیق را از وضعیت آب گیاه را فراهم می‌کند، چرا که در شرایط تنش آبی، تغییرات مهم و بارزی در طیف منعکس شده از برگ گیاه رخ می‌دهد.

تنش آبی باعث تغییر در ساختار درونی برگ شده و به سبب آن هوای موجود در مزوفیل برگ افزایش یافته و رطوبت کاسته می‌شود. تغییرات ایجاد شده در فضای درون سلولی برگ سبب افزایش انعکاس طیفی می‌شود (Penuelas et al., 1997). بنابراین طیف‌سنجی یکی از اصلی‌ترین راهکارهای مدیریت تنش آبی گیاه و برنامه‌ریزی آبیاری در مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشد (Elsayed and Darwish, 2017). چندین طول موج طیفی در نواحی مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز کوتاه قرار دارند، مانند طول موج‌های ۶۷۰، ۷۵۰، ۷۰۵، ۸۰۰، ۹۷۰، ۹۰۰،۹۱۰، ۱۱۰۰، ۱۴۵۰، ۱۶۰۰، ۱۷۳۰، ۱۹۵۰، ۲۱۰۰، ۲۲۵۰ و ۲۵۰۰ که در تخمین پارامترهای مختلف گیاهی از جمله محتوای نسبی آب برگ در گیاهان مختلف مؤثر هستند (El-Hendawy et al., 2019). با این حال، اثربخشی این طول موج‌ها برای تخمین صفات گیاهی به شدت تحت تأثیر عوامل متعددی غیر از محتوای آب گیاه مانند مراحل مختلف رشد ، گونه‌های گیاهی و شرایط آب و هوایی است (Junttila et al., 2017). این محدودیت ها را می‌توان با ایجاد شاخص‌های طیفی مختلف کاهش داد. هر شاخص طیفی شامل دو تا سه طول موج مؤثر از طیف کامل است که این طول موج‌ها برای نظارت بر تغییرات ایجاد شده در صفات گیاهی مرتبط با وضعیت آب گیاه مؤثر هستند.

شاخص‌های طیفی به‌دست آمده از طیف‌سنجی اغلب از ترکیب طول موج‌های بازتاب شده از نواحی مرئی، مادون قرمز نزدیک و کوتاه می‌باشند که قابلیت استفاده به‌منظور نظارت بر وضعیت آبی گیاه را دارند (Gao, 1996). از سوی دیگر شاخص‌های طیفی علاوه بر بیان علت تفاوت طیفی نمونه‌ها، با برقراری رابطه با متغیر هدف، نقش مؤثری در برطرف کردن و کاهش اثر عوامل مزاحم در بازتاب طیفی را دارند. بنابراین می‌توان به‌منظور بهبود تشخیص تنش آبی در گیاه و مدیریت بهینه مصرف آب در کشاورزی از شاخص‌های طیفی بهره‌گرفت (Ihuoma and Madramootoo, 2020). در سال‌های اخیر، برای تشخیص تنش آبی در گیاهان، شاخص‌های طیفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Elsayed et al., 2017; Elsayed et al., 2021; Asgari et al., 2023; Wang et al., 2021; Ihuoma and

DOI: 10.22055/jise.2024.46568.2121

Madramootoo, 2019; Kovar et al., 2019; Yasir .(and Zhang, 2022; Zhang et al., 2012).

برخی از شاخص‌های طیفی مانند شاخص آب-۱ (WI1) Penuelas et al. (1993)، شاخص آب-۲ (WI2)، شاخص آب-۳ (WI3) و شاخص آب-۴ (WI-4) Elsayed et al. (2021)، شاخص نرمال آب-۵ (NWI5) Elsayed et al. (2017)، شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی(NDVI) Gitelson و Merzlyak (1994)، نسبت شاخص تفاوت پوشش گیاهی (RDVI) Roujean و Breon (1995) و شاخص گیاهی تعدیل شده خاک بهبود یافته (OSAVI) Haboudane .et al (2002) نتایج مطلوب و قابل قبولی در تخمین محتوای آب برگ گیاه از خود نشان دادند. شاخص‌های طیفی زیادی در پایش وضعیت آب گیاهان مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند اما بیشتر این شاخص‌ها برای برنامه‌ریزی آبیاری و بررسی وضعیت آب درختان و غلات در شرایط مزرعه بکاربرده شده‌اند ولی ارزیابی و اعتبار سنجی آن‌ها در شرایط گلخانه‌ای و برای گیاه گوجه‌فرنگی به ندرت صورت گرفته‌است.

گیاه گوجه‌فرنگی با نام علمی Lycopersicon یکی از محصولات ارزشمند به‌شمار می‌آید که منشاء آن قاره آمریکا است (Kasraei and Saedi, 2010). با توجه به وضعیت منابع آب کشور، افزایش جمعیت و به طبع آن تقاضا برای تهیه محصولات کشاورزی و همچنین فصلی بودن تولید این محصول سبب شده که برای تأمین نیاز مردم راه‌کارهایی در نظر گرفته شود تا با مصرف بهینه آب قابل دسترس، میزان تولید محصولات کشاورزی در واحد سطح افزایش و امکان تولید محصول در خارج از فصل فراهم شود. نیاز آبی نسبتاً بالای گوجه‌فرنگی، کمبود آب در سال‌های اخیر و عدم مدیریت مطلوب مصرف آب از جمله دلایلی هستند که پایداری تولید این محصول را تهدید می‌کند. با توجه به اهمیت بالای این گیاه و نیاز مبرم کشور به تولید آن، باید تحقیقات بیشتری برای کاهش آب مصرفی ، بالا بردن عملکرد و کیفیت میوه به‌منظور مدیریت هرچه بهتر منابع آب انجام گردد. بنابراین بررسی تنش آبی گیاه گوجه‌فرنگی برای تعیین اعمال سطوح مشخصی از تنش آبی، در مدیریت هرچه بهتر آبیاری و بهینه سازی مدیریت مصرف آب ضروری خواهدبود. براساس نتایج تحقیق Ihuoma و Madramootoo (2019) شاخص‌های طیفی می‌توانند ابزارهای مناسبی برای پیش‌بینی وضعیت تنش آبی گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط گلخانه‌ای باشند. پژوهش حاضر با هدف بررسی قابلیت چندین شاخص طیفی گیاهی و انتخاب مناسب‌ترین شاخص به‌منظور پایش وضعیت تنش آبی گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط گلخانه‌ای انجام شد.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه

این تحقیق به‌صورت کشت گلدانی در مجتمع گلخانه‌ای دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید چمران اهواز با محدوده جغرافیایی ۳۱ درجه، ۱۸ دقیقه و ۱۳ ثانیه شمالی و ۴۸ درجه، ۳۹ دقیقه و ۴۰ ثانیه‌ی شرقی و ارتفاع ۲۲/۵ متری از سطح دریا انجام شد. نتایج بررسی ویژگی‌های خاک مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است.

طرح آزمایشی و تیمارهای آبیاری

این پژوهش از دی ماه سال۱۴۰۰ تا خرداد ماه سال ۱۴۰۱ به‌صورت کرت‌های خردشده (اسپیلت پلات) در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار و در مجموع ۱۲۰ عدد گلدان انجام شد. فاکتور اصلی، تیمارهای آبیاری در سه سطح، شامل آبیاری کامل با ۱۰۰درصد نیاز آبی (I_{100}) ، آبیاری با ۸۰ درصد نیاز آبی (I_{80}) و۶۰ درصد نیاز آبی (I_{60}) و فاکتور فرعی، تیمار نانو ذرات سیلیکا در دو سطح شامل نانو ذرات با غلظت‌های صفر میلی‌گرم بر لیتر (F_0) و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر (F_{100}) اجرا شد.

در ابتدا بذرهای گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای رقم واسانتا در سینی‌های کشت حاوی بستر کوکوپیت، کشت شدند. سپس نشاهای منتخب (در مرحله ۵-۶ برگی حقیقی) برای کشت از خزانه به گلدان‌هایی که با نسبت مشخص از خاک مزرعه و ماسه رودخانه پر شده بودند، منتقل شدند. از ابتدای کشت گوجه‌فرنگی در سینی کشت برای کل تیمارها تا قبل از مرحله‌ی استقرار گیاه (۵-۶ برگی شدن) آبیاری معمولی انجام گرفت. سپس بعد از مرحله‌ی استقرار گیاه، تیمارهای نانوذرات و کم آبیاری اعمال شد. به‌منظور کنترل دما در محیط گلخانه از سیستم فن و پد و بخاری استفاده شد. در فصل سرما، برای کنترل دمای گلخانه از بخاری گازی استفاده شد.

جدول۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1-Physical and chemical properties

Soil texture	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	ρb (gr/cm^3)	PH	EC (ds/m)	FC ($\%\Theta_m$)	PWP ($\%\Theta_m$)
Sandy loam	58	26	16	1.47	5.6	3.45	21	9

نیاز آبی و مقدار آب آبیاری مورد نیاز گیاه

به‌منظور محاسبه‌ی نیاز آبی گوجه‌فرنگی از سه عدد میکرولایسیمتر استفاده شد. برای به‌دست آوردن میزان آب آبیاری میکرولایسیمترها از روش وزنی Pelesco و Alagao (2014) استفاده شد:

$$W_U = (W_L + W_2) - (W_1 + W_D) \quad (۱)$$

W_U= آب مصرفی (گرم)
W_1= وزن میکرولایسیمتر پس از آبیاری (گرم)
W_2= وزن آب آبیاری (گرم)
W_L=وزن میکرولایسیمتر قبل از آبیاری (گرم)
W_D = وزن زهاب (گرم)

به‌منظور برآورد نیاز خالص و ناخالص آبیاری در گلدان‌ها از روابط زیر استفاده شد:

$$d = \frac{W_2 - W_D}{A} \quad (۲)$$

d= عمق خالص آبیاری (میلی‌متر)
A= مساحت میکرولایسیمتر (مترمربع)

به‌منظور کاهش تجمع املاح و برای اطمینان از تأمین آب مناسب گیاه، جزء آبشویی ۲۵-۲۰ درصد در نظر گرفته شد.

$$\mathrm{GWR} = \frac{d}{1-D} \quad (۳)$$

GWR= نیاز ناخالص آبیاری (میلی‌متر)
d= نیاز خالص آبیاری (میلی‌متر)
D= جزء آبشویی (۰/۲۵-۰/۲)

محلول غذایی و آب مورد نیاز گیاه از طریق سیستم آبیاری قطره‌ای به گیاه داده شد. دما و رطوبت نسبی گلخانه، روزانه توسط حسگر دیجیتال اندازه‌گیری و ثبت شد. میانگین اطلاعات هواشناسی (به‌ترتیب ماه‌های دی، بهمن، اسفند، فروردین، اردیبهشت و خرداد) در طول دوره‌ی پژوهش در جدول (۲) ارائه شده‌است.

ارزیابی تنش آبی گیاه به روش طیف سنجی

در این تحقیق برای بررسی تغییرات طیفی در برگ گیاه گوجه-فرنگی، نمونه‌گیری‌ها در ماه‌های فوریه، مارچ، آوریل و می (به‌ترتیب مراحل رشد رویشی، گلدهی، تشکیل و رسیدگی میوه) هم‌زمان با سایر اندازه‌گیری‌ها انجام شد. در هر روز از نمونه‌گیری، تعداد ۱۲۰ نمونه از برگ گیاه گوجه‌فرنگی مورد طیف‌سنجی قرار گرفت. به-منظور اندازه‌گیری، ثبت و تهیه منحنی طیفی نمونه‌های گیاهی از دستگاه طیف‌سنج زمینی به نام ASD Fieldspec3 استفاده شد. این دستگاه در دسته‌ی دستگاه‌هایی با دامنه طیفی کامل بوده و قادر است در هر مرحله از اندازه‌گیری، محدوده طول موج‌های۲۵۰۰ - ۳۰۰ نانومتر را ثبت کند. در این پژوهش طیف انعکاسی از پوشش سبز گیاه برای هر تیمار اندازه‌گیری شد، سپس چندین شاخص انعکاس طیفی طبق جدول (۳) محاسبه و بررسی شدند.

جدول ۲-میانگین اطلاعات هواشناسی در طول فصل رشد

Table 2- Averag of Climate Information During the Growing Season

Month	Temperature mean	Relative humidity (%)
January	20.5	63
February	22.7	74
March	22.8	56
April	28.2	32
May	31.6	28
June	34	29

جدول ۳- شاخص‌های طیفی مورد استفاده در پژوهش

Table3- Spectral indices used in research

Index names	Index	Formulation	Reference
Water content indices	NWI-5	$(R_{970} - R_{910})/(R_{970} + R_{910})$	Elsayed et al., 2017
	WI1 (900;970)	R_{900}/R_{970}	Penuelas et al., 1993
	WI2(976;888)	R_{976}/R_{888}	
	WI3(974;904)	R_{974}/R_{904}	Elsayed et al., 2021
	WI4(988;895)	R_{988}/R_{895}	
Greenness indices	RDVI	$(R_{800} - R_{670})/(R_{800} + R_{670})^{1/2}$	Roujean and Breon, 1995
	OSAVI	$(1 + 0.16)(R_{800} - R_{670})/(R_{800} + R_{670} + 0.16)$	Haboudane et al., 2002
	NDVI	$(R_{750} - R_{705})/(R_{750} + R_{705})$	Gitelson and Merzlyak, 1994

 DOI: 10.22055/jise.2024.46568.2121

محتوای نسبی آب برگ

به‌منظور اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ گیاه (RWC) به‌صورت ماهانه، در روزهایی که سایر اندازه‌گیری‌ها انجام شد، برگی از برگ‌های جوان کاملاً توسعه‌یافته از هر تیمار (گلدان)، به‌طور تصادفی انتخاب شد. به‌منظور تازه نگه‌داشتن نمونه‌ها تا زمان انتقال آن‌ها به آزمایشگاه، نمونه‌ها را در پلاستیک در بسته قرار داده و با ظرف حاوی تکه‌های یخ به سرعت به آزمایشگاه، انتقال و وزن تر آن‌ها اندازه‌گیری شد. برای محاسبه‌ی وزن اشباع، نمونه‌ها به مدت چهار ساعت در دمای اتاق و نور کم در آب مقطر غوطه‌ور شدند. بعد از طی مدت زمان آب‌گیری، برگ‌ها با به آرامی خشک و بلافاصله توزین شدند. سپس برگ‌ها در آون با دمای ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت خشک شدند و وزن خشک به‌دست آمد. برای اندازه‌گیری وزنی RWC از رابطه Schlemmer et al. (2005) استفاده شد:

$$RWC = \frac{W_f - W_d}{W_s - W_d} \quad (۴)$$

که در آن W_f، وزن تر برگ، W_d، وزن خشک برگ و W_s وزن اشباع برگ است.

تحلیل‌های آماری

به‌منظور اندازه‌گیری طیفی نمونه‌ها و پردازش اولیه منحنی‌های طیفی از نرم‌افزارهای ViewSpecPro و SAMS، تجزیه و تحلیل آماری متغیرها و بررسی مقایسه میانگین‌ها (آزمون LSD) با استفاده از نرم‌افزارSAS9/4 انجام شد. در انتها از رگرسیون خطی ساده جهت بررسی همبستگی بین شاخص‌های طیفی مورد مطالعه با شاخص فیزیولوژیکی گیاه (محتوای نسبی آب برگ) استفاده شد. جهت بررسی معنی‌داری ضریب تعیین (R^2) در سطح پنج و یک درصد از نرم افزار SPSS16 استفاده شد.

به‌منظور ارزیابی مدل‌های، از چند معیار آماری از جمله ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی در ماه‌های مختلف و متوسط کل دوره تحت اثرات جداگانه و توأمان رژیم آبیاری و نانوذرات سیلیکا در جدول (۴) ارائه شده‌است. بر اساس این نتایج، مقادیر محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی در متوسط کل دوره (The whole period) و در تمام ماه‌ها بجز ماه فوریه تحت تأثیر رژیم آبیاری قرار گرفت. در این مطالعه اثر استفاده از نانوذرات بر محتوای نسبی آب برگ در ماه‌های مارچ، آوریل و متوسط کل دوره (The whole period) معنی‌دار یافت شد. علاوه بر این، در هیچ یک از مراحل اندازه‌گیری و همچنین به‌طور متوسط در کل دوره تحقیق تأثیر توأمان رژیم آبیاری و نانوذرات سیلیکا روی این شاخص معنی‌دار یافت نشد.

با توجه به نتایج مقایسه میانگین جدول (۵)، اگر چه مقادیر محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی با افزایش تنش آبی کاهش یافته‌است با این حال مقدار این شاخص در آبیاری کامل و آبیاری برای تأمین ۶۰ درصد نیاز آبی در طول دوره اندازه‌گیری‌ها (ماه‌های مختلف) معنی‌دار یافت شد. علاوه بر این، مقدار این شاخص در ماه‌های مارچ، آوریل و متوسط کل دوره (The whole period) در سطح احتمال پنج درصد، تحت تأثیر معنی‌دار نانو ذره قرار گرفت.

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۵)، اگرچه افزایش هرچه بیشتر تنش آبی موجب کاهش بیشتر شاخص محتوای نسبی آب برگ شد، اما در متوسط کل دوره مقدار کاهش این شاخص در بین رژیم‌های مختلف آبیاری معنی‌دار یافت نشد. شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه فرنگی درتیمار نانو ذره با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نسبت به تیمار با غلظت صفر میلی‌گرم بر لیتر بیش‌تر بود. به‌طور کلی استفاده از نانوذرات سیلیکا باعث بهبود و افزایش محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی شد. در پژوهشی Ebrahimi (2020) به بررسی تأثیر اثر نانو سیلیس بر کشت گلخانه‌ای گوجه‌فرنگی تحت شرایط تنش خشکی پرداخته‌اند. آن‌ها بیان کردند محتوای نسبی آب برگ گیاه، با استفاده از نانو ذرات سلیکا افزایش پیدا کرده‌است. در پژوهشی دیگر Shokri et al. (2021) روی گیاه خیار گلخانه‌ای نشان دادند که کاربرد نانو ذرات سلیکا، به‌طور قابل توجهی اثرهای منفی و مخرب تنش آبی را بر محتوای نسبی آب برگ کاهش می‌دهد. اثر متقابل تیمارهای آبیاری و نانوذرات سیلیکا بر روی شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی، معنی‌دار یافت نشد. در بین شش تیمار در متوسط کل دوره (The whole period) ، تیمار $I_{100}F_{100}$ با ۸۵/۲۳ درصد بالاترین و تیمار $I_{60}F_0$ ۸۱/۴۹ درصد پایین‌ترین شاخص محتوای نسبی آب برگ را داشتند.

طیف بازتاب گیاه

جذب امواج طیفی در محدوده ۳۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر توسط ملکول‌های آب سبب کاهش بازتاب طیفی از سطح برگ می‌شود. زمانی که گیاه دچار تنش آبی می‌شود و محتوای آب برگ کاهش می‌یابد، جذب کاهش یافته و بازتابش از برگ گیاه افزایش می‌یابد. بنابراین، گیاهی که محتوای نسبی آب برگ کمتری دارد، بازتاب طیفی بیشتری از خود نشان می‌دهد. شکل (۱)، میانگین بازتاب طیفی از برگ گیاه گوجه فرنگی را تحت تأثیر تیمارهای تنش آبی و نانوذره در چهار ماه مورد مطالعه نشان می‌دهد. هر شش تیمار روند مشابهی را از خود نشان دادند. بیشترین بازتاب طیفی در تیمار $I_{60}F_0$ و کمترین در تیمار $I_{100}F_{100}$ مشاهده شد. Ihuoma و Madramootoo (2019) در پژوهشی به بررسی اثر تیمارهای مختلف آبیاری بر طیف بازتاب شده از گیاه گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای در دو مرحله از رشد (گلدهی و تشکیل میوه) پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند با افزایش تنش آبی، طیف بازتابی از سطح برگ افزایش می‌یابد.

جدول٤- نتایج تجزیه واریانس اثر رژیم آبیاری، نانوذرات سیلیکا و برهم کنش آن ها بر محتوای نسبی آب برگ

Table 4-The results of variance analysis of the effect of irrigation regime, silica nanoparticles, and their interaction on relative leaf water content

Source of variation	Degree of freedom	Mean square				
		February	March	April	May	The whole period
Irrigation regimes (I)	2	11.41^{ns}	17.68**	15.19**	63.49**	42.58**
Error I	9	7.38	26.98	36.52	28.12	118.4
Nanoparticles(N)	1	4.59^{ns}	17.02**	10.61**	9.67^{ns}	9.98**
I * N	2	0.499^{ns}	2.60^{ns}	2.81^{ns}	0.23^{ns}	1.13^{ns}
Error N	9	18.12	5.08	1.81	23.98	1.53
CV(%)		1.56	1.89	2.01	2.91	1.64

**, *, ns: significant effect at 1%, 5%, and no significant effect, respectively

جدول٥-مقایسه ی میانگین محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه فرنگی در رژیم‌های متفاوت آبیاری و نانو ذرات سیلیکا

Table 5- Comparison of the mean of the relative water content of tomato plant leaves in different irrigation regimes and silica nanoparticles

Treatments	Percentage of relative water content of tomato plant leaves (RWC)				
	February	March	April	May	The whole period
Irrigation regime					
I_{100}	87.34^{a}	85.98^{a}	83.92^{a}	82.15^{a}	84.85^{a}
I_{80}	86.16^{a}	84.47^{b}	82.49^{ab}	80.58^{b}	83.43^{a}
I_{60}	85.91^{b}	84.04^{b}	81.64^{b}	77.99^{c}	82.39^{a}
Nanoparticles (mg/l)					
F_0	86.03^{a}	83.99^{a}	82.02^{a}	79.59^{a}	82.91^{a}
F_{100}	86.91^{a}	85.67^{b}	83.35^{b}	80.86^{a}	84.20^{b}
I * N					
$I_{100}F_{100}$	87.79^{a}	86.33^{a}	84.22^{a}	82.58^{a}	85.23^{a}
$I_{100}F_0$	87.17^{ab}	85.54^{a}	83.84^{a}	81.46^{a}	84.50^{a}
$I_{80}F_{100}$	86.54^{ab}	85.44^{a}	83.31^{a}	81.35^{a}	84.16^{ab}
$I_{80}F_0$	86.42^{ab}	84.93^{ab}	83.06^{a}	80.21^{ab}	83.28^{bc}
$I_{60}F_{100}$	85.82^{ab}	83.53^{bc}	81.67^{ab}	78.70^{bc}	82.81^{c}
$I_{60}F_0$	85.14^{b}	82.58^{bc}	81.09^{ab}	77.15^{bc}	81.49^{d}

Mean with the same letter in each column and for each Treatment are not significantly different based on the LSD test at the 5% level

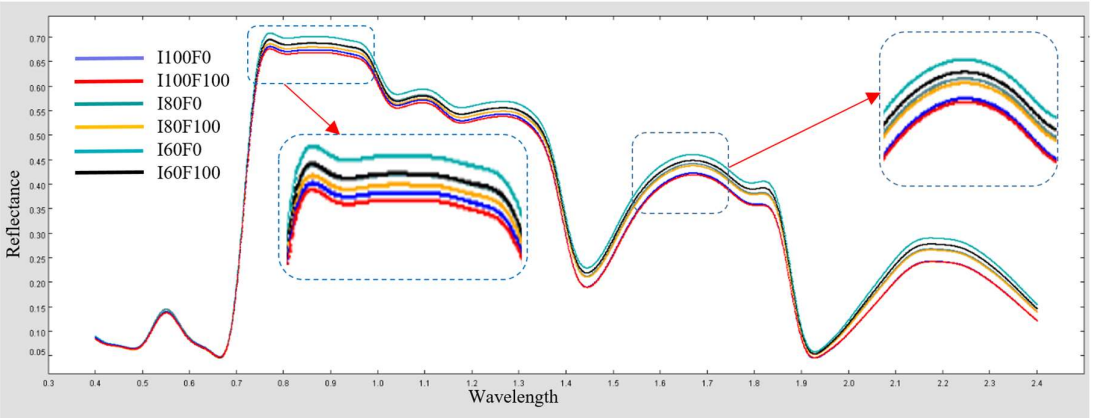


Fig.1- Leaf reflection spectrum of tomato plant in water stress and nanoparticles treatments

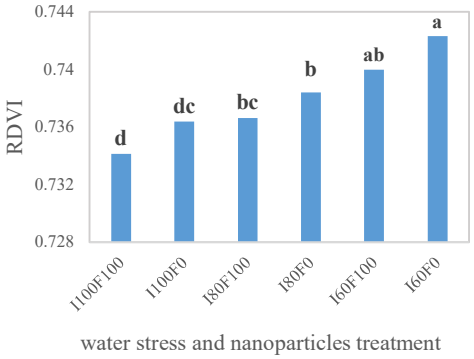
شکل۱- طیف بازتاب برگ گیاه گوجه فرنگی در تیمارهای تنش آبی و نانوذره

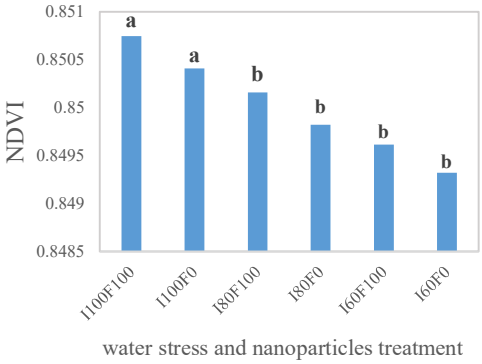
شاخص‌های‌طیفی

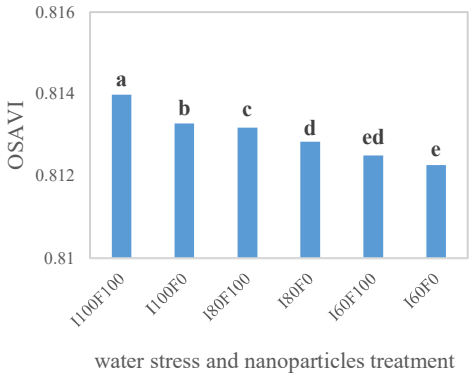
مقادیر اندازه‌گیری شده از بازتاب برگ برای محاسبه شاخص‌های طیفی که در جدول (۳) ارائه شده، استفاده شدند. شکل (۲)، اثر توأمان رژیم‌های آبیاری و نانوذرات را بر تغییرات شاخص‌های طیفی مورد مطالعه در گیاه گوجه‌فرنگی را نشان می‌دهد. شاخص‌های NDVI، WI1 و OSAVI با افزایش تنش

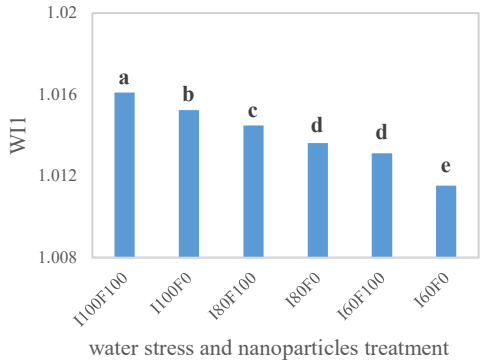
DOI: 10.22055/jise.2024.46568.2121

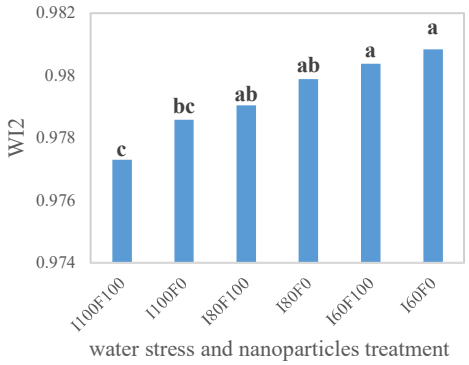
آبی کاهش یافتند. اما شاخص‌های WI2، WI3، WI4، NWI5 و RDVI با افزایش تنش آبی، افزایش یافتند. همچنین در تمام شاخص‌های مورد مطالعه، تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای ۶۰ درصد و ۱۰۰ درصد نیاز آبی مشاهده گردید. El-Hendawy et al. (2019) در پژوهشی با بررسی تغییرات شاخص‌های طیفی برگ گیاه گندم در شرایط تنش آبی نشان دادند که با افزایش تنش آبی شاخص طیفی WI1 کاهش، اما شاخص NWI5 افزایش می‌یابد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که این شاخص‌ها می‌تواند با موفقیت تنش آبی را در گیاه گندم نشان دهند. Elsayed et al. (2021) نیز بیان کردند که مقدار شاخص‌های طیفی مستخرج از برگ گیاه گندم در دو سال متوالی، با تیمارهای آبیاری مورد مطالعه (۱۰۰ ET_C درصد، ۷۵ ET_C درصد و ۵۰ ET_C درصد) رابطه معنی‌داری دارند. آن‌ها نشان دادند با افزایش تنش آبی شاخص‌های طیفی WI2، WI3 و WI4 افزایش یافته و مقدار شاخص WI1 کاهش می‌یابد.

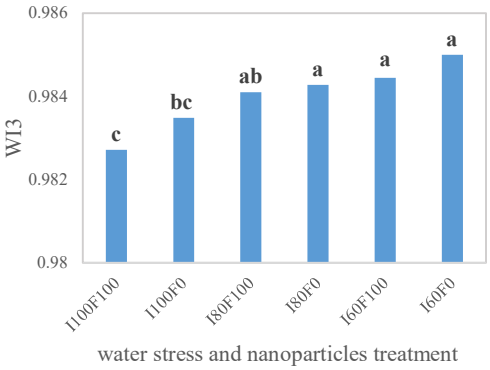












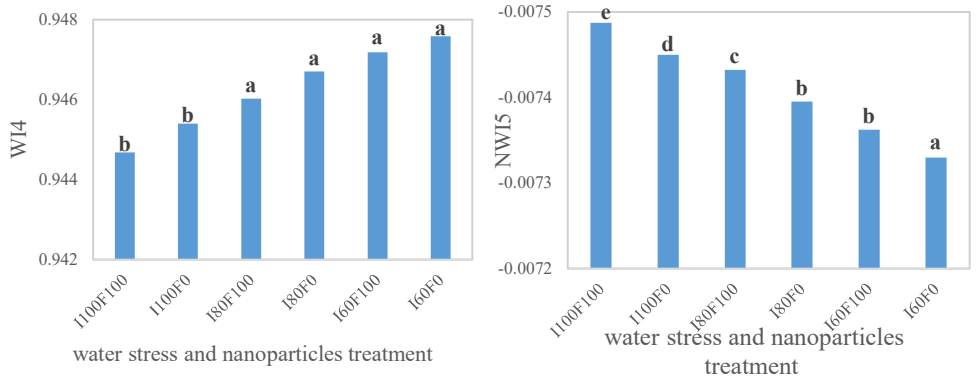


Fig.2- The response of different spectral indices to water stress and silica nanoparticles in tomato plants

***mean values with the same letter are not significantly different based on the LSD test at the 5% level**

شکل۲- تغییرات شاخص‌های طیفی در تیمارهای تنش آبی و نانوذرات

***میانگین‌های دارای حروف مشترک، بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌داری ندارند.**

براساس مقدار متوسط شاخص‌های طیفی مورد مطالعه در طول دوره تحقیق جدول (۶)، با افزایش تنش آبی مقدار شاخص WI1، NDVI و OSAVI کاهش و مقدار شاخص RDVI، NWI5 ، WI2، WI3 و WI4 افزایش یافت. علاوه بر این، در طول دوره مقدار شاخص WI1، NDVI و OSAVI در گیاه گوجه‌فرنگی در تیمار حاوی ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانو ذره بیش‌تر از این مقدار در تیمار بدون نانوذره بود. اما این افزایش تنها در شاخص WI1 معنی‌دار بود. همچنین مقدار شاخص‌های RDVI، NWI5، WI2 ، WI3 و WI4 در تیمار حاوی ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانو ذره کمتر تیمار بدون نانوذره مشاهده شد. اما به طور متوسط در میانگین کل دوره (The whole period) این کاهش تنها در شاخص RDVI و WI2 معنی‌دار یافت شد. بر اساس نتایج جدول مقایسه میانگین جدول (۶)، شاخص‌های طیفی RDVI،WI1 و WI2 در هر چهار ماه از اندازه‌گیری‌ها به‌طور معنی‌دار تحت تأثیر نانوذره قرار گرفت. همچنین مقدار شاخص‌های طیفی RDVI، NWI5، WI1 ، WI2، WI3 و WI4 در طول دوره به طور معنی‌دار تحت تأثیر رژیم آبیاری ۶۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبیاری قرار گرفت. نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیق Asgari et al. (2023) که نشان دادند مقدار شاخص طیفی WI1 در دو رقم درخت زیتون، با افزایش سطح تنش آبی، کاهش یافت، مطابقت دارد. آن‌ها همچنین بیان کردند با افزایش تنش آبی مقدار شاخص NWI5 افزایش یافته است. در تحقیق دیگری Ihuoma و Madramootoo (2019) به این نتیجه رسیدند که مقدار شاخص WI1، NDVI و OSAVI در گیاه گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای در شرایط تنش آبی نسبت به شرایط آبیاری کامل، کاهش قابل توجهی یافته‌است. Elsayed et al. (2021) نشان دادند که مقدار شاخص طیفی WI1 درگیاه گندم بهاره در تیمار آبیاری کامل نسبت به شرایط تنش آبی بیشتر بود. آن‌ها همچنین سه شاخص جدید WI2 ، WI3 و WI4 را معرفی کردند و بیان کردند که مقدار هر سه شاخص با افزایش تنش آبی، افزایش یافته‌است. همچنین تحقیق حاضر با نتایج Penuelas et al. (1993) که نشان داد، شاخص آب WI1 با افزایش شاخص محتوای نسبی آب در گیاه فلفل گلخانه ای در شرایط تنش آبی افزایش یافته است، مطابقت دارد.

جدول (۷)، ضریب تعیین(R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) شاخص‌های طیفی را در برآورد شاخص محتوای نسبی آب برگ در چهار ماه اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که شاخص‌های طیفی مورد مطالعه با شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه فرنگی در طول دوره ارتباط داشت.

بر اساس نتایج جدول (۷)، رابطه میان شاخص‌های طیفی مورد مطالعه با شاخص‌های محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی در چهار ماه اندازه‌گیری‌ها متغیر بوده و قادرند از ۰/۴۹ تا ۰/۷۸ تغییرات شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی را تحت تأثیر تنش آبی در طول دوره برآورد کنند. براساس نتایج تحقیق حاضر به‌طور کلی شاخص طیفی نرمال آب۵ (NWI5) با داشتن بیشترین NRMSE، RMSE و کمترین ضریب تعیین (R^2) و شاخص‌های WI1 و WI2 با داشتن کمترین مقدار NRMSE، RMSE و بیشترین ضریب تعیین (R^2)، به ترتیب ضعیف ترین و قوی‌ترین عملکرد را در برآورد شاخص محتوای نسبی آب برگ در طول اندازه گیری‌ها نشان دادند. پنج شاخص طیفی آب WI1، WI2، WI3، WI4 و NWI5 مورد استفاده در پژوهش از نسبت انعکاس طول موج‌هایی که در عمق بیشتری از برگ نفوذ کرده به طول موج هایی که خارج از محدوده‌ی جذب آب بوده، می‌باشد. بنابراین این شاخص‌ها توانایی تخمین دقیق‌تری از محتوای آب برگ گیاه را دارا می‌باشند (Romero et al., 2017; Elsayed et al., 2021).

DOI: 10.22055/jise.2024.46568.2121

علاوه بر این، ساختار سه شاخص سبزینگی NDVI، OSAVI و RDVI براساس میزان جذب در محدوده طیفی ناحیه مرئی (۷۰۰–nm۴۰۰) و مادون قرمز نزدیک (۷۰۰–nm۱۳۰۰) بوده و شامل اطلاعات مفید از ساختار درونی برگ، سلامت گیاه و کلروفیل می‌باشد (El-Hendawy et al., 2019). بنابراین در پایش وضعیت آب گیاه ناشی از تنش‌های آبی، مفید می‌باشند.

شکل (۳)، مدل رگرسیون خطی میان شاخص‌های طیفی مورد مطالعه و شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی را به‌طور متوسط در دوره‌ی تحقیق نشان می‌دهد. با توجه به ضریب تعیین به‌دست آمده از ارتباط بین شاخص‌های طیفی و شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه فرنگی در میانگین کل دوره، شاخص‌های WI2، WI1، WI3، WI4، RDVI، OSAVI، NDVI و NWI5 به‌ترتیب رابطه بهتری با شاخص محتوای نسبی آب برگ نشان دادند.

جدول٦-مقایسه ی میانگین شاخص‌های طیفی گیاه گوجه فرنگی در رژیم‌های منفاوت آبیاری و نانو ذرات سیلیکا

Table 6- Mean values of spectral indices of tomato plants in different regimes of irrigation and silica nanoparticles

	Treatments	NDVI	RDVI	OSAVI	WI1	WI2	WI3	WI4	NWI5
February	Irrigation regime(%)								
	I_{100}	0.8519^{a}	0.7311^{a}	0.8143^{a}	1.0163^{a}	0.9757^{a}	0.9803^{a}	0.9421^{a}	-0.00752^{a}
	I_{80}	0.8513^{a}	0.7327^{ab}	0.8135^{a}	1.0150^{b}	0.9762^{b}	0.9812^{b}	0.9434^{a}	-0.00747^{a}
	I_{60}	0.8508^{a}	0.7360^{b}	0.8129^{a}	1.0129^{c}	0.9770^{c}	0.9814^{b}	0.9444^{b}	-0.00740^{b}
	Nanoparticles (mg/l)								
	F_0	0.8511^{a}	0.7341^{a}	0.8133^{a}	1.0141^{a}	0.9765^{a}	0.9812^{a}	0.9436^{a}	-0.00744^{a}
	F_{100}	0.8515^{a}	0.7324^{b}	0.8137^{a}	1.0154^{b}	0.9760^{b}	0.9807^{b}	0.9430^{a}	-0.00748^{a}
March	Irrigation regime(%)								
	I_{100}	0.8515^{a}	0.7327^{a}	0.8139^{a}	1.0163^{a}	0.9767^{a}	0.9818^{a}	0.9438^{a}	-0.00750^{a}
	I_{80}	0.8509^{a}	0.7342^{b}	0.8133^{a}	1.0142^{b}	0.9775^{b}	0.9826^{b}	0.9452^{a}	-0.00744^{a}
	I_{60}	0.8504^{a}	0.7378^{c}	0.8127^{a}	1.0126^{c}	0.9783^{c}	0.9829^{b}	0.9462^{b}	-0.00737^{b}
	Nanoparticles (mg/l)								
	F_0	0.8508^{a}	0.7358^{a}	0.8132^{a}	1.0137^{a}	0.9780^{a}	0.9826^{a}	0.9453^{a}	-0.00742^{a}
	F_{100}	0.8511^{a}	0.7340^{b}	0.8135^{a}	1.0150^{b}	0.9769^{b}	0.9822^{a}	0.9448^{a}	-0.00745^{a}
April	Irrigation regime(%)								
	I_{100}	0.8497^{a}	0.7365^{a}	0.8134^{a}	1.0154^{a}	0.9780^{a}	0.9844^{a}	0.9459^{a}	-0.00745^{a}
	I_{80}	0.8491^{a}	0.7384^{ab}	0.8127^{a}	1.0139^{b}	0.9809^{b}	0.9857^{b}	0.9472^{a}	-0.00739^{a}
	I_{60}	0.8486^{a}	0.7419^{b}	0.8124^{a}	1.0121^{c}	0.9823^{c}	0.9867^{b}	0.9482^{b}	-0.00733^{b}
	Nanoparticles (mg/l)								
	F_0	0.8490^{a}	0.7404^{a}	0.8126^{a}	1.0133^{a}	0.9810^{a}	0.9858^{a}	0.9475^{a}	-0.00737^{a}
	F_{100}	0.8493^{a}	0.7376^{b}	0.8131^{a}	1.0143^{b}	0.9798^{b}	0.9854^{a}	0.9467^{a}	-0.00741^{a}
M	Irrigation regime(%)								

	I_{100}	0.8493[a]	0.7407[a]	0.8130[a]	1.0148[a]	0.9814[a]	0.9860[a]	0.9485[a]	-0.00742[a]
	I_{80}	0.8487[a]	0.7447[ab]	0.8124[a]	1.0132[b]	0.9834[b]	0.9873[b]	0.9496[a]	-0.00737[a]
	I_{60}	0.8481[a]	0.7489[b]	0.8116[a]	1.0117[c]	0.9848[c]	0.9879[b]	0.9508[b]	-0.00730[b]
	Nanoparticles (mg/l)								
	F_0	0.8485[a]	0.7459[a]	0.8121[a]	1.0128[a]	0.9836[a]	0.9873[a]	0.9499[a]	-0.00734[a]
	F_{100}	0.8488[a]	0.7437[b]	0.8126[a]	1.0136[b]	0.9829[b]	0.9867[b]	0.9493[a]	-0.00738[a]
The whole period	Irrigation regime(%)								
	I_{100}	0.8506[a]	0.7353[a]	0.8136[a]	1.0157[a]	0.9779[a]	0.9831[a]	0.9450[a]	-0.00747[a]
	I_{80}	0.8500[a]	0.7375[ab]	0.8130[a]	1.0141[b]	0.9795[b]	0.9842[b]	0.9464[b]	-0.00741[a]
	I_{60}	0.8495[a]	0.7412[b]	0.8124[b]	1.0123[c]	0.9806[c]	0.9847[b]	0.9474[b]	-0.00735[b]
	Nanoparticles (mg/l)								
	F_0	0.8499[a]	0.7390[a]	0.8128[a]	1.0135[a]	0.9798[a]	0.9843[a]	0.9466[a]	-0.00739[a]
	F_{100}	0.8502[a]	0.7369[b]	0.8132[a]	1.0146[b]	0.9789[b]	0.9838[a]	0.9460[a]	-0.00743[ab]

Mean with the same letter in each column and for each Treatment are not significantly different based on the LSD test at the 5% level

جدول۷- مقادیر ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) شاخص‌های طیفی در برآورد شاخص محتوای آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی

Table 7- Values of R^2, RMSE, and NRMSE for each spectral indices to Estimate relative water content (RWC) in tomato plants

Spectral indices	February			March			April			May		
	R^2	RMSE	NRMSE	R^2	RMSE	NRMSE	R^2	RMSE	NRMSE	R^2	RMSE	NRMSE
NDVI	0.59	1.23	0.149	0.68	0.62	0.072	0.62	0.77	0.091	0.58	1.48	0.184
RDVI	0.61	1.21	0.147	0.67	0.59	0.068	0.60	0.76	0.090	0.56	1.50	0.187
OSAVI	0.58	0.95	0.150	0.55	0.58	0.067	0.59	0.83	0.099	0.56	1.51	0.189
WI1	0.69	0.95	0.115	0.74	0.51	0.059	0.69	0.64	0.075	0.64	1.26	0.157
WI2	0.69	1.08	0.130	0.78	0.56	0.064	0.68	0.59	0.071	0.66	1.25	0.155
WI3	0.63	1.11	0.134	0.63	0.60	0.069	0.69	0.72	0.084	0.7	1.40	0.175
WI4	0.64	1.16	0.140	0.62	0.55	0.064	0.65	0.70	0.083	0.69	1.41	0.175
NWI5	0.55	1.24	0.153	0.49	0.66	0.075	0.53	0.89	0.1	0.52	1.87	0..23

DOI: 10.22055/jise.2024.46568.2121

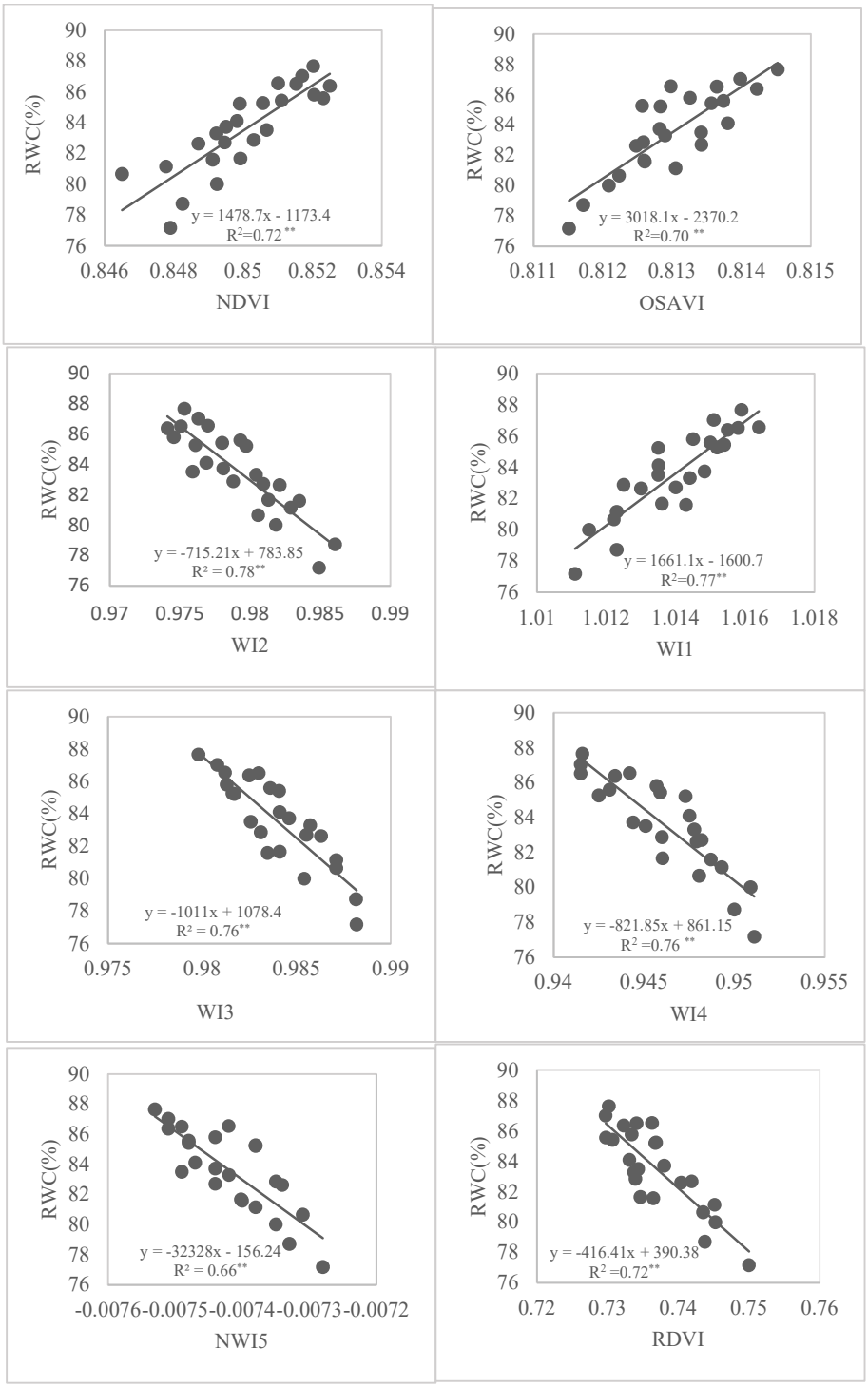


Fig.3- The Linear regression relationship between spectral indices (WI1-4, NWI5, NDVI, RDVI, and OSAVI) and relative water content (RWC) of tomato plants under water stress and silica nanoparticles in the whole research period with linear regressions fitted.

**, *: significant effect at 1% and 5% respectively.

شکل ۳- مدل رگرسیون خطی میان شاخص‌های طیفی و محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه فرنگی تحت رژیم آبیاری و نانو ذرات سیلیکا در کل دوره تحقیق

**، *: اثر معنی‌دار به ترتیب در سطح ۱درصد و ۵درصد.

براساس نتایج به‌دست آمده شاخص طیفی NWI5 (۰/۶۶) کمترین و شاخص WI2 (۰/۷۸) بیشترین ضریب تعیین را با شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه فرنگی در متوسط کل دوره نشان داد. رابطه معنی‌دار میان شاخص‌های طیفی مورد مطالعه و محتوای نسبی آب برگ، نشان دهنده مفید و کارآمد بودن این شاخص‌ها در بررسی سریع تغییرات تنش آبی گیاه گوجه‌فرنگی با استفاده از روش طیف‌سنجی می‌باشد که نتایج Ihuoma و Madramootoo (2019) را که نشان دادند شاخص‌های طیفی آب WI و شاخص‌های طیفی سبزینگی RDVI، OSAVI و NDVI با محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای ارتباط نزدیک دارند ($۰/۶۱<R^2<۰/۸۶$) را تأیید می‌کند.

Elsayed et al. (2021) نشان دادند سه شاخص جدید WI2، WI3 و WI4 ارتباط قوی و معنی‌دار با پارامترهای پتانسیل آب برگ و شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه گندم در شرایط تنش آبی دارند.

در تحقیقی دیگر Elsayed et al. (2017) با معرفی شاخص NWI5، به بررسی ارتباط میان این شاخص با محتوای نسبی آب برگ در دو رقم گندم بهاره تحت رژیم‌های متفاوت آبیاری پرداخته و نشان دادند شاخص NWI5، ارتباط معنی‌دار ($۰/۵۴<R^2<۰/۸$) با شاخص محتوای نسبی آب برگ داشت. Asgari et al. (2023) در پژوهشی به بررسی شاخص‌های طیفی NWI1، NWI2، NWI3، NWI4، NWI5 و NWI960-940 با شاخص محتوای نسبی آب برگ دو رقم درخت زیتون، در شرایط تنش آبی پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند شاخص های طیفی مورد مطالعه ارتباط قوی و معنی داری ($۰/۲۶<R^2<۰/۷۶$) با محتوای نسبی آب برگ درخت زیتون داشتند.

همچنین Wang et al. (2021) بیان کردند شاخص‌های طیفی OSAVI، NDVI و RDVI مستخرج از طیف منعکس شده برگ گیاه ذرت خوشه‌ای از نظر آماری ارتباط خطی و نزدیک با محتوای نسبی آب برگ گیاه ($R^2>۰/۷$) دارند.

علاوه بر این Yasir et al. (2022) در مطالعه‌ای به بررسی محتوای نسبی آب ۱۰ گونه خاص گیاهی با شاخص طیفی آب (WI) پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد شاخص طیفی آب (WI)، رابطه معنی‌داری و قوی با محتوای آب برگ گیاهان مورد بررسی داشت.

صحت‌سنجی مدل پیش‌بینی شاخص محتوای نسبی آب برگ با استفاده از شاخص‌های طیفی

ابتدا با استفاده از اطلاعات جمع آوری شده در سه ماه فوریه، مارچ و آوریل (۷۲ داده) رابطه‌ی خطی میان شاخص‌های طیفی و شاخص محتوای نسبی آب برگ گوجه‌فرنگی (RWC) واسنجی شد. سپس روابط تعیین شده در مرحله‌ی واسنجی، با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده در ماه می (۲۴ داده)، صحت‌سنجی گردید. در شکل (۴) رابطه‌ی خطی میان مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی، ویژگی‌های آماری شیب، عرض از مبدأ، ضریب تعیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نشان داده شده است. نتایج نشان داد که شاخص‌های طیفی مورد مطالعه در تخمین مقادیر شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی به‌عنوان شاخصی از تنش آبی گیاه، موثر هستند. شاخص دقیق‌تر مقدار R^2 بیشتر، RMSE کمتر و شیب بیشتری دارد. بر اساس این نکته به ترتیب شاخص‌های WI2، WI3، WI4، WI1، OSAVI، RDVI، NDVI، و NWI5 دقت بیشتری در پیش‌بینی محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی داشتند. نتایج Asgari et al. (2023) نیز نشان داد پارامترهای محتوای آب برگ با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی بر اساس شاخص‌های طیفی مانند NWI5 و WI1 با دقت بالایی قابل برآورد هستند.

 DOI: 10.22055/jise.2024.46568.2121

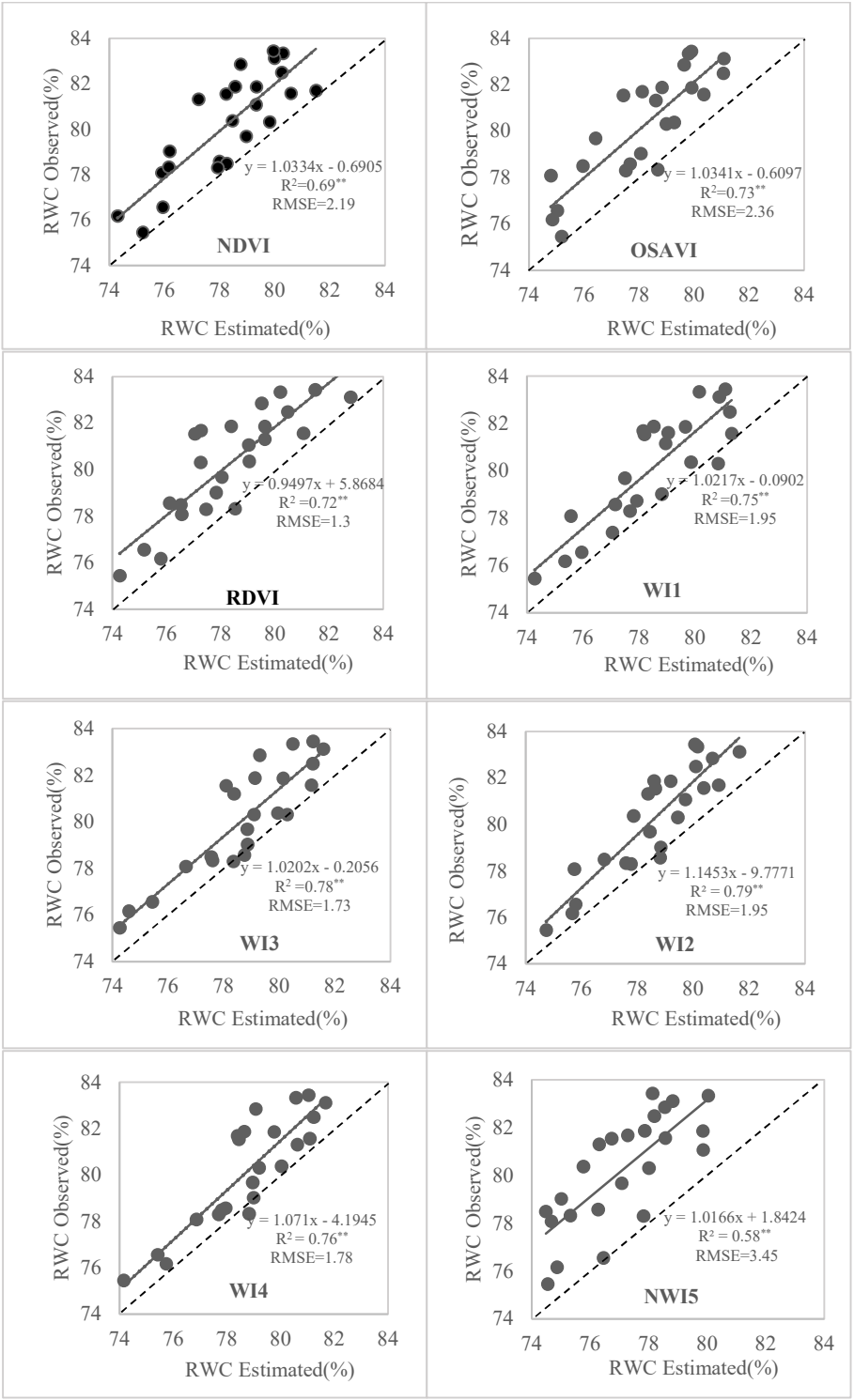


Fig.4- The Linear regression relationship between observed and predicted values of relative water content (RWC) of tomato plants based on the data of eight spectral indices studied.

**, *: significant effect at 1% and 5% respectively.

شکل٤- مدل رگرسیون خطی میان مقادیر اندازه‌گیری شده و پیشبینی شده محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه فرنگی بر اساس هشت شاخص طیفی مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

گیاه گوجه‌فرنگی جز محصولات راهبردی در بخش کشاورزی است. با توجه به نیاز بالای گوجه فرنگی و کمبود آب، لزوم مدیریت مطلوب مصرف آب و برنامه‌ریزی آبیاری برای پایداری تولید محصولات کشاورزی وجود دارد. به‌منظور مدیریت بهینه مصرف آب در کشاورزی و تشخیص تنش در گیاه، استفاده از روش‌های نوین و غیر مخرب سنجش از راه دور، مورد نیاز است.

در این پژوهش قابلیت شاخص‌های طیفی آب، از جمله شاخص آب ۱-۴ (WI1-4)، شاخص نرمال آب ۵ (NWI5)، شاخص‌های طیفی سبزینگی RDVI، NDVI و OSAVI در بررسی وضعیت تنش آبی گیاه گوجه فرنگی تحت تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری و نانو ذرات سیلیکا در شرایط گلخانه‌ای از طریق تعیین ارتباط میان شاخص‌های طیفی و شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه (RWC) مورد بررسی قرار گرفت. از بین هشت شاخص طیفی مورد بررسی، شاخص‌های طیفی WI2 و WI1 بالاترین ضریب تعیین را با شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی داشتند. ارتباط معنی‌دار میان شاخص‌های طیفی و شاخص محتوای نسبی آب برگ، امکان بررسی سریع و غیر مخرب تغییرات وضعیت آبی گیاه گوجه‌فرنگی را در شرایط گلخانه ای با استفاده از روش طیف سنجی نشان داده و می‌تواند معیار خوبی برای بیان وضعیت آب گیاه باشد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

حمایت های مالی این تحقیق از محل اعتبار پژوهشی شماره پژوهانه SCU.WI1402.144 صورت گرفته است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: آناهیتا هادی قنوات، انجام پژوهش، تجزیه و تحلیل داده ها ، همکاری در تهیه مقاله.

نویسنده دوم: عبدالرحیم هوشمند، نظارت بر انجام پژوهش، بررسی نتایج ، همکاری در تهیه مقاله

نویسنده سوم: پروانه تیشه زن، نظارت بر انجام پژوهش، بررسی نتایج و تجزیه و تحلیل داده ها، همکاری در تهیه مقاله

نویسنده چهارم: ناصر عالم زاده انصاری، همکاری در انجام پژوهش گلخانه ای

نویسنده پنجم: کاظم رنگزن، همکاری در طیف سنجی

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه و شرکت سپاهان رویش اصفهان به‌منظور تأمین بذر گوجه فرنگی تشکر و قدردانی مینماید.

References

1- Alsaeedi, A., El-Ramady, H., Alshaal, T., El- Garawany, M., Elhawat, N. and Al-Otaibi, A., 2019. Silica nanoparticles boost the growth and productivity of cucumber under water deficit and salinity stresses by balancing nutrient uptake. *Journal Plant Physiology and Biochemistry. 139*(12), pp.1–10. doi:10.1016/j.plaphy.2019.03.008

2- Asgari, A., Hooshmand, A., Broumand-Nasab, S. and Zivdar, S., 2023. Potential application of spectral indices for olive water status assessment in (semi-) arid regions: A case study in Khuzestan Province, Iran. Plant Direct, 7(6), pp.478-494. doi: 10.1002/pld3.494

3- Ballester, C., Miguel, A.J., Juan, R. C. and Diego, S.I., 2013. The usefulness of thermography for plant water stress detection in citrus and persimmon trees. *Journal Agricultural and Forest Meteorology. 168*(15), pp. 120-129. doi: 10.1016/j.agrformet.2012.08.005

4- Ballesteros, R., Ortega, J.F. and Moreno, M.A., 2016. FORETo: new software for reference evapotranspiration forecasting. *Journal of Arid Environments. 124*(3), pp.128–141. doi:10.1016/j.jaridenv.2015.08.006

5- Bohman, B.J., Rosen, C.J. and Mulla, D.J., 2019. Evaluation of variable rate nitrogen and reduced Irrigation management for potato production. *Journal of Agronomy. 111*(4), pp.2005–2017. doi:10.2134/agronj2018.09.0566

6- Ebrahimi, H., 2020. Investigating the performance and efficiency of tomato juice consumption in low irrigation conditions and the use of silica nanoparticles, Thesis, *Shahid Chamran University of Ahvaz*, Iran. 124p. (In Persian).

7- El-Hendawy, S.E., Al-Suhaibani, N., Elsayed, S., Hassan, W.M., Dewir, Y.H., Refay, Y. and Abdella, K.A., 2019. The potential of the existing and novel spectral reflectance indices for estimating the leaf water status and grain yield of spring wheat exposed to different irrigation rates. *Journal Agricultural Water Management. 217*(c), pp.356–373. doi: 10.1016/j.agwat.2019.03.006.

8- Elmetwalli, A.H., El-Hendawy, S.E., Al-Suhaibani, N., Alotaibi, M., Tahir, M.U., Mubushar, M., Hassan, W.M. and El-Sayed, S., 2020. Potential of hyperspectral and thermal proximal sensing for estimating growth performance and yield of soybean exposed to different drip irrigation regimes under arid conditions. *The Specia Issue Sensors in Agriculture. 27*(2), pp.93-105. doi.org/10.3390/s20226569

9- Elsayed, S. and Darwish, W., 2017. Hyperspectral remote sensing to assess the water status, biomass, and yield of maize cultivars under salinity and water stress. *Crop Production and Management*., 76(1), pp.62-72. doi:10.1590/1678-4499.018

10- Elsayed, S., El-Hendawy, S., Dewir, Y., Schmidhalter, U., Ibrahim, H., Ibrahim, M., Elsherbiny, O. and Farouk, M., 2021. Estimating the Leaf Water Status and Grain Yield of Wheat under Different Irrigation Regimes Using Optimized Two- and Three-Band Hyperspectral Indices and Multivariate Regression Models. *Journal Water. 13*(19), pp.1-22. doi:10.3390/w13192666

11- Elsayed, S., Elhoweity, M., Ibrahim, H.H., Dewir, Y., Migdadi, H.M. and Schmidhalter, U., 2017. Thermal imaging and passive reflectance sensing to estimate the water status and grain yield of wheat under different irrigation regimes. *Journal Agricultural Water Management.189*, pp.98-110. doi:10.1016/j.agwat.2017.05.001

12- Elsayed, S., Rischbeck, P. and Schmidhalter, U., 2015. Comparing the performance of active and passive reflectance sensors to assess the normalized relative canopy temperature and grain yield of drought-stressed barley cultivars. *Journal Field Crop Research. 177*(13), pp.148–160. doi:10.1016/j.fcr.2015.03.010

13- Gao, B., 1996. NDWI- a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Journal Remote Sensing of Environment. 58*(3), pp.257- 266. doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3

14- Gitelson, A.A., Merzlyak, M.M., 1994. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of aesculus hippocastanum L. and Acer platanoides L. seaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant physiology. 143*(3), pp. 286–292. http://dx.doi.org/10.3390/w11030443

15- Haboudane, D., Miller, J.R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P.J. and Dextraze, L., 2002. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Journal Remote Sensing of Environment. 81*(2-3), pp.416-426. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00018-4

16- Haghighi, M., Parniani far., F. and Mozafarian, S., 2021. Investigating the performance and efficiency of tomato juice consumption in low irrigation conditions and the use of silica nanoparticles. In *5th International Congress of Agricultural Development, Natural Resources, Environment and Tourism of Iran, Tabriz, Iran*.

17- Hashemi Dehkordi, E., Mousavi, M., Moallemi, N. and Ghafariyan moghareb, M.H., 2017. Effect of nanoparticles of titanium dioxide (anatase) on physiological characteristics of strawberry (Fragaria ananassa c.v. Queen Elisa) in hydroponic condition. *Journal Plant Process and Function. 5*(16), pp.1-8. (In Persian).

18- Ihuoma, S.O. and Madramootoo, C.A., 2019. Sensitivity of spectral vegetation indices for monitoring water stress in tomato plants. *Computers and Electronics in Agriculture*, *163*, p.104860. doi.org/10.1016/j.compag.2019.104860

19- Ihuoma, S.O. and Madramootoo, C.A., 2020. Narrow-band reflectance indices for mapping the combined effects of water and nitrogen stress in field-grown tomato crops. *Journal Biosystem Engineering. 192*(1), pp. 133-143. doi:10.1016/j.biosystemseng.2020.01.017.

20- Inoue, Y., Kurosu, T., Maeno, H., Uratsuka, S., Kozu, T., Dabrowska-Zielinska, K. and Qi, J., 2002. Season-long daily measurements of multifrequency (Ka, Ku, X, C, and L) and full-polarization backscatter signatures over paddy rice field and their relationship with biological variables. *Journal Remote Sensing of Environment. 81* (2–3), pp.194–204. doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00343-1

21- Junttila, S., Vastaranta, M., Liang, X., Kaartinen, H., Kukko, A., Kaasalainen, S., Holopainen, M., Hyyppä, H. and Hyyppä, J., 2017. Measuring leaf water content with dual-wavelength intensity data from terrestrial laser scanners. *Journal Remote Sensing. 9*(1), pp.1-20. doi.org/10.3390/rs9010008.

22- Kasraei, R. and Saedi, S., 2010. The effect of sewage sludge of Tabriz Petrochemical Complex on tomato plant growth. *Water and Soil Magazine*. *25*(1), pp.10-20. (In Persian). doi: 10.22067/JSW.V0I0.2913

23- Kovar, M., Brestic, M., Sytar, O., Barek, V., Hauptvogel, P. and Zivcak, M., 2019. Evaluation of Hyperspectral Reflectance Parameters to Assess the Leaf Water Content in Soybean. . *Journal Water. 443*(1), pp.1-12. doi: 10.3390/w11030443

24- Lynch, J.P., 2019.Root phenotypes for improved nutrient capture. An underexploited opportunity for global agriculture. *Journal New Phytologist. 223*, pp.548–564. doi:org/10.1111/nph.15738

25- Maghsoudi, K., Emam, Y. and Ashraf, M., 2015. Influence of foliar application of silicon on chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, and growth in water-stressed wheat cultivars differing in drought tolerance. *Turkish Journal of Botany. 39*(4), pp.625–634. doi:10.3906/bot-1407-11

26- Mahmoodi, K., Alizadeh, Y., Abdul-Hamid, H. and Naji, H.R., 2020. Effect of nano Sio2 on physiological features of Pistacia atlantica subsp. Mutica under drought stress. *Journal Wood and Forest Science and Technology. 26*(4), pp.85-100. (In Persian). Doi: 10.22069/JWFST.2020.13986.1715

27- Nguy-Robertson, A., Gitelson, A., Peng, Y.,Vina, A., Arkebauer, T. and Rundquist, D., 2012. Green leaf area index estimation in maize and soybean: Combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. *Journal of Agronomy. 104*(5), pp.1336–1347. doi.org/10.2134/agronj2012.0065

28- Pelesco, VA. and Alagao, FB., 2014. Evapotranspiration Rate of Lettuce (Lactuca sativa L., Asteraceae) in a Non-Circulating Hydroponi cs System. *Journal Society & Technology. 4*(1), pp.1-6. doi: 10.5281/jst.v4i1.18

29- Penuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L. and Save, R., 1993. The reflectance at the 950–970 mm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing. 14*(10), pp.1887-1905. doi:10.1080/01431169308954010

30- Penuelas, J., Pinol, J., Ogaya, R. and Filella, I., 1997. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing. 18*(13), pp.69–75. doi:10.1080/014311697217396

31- Romero, A.P., Alarcón, A., Valbuena, R.I. and Galeano, C.H., 2017. Physiological assessment of water stress in potato using spectral information. *Journal Frontiers Plant science. 8*, pp.1608. doi.org/10.3389/fpls.2017.01608

32- Roujean, J.L. and Breon, F.M., 1995. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements Remote Sensing of Environment. *Journal Remote Sensing of Environment. 51*(3), pp.375-384. doi.org/10.1016/0034-4257(94)00114-3

33- Schlemmer, M.R., Francis, D.D., Shanahan, J.F. and J.S., Schepers., 2005. Remotely measuring chlorophyll content in corn leaves with differing nitrogen levels and relative water content. *Journal of Agronomy. 97*(1), pp.106-112. doi.org/10.2134/agronj2005.0106

34- Shokri, S., Hooshmand, A., Golabi, M., Alemzadeansari, N. and Struve, D., 2021. Effect of Silica Nanoparticles on Yield of Cucumber (Cucumis sativus L.) in Ahvaz region. *Journal of Sustainable Agriculture and Production Sciences .22*(1), pp.279-292. (In Persion). doi: 10.22034/SAPS.2021.44312.2624

35- Tripathi, D.K., Singh, V.P., Prasad, S.M., Chauhan, D.K. and Dubey, N.K., 2015. Silicon nanoparticles (SiNp) alleviate chromium (VI) phytotoxicity in Pisum sativum (L.) seedlings. *Journal Plant Physiology and Biochemistry. 96*(3), pp.189-198. doi: 10.1016/j.plaphy.2015.07.026

36- Wang, J.J., Tian, X., CHen, L. and Wang, H.G., 2021. Grain Estarch Estimation using Hyperspectral Data and its Relationship with Leaf Water Contents for Broomcorn Millet(Panicum Milliaceum L). *Journal Ecology and Environmental Research. 20*(1), pp.431-445. doi:10.15666/aeer/2001_431445.

37- Yasir, QM1. and Zhang, W., 2022. Estimation of Leaf Water Content of Different Leaves from Different Species Using Hyperspectral Reflectance Data. *Annals of Agricultural & Crop Sciences. 7*(2), pp.1111-2022. doi:10.26420/annagriccropsci.2021.1111

38- Zhang, Q., Li, Q. and Zhang, G., 2012. Rapid determination of leaf water content using VIS/NIR spectroscopy analysis with wavelength selection. *Journal of Spectroscopy. 27*(2), pp.93-105

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 1, Spring 2026, p. 43-58

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

Research Paper

EXTENDED ABSTRACT

Evaluation of temporal-spatial changes of water quality characteristics of Abbas-Abad River using the QUAL2Kw simulator model

A. Noorali[1], S. Marofi[2*] and O. Babamiri[3]

1- PhD student, Department of Water Sciences Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
2- Corresponding Author, Professor, Department of Water Sciences Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. (marofi@basu.ac.ir)*
3- PhD, Department of Water Sciences Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 24 August 2024
Revised: 05 December 2024
Accepted: 21 December 2024
Available online: 05 May 2026

Keywords:
Agricultural effluents, Abbas-Abad River, QUAL2Kw, Wastewater, and Water quality parameters

TO CITE THIS ARTICLE:

Noorali, A., Marofi, S., Babamiri, O. 2026. 'Evaluation of temporal-spatial changes of water quality characteristics of Abbas-Abad River using the QUAL2Kw simulator model', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(1), pp. 43-58. doi: 10.22055/jise.2024.47846.2134.

Abstract

Rivers, as vital arteries of surface water, play an important role in providing various water consumption needs. Population growth and vast urbanization carry out a significant increase in the production of sewage and urban effluents, thus resulting in a decreasing river water quality rate. In this study, the impact of the agriculture wastewater sector (gardens), villages, restaurants, and tourist sites of the study area on the Abbas-Abad River water quality was investigated using the QUAL2Kw model. The modeling result of the period 2021-2022 showed any increase in pollutant flow realized by the agriculture sector and restaurant wastewaters increased the biochemical oxygen demand value of the river, especially in spring and summer. As a result, the amount of dissolved oxygen along the river, especially in the downstream sections (the end of considered river reach), decreased. Additionally, the river water illustrated an alkaline condition (high pH rate), and increased electrical conductivity (because of lack of sedimentation of dissolved and suspended solids) along the river. Although the nitrate rate was increased along the river during spring and summer, it did not also exceed the standard level for surface waters. The results of this research indicate a need to establish quality management of the river to have a safe environmental balance development that prevents the pollutant rate of the river, ensuring a sustainable trend in its self-purification value.

Introduction

Rivers are essential for providing water, yet population growth and urban expansion can exacerbate water pollution. Water quality simulation models assist in managing pollution by mimicking natural processes and elucidating the relationship between water supply and demand, resulting in improved water quality and resource conservation (Farkhani, 2021). In this regard, Chapra and Pelletier, (2003) introduced the QUAL2Kw water quality simulation model, which is a stable and user-friendly one-dimensional model. This model can simulate over 15 parameters of water quality and river flow, such as dissolved oxygen (DO), chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD), electrical conductivity (EC), nitrate (NO_3), ammonium (NH_4), phosphate (PO_4), temperature (T), and pH. Numerous studies have utilized this model to simulate water quality in various rivers.

Babamiri et al., (2021) conducted a study using the QUAL2Kw model to assess the quality status and self-purification capacity of the Abbas-Abad River. The study involved simulating six parameters (COD, BOD, DO, PO_4, NO_3, and NH_4) using the model and comparing the results with field observations. The sensitivity analysis revealed that the oxidation rate, nitrification rate, and denitrification rate were the most influential parameters on water quality. Additionally, the study found that river flow had the greatest impact on the river's self-purification capability. A study was conducted to identify the sources of pollution in the Zarine-Rood River and to explore various pollution control scenarios to meet water quality standards for the preservation of fish life. Many studies have used the QUAL2Kw model to simulate the quality parameters of rivers, and the results show that this model has good accuracy in simulation (Pashazade Laleh et al., 2021; Babamiri and Dinpashoh, 2023; Noorali et al., 2026).

This research aims to assess the tempo-spatial variations in the qualitative characteristics of the Abbas-Abad River. Utilizing hydrometric and hydraulic information, along with measured qualitative data, the river's water quality was simulated with the QUAL2Kw numerical model. The study examined the temporal and spatial changes in DO, BOD, NO_3, EC, temperature (T), and pH.

Methodology

This study focused on the Mountainous River of Abbas-Abad in Hamedan province, Iran. To evaluate the qualitative condition of the Abbas-Abad River, the QUAL2Kw model was used, and data related to eight polluting sources entering the river were identified. These sources included six agricultural drainages and two restaurant wastewater in the downstream area of Abbas-Abad. Information about six sampling stations along the river was also utilized. The first station, located upstream of the river, is more affected by natural conditions, with no agricultural activities or sewage entering the area. Fig. (1) shows the location of pollutant sources and sampling stations in the GIS environment, while Table. (1) displays the qualitative characteristics of polluting sources. Stations 3 and 4 are affected by agricultural activities, while stations 2, 5, and 6 are exposed to wastewater from restaurants and, to some extent, agricultural activities. Table. (2) shows the geographic coordinates of the sampling stations along the Abbas-Abad River (Noorali et al., 2024; Babamiri et al., 2026).

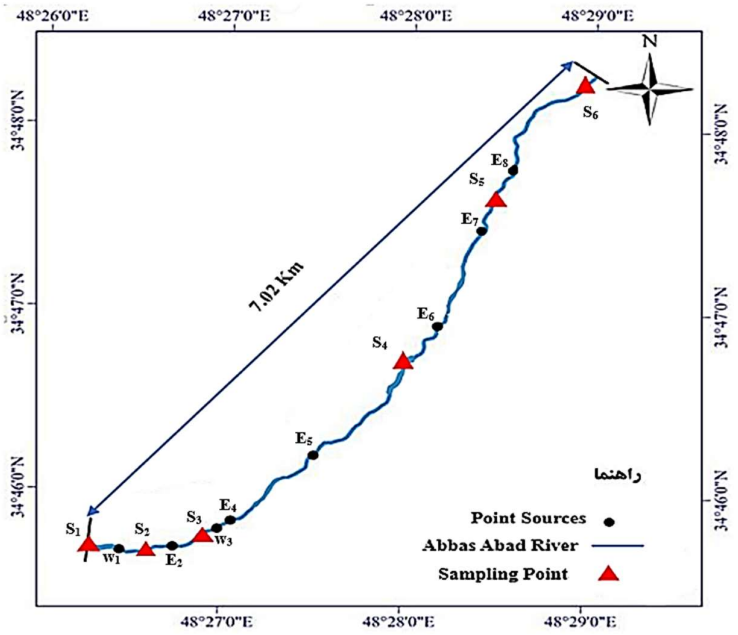


Fig. 1- Location of point source pollutants and sampling stations

Table 1- The average qualitative data of the pollutant sources entering the Abbas-Abad River

	Point sources	Distance* (Km)	Q (l/s)	BOD (mg/l)	DO (mg/l)	NO_3 (µg/l)	EC (µs/cm)
Agricultural effluents	E_2	5.60	125	9.25	4.13	1240	98.30
	E_4	4.38	150	29.43	3.85	2422	235.75
	E_5	3.55	6	10.35	2.12	1420	124.55
	E_6	2.50	403	25.75	3.52	4420	442.70
	E_7	1.86	255	23.78	3.21	4224	523.60
	E_8	0.2	152	22.86	3.10	5843	549.25
Wastewater of restaurants	W_1	6.08	10	10	4.98	1490	110.25
	W_3	5.20	250	55	2.97	3977	324.22

*Distance from upstream of the river

Table 2- Geographical location of sampling stations

Monitoring stations	Distance* (Km)	Geographical Coordinates	
		Latitude	Longitude
S_1	7.03	34°46’00”	48°26’00”
S_2	6.14	34°46’02”	48°26’20”
S_3	5.25	34°46’09”	48°26’53”
S_4	4.23	34°46’15”	48°27’12”
S_5	1.86	34°47’57”	48°28’00”
S_6	0.0	34°47’46”	48°28’34”

*Distance from upstream of the river

The model was run using available data for the spring of 2021, and model calibration was performed using auto-calibration and a genetic algorithm in the modern version of QUAL2Kw. Auto-calibration was carried out for 100 populations and 85 iterations of the genetic algorithm. To evaluate the accuracy of the numerical modeling results and determine their error, the root mean square error (RMSE), minimum mean square error (MSE), mean absolute error (MAE), and standard error (SE) indicators were used (Eq.s 1 to 4). The small value of the criteria indicates a more accurate simulation of real conditions (Rafiee et al., 2014).

$$RMSE = \sqrt{\frac{(Y_m - \bar{Y}_p)^2}{n}} \quad (1)$$

$$MSE = \sum_{i=1}^{n} \frac{(Y_p - Y_m)^2}{n} \quad (2)$$

$$MAE = \sum_{i=1}^{n} \frac{|Y_m - Y_p|}{n} \quad (3)$$

$$SE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(Y_m - Y_p)^2}}{\bar{Y}_m} \quad (4)$$

Where Ym is the observed value, $\bar{Y}m$ is the average observed value, Yp is the predicted value, $\bar{Y}p$ is the average predicted value.

Results and Discussion

The RMSE, MSE, MAE, and SE errors indicate acceptable results for model calibration, with the best values for the pH being 0.063, 0.004, 0.032, and 0.008, respectively. Model validation using summer season data also shows satisfactory results, with the most favorable RMSE, MSE, MAE, and SE values related to the DO at 0.26, 0.06, 0.22, and 0.03 mg/l, respectively.

The findings suggest that pollution entering the river during summer from agricultural and restaurant sewage discharge is greater than in spring. The model output indicates unsuitable DO levels downstream of the river in both seasons, pointing to an increase in pollution and a decrease in the river's self-purification ability. However, the NO_3 concentration along the river does not

exceed the standard input level for surface waters, including rivers (10 mg/l), despite showing an increasing trend in both seasons.

Conclusion

This research identifies the polluting sources of the Abbas-Abad River and to assess its quality during different seasons of 2021-2022. For this purpose, the QUAL2Kw model was used to evaluate the river's quality condition. Meteorological data, hydraulic and hydrological properties from the six sampling stations records (2021), were analyzed. Additionally, eight points of pollutant sources entering the river were considered in the model. The results of the model's calibration and validation demonstrate the QUAL2Kw model's capability in assessing river quality. The river simulation results (2021-2022) indicate that the pollution rates from agricultural and restaurant wastewater have increased the BOD levels during spring and summer. Consequently, the levels of the DO along the river, especially at the end of the river flow, have decreased. Additionally, the river water exhibits an alkaline (pH) condition. The EC rate has also shown a rising trend due to the lack of settling of dissolved and suspended solids in the water. Although the NO_3 levels have increased during the spring and summer, they did not exceed the standard value for surface water (10 mg/l).

Conflict of Interest

The authors declared no any conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding

The financial support of this research has been provided by Researcher Funding Budget (Grant). we hereby thank Bu-Ali Sina University Vice Chancellor of Research from for their support.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution

First Author: Atefe Noorali, Collection and analysis of data, Methodology implementation, Original draft writing, Software using, Interpretation of results and Final manuscript version providing.

Second Author: Safar Marofi, Manuscript review, Control and Validation of the research results, Edition of the final manuscript.

Third Author: Omid Babamiri, Collection and analysis of data, Software handling, Interpretation of the results.

Acknowledgments

The authors wish to express their sincere gratitude to the staffs and officials of the Regional Water Company and Meteorology Organization of Hamedan Province for their essential support and necessary information of the research.

References

1- Babamiri, O. and Dinpashoh, Y., 2023. Uncertainty Analysis of River Water Quality Based on Stochastic Optimization of Waste Load Allocation Using the Generalized Likelihood Uncertainty Estimation Method. *Water Resources Management*, pp.1-23. Doi:10.1007/s11269-023-03704-9.

2-Babamiri, O., Noorali, A. and Marofi, S., 2026. Optimized Modeling of Pollution Load Allocation in a Mountainous River of Semiarid Basin Based on Bankruptcy Rules: A Case Study of the Abbas-Abad River, Iran. Journal of Water Resources Planning and Management, 152(5), p.05026006.

3- Babamiri, O., Vanaei, A., Guo, X., Wu, P., Richter, A., Ng, K.T., 2021. Numerical Simulation of Water Quality and Self-Purification in a Mountainous River Using QUAL2KW. *Journal of Environmental Informatics*, 37(1). Doi: 10.3808/jei.202000435.

4- Chapra, S.C., Pelletier, G.J. and Tao, H., 2003. QUAL2K: A modeling framework for simulating river and stream water quality: Documentation and user's manual. *Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA*, *25*, p.121.

5- Farkhani, S., 2021. Investigating the Quality Status of Haraz River Using Numerical Modeling. *Iran-Water Resources Research*, *17*(1), pp.262-276. (In Persian).

6- Noorali, A., Marofi, S. and Babamiri, O., 2024. Evaluation of temporal-spatial changes of water quality characteristics of Abbas-Abad River using the QUAL2Kw simulator model. *Water and Irrigation Management*. (In Persian). Doi: 10.22059/jwim.2024.369706.1127.

7- Noorali, A., Babamiri, O. and Marofi, S., 2026. Uncertainty assessment of mountainous river water quality parameters using the generalized likelihood uncertainty estimation method. *Hydrological Sciences Journal*, *71*(1), pp.152-165.

8- Pashazadeh Laleh, Z., Jafari, H. and Vaezihir, A., 2021. Qualitative assessment of the Aji-Chay River (Tabriz Plain) based on the specific user's quality indices. *Irrigation and Water Engineering*, *11*(4), pp.344-367. Doi:10.22125/IWE.2021.133769.

7- Rafiee, M., Akhond Ali, A.M., Moazed, H., Lyon, S.W., Jaafarzadeh, N. and Zahraie, B., 2014. A case study of water quality modeling of the Gargar River, Iran. *Journal of Hydraulic Structures*, *1*(2), pp.10-22. (In Persian). Doi: 10.22055/JHS.2014.10533.

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۹، شماره‌ی ۱، بهار ۱۴۰۵، مقاله پژوهشی، ص. ۵۸-۴۳

ارزیابی تغییرات زمانی-مکانی مشخصه‌های کیفی آب رودخانه عباس‌آباد با استفاده از مدل شبیه‌ساز QUAL2Kw

عاطفه نورعلیئی[۱]، صفر معروفی[۲*] و امید بابامیری[۳]

۱- دانشجوی دوره دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران.

۲*- نویسنده مسئول، استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران. (marofi@basu.ac.ir)

۳- دانش‌آموخته دوره دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۳ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۵ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵

چکیده

رودخانه‌ها به‌عنوان شریان‌های حیاتی آب‌های سطحی، نقش مهمی در تأمین نیازهای مختلف مصرف آب دارند. رشد جمعیت و گسترش شهرنشینی باعث افزایش قابل توجهی در تولید فاضلاب و پساب شهری می‌شود که در نتیجه نرخ کیفیت آب رودخانه کاهش می‌یابد. در این تحقیق تأثیر بخش فاضلاب کشاورزی (باغ‌ها)، روستاها، رستوران‌ها و موقعیت گردشگری منطقه مورد مطالعه بر کیفیت آب رودخانه عباس‌آباد با استفاده از مدل QUAL2Kw مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی دوره ۱۴۰۱-۱۴۰۰ نشان داد که افزایش جریان آلاینده توسط بخش کشاورزی و فاضلاب رستوران‌ها باعث افزایش اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی رودخانه به‌ویژه در فصول بهار و تابستان شده است. در نتیجه میزان اکسیژن محلول در طول رودخانه، به‌ویژه در بخش‌های پایین‌دست (بازه انتهای رودخانه در نظر گرفته شده) کاهش یافت. علاوه بر این، آب رودخانه یک وضعیت قلیایی (میزان pH بالا) و افزایش هدایت الکتریکی (به‌دلیل عدم رسوب مواد جامد محلول و معلق) در طول رودخانه را نشان می‌دهد. اگرچه میزان نیترات در طول رودخانه در فصل بهار و تابستان افزایش یافت، اما از حد استاندارد آب‌های سطحی نیز فراتر نرفت. نتایج این تحقیق بیانگر ایجاد مدیریت کیفیت رودخانه به‌منظور برقرار کردن تعادل زیست‌محیطی ایمن است که از میزان آلاینده رودخانه جلوگیری کرده و روند پایدار میزان خودپالایی آن را تضمین کند.

کلیدواژه‌ها: پساب‌های کشاورزی، پارامترهای کیفی آب، رودخانه عباس آباد، فاضلاب، مدل QUAL2Kw.

مقدمه

افزایش جمعیت و توسعه شهرنشینی به افزایش آلودگی منابع آبی، از جمله رودخانه‌ها، منجر می‌شود. استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی کیفیت آب به‌عنوان ابزاری مؤثر برای مدیریت و کنترل آلودگی منابع آبی می‌باشد. این مدل‌ها با تحلیل فرآیندهای طبیعی و هیدرولوژیکی مرتبط با سیستم‌های منابع آب، به ما امکان می‌دهند تا تعاملات بین عرضه و تقاضای آب را به شکل بهتری درک کرده و راهکارهایی برای کنترل و کاهش آلودگی شناسایی کنیم. این روش‌ها می‌توانند به بهبود کیفیت آب و حفاظت از منابع آبی کمک شایانی کنند (Farkhani, 2021). به‌منظور کنترل منابع آلاینده ورودی به رودخانه‌ها و کیفیت آب آن‌ها استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی کیفیت آب می‌تواند مفید باشد (Herbay et al., 1983). در همین راستا مدل شبیه‌ساز کیفی آب QUAL2Kw توسط Chapra et al (2003) ارائه شده است. این مدل یک‌بعدی، پایدار و کاربرپسند بوده و قادر است بیش از ۱۵ پارامتر کیفی آب و جریان رودخانه را شبیه‌سازی کند، از جمله اکسیژن محلول (DO)، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی و بیوشیمیایی (COD و BOD)، هدایت الکتریکی (EC)، نیترات (NO_3)، آمونیوم (NH_4)، فسفات (PO_4)، دما (T)، اسیدیته (pH) و غیره. تحقیقات فراوانی در زمینه شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه‌های مختلف با بهره‌گیری از این مدل صورت گرفته است.

Chen et al., (2018) با استفاده از مدل QUAL2Kw به شبیه‌سازی DO رودخانه Boulder Creek در ایالت کلرادو آمریکا پرداختند. همچنین در این مطالعه، تحلیل‌های حساسیت‌سنجی برای شناسایی تأثیرگذارترین فرآیندها بر DO صورت گرفت، که هوادهی رودخانه و نیتریفیکاسیون به‌عنوان مهمترین فرآیندها بر DO شناخته شده‌اند. فتوسنتز نیز برای این پارامتر تأثیرگذار بوده و فرآیند تنفس نیز با اثرات نسبتاً کوچک بر DO معرفی شد. در تحقیقی با استفاده از مدل QUAL2Kw، تغییرات فصلی خودپالایی رودخانه کارون و تغییرات غلظت DO، نیترات و کلیفرم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که غلظت نیترات در فصل زمستان به‌دلیل استفاده از کودهای نیتراته برای رشد گیاهان و ورود پساب این آلاینده به رودخانه، بیشتر از سایر فصل‌ها است (Nezad et al., 2018). طی مطالعه‌های Iqbal et al., (2018) کیفیت چهار رودخانه در چهار منطقه اقلیمی مختلف (گرمسیری، معتدل، سرد و خشک) را در آسیا با استفاده از مدل عددی QUAL2Kw بررسی کردند. براساس نتایج مدل‌سازی و شاخص کیفیت آب، نتایج نشان داد که رودخانه Yamuna در هند (اقلیم خشک) دارای کیفیت آب ضعیفی است، در حالی‌که رودخانه‌های Bagmati در نپال (اقلیم گرم) و Galing در مالزی (اقلیم معتدل) دارای کیفیت متوسط هستند و با حرکت به سمت پایین دست، میزان DO آن‌ها کاهش می‌یابد. از سوی دیگر،

میزان DO در رودخانه Nacdong واقع در کره جنوبی (اقلیم سرد)، به‌دلیل نرخ بالای هوادهی، با حرکت به پایین دست افزایش می‌یابد و دارای کیفیت مناسب است. در تحقیق دیگری، با شناسایی منابع آلاینده رودخانه زرینه‌رود، از سناریوهای مختلف کنترل آلودگی‌های این رودخانه برای دستیابی به استانداردهای کیفیت آب برای حفظ زندگی ماهیان مورد مطالعه قرار گرفت. به‌منظور انجام این کار، مدل کیفی QUAL2Kw برای داده‌های سال ۱۳۹۵ اجرا و صحت‌سنجی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که آلودگی به مواد مغذی باعث شده تا در برخی از فصول سال و بازه‌های زمانی، شرایط کیفیت آب برای حیات ماهیان مناسب نباشد (Biglari et al., 2019). Bui et al., (2019) برای مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه Cao در ویتنام، از مدل QUAL2Kw استفاده کردند. به‌دلیل نقص اطلاعات در دسترس، خروجی‌های مدل هیدرولوژیکی SWAT برای برخی از ورودی‌های مدل فوق استفاده شد. پارامترهای DO، BOD، COD، نیترات کل (TN) و فسفر کل (TP) در این مطالعه شبیه‌سازی شدند و طی دو دوره در سال ۲۰۱۴ مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که مدل‌سازی با مشاهدات، هم‌خوانی خوبی دارد.

در تحقیقی برای مدل‌سازی کیفی رودخانه Skudai در مالزی از مدل عددی QUAL2Kw استفاده شد. شبیه‌سازی‌ها تحت سه سناریوی تخلیه آلاینده به این رودخانه صورت گرفت. نتایج نشان دادند که کیفیت آب رودخانه در بیشتر ایستگاه‌ها، براساس شاخص کیفیت آب، در گروه سه (نسبتاً آلوده و آلوده) قرار دارد. این ایستگاه‌ها توسط مناطق مسکونی، صنایع، کارگاه‌ها و رستوران‌ها احاطه شده‌اند و همین موضوع منجر به کاهش کیفیت آب رودخانه گشته‌اند (Kamal et al., 2020). تحقیقی توسط Babamiri et al., (2021) با استفاده از مدل QUAL2Kw انجام شد تا وضعیت کیفی رودخانه عباس‌آباد و ظرفیت خودپالایی آن ارزیابی شود. در این مطالعه، شش پارامتر COD، BOD، DO، PO_4، NO_3 و NH_4 با استفاده از مدل مذکور شبیه‌سازی شده و سپس نتایج آن با مشاهدات میدانی مقایسه شدند. نتایج آنالیزهای حساسیت‌سنجی نشان داد که نرخ اکسیداسیون، نرخ نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون به‌عنوان پارامترهای مؤثر بر کیفیت آب شناسایی شدند. همچنین، آبدهی رودخانه بیشترین تأثیر را بر قدرت خودپالایی رودخانه دارد. در پژوهشی به‌منظور بررسی کیفیت آب رودخانه هراز و شناسایی تأثیر منابع آلاینده بر روی کیفیت آب رودخانه مذکور از مدل شبیه‌ساز QUAL2Kw استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش تخلیه آلاینده‌های کارگاه‌ها و کارخانجات اطراف به رودخانه مذکور، میزان BOD افزایش یافته است و رودخانه از کیفیت نامطلوبی برخوردار می‌باشد (Farkhani, 2018; Abdeveis et al., 2020). مطالعه‌های زیادی با استفاده از مدل عددی QUAL2Kw به‌منظور شبیه‌سازی پارامترهای کیفی رودخانه‌ها انجام شده است و نتایج نشان می‌دهد مدل مذکور در شبیه‌سازی، دارای دقت مطلوبی می‌باشد (Pashazade Laleh et al., 2021; Babamiri and Dinpashoh, 2023; Noorali et al., 2026).

هدف از این تحقیق، ارزیابی تغییرات زمانی-مکانی مشخصه‌های کیفی رودخانه تند سرشاخه الوند می‌باشد. در این خصوص با استفاده از اطلاعات هیدرومتری و هیدرولیکی و داده‌های کیفی اندازه‌گیری شده رودخانه، وضعیت کیفیت آب رودخانه با استفاده از مدل عددی QUAL2Kw شبیه‌سازی شد. در این مطالعه تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای DO، BOD، NO_3، هدایت الکتریکی (EC)، دما (T) و اسیدیته (pH) مورد بررسی قرار گرفتند.

روش کار

منطقه مورد مطالعه

رودخانه عباس‌آباد با ارتفاع ۳۳۱۲ متر از ارتفاعات الوند سرچشمه می‌گیرد و در ۱۲ کیلومتری جنوب‌غربی شهر همدان واقع شده، و به سمت شمال جریان دارد. حوضه آبریز این رودخانه ۱۸ کیلومتر طول و تقریباً ۴۰ کیلومتر مربع وسعت دارد. موقعیت جغرافیایی این حوضه بین عرض جغرافیایی ´۴۶ °۳۴ تا ´۴۸ °۳۴ و طول جغرافیایی ´۴۸ °۲۷ تا ´۲۹ °۴۸ قرار دارد. ارتفاع متوسط حوضه از سطح دریا حدود ۲۶۰۰ متر است و میانگین دما و بارش سالانه به‌ترتیب ۱۱/۳ درجه سانتی‌گراد و ۳۱۷/۷ میلی‌متر می‌باشد (Noorali et al., 2024). در شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

در این تحقیق مقادیر DO، BOD، NO_3، EC، T، pH و آبدهی جریان در فصل‌های بهار و تابستان ۱۴۰۱-۱۴۰۰ به‌منظور ارزیابی تغییرات زمانی مقادیر داده‌های کیفی آب رودخانه در نظر گرفته شد. ضمناً شش ایستگاه نمونه‌برداری (پایش) در طول رودخانه عباس‌آباد، در نظر گرفته شد که در شکل (۲) و جداول (۱) و (۲) ویژگی‌ها و موقعیت‌های آن‌ها آورده شده‌اند. منابع آلودگی در منطقه مورد بررسی شامل پساب‌های رستوران‌ها و ویلاهایی است که در کنار رودخانه عباس‌آباد قرار دارند و فاضلاب خود را به درون رودخانه می‌ریزند. (Babamiri et al., 2026) همچنین زه‌آب‌های کشاورزی حاوی مقادیر بالایی از عناصر غذایی مانند نیتروژن و فسفر، باقی‌مانده سموم و آفت‌کش‌ها، و گاهی اوقات عوامل بیماری‌زا هستند. منابع اصلی آلودگی در منطقه مورد بررسی، پساب‌های کشاورزی اطراف رودخانه عباس‌آباد هستند که به درون رودخانه رها می‌شوند. در این رابطه دو منبع آلاینده نقطه‌ای ناشی از فاضلاب مسکونی و شش منبع آلودگی ناشی از زه‌آب‌های بخش کشاورزی در مدل‌سازی (QUAL2Kw) مربوطه در نظر گرفته شد.

ایستگاه پایش اول در بالادست رودخانه واقع شده و بیشتر تحت تأثیر شرایط طبیعی است و می‌توان گفت که فعالیت‌های کشاورزی و ورود فاضلاب در این محدوده وجود ندارد. ایستگاه‌های پایش دو و سه در معرض فاضلاب رستوران‌ها و تا حدی فعالیت‌های کشاورزی و ایستگاه‌های پایش چهار، پنج و شش تحت تأثیر فعالیت‌های کشاورزی می‌باشند.

DOI: 10.22055/jise.2024.47846.2134

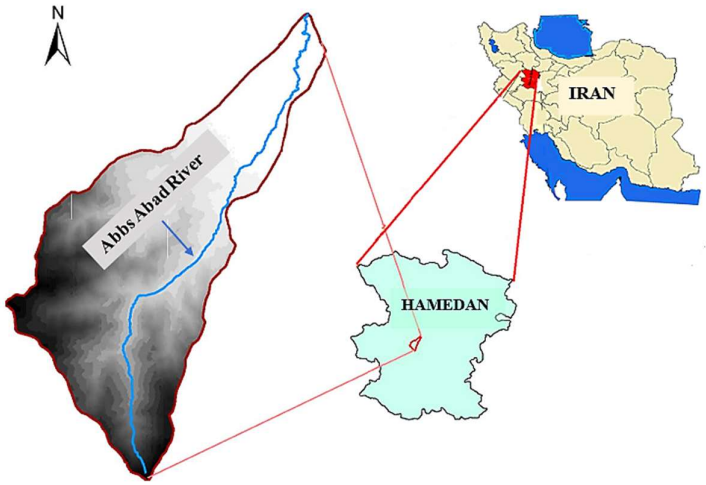


Fig. 1- Location of the Abbas-Abad River basin
شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز رودخانه عباس‌آباد

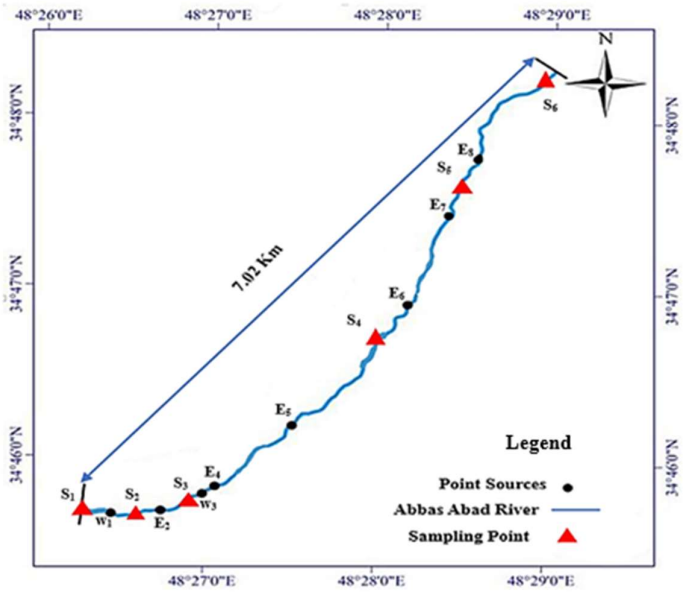


Fig. 2- Location of point source pollutants and sampling stations
شکل ۲- موقعیت منابع آلاینده نقطه‌ای و ایستگاه‌های نمونه‌برداری

جدول ۱- میانگین داده‌های کیفی منابع آلوده‌کننده ورودی به رودخانه کوهستانی عباس‌آباد

Table 1- The average qualitative data of the pollutant sources entering the Abbas-Abad River

	Point sources	Distance* (Km)	Q (L/s)	BOD (mg/L)	DO (mg/L)	NO_3 (µg/L)	EC (µs/cm)
Agricultural effluents	E_2	5.60	125	9.25	4.13	1240	98.30
	E_4	4.38	150	29.43	3.85	2422	235.75
	E_5	3.55	6	10.35	5.12	1420	124.55
	E_6	2.50	403	25.75	3.52	4420	442.70
	E_7	1.86	255	23.78	3.21	4224	523.60
	E_8	0.2	152	22.86	3.10	5843	549.25
Wastewater of restaurants	W_1	6.08	10	10	4.98	1490	110.25
	W_3	5.20	250	55	2.97	3977	324.22

*Distance from upstream of the river

جدول ۲- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های نمونه‌برداری

Table 2- Geographical location of sampling stations

Monitoring Stations	Distance* (Km)	Geographic Coordinates	
		Latitude	Longitude
S_1	7.03	34°46’00”	48°26’00”
S_2	6.14	34°46’02”	48°26’20”
S_3	5.25	34°46’09”	48°26’53”
S_4	4.23	34°46’15”	48°27’12”
S_5	1.86	34°47’57”	48°28’00”
S_6	0.0	34°47’46”	48°28’34”

*Distance from upstream of the river

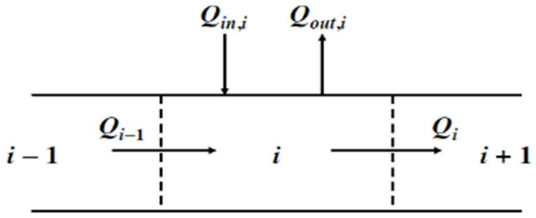


Fig. 3- Current balance in the element

شکل ۳- نمایش مؤلفه‌های بیلان جرم

مدل عددی QUAL2Kw

مدل QUAL-II، که توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا تهیه شده، در حقیقت نسخه‌ای پیشرفته‌ای از مدل QUAL-I است که پیشتر توسط سازمان توسعه آب تگزاس ارائه شده بود. مدل QUAL2Kw، که آخرین ویرایش در سری مدل‌های QUAL به‌شمار می‌رود، امروزه به‌عنوان یکی از بهترین ابزارها برای مدل‌سازی پارامترهای کیفیت آب در رودخانه‌ها شناخته می‌شود. این مدل قادر است معادله‌های مرتبط به رودخانه‌ها را در شرایط متفاوت، دائمی و غیردائمی، به‌طور دقیق حل کند و پارامترهای متنوعی نظیر اکسیژن محلول، دما، اسیدیته، فسفر، نیتروژن و جلبک‌ها را در شبکه‌های رودخانه‌ای شبیه‌سازی نماید. علاوه‌براین، مدل می‌تواند رودخانه‌ها را به بازه‌های مختلف تقسیم کرده و منابع آلودگی نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای را در هر بازه به خوبی مدیریت کند. در این مدل، برای هر بخش، تعادل هیدرولیکی بر مبنای جریان، تعادل حرارتی بر مبنای دما و تعادل جرم بر مبنای غلظت مواد، اعمال می‌شود (Chapra et al., 2003).

موازنه جریان

موازنه جرم، پارامترها و مؤلفه‌های کیفی مدل در رابطه (۲) آورده شده است:

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i}c_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i}c_i - \frac{Q_{out,,i}}{V_i}c_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i}(c_{i-1} - c_i) + \frac{E'_i}{V_i}(c_{i+1} - c_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i \qquad (۲)$$

که در آن W_i بارگذاری خارجی پارامتر کیفی وارد بر المان i، C_i غلظت پارامتر کیفی در المان i، Q_i میزان جریان خروجی از المان i به المان i+1، Q_{i-1} میزان جریان خروجی از المان i-1، $Q_{out,i}$ کل جریان خروجی از المان i به‌صورت نقطه‌ای و

موازنه جریان

برای هر بازه زمانی و المان مشخص، موازنه جریان رودخانه در حالت جریان پایدار مطابق با رابطه (۱) است (Chapra et al., 2003).

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{in,i} - Q_{out,i} \qquad (۱)$$

که Q_i میزان جریان خروجی از بازه i، Q_{i-1} میزان جریان خروجی از بازه i-1، $Q_{in,i}$ جریان ورودی از تمامی منابع نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای به بازه i، $Q_{out,i}$ جریان خروجی از تمامی منابع نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای از بازه i می‌باشد (شکل ۳).

غیرنقطه‌ای، V_i حجم المان i، E_i ضریب پخش حجمی بین المان i و i+1 و S_i شیب کف در المان i می‌باشد (Chapra et al., 2003).

داده‌های مورد نیاز مدل‌سازی

به‌منظور اجرای مدل، هفت کیلومتر از طول رودخانه، با توجه به شرایط هیدرولیکی منطقه، جنس بستر و ضریب زبری آن، به ۱۲ بازه با طول‌های مختلف تقسیم شد (شکل ۴). در هر بازه مشخصات هندسی از قبیل شیب دیواره‌ها، شیب طولی رودخانه، رقوم ارتفاعی کف، عرض کف و غیره در محیط نرم‌افزار AutoCAD 2018 ترسیم و وارد مدل شد (Chapra et al., 2008; Noorali et

DOI: 10.22055/jise.2024.47846.2134

al., 2024). بازه‌های رودخانه، محل ورود منابع آلاینده‌ی نقطه‌ای و محل برداشت آب از رودخانه در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. داده‌های هیدرولیکی مورد نیاز شامل دبی، سرعت و عمق جریان بوده و با توجه به ذوزنقه‌ای بودن مسیر رودخانه، براساس معادله مانینگ، عمق و سرعت جریان محاسبه گردید. با توجه به جنس بستر رودخانه و دیواره‌های آن، ضریب مانینگ ۰/۰۳ در نظر گرفته شد. پارامترهای هواشناسی مورد نیاز برای شبیه‌سازی شامل دمای هوا، دمای نقطه شبنم، سرعت باد، پوشش ابر و سطح سایه‌انداز بوده که مقادیر متوسط بلندمدت آن در جدول (۳) آورده شده است. لازم به ذکر است، داده‌های هواشناسی مذکور از اداره کل هواشناسی استان همدان دریافت شدند.

کالیبراسیون مدل

پس از اجرای مدل با داده‌های مربوط به فصل بهار سال ۱۴۰۰، کالیبراسیون آن برای این فصل صورت گرفت. در نسخه مدرن QUAL2Kw، کالیبراسیون مدل از طریق اتوکالیبراسیون (به‌صورت اتوماتیک یا خودکار) و با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود که قادر است تطابق نتایج مدل را با داده‌های اندازه‌گیری شده به بهینه‌ترین حالت برساند. اتوکالیبراسیون برای یک جمعیت ۱۰۰ نفره و با ۸۵ تکرار الگوریتم ژنتیک اجرا شد. محدوده مجاز تغییرات بیشینه و کمینه پارامترها در کالیبراسیون مدل کیفیت آب رودخانه، مقادیر پیش‌فرض مدل در نظر گرفته شد.

ارزیابی دقت مدل

به‌منظور ارزیابی دقت نتایج مدل‌سازی عددی و تعیین میزان خطای آن، از شاخص‌های میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE)، حداقل میانگین مربعات خطا (MSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و خطای استاندارد (SE) استفاده شده است (رابطه‌های ۳، ۴، ۵ و ۶). هر چه مقادیر شاخص‌های مذکور به صفر نزدیک‌تر باشند، دقت مدل در شبیه‌سازی شرایط واقعی بیشتر است (Kannel et al., 2007; Rafiee et al., 2014).

$$RMSE = \sqrt{\frac{(Y_m - \bar{Y}_p)^2}{n}} \quad (۳)$$

$$MSE = \sum_{i=1}^{n} \frac{(Y_p - Y_m)^2}{n} \quad (۴)$$

$$MAE = \sum_{i=1}^{n} \frac{|Y_m - Y_p|}{n} \quad (۵)$$

$$SE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(Y_m - Y_p)^2}}{\bar{Y}_m} \quad (۶)$$

که Y_m مقدار مشاهداتی، $\bar{Y}_m$ میانگین مقدار مشاهداتی، Y_p مقدار پیش‌بینی شده، $\bar{Y}_P$ میانگین مقدار پیش‌بینی شده، می‌باشند.

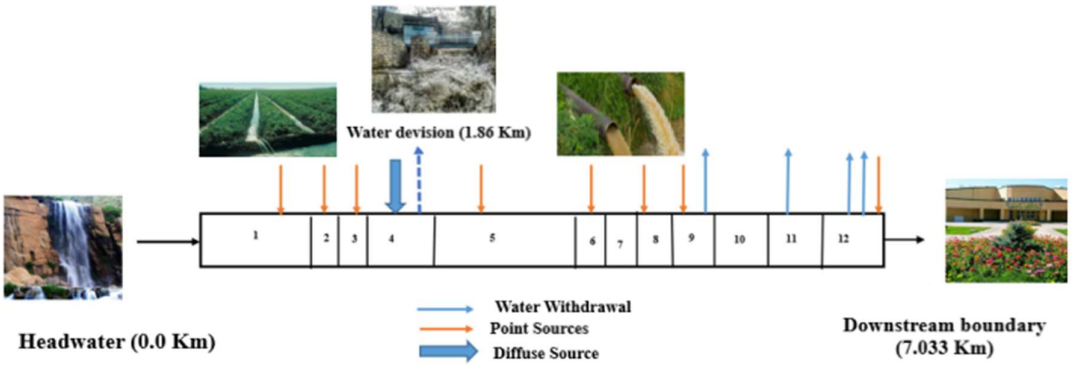


Fig. 4- The considered reaches of the Abbas-Abad River for QUAL2Kw modeling
شکل ٤- بازه‌بندی رودخانه عباس‌آباد برای شبیه‌سازی توسط مدل QUAL2Kw

جدول ۳- میانگین پارامترهای هواشناسی ایستگاه عباس‌آباد
Table 3- Average meteorological parameters of the Abbas-Abad station

Air temperature (°C)	Dew point temperature (°C)	Wind speed (m/s)	Cloud cover (%)	Shader surface (%)
13.3	4.30	3.10	30	70

نتایج و بحث

نتایج کالیبراسیون مدل

نتایج مقادیر به‌دست آمده برای پارامترهای کالیبره شده در جدول (۴) و همچنین نتایج شاخص خطاهای RMSE، MSE، MAE و SE برای پارامترهای مختلف در جدول (۵) نشان داده شده‌اند. به‌طور کلی شاخص خطاهای محاسبه شده برای پارامترهای BOD، DO، NO_3، EC، pH و T نشان‌دهنده نتایج قابل قبولی برای کالیبراسیون مدل می‌باشند. بهترین مقادیر RMSE، MSE، MAE و SE، به‌ترتیب مربوط به پارامتر pH، با مقادیر ۰/۰۶۳، ۰/۰۰۴، ۰/۰۳۲ و ۰/۰۰۸ می‌باشند.

شکل (۵) روند تغییرات مقادیر DO و BOD را در طول رودخانه در فصل بهار نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌گردد، مقدار BOD در بالادست رودخانه به‌دلیل پایین بودن مقدار آلاینده‌ها، اندک بوده و با پیشروی رودخانه و ورود آلاینده‌های بیشتر، مقدار آن روندی افزایشی می‌یابد. همچنین به تبع آن مقدار DO در بالادست رودخانه به‌دلیل فقدان یا پایین بودن آلاینده‌های ورودی، زیاد می‌باشد و با پیشروی جریان و افزایش نرخ آلاینده‌های ورودی به رودخانه، دارای روندی کاهشی می‌گردد.

براساس ساختار مدل QUAL2Kw کیلومتراژ جریان رودخانه از مبدا (بالادست) به سمت انتهای جریان (پایین‌دست) در نظر گرفته شد. بدین‌سان که کیلومتراژ مبدا جریان، معادل هفت و کیلومتراژ نقطه پایانی بازه مورد بررسی، صفر در نظر گرفته شد. بنابراین، با حرکت به سمت پایین‌دست رودخانه، تا پیش از کیلومتراژ ششم جریان، تغییرات DO نشان‌دهنده کیفیت مطلوب آب رودخانه می‌باشد و از این نقطه به بعد، افت محسوسی در مقدار DO آب پدیدار می‌شود که این امر به‌دلیل ورود پساب‌های کشاورزی و فاضلاب رستوران‌های حاشیه رودخانه می‌باشد. همچنین وضعیت کیفی رودخانه بر اساس مقدار BOD تا قبل از کیلومتراژ پنج مطلوب بوده و از این نقطه به بعد تا انتهای رودخانه مقدار BOD افزایش یافته است. با توجه به مقادیر DO و BOD، می‌توان دریافت که در حدود ۱/۵ کیلومتر انتهایی مسیر کیفیت آب رودخانه تحت شرایط بهره‌برداری نامطلوب قرار داشته که می‌بایست با اعمال تدابیر مدیریتی شاخص‌های کیفی آن ارتقا یابد. نتایج به‌دست آمده از روند تغییرات BOD و DO در طول رودخانه در فصل بهار با نتایج تحقیقات Farkhani, (2021) و Venae et al., (2018) مطابقت دارد. همچنین شکل (۵) نتایج حاصل از مدل‌سازی برای تغییرات pH و دمای آب را در طول رودخانه عباس‌آباد نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد مقدار نوسانات pH در محدوده‌ی ۸-۷/۷۶ نشان‌دهنده وضعیت قلیایی رودخانه مذکور می‌باشد. با فاصله گرفتن از بالادست رودخانه، کاهش ارتفاع و افزایش دمای هوا، دمای آب رودخانه نیز افزایش می‌یابد. این نتایج با نتایج تحقیقات Emami Ghara et al., (2023) و Farkhani, (2021) مطابقت دارد.

همچنین این شکل روند تغییرات غلظت NO_3 و EC در طول رودخانه عباس‌آباد را نشان می‌دهد. تغییرات غلظت NO_3 مانند BOD بوده و از کیلومتراژ ششم تا انتهای بازه رودخانه (کیلومتراژ صفر) به دلیل ورود زه‌آب‌های کشاورزی، دارای روندی افزایشی می‌باشد. نتایج روند تغییرات NO_3 در طول رودخانه در فصل بهار با نتایج Zallaghi و Afrous (2019) مطابقت دارد. براساس نتایج مدل‌سازی، با حرکت به سمت پایین‌دست رودخانه مقدار پارامتر EC نیز افزایش یافته، که نشان می‌دهد در طول رودخانه با افزایش دبی در فصل بهار میزان جامدات محلول و معلق در طول رودخانه ته‌نشین نشده‌اند و بیشتر به صورت معلق در آب می‌باشند. نتایج روند تغییرات پارامتر EC طی فصل بهار در طول رودخانه با نتایج تحقیق Rafiee و Azari (2020) مطابقت دارد، اما با نتایج تحقیق Emami Ghara et al., (2023) مغایرت دارد.

جدول ٤- پارامترهای کالیبره شده در مدل‌سازی کیفی رودخانه عباس‌آباد

Table 4- Parameters calibrated for qualitative modeling of the Abbas-Abad River

Parameters		Value	Unit	Limits	
				Mini	Max
Fast BOD	Oxidation rate	0	1/day	0	5
Ammonium	Nitrification	0	1/day	0	10
	Denitrification	0.316	m/d	0	2

جدول ۵- نتایج کالیبراسیون پارامترهای مدل

Table 5- Calibration results of the model parameters of spring

	Water Temperature (°C)	pH	EC (µs/cm)	NO_3 (µg/L)	DO (mg/L)	BOD (mg/L)
RMSE	0.99	0.063	8.05	91.79	0.84	0.61
MSE	0.87	0.004	64.90	8425.68	0.70	0.38
MAE	0.72	0.032	6.11	73.41	0.63	0.48
SE	0.07	0.008	0.07	0.06	0.11	0.06

DOI: 10.22055/jise.2024.47846.2134

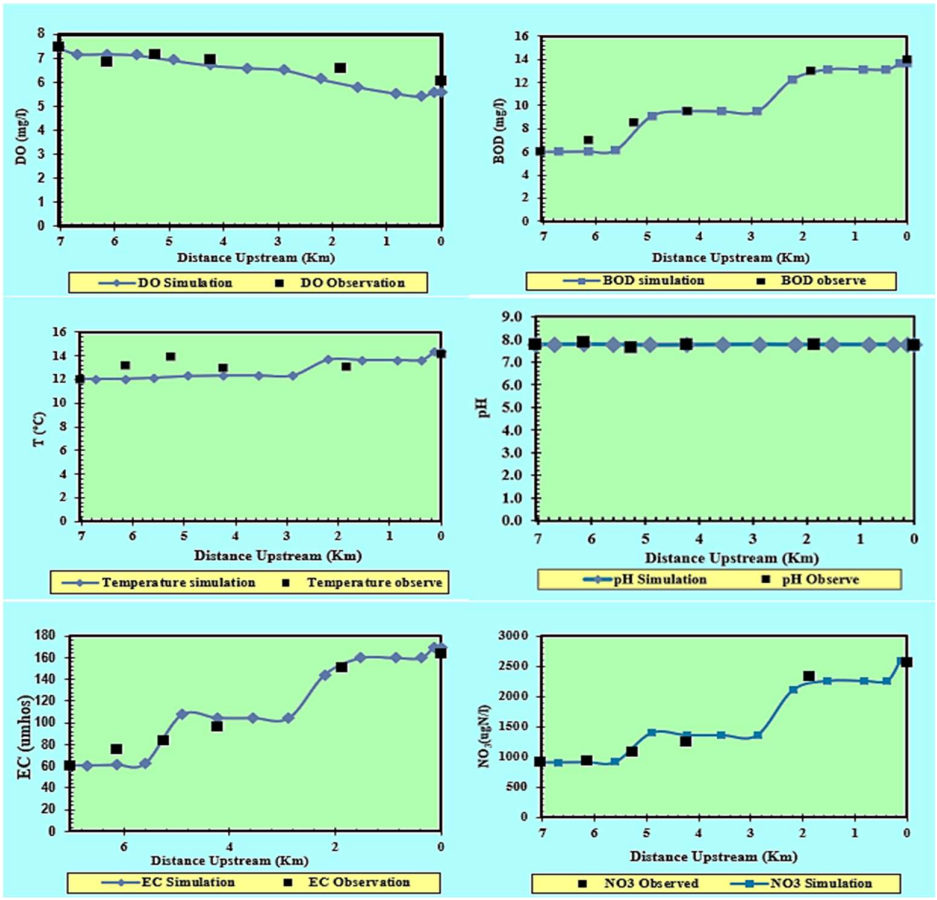


Fig. 5- Variations in the river water quality parameters during spring period
شکل ۵- روند تغییرات پارامترهای کیفی در طول رودخانه عباس‌آباد در فصل بهار

صحت‌سنجی مدل

به‌منظور صحت‌سنجی نتایج مدل، تمامی پارامترهای کالیبره شده ثابت نگه داشته شده و مدل برای داده‌های فصل تابستان اجرا گردید. نتایج شاخص خطاهای RMSE، MSE، MAE و SE برای پارامترهای مختلف در جدول (۶) نشان از نتایج قابل قبولی برای صحت‌سنجی مدل می‌باشد. بهترین مقادیر برای RMSE، MSE، MAE و SE مربوط به پارامتر DO به‌ترتیب، با مقادیر ۰/۲۶، ۰/۰۶، ۰/۲۲ و ۰/۰۳ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. همچنین نتایج صحت‌سنجی مدل برای پارامترهای مختلف این فصل در شکل (۶) نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌گردد مدل به‌خوبی روند تغییرات زمانی-مکانی را نشان داده است.

همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌گردد تغییرات DO و BOD در فصل تابستان تقریباً تا کیلومتراژ سوم نشانگر کیفیت مناسب آب رودخانه می‌باشد، یعنی می‌توان گفت در این بازه مقدار آلودگی ورودی به رودخانه بسیار کم و در حد ناچیز است. اما از کیلومتراژ سوم تا انتهای بازه رودخانه (کیلومتراژ صفر) به‌دلیل ورود پساب‌های کشاورزی و فاضلاب‌ها مقدار BOD افزایش یافته و به تبع آن مقدار DO کاهش یافته است. نتایج تغییرات DO و BOD در فصل تابستان در طول رودخانه با نتایج تحقیقات Noorali et al., (2024) و Farkhani, (2021) مطابقت دارد.

همچنین در شکل (۶)، تغییرات pH و دمای آب را در طول رودخانه نشان می‌دهد، که مقادیر اندازه‌گیری شده به مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل بسیار نزدیک بوده که ناشی از صحت و درستی برآورد مدل برای داده‌های مربوط به فصل تابستان می‌باشد. نتایج صحت‌سنجی روند تغییرات pH و دمای آب در طول رودخانه با نتایج تحقیقات Rafiee و Azari (2020) و Farkhani, (2021) مطابقت دارد.

اگرچه در فصل تابستان میزان غلظت EC تقریباً دو برابر فصل بهار (۱۰۰ الی ۳۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) می‌باشد اما هم‌چنان تغییرات آن در طول رودخانه دارای روندی افزایشی است. با کاهش دبی در این فصل، مقدار جامدات محلول و معلق در آب رودخانه تسبت به فصل بهار بیشتر ته‌نشین شده‌اند و همین عامل مسبب افزایش میزان غلظت EC در طول رودخانه می‌گردد. نتایج صحت‌سنجی روند تغییرات غلظت EC در طول رودخانه با نتایج Rafiee و Azari (2020) مطابقت دارد، اما با نتایج تحقیق Farkhani, (2021) مغایرت دارد. مقدار تغییرات NO_3 نیز در

فصل تابستان بیشتر از فصل بهار می‌باشد. چنانچه در شکل (۶) مشاهده می‌گردد که تغییرات NO_3 در طول رودخانه دارای روندی افزایشی بوده و حتی مقدار ماکزیمم آن در طول رودخانه عباس‌آباد (برای آب‌های سطحی از جمله رودخانه‌ها با توجه به مقدار استاندارد آن ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر) خطرناک نبوده است. می‌توان گفت دلیل افزایش مقدار NO_3 در طول رودخانه، افزایش فعالیت‌های کشاورزی، مصرف کودهای ازته و همچنین افزایش میزان تبخیر در فصل تابستان نسبت به بهار می‌باشد که این نتایج با نتایج تحقیق Babamiri et al., (2020) مغایرت دارد.

بنابراین، به‌عنوان یک ایده کلی از شرایط طبیعی، زیستی، اقتصادی و مدیریتی حوضه آبریز رودخانه و مناطق همجوار جریان اصلی آن، با توجه به دستاوردهای این تحقیق قابل ذکر است که مناطق کشاورزی و زیستی موجود در منطقه تأثیر به‌سزایی در آلوده نمودن منطقه عباس‌آباد همدان داشته‌اند به‌گونه‌ای که این رودخانه علی‌رغم واقع شدن در منطقه‌ای کوهستانی، خوش آب و هوا و ییلاقی، متاسفانه به‌دلیل مدیریت نامطلوب ناشی از شرایط اقتصادی منطقه که تمایل به تغییر کاربری بیشتر و گسترش پیش از پیش تفریح‌گاه‌ها و مناطق توریستی می‌باشد وضعیت زیست‌محیطی آن را به لبه‌ی بحرانی نیل داده است. لذا به‌منظور پرهیز از وجود چنین شرایطی ایجاد یک مدیریت جامع مشتمل بر بخش کشاورزی و جلوگیری از توسعه امکانات توریستی و تفریحی منطقه، باید به گونه‌ای باشد که از ورود بیشتر آلاینده‌ها به رودخانه جلوگیری به‌عمل آمده و یک تعادل پایدار از نظر حجم آلاینده‌های ورودی به وجود آید و خودپالایی طبیعی رودخانه از گسترش نرخ آلاینده‌ها جلوگیری نماید.

جدول ٦- نتایج صحت‌سنجی پارامترهای مدل

Table 6- Validation of the model parameters of summer period

	BOD (mg/L)	DO (mg/L)	NO_3 (µg/L)	EC (µs/cm)	pH	Water Temperature (°C)
RMSE	1.09	0.26	120.91	14.50	0.30	1
MSE	1.20	0.06	14620.78	210.25	0.09	1
MAE	0.90	0.22	79.22	12.95	0.24	0.96
SE	0.08	0.03	0.06	0.08	0.04	0.06

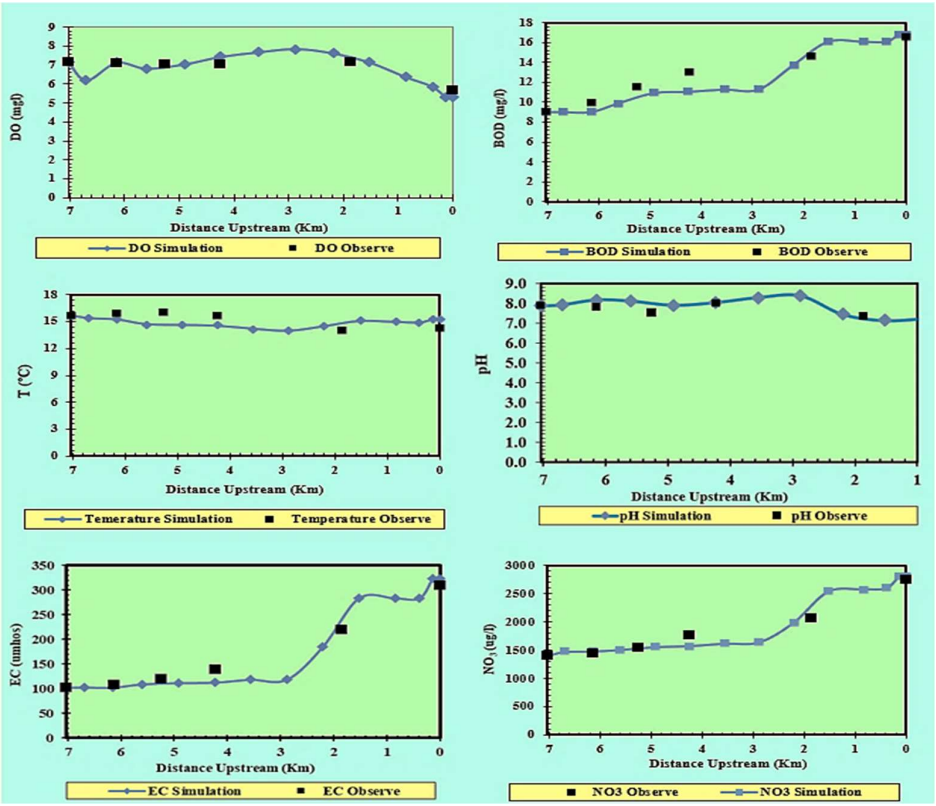


Fig. 6- Variations in the Abbas-Abad River quality parameters during summer season

شکل ٦- روند تغییرات پارامترهای کیفی در طول رودخانه عباس‌آباد در فصل تابستان

 DOI: 10.22055/jise.2024.47846.2134

نتیجه‌گیری

به‌منظور تحقق اهداف تحقیق تغییرات کیفی زمانی-مکانی رودخانه عباس‌آباد و داده‌های هواشناسی ایستگاه عباس‌آباد و داده‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی شش ایستگاه هیدرومتری (سال ۱۴۰۰) مورد استفاده و آنالیز قرار گرفتند. با استفاده از مدل QUAL2Kw آلاینده‌های مختلف ورودی به رودخانه بررسی گردیدند. نتایج کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل، نشان از توانمند بودن و دقت مدل QUAL2Kw در بررسی وضعیت و تغییرات کیفی زمانی-مکانی رودخانه می‌باشد. براساس یافته‌های این تحقیق، بالا بودن pH، نشان‌دهنده شرایط قلیایی آب رودخانه می‌باشد. همچنین میزان آلودگی ورودی به رودخانه در فصل تابستان به‌دلیل تخلیه پساب‌های کشاورزی و فاضلاب رستوران‌ها بیشتر از فصل بهار است. افزایش میزان DO در فصل‌های بهار و تابستان در پایین‌دست رودخانه نشان‌دهنده وضعیت نامناسب رودخانه می‌باشد. بدان معنی که در پایین‌دست رودخانه مقدار آلودگی ورودی به آن افزایش یافته و ضریب خودپالایی رودخانه کاهش می‌یابد. اگرچه غلظت NO_3 در دو فصل بهار و تابستان در طول رودخانه روندی افزایشی داشته، اما ماکزیمم غلظت NO_3 در پایین‌دست رودخانه نسبت به مقدار استاندارد ورودی به آب‌های سطحی از جمله رودخانه‌ها (۱۰ میلی‌گرم بر لیتر) مقدار قابل توجهی نمی‌باشد و با افزایش آن دارای وضعیت نگران‌کننده‌ای نخواهد بود. بنابراین بر اساس یافته‌های تحقیق حاضر، پیشنهاد می‌گردد اقدامات مدیریتی بیشتری به‌منظور کنترل منابع آلاینده ورودی به رودخانه صورت گیرد تا کیفیت آب آن در حد مطلوب و استاندارد محیط‌زیست کشور حفظ گردد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

حمایت های مالی این تحقیق از محل اعتبار پژوهشی صورت گرفته است. بدینوسیله از حمایت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه بوعلی سینا تقدیر می‌شود.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: عاطفه نورعلیئی، جمع‌آوری و آنالیز داده‌ها، انجام مواد و روش‌ها، نگارش اولیه مقاله، اجرای نرم‌افزار، بررسی نتایج و نگارش نهایی مقاله.

نویسنده دوم: صفری معروفی، بررسی اولیه مقاله، بررسی نتایج و بررسی نگارش نهایی مقاله.

نویسنده سوم: امید بابامیری، جمع‌آوری و آنالیز داده‌ها ، اجرای نرم‌افزار، بررسی نتایج.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از مسئولان و کارکنان شرکت آب منطقه‌ای و اداره کل هواشناسی استان همدان، برای ارائه برخی از اطلاعات ضروری و حمایت معنوی از این تحقیق تشکر و قدردانی می‌کنند.

References

1- Abdeveis, S., Sedghi, H., Hassonizadeh, H. and Babazadeh, H., 2020. Application of water quality index and water quality model QUAL2K for evaluation of pollutants in Dez River, Iran. *Water Resources*, *47*, pp.892-903. Doi:10.1134/S0097807820050188.

2- Babamiri, O. and Dinpashoh, Y., 2023. Uncertainty Analysis of River Water Quality Based on Stochastic Optimization of Waste Load Allocation Using the Generalized Likelihood Uncertainty Estimation Method. *Water Resources Management*, pp.1-23. Doi:10.1007/s11269-023-03704-9.

3- Babamiri, O., Marofi, S., and Azari, A., 2020. An investigation into self-purification and modeling of changes in nitrogen and phosphor along Dez River (The distance between Dez Dam and Band-Ghir Bridge). *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(3), 301-315. Doi: 10.22034/jest.2020.31130.3948.

4- Babamiri, O., Vanaei, A., Guo, X., Wu, P., Richter, A. and Ng, K.T., 2021. Numerical Simulation of Water Quality and Self-Purification in a Mountainous River Using QUAL2KW. *Journal of Environmental Informatics, 37(1).* Doi: 10.3808/jei.202000435.

5- Babamiri, O., Noorali, A. and Marofi, S., 2026. Optimized Modeling of Pollution Load Allocation in a Mountainous River of Semiarid Basin Based on Bankruptcy Rules: A Case Study of the Abbas-Abad River, Iran. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *152*(5), p.05026006.

6- Biglari, M.R., Sima, S. and Saadat pour, M., 2019. Modeling and management of the river water quality for aquatic life using a source control approach (case study: The Zarrineh River). *Iran-Water Resources Research*, *14*(5), pp.57-70. (In Persian).

7- Bui, H.H., Ha, N.H., Nguyen, T.N.D., Nguyen, A.T., Pham, T.T.H., Kandasamy, J. and Nguyen, T.V., 2019. Integration of SWAT and QUAL2K for water quality modeling in a data scarce basin of Cau River basin in Vietnam. *Ecohydrology & Hydrobiology*, *19*(2), pp.210-223. Doi: 10.1016/j.ecohyd.2019.03.005.

8- Chen, Q.S., Xie, X.H., Du, Q.Y. and Liu, Y., 2018. October. Parameters sensitivity analysis of DO in water quality model of QUAL2K. In *IOP Conference series: earth and environmental science* (Vol. 191, No. 1, p. 012030). IOP Publishing. Doi:10.1088/1755-1315/191/1/012030.

9- Chapra, S. C., Pelletier, G. J. and Tao, H., 2008. *QUAL2K: A modeling framework for simulating river and stream water quality, version 2.11: Documentation and user's manual.* Civil and Environmental Engineering Department, Tufts University, Medford, MA, 109.

10- Chapra, S.C., Pelletier, G.J. and Tao, H., 2003. *QUAL2K*: *A modeling framework for simulating river and stream water quality: Documentation and user's manual*. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA, 25, p.121.

11- Emami Ghara, F., Fazloula, R., and Khoshravesh, M., 2023. Investigating trends of qualitative changes of Neka River using the QUAL2Kw in the downstream of Gelevard Dam. *Irrigation and Water Engineering*, 14(1), 266-283. Doi: 10.22125/iwe.2023.369028.1686.

12- Farkhani, Sh., 2021. Investigating the Quality Status of Haraz River Using Numerical Modeling. *Iran-Water Resources Research*, *17*(1), pp.262-276. (In Persian).

13- Farkhani, Sh., 2018. Qualitative modeling of Haraz River using QUAL2K model. In: *Proc. of Conference on Civil engineering, Architecture and Urbanism of the Islamic Countries, 16-17 May, Tabriz, Iran*. (In Persian).

14- Herbay, J.P., Smeers, Y. and Tyteca, D., 1983. Water quality management with time varying river flow and discharger control. *Water Resources Research, 19(6)*, pp.1481-1487. Doi:10.1029/WR019i006p01481.

15- Iqbal, M.M., Shoaib, M., Farid, H.U. and Lee, J.L., 2018. Assessment of water quality profile using numerical modeling approach in major climate classes of Asia. *International journal of Environmental Research and Public Health*, *15*(10), p.2258. Doi:10.3390/ijerph15102258.

16- Kamal, N.A., Muhammad, N.S. and Abdullah, J., 2020. Scenario-based pollution discharge simulations and mapping using integrated QUAL2K-GIS. *Environmental Pollution*, *259*, p.113909. Doi: 10.1016/j.envpol.2020.113909.

17- Kannel, P.R., Lee, S., Kanel, S.R., Lee, Y.S. and Ahn, K.H., 2007. Application of QUAL2Kw for water quality modeling and dissolved oxygen control in the river Bagmati. *Environmental Monitoring and Assessment*, *125*, pp.201-217. Doi:10.1007/s10661-006-9255-0.

18- Nezad, S.M., Ebrahimi, K. and Kerachian, R., 2018. Investigation of seasonal self-purification variations of Karun River, Iran. *Amir Kabir J Civil Eng.*, *49*(4), pp.621-634. Doi:10.22060/ceej.2016.866.

19- Noorali, A., Babamiri, O. and Marofi, S., 2026. Uncertainty assessment of mountainous river water quality parameters using the generalized likelihood uncertainty estimation method. *Hydrological Sciences Journal*, 71(1), pp.152-165. https://doi.org/10.1080/02626667.2025.2589354

20- Noorali, A., Marofi, S. and Babamiri, O., 2024. The impact of implementing a water treatment plant on the quality and pollution levels of the Abbas-Abad mountainous River. *Journal of Water and Irrigation Management.* (In Persian). Doi: 10.22059/jwim.2024.369706.1127.

21- Pashazadeh Laleh, Z., Jafari, H. and Vaezihir, A., 2021. Qualititaive assessment of the Aji-Chay River (Tabriz plain) based on the specific use's quality indices. *Irrigation and Water Engineering*, *11*(4), pp.344-367. Doi:10.22125/IWE.2021.133769.

22- Rafiee, N., and Azari, A., 2020. Evaluating the Effects of Constructing Urban and Agricultural Wastewater Treatment Plants on Improvement of Quality and Contamination Trends of Dez River. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 50(98), 33-41. Doi: 10.22034/ceej.2020.11125.

23- Rafiee, M., Akhond-Ali, A.M., Moazed, H., Lyon, S.W., Jaafarzadeh, N. and Zahraie, B., 2014. A case study of water quality modeling of the Gargar River, Iran. *Journal of Hydraulic Structures*, *1*(2), pp.10-22. (In Persian). Doi: 10.22055/JHS.2014.10533.

24- Venae, A., Marofi, S. and Azari, A., 2018. Investigating the self-remediation of the mountainous area of the Abbas Abad River in Hamedan. *Journal of Environment, 43(4)*, 727–742. (In Persian).

25- Zallaghi, M., and Afrous, A., 2019. Qualitative simulation of nitrate and phosphate along the Dez River using QUAL2KW model. *Journal of Soil and Water Research*, 50(90), 2099-2111.

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 1, Spring 2026, p. 59-84

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

Research Paper

EXTENDED ABSTRACT

Joint Frequency Analysis of Meteorological Drought Duration and Severity Based on ERA5-Land Reanalysis Database

A. Mianabadi[1*], M. Nazeri Tahroudi[2] and M. Pourreza-Bilondi[3]

1- Corresponding Author, Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. (a.mianabadi@kgut.ac.ir).*
2- Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad. Iran.
3- Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand. Iran.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 26 December 2024
Revised: 21 pril 2025
Accepted: 12 May 2025
Available online: 05 May 2026

Keywords:
Copula Function, Drought Duration, Drought Severity, Marginal Distribution, Reanalysis, SPI.

TO CITE THIS ARTICLE:

Mianabadi, A., Nazeri Tahroudi, M., Pourreza-Bilondi, M. 2026. 'Joint Frequency Analysis of Meteorological Drought Duration and Severity Based on ERA5-Land Reanalysis Database', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(1), pp. 59-84. doi: 10.22055/jise.2025.48618.2150.

Abstract

Drought is a natural phenomenon that occurs when precipitation is below normal levels over period of time and is characterized by duration, severity, intensity, and frequency. Due to climate change, these characteristics have changed, necessitating updated monitoring methods. Drought characteristics were often examined separately through univariate - analyses; however, drought is an interrelated, multivariate phenomenon whose attributes are dependent on one another. Therefore, recent studies have recommended joint analysis of drought characteristics using multivariate probability functions. This study used copula functions to analyze drought duration and severity jointly. Daily precipitation data from Bandar Anzali (wet, 1755 mm average annual rainfall) and Kerman (dry, 131 mm average annual rainfall) were analyzed from 1959 to 2020 using ERA5-Land reanalysis. The Standardized Precipitation Index (SPI) was calculated for six time scales (1, 3, 6, 9, 12, and 24 months). After fitting marginal distribution functions to the variables and confirming the correlation between drought duration and severity, the best copula functions were selected for each timescale. The results showed that in the "AND" condition (D≥d AND S≥s), the probability of similar droughts was higher in Kerman than in Bandar Anzali, while in the "OR" condition (D≥d OR S≥s), the probability of droughts with either high duration or severity was greater in Bandar Anzali. Furthermore, estimating return periods by considering both duration and severity jointly provided a more accurate assessment of drought events. The resulting curves, which demonstrate the relationship between drought duration, severity, and return period, can serve as standard references for the Bandar Anzali and Kerman stations across various time scales. These curves remain applicable as long as the statistical distribution of drought duration and severity does not change. They provide a practical tool for monitoring drought across different time windows and devising more effective strategies for water resources management and mitigating drought impacts.

Introduction

Drought is characterized by prolonged periods of below-normal precipitation, leading to water shortages affecting ecosystems, agriculture, and human activities. Key attributes used to describe drought include duration, severity, intensity, and frequency. The importance of these characteristics in the design of water supply systems cannot be overstated. In recent years, changes attributed to climate change have been observed in these characteristics, highlighting the need for improved methods of monitoring drought. Given their random nature, studies on drought characteristics are frequently conducted using probabilistic theories. While many previous studies have focused on examining drought characteristics separately through univariate analyses. It has been established that drought is a multivariate phenomenon. Characteristics such as duration and severity are interdependent; therefore, accurate monitoring cannot be achieved using univariate functions alone. As a result, recent research has advocated for studying drought and its associated characteristics through multivariate probabilistic functions. Copula functions and joint probability distribution approaches allow researchers to analyze multiple related variables simultaneously (e.g., Drought duration vs. Drought severity) rather than independently treating them as separate time series data. Addressing the complexity of drought through multivariate approaches enables researchers and practitioners alike to develop robust monitoring frameworks essential for sustainable environmental management amid changing climatic conditions. In this study, copula functions and the ERA5-Land reanalysis dataset were utilized to conduct a comprehensive analysis of drought characteristics at two stations located in southern and northern Iran during the period from 1959 to 2020.

Materials and Methods

ERA5-Land data

The ERA5-Land reanalysis product is recognized as an enhanced version of the original ERA5 dataset, which was developed by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Various climate variables, including temperature, humidity, precipitation, and wind, are provided by both ERA5 and ERA5-Land products; however, a distinction in their spatial resolution exists (Muñoz-Sabater et al., 2021).

Standardized Precipitation Drought Index (SPI)

In this study, the Standardized Precipitation Index (SPI) was employed for monitoring drought conditions. A drought event is identified when the SPI value fallsbelow zero according to Run Theory (Yevjevich, 1967). Utilizing this theoretical framework with SPI enables calculations of both duration and severity related to drought events. The duration of a drought is defined as a continuous time period in months during which SPI values remain below zero. Additionally, the severity of a drought is characterized as the cumulative sum of SPI values throughout that period.

Marginal and copula functions

In this analysis, after calculating both duration and severity associated with drought conditions while examining correlations between these two variables using Kendall's tau statistic, 11 marginal distribution functions were fitted for each variable. Following the identification of optimal marginal functions, 7 copula functions were utilized at each station for comprehensive joint monitoring of drought events. Finally, calculations were conducted to determine joint probabilities of occurrence and joint return periods under two scenarios: "and" ($D \geq d$ and $S \geq s$) and "or" ($D \geq d$ or $S \geq s$).

Results and Discussion

ERA5-Land showed better performance in estimating monthly precipitation for Kerman compared to Bandar Anzali. However, overall accuracy was found to be good at both stations when considering the values of the evaluation criteria. It has been noted that alternating periods of drought and wet years have been experienced at the Bandar Anzali station, while longer and more severe drought periods

have occurred at the Kerman station, with the most intense drought recorded between 1960 and 1970. By evaluating marginal distributions, it was shown that among the examined distribution functions, a good fit for duration and severity of drought in various time windows was provided by generalized Pareto, Nakagami, GEV, Normal, log-logistic, and Weibull distributions. The correlation among the studied pair variables was confirmed; results from copula function analysis demonstrated that Galambos Copula offered the best fit at 1-, 6-, and 24-month scales; Frank copula showed optimal fitting at a 9-month scale; while Gumbel-Hoggard exhibited superior fitting at a 12-month scale. It was found that the joint probability of drought occurrence over a 24-month period with a duration of less than 8 months and severity below 8 is approximately 16% for Bandar Anzali and about 20% for Kerman. For both stations at a one-month scale, this joint probability is roughly estimated to be around 75%. Furthermore, drought severity can be estimated with varying probabilities for specific durations.

Conclusion

Based on the results and as indicated in earlier studies, it has been observed that the computational return period in the "and" scenario is greater than in the "or" scenario. This suggests that the likelihood of two events occurring simultaneously is significantly lower, resulting in longer return periods. Additionally, a general review of the presented graphs reveals that in the combined "AND" case ($D \geq d$ AND $S \geq s$), a higher probability of similar droughts occurring is found for Kerman compared to Bandar Anzali. Conversely, in the "OR" case ($D \geq d$ OR $S \geq s$), a greater probability of drought occurrences with any characteristics related to duration or severity is noted for Bandar Anzali. It has been determined that estimating return periods by considering both drought duration and severity together can provide more useful and precise outcomes for comprehensive analyses of drought events. In fact, the curves produced to illustrate relationships between duration, severity, and return period (probability of occurrence) for droughts can be utilized as standard curves for both Bandar Anzali and Kerman stations across various time scales. These curves remain effective as long as there are no changes in the statistical distributions of drought duration and severity values at these stations; therefore, they can enhance monitoring efforts regarding an essential component of water resources—precipitation—more accurately over different time intervals while offering more effective solutions to mitigate drought impacts.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

Data Availability Statement: All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution

First Author: Ameneh Mianabadi, Proposing the idea, Data analysis, Writing original draft.
Second Author: Mohammad Nazeri Tahroudi, Code programing, Investigation, Review and editing.
Third Author: Mohsen Porreza-Bilondi, Investigation, Review and editing.

Acknowledgment

This research has no acknowledgments.

References

1- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H. and Martens, B., 2021. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth system science data*, *13*(9), pp.4349-4383. doi: 10.5194/essd-13-4349-2021.

2- Yevjevich, V., 1967. An objective approach to defnitions and investigations of continental hydrologic droughts. *Hydrology Papers*, 23, 1–18.

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ٤٩، شماره‌ی۱، بهار ١٤٠٥، مقاله پژوهشی، ص. ٨٤-٥٩

تحلیل فراوانی توأم مدت و سختی خشکسالی هواشناسی مبتنی بر داده‌های بازتحلیل حاصل از پایگاه ERA5-Land

آمنه میان‌آبادی[1*]، محمد ناظری تهرودی[2] و محسن پوررضا بیلندی[3]

۱*- نویسنده مسئول، گروه اکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران، (a.mianabadi@kgut.ac.ir)

۲- گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

۳- گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۶ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۲ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵

چکیده

خشکسالی یکی از پدیده‌های طبیعی است که در صورت کاهش بارش نسبت به مقدار نرمال طی یک بازه زمانی رخ می‌دهد و با مشخصه‌هایی مانند مدت، سختی، شدت و فراوانی شناخته می‌شود. تغییرات اقلیمی اخیر موجب تغییر این مشخصه‌ها شده و ضرورت به‌روزرسانی روش‌های پایش خشکسالی را دوچندان کرده است. با توجه به ماهیت درهم‌تنیده خشکسالی، تحلیل مشخصه‌های آن به‌صورت چندمتغیره و توأم، با استفاده از توابع مفصل، در مطالعه‌های اخیر توصیه می‌شود. در گذشته، تحلیل خشکسالی بیشتر با داده‌های ایستگاهی انجام می‌شد، اما در مناطق فاقد ایستگاه این امکان وجود ندارد. در این مطالعه، از داده‌های بارش بازتحلیل ERA5-Landبرای محاسبه شاخص SPI و بررسی توأم مدت و سختی خشکسالی در شش مقیاس زمانی یک تا ۱۲ ماهه استفاده شد. دقت این داده‌ها با اطلاعات بارش روزانه ایستگاه‌های بندرانزلی (ایستگاه مرطوب) و کرمان (ایستگاه خشک) طی سال‌های ۱۹۵۹ تا ۲۰۲۰ ارزیابی گردید. پس از برازش توابع توزیع حاشیه‌ای و تأیید همبستگی بین مدت و سختی خشکسالی، بهترین تابع مفصل برای هر مقیاس زمانی انتخاب شد .نتایج نشان داد که در حالت "و(D≥d and S≥s) "، احتمال وقوع خشکسالی‌های مشابه در کرمان بیشتر از بندرانزلی است، در حالی که در حالت "یا(D≥d or S≥s) "، احتمال وقوع خشکسالی با هر یک از مشخصه‌های مدت یا سختی بالا در بندرانزلی بیشتر است .همچنین، تخمین دوره بازگشت با در نظر گرفتن هر دو متغیر مدت و سختی به‌صورت توأم، تحلیل دقیق‌تری از وقایع خشکسالی ارائه می‌دهد. منحنی‌های به‌دست‌آمده می‌توانند به‌عنوان الگوی قابل استفاده در مقیاس‌های زمانی مختلف برای پایش خشکسالی و کمک به تصمیم‌گیری در مدیریت منابع آب تا زمانی که توزیع آماری مقادیر مدت و سختی خشکسالی تغییر نکند، به کار گرفته شوند. همچنین، عملکرد مطلوب ERA5-Land در تخمین بارش، کارایی آن را برای تحلیل خشکسالی در مناطق فاقد داده‌های ایستگاهی نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: بازتحلیل، تابع مفصل، توزیع حاشیه‌ای، سختی خشکسالی، مدت خشکسالی، SPI.

مقدمه

خشکسالی پدیده‌ای طبیعی است که هنگامی که بارش در منطقه‌ای از مقدار نرمال منطقه در یک دوره زمانی کمتر باشد، اتفاق می‌افتد. وقوع خشکسالی می‌تواند اثرات زیادی بر اکوسیستم، کشاورزی، منابع آب داشته و چالش‌های اجتماعی–اقتصادی قابل ملاحظه‌ای را به دنبال داشته باشد (Dai, 2011; Wilhite, 2000). خشکسالی با مشخصه‌هایی همچون مدت (Duration)، سختی (Severity)، شدت (Intensity) و فراوانی (Frequency) خشکسالی مشخص می‌شود. این مشخصه‌ها اهمیت زیادی در طراحی سیستم‌های تأمین آب دارند (Shiau, 2006). در سال‌های اخیر به‌دلیل وقوع تغییرات اقلیمی، این مشخصه‌ها تغییر یافته و بنابراین نیاز برای بهبود روش‌های پایش خشکسالی احساس می‌شود (IPCC, 2021; Trenberth et al., 2014). مشخصه‌های خشکسالی به‌دلیل تصادفی بودن اغلب با استفاده از نظریه‌های احتمالاتی مورد بررسی قرار می‌گیرند (Shiau, 2006). اگرچه اغلب مطالعه‌های گذشته مشخصه‌های خشکسالی را به‌صورت تک متغیره و جداگانه بررسی نموده‌اند، اما پدیده‌های درهم‌تنیده‌ای چون خشکسالی، رخدادهای چند متغیره هستند که مشخصه‌های آن‌ها از جمله مدت و سختی به همدیگر وابسته می‌باشند و پایش آن‌ها با استفاده از توابع تک متغیره نمی‌تواند با دقت مناسبی همراه باشد (Mishra and Singh, 2011). بنابراین مطالعه‌های اخیر پیشنهاد کرده‌اند که بررسی خشکسالی و مشخصه‌های آن با استفاده از توابع احتمالی چندمتغیره از دقت بیشتری برخوردار است (Shiau, 2006; Tosunoğlu and Onof, 2017).

DOI: 10.22055/jise.2025.48618.2150

بر این اساس برخی از محققان مانند González و Valdés (2003) و Nadarajah (2006) از توابع توزیع دو متغیره برای پایش توأم متغیرهای هیدرومتئورولوژی از جمله خشکسالی استفاده می‌کردند که علی‌رغم سادگی، دارای محدودیت‌هایی می‌باشند، از جمله اینکه تابع توزیع حاشیه‌ای هر متغیر باید از یک خانواده باشد (Frees and Valdez, 1998). به‌عنوان مثال، اگر مدت خشکسالی دارای تابع توزیع گاما و سختی خشکسالی دارای تابع توزیع گامبل باشد، امکان استفاده از توابع توزیع دومتغیره وجود ندارد. برای رفع این محدودیت توابع توزیع چندمتغیره با استفاده از توابع مفصل مورد توجه محققین قرار گرفت. توابع مفصل توابعی هستند که تابع توزیع تجمعی چندین تابع توزیع یک متغیره را ترکیب نموده و تابع توزیع چند متغیره تولید می‌کنند (Grimaldi et al., 2016; Shiau, 2006). مزیت اصلی توابع مفصل این است که این توابع قادر به مدل‌سازی وابستگی بین چند متغیر تصادفی بدون درنظر گرفتن توابع توزیع حاشیه‌ای آن‌ها می‌باشند. لازم به ذکر است که تابع توزیع حاشیه‌ای هر متغیر، بهترین تابع توزیع برازش داده شده به آن متغیر بدون درنظر گرفتن توزیع سایر متغیرها می‌باشد.

با درنظر گرفتن متغیرهای تصادفی پیوسته $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ با توابع توزیع حاشیه‌ای $F_1(x_1)$، $F_2(x_2)$، ...، $F_n(x_n)$، با استفاده از توابع مفصل می‌توان تابع توزیع احتمال توأم این متغیرها $(F(x_1, x_2, \dots, x_n))$ را با رابطه زیر به‌دست آورد:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = C[F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)] \quad (۱)$$

مطالعه‌های گذشته نشان داده‌اند که توابع مفصل بهتر از سایر روش‌ها از جمله روش‌های یادگیری ماشین یا روش‌های ترکیبی وزنی برای پایش توأم خشکسالی عمل می‌کند (Mishra and Singh, 2011; Wang et al., 2020).

توابع مفصل در مطالعه‌های مختلفی برای مدل‌سازی چند متغیره خشکسالی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به‌عنوان مثال، Shiau (2006) از توابع مفصلی دو بعدی برای تحلیل توأم مدت و سختی خشکسالی در ایستگاه بارانسنجی Wushantou در تایوان استفاده نموده و بر اساس آن دوره بازگشت وقایع خشکسالی با مدت و سختی‌های مختلف را به‌دست آورد. توابع مفصل برای تحلیل مدت–سختی خشکسالی در سال‌های ۱۹۵۴–۲۰۰۳ در دو ایستگاه بندرانزلی و آبادان در ایران توسط Shiau و Modarres (2009) استفاده شد. بر اساس نتایج ایشان، به‌دلیل نوسانات زیاد بارش در بندرانزلی، سختی خشکسالی‌ها در این ایستگاه بیشتر از ایستگاه آبادان بوده است. در مطالعه دیگری که در ایران توسط Behzadi et al. (2024) انجام شد، از توابع مفصل برای بررسی اثرات دوره برگشت تغییر اقلیم بر مدت–سختی وقایع خشکسالی استفاده شد. بر اساس نتایج آن‌ها وقایع خشکسالی در اقلیم آینده ایران مدت و سختی بیشتری خواهد داشت و احتمال وقوع آن‌ها افزایش خواهد یافت.

علاوه بر مطالعه‌های ذکر شده، محققان دیگری به مدل‌سازی چند متغیره وقایع خشکسالی و تحلیل توأم مدت، سختی و دوره بازگشت این وقایع با استفاده از توابع مفصل پرداختند که از آن میان می‌توان به مطالعه‌های Liu et al. (2011)، Ganguli و Reddy (2012)، Zhang et al. (2013)، Abdul Rauf و Zeephongsekul (2014)، Liu et al., (2016)، Tosunoglu و Can (2016)، Tosunoglu و Kisi (2016)، Tosunoğlu و Onof (2017)، Chen و Guo (2019)، EskandariPour و Soltaninia (2022)، Páscoa et al. (2024) Meimandi et al. (2024) و Ahmad et al. (2024) اشاره نمود. مطالعه‌های فوق نشان می‌دهد که کاربرد مفصل در تحلیل و مدل‌سازی خشکسالی در سال‌های اخیر گسترش یافته و نتایج خوبی در شرایط اقلیمی و هیدرولوژیکی مختلف به همراه داشته است.

لازم به ذکر است که اغلب مطالعه‌های صورت گرفته در زمینه تحلیل خشکسالی با استفاده از توابع مفصل بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌ها بوده است. اما به‌دلیل پراکنش نامناسب ایستگاه‌های باران‌سنجی در برخی از مناطق دنیا و یا تعداد کم سال‌های آماری در برخی از ایستگاه‌ها، امکان استفاده از این روش در چنین شرایطی وجود ندارد. استفاده از پایگاه‌های داده‌ای جهانی که شبکه‌بندی مناسبی از متغیرهای اقلیمی از جمله بارش و دما را فراهم می‌کنند، می‌تواند در این زمینه مورد توجه قرار گیرد. برخی از این محصولات از جمله محصولات بازتحلیلی ERA5 و ERA5-Land Hersbach et al (2020) Muñoz-Sabater et al (2021) دارای داده‌های طولانی‌مدت بارش می‌باشند که امکان استفاده از آن‌ها را در مطالعه‌های اقلیمی فراهم می‌کنند. نتایج ارزیابی این محصولات در مناطق مختلف و برای کاربردهای مختلف نشان داده است که این دو محصول دقت مناسبی در تخمین متغیرهای اقلیمی داشته و می‌توان از آن‌ها برای مدل‌سازی در مناطق فاقد داده استفاده نمود (Aschale et al., 2024; Guo et al., 2024; Kavyani Malayeri et al., 2021; Tan et al., 2023; Xu et al., 2024; Yilmaz, 2023). با توجه به توان تفکیک بهتر ERA5-Land نسبت به ERA5 و همچنین اینکه تمرکز آن بر روی پارامترهای سطح زمین می باشد تا لایه‌های ارتفاعی بالاتر و نظر به اینکه در مطالعه‌های معدودی از این محصول تاکنون در ایران استفاده شده است (Gholami et al., 2024; Kazemiazar et al., 2025). در این مطالعه عملکرد محصول ERA5-Land برای مدل‌سازی خشکسالی مورد ارزیابی قرار گرفت.

بر این اساس و با توجه به اهمیت مدل‌سازی خشکسالی و تعیین احتمال وقوع و دوره بازگشت رخدادهای خشکسالی با مدت و سختی‌های مختلف به‌ویژه در زمینه مدیریت خشکسالی،

برنامه‌ریزی منابع آب و طراحی سیستم‌های مربوطه، هدف این مطالعه تحلیل توأم مدت و سختی خشکسالی و تعیین احتمال وقوع و دوره بازگشت توأم بر اساس توابع مفصل در دو ایستگاه بندرانزلی و کرمان به‌عنوان دو ایستگاه شاخص با اقلیم های مرطوب و خشک در ایران و با استفاده از محصول بازتحلیل ERA5-Land می‌باشد.

مواد و روش‌ها

داده‌های ایستگاهی

برای پایش توأم مشخصه‌های خشکسالی از داده‌های دو ایستگاه بندرانزلی و کرمان استفاده شد (شکل ۱). ایستگاه بندرانزلی با بارش متوسط سالانه ۱۷۵۵ میلی‌متر مرطوب‌ترین ایستگاه و کرمان با بارش متوسط سالانه ۱۳۱ میلی‌متر یکی از ایستگاه‌های خشک ایران است (Mianabadi, 2023). داده‌های بارش مشاهداتی برای این دو ایستگاه از سال ۱۹۵۹ تا ۲۰۲۰ و در مقیاس روزانه موجود است که برای مطالعه خشکسالی، داده‌های روزانه به داده‌های ماهانه تبدیل شده و مورد استفاده قرار گرفت.

داده‌های ERA5-Land

محصول بازتحلیل ERA5-Land نسخه بهبود یافته ERA5 است که توسط مرکز پیش‌بینی‌های هواشناسی میان‌مدت اروپا (ECMWF) ارائه شده است. هر دو محصول ERA5 و ERA5-Land داده‌های مختلف اقلیمی از جمله دما، رطوبت، بارش و باد را فراهم می‌کنند، اما توان تفکیک مکانی آن‌ها متفاوت است. توان تفکیک ERA5-Land نه کیلومتر (۰/۱× ۰/۱ درجه) است که در مقایسه با توان تفکیک ۳۱ کیلومتری ERA5 (۰/۲۵× ۰/۲۵ درجه) جزئیات بیشتری از داده‌های سطح زمین را فراهم می‌کند (Muñoz-Sabater et al., 2021). همچنین در این محصول بر مؤلفه‌های زمینی تمرکز بیشتری شده است و بنابراین برای مطالعه‌های هیدرولوژیکی مناسب‌تر است. داده‌های ERA5-Land از سال ۱۹۵۰ به‌صورت ساعتی در دسترس کاربران قرار دارد. این داده‌ها را می‌توان از سایت کوپرنیکوس (https://www.copernicus.eu/en/access-data) تهیه کرد، اما در این مطالعه با کدنویسی در محیط GOOGLE COLAB و با بهره‌گیری از قابلیت‌های کدنویسی هم‌زمان پایتون و جاوا اسکریپ، داده‌های بارش روزانه از طریق سامانه Google Earth Engine فراخوانی و پس از تبدیل به مقادیر ماهانه مقادیر شاخص SPI و مشخصه‌های شدت و مدت خشکسالی در پنجره‌های زمانی مختلف استخراج شده و سپس به‌منظور تحلیل فراوانی توأم آن‌ها از توابع مفصل استفاده گردید (شکل ۲).

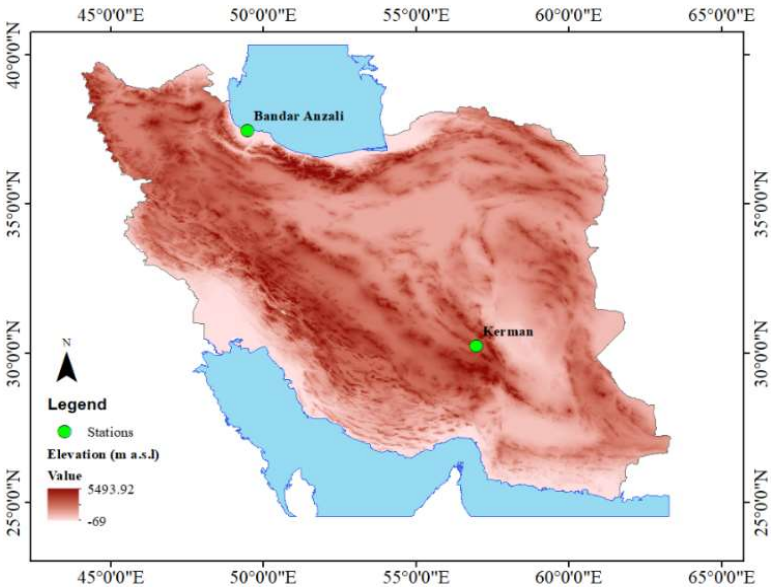


Fig. 1- Location of the two studied stations in Iran

شکل ۱- موقعیت دو ایستگاه مورد مطالعه

 DOI: 10.22055/jise.2025.48618.2150

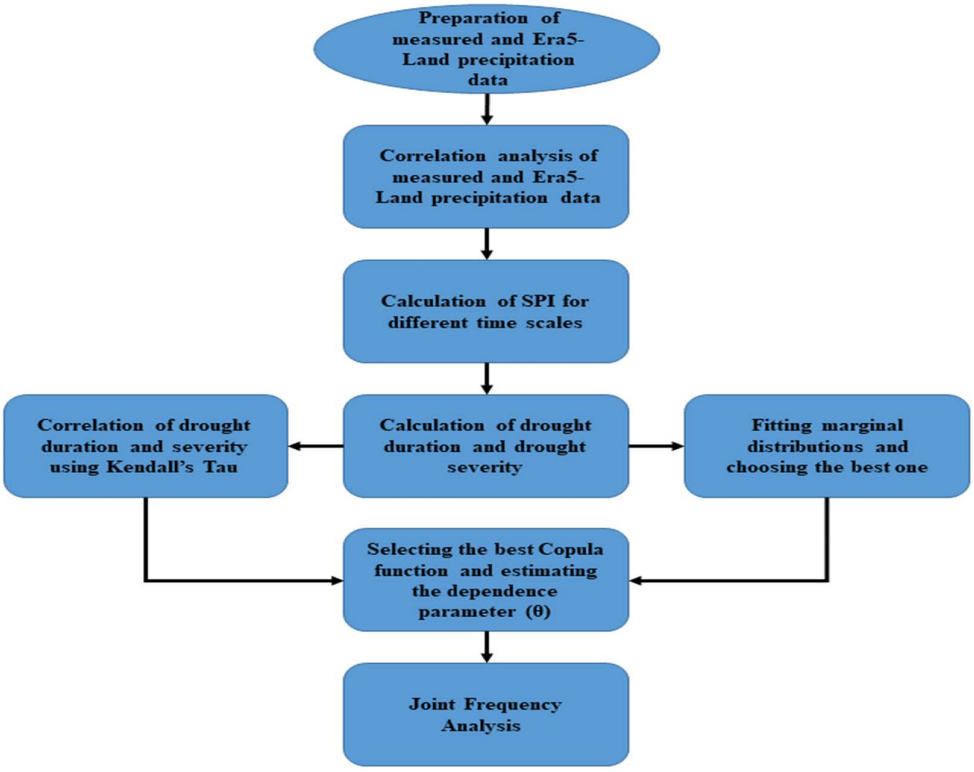


Fig. 2- Flowchart of the methodology
شکل ۲- فلوچارت مراحل انجام کار

شاخص خشکسالی بارش استاندارد شده (SPI)

در این مطالعه برای پایش خشکسالی از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) استفاده شد. این شاخص که توسط McKee et al. (1993) ارائه شده است، برمبنای داده‌های ماهانه بارش به دست می‌آید. شاخص SPI متغیر بارش را به‌عنوان عامل اصلی مؤثر بر مدت و شدت خشکسالی درنظر می‌گیرد (Ali et al., 2019). شاخص فوق احتمال وقوع کمبود یا مازاد بارش را برای منطقه موردنظر و برای پنجره‌های زمانی مختلف (۱ تا ۲۴ ماهه) و با برازش تابع توزیع گاما بر داده‌های بارش محاسبه می‌کند. این احتمال سپس به متغیر تصادفی نرمال Z تبدیل می‌شود تا از تابع توزیع نرمال استاندارد (با میانگین صفر و انحراف معیار ۱) تبعیت کند (Mckee et al., 1993). این مسئله امکان مقایسه شاخص در مکان‌ها و دوره‌های زمانی مختلف را فراهم می‌کند. در این مطالعه شاخص SPI در شش مقیاس زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه محاسبه شد.

مشخصه‌های خشکسالی

بر اساس تعریف و بر مبنای Run Theory، خشکسالی زمانی رخ می‌دهد که مقدار SPI کمتر از صفر باشد (Yevjevich, 1967). بر اساس این نظریه و با استفاده از SPI مدت و سختی خشکسالی را می‌توان محاسبه نمود. مدت خشکسالی دوره زمانی (تعداد ماه‌ها) پیوسته‌ای است که در آن دوره SPI کمتر از صفر باشد. سختی خشکسالی نیز به‌صورت مجموع مقادیر SPI در هر دوره تعریف می‌شود.

توابع حاشیه‌ای و مفصل

در این مطالعه پس از محاسبه مدت و سختی خشکسالی، ضمن بررسی همبستگی بین جفت متغیر مدت-سختی خشکسالی با استفاده از آماره تائو کندال، تعداد ۱۱ تابع توزیع حاشیه‌ای بر هریک از این متغیرها برازش داده شد. توابع توزیع مورد بررسی در این مطالعه برای مدت و سختی خشکسالی شامل توابع نرمال، لوگ نرمال، نمایی، گاما، GEV، لوجستیک، لوگ لوجستیک، رایلی (Rayleigh)، ناکاگامی (Nakagami)، پارتو تعمیم یافته (Generalized Pareto) و ویبول می‌باشد. پس از برازش توابع حاشیه‌ای، بهترین تابع برای هر متغیر بر اساس معیارهای آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE) انتخاب شد. لازم به ذکر است که برای تخمین پارامتر θ از روش منطقی برای حاشیه‌ها (Inference Function for Margins (IFM)) استفاده شد (Joe, 1997).

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_{im} - x_{io})^2}{n}} \qquad (۱)$$

$$\mathrm{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_{io} - x_{im})^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_{io} - \overline{x_o})^2} \quad (۲)$$

در روابط بالا، x_{io} احتمال تجربی، x_{im} احتمال تئوری، $\overline{x_o}$ مقدار متوسط احتمال تجربی و n تعداد نمونه می‌باشد. لازم به ذکر است که همبستگی بین جفت متغیر مورد مطالعه با استفاده از آماره تائو کندال (Kendall's Tau) انجام شد (Nash and Sutcliffe, 1970).

$$\tau = \binom{N}{2}^{-1} \sum_{i<j} \mathrm{sign}\left[(x_i - x_j)(y_i - y_j)\right] \quad (۳)$$

در رابطه فوق، N تعداد داده‌ها، sign() تابع علامت و x و y جفت داده‌های مشاهداتی برای مقادیر یاد شده می‌باشد. همان گونه که از رابطه آن مشخص است این معیار شباهت بین رتبه بندی دو متغیر را کمی می‌کند و در حقیقت معیاری برای تعیین قدرت و برای ارتباط بین دو متغیر در یک مقیاس ترتیبی می‌باشد.

پس از تعیین بهترین توابع حاشیه‌ای برای هر ایستگاه، تعداد هفت تابع مفصل برای پایش توأم خشکسالی در دو ایستگاه استفاده شد که مشخصات این توابع در جدول (۱) آمده است. در این روابط u و v توابع توزیع تجمعی توزیع‌های حاشیه‌ای و θ نیز پارامتر وابستگی تابع مفصل است که درجه ارتباط بین u و v را نشان می‌دهد (Shiau, 2006). انتخاب بهترین تابع مفصل برای توزیع توأم مدت و سختی خشکسالی نیز بر مبنای معیارهای آماری RMSE، NSE و معیار آکاییکه (AIC) صورت گرفت. استفاده از این معیارها در کنار هم می‌تواند دقت، میزان خطا و کارایی مدل را مورد بررسی قرار دهد. مدل برتر بر اساس کمترین معیار آکاییکه، کمترین مقدار RMSE و بیشترین مقدار NSE انتخاب می‌شود.

$$\mathrm{AIC} = 2k - 2\,ln(L) \quad (۴)$$

در این رابطه، k تعداد پارامترهای تخمین زده شده و L مقدار حداکثر درست‌نمایی می‌باشد که به شرح زیر برآورد می‌شود:

$$\mathrm{L}(\Theta) = \prod_{i=1}^{n} f(x_i;\theta) \quad (۵)$$

محاسبه دوره بازگشت

دوره بازگشت بر مبنای مدت و سختی خشکسالی و به طور جداگانه با روابط زیر محاسبه می‌شود (Shiau and Shen, 2001):

$$T_D = \frac{E(L)}{1 - F_D(d)}$$
$$T_S = \frac{E(L)}{1 - F_S(s)} \quad (۶)$$

در روابط بالا T_D و T_S دوره بازگشت تک متغیره بر مبنای مدت خشکسالی بزرگتر از d و سختی خشکسالی بزرگتر از s، L فاصله بین وقوع دو خشکسالی پیاپی، $E(L)$ میانگین فواصل L و $F_D(d)$ و $F_S(s)$ نیز احتمال وقوع مدت خشکسالی بزرگتر از d و سختی خشکسالی بزرگتر از s می‌باشد.

اما با توجه به آنچه ذکر شد، خشکسالی یک پدیده چندمتغیره است که با مدت و سختی خشکسالی مشخص می‌شود و بنابراین محاسبه دوره بازگشت توأم با درنظر گرفتن هر دو مشخصه مدت و سختی می‌تواند باعث پایش بهتر خشکسالی شود (Tosunoğlu and Onof, 2017). بنابراین دوره بازگشت توأم خشکسالی را می‌توان در دو حالت "و" ($S \geq s$ and $D \geq d$) و "یا" ($D \geq$ $S \geq s$ or d) محاسبه نمود (Shiau, 2006).

$$T_{DS} = \frac{E(L)}{P(D \geq d, S \geq s)} = \frac{E(L)}{1 - F_D(d) - F_S(s) + F_{DS}(d,s)} = \frac{E(L)}{1 - F_D(d) - F_S(s) + C(F_D(d), F_S(s))} \quad (۷)$$

$$T'_{DS} = \frac{E(L)}{P(D \geq d \ or \ S \geq s)} = \frac{E(L)}{1 - F_{DS}(d,s)} = \frac{E(L)}{1 - C(F_D(d), F_S(s))}$$

در روابط بالا، T_{DS} و T'_{DS} به‌ترتیب دوره بازگشت توأم خشکسالی در حالت "و" و "یا" و $C(F_D(d), F_S(s))$ تابع مفصلی انتخاب شده در مرحله قبل می‌باشند.

شکل (۲) مراحل انجام کار در این مطالعه را به‌صورت خلاصه نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات توابع مفصل مورد بررسی در مطالعه حاضر (Shiau, 2006)
Table 1- Copula functions properties (Shiau, 2006)

Copula Function	Abbreviation	Equation	Parameter Range
Clayton	Cly	$C(u,v)=(u^{-\theta}+v^{-\theta}-1)^{-1/\theta}$	$\theta \geq 0$
Ali-Mikhail-Haq	AMH	$C(u,v)=\frac{uv}{1-\theta(1-u)(1-v)}$	$-1 \leq \theta \leq 1$
Farlie-Gumbel-Morgenstern	FGM	$C(u,v)=uv[1+\theta(1-u)(1-v)]$	$-1 \leq \theta \leq 1$
Frank	Fra	$C(u,v)=-\frac{1}{\theta}\ln\left[1+\frac{(e^{-\theta u}-1)(e^{-\theta v}-1)}{e^{-\theta}-1}\right]$	$\theta \neq 0$
Galambos	Gal	$C(u,v)=uv\exp\left\{\left[(-\ln u)^{-\theta}+(-\ln v)^{-\theta}\right]^{-1/\theta}\right\}$	$\theta \geq 1$
Gumbel-Hougaard	GH	$C(u,v)=\exp\left\{-\left[(-\ln u)^{\theta}+(-\ln v)^{\theta}\right]^{1/\theta}\right\}$	$\theta \geq 1$
Plackett	Pla	$C(u,v)=\frac{1}{2(\theta-1)}\{1+(\theta-1)(u+v) - [(1+(\theta-1)(u+v))^2 - 4\theta(\theta-1)uv]^{1/2}\}$	$\theta \geq 0$

نتایج و بحث

ارزیابی ERA5-Land

جدول (۲) ارزیابی محصول بازتحلیل ERA5-Land را در تخمین بارش ماهانه ایستگاه‌های بندرانزلی و کرمان در سال‌های ۱۹۵۹ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که محصول ERA5-Land در تخمین بارش کرمان بهتر از بندرانزلی عمل کرده است، اما به‌طور کلی با توجه به مقادیر معیارهای ارزیابی، این محصول دقت مناسبی در تخمین بارش ماهانه در هر دو ایستگاه داشته است. درصد بایاس و آماره KGE ارائه شده در جدول (۲) نشان می‌دهند که داده‌های بازتحلیل ERA5-Land تطابق بیشتری با داده‌های مشاهداتی در ایستگاه کرمان دارند. علاوه بر آماره‌های یاد شده، از نمودار وایولین پلات نیز در خصوص مقایسه داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل ERA5-Land در ایستگاه‌های مورد مطالعه استفاده شد که نتایج در شکل (۳) قابل مشاهده می‌باشد. بر اساس نتایج ارائه شده در نمودارهای وایولین پلات می‌توان مشاهده کرد که توزیع و تراکم داده‌های بازتحلیل و تخمین بارش‌های حدی در ایستگاه کرمان بهتر از ایستگاه انزلی می‌باشد.

شاخص خشکسالی بارش استاندارد شده (SPI)

تغییرات شاخص SPI در مقیاس‌های ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه در دو ایستگاه بندرانزلی و کرمان در شکل (۴) و (۵) نشان داده شده است. بر اساس شکل (۴)، ایستگاه بندرانزلی دوره‌های متناوب خشکسالی و ترسالی را تجربه کرده است. شدیدترین خشکسالی در این ایستگاه در فاصله سال‌های ۱۹۵۱ تا ۱۹۶۰ رخ داده است (SPI<-2) و در بقیه رخدادهای خشکسالی مقدار SPI از ۲- تجاوز نکرده است.

در ایستگاه کرمان (شکل ۵) دوره‌های خشکسالی طولانی‌تر و شدیدتری رخ داده است. شدیدترین خشکسالی در این ایستگاه در فاصله سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰رخ داده است. در فاصله سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ نیز دو واقعه خشکسالی دیگر رخ داده است که سختی آن کمتر از خشکسالی ۱۹۶۰-۱۹۷۰ است.

ارزیابی توابع توزیع احتمال برازش یافته بر مدت و سختی خشکسالی

جدول‌های (۳) و (۴) نتایج ارزیابی توابع توزیع احتمال برازش یافته بر مدت و سختی خشکسالی برای ایستگاه بندرانزلی را بر اساس آماره‌های RMSE (بر حسب واحد متغیر بارش، میلی متر) و NSE نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، از بین توابع توزیع مورد بررسی در مقیاس یک ماهه و شش ماهه تابع پارتو تعمیم یافته برای مدت و تابع ناکاگامی برای سختی خشکسالی برازش بهتری داشته‌اند. در مقیاس سه ماهه مدت خشکسالی با تابع GEV و سختی خشکسالی با تابع نرمال بهتر برازش یافته است. در مقیاس نه ماهه تابع لوگ لوجستیک بر مدت خشکسالی و تابع GEV بر سختی خشکسالی برازش بهتری دارند. در مقیاس ۱۲ ماهه توابع پارتو تعمیم یافته و ویبول به‌ترتیب بر مدت و سختی خشکسالی و درمقیاس ۲۴ ماهه توابع پارتو تعمیم یافته و GEV بر مدت و سختی خشکسالی برازش مناسب‌تری دارند.

نتایج توابع برازش یافته بر مدت و سختی خشکسالی در ایستگاه کرمان در جدول‌های (۵) و (۶) ارائه شده است. بر اساس نتایج جدول (۵)، از بین توابع توزیع مورد بررسی در مقیاس یک ماهه توابع پارتو تعمیم یافته و GEV بر مدت و سختی خشکسالی برازش مناسب‌تری دارند. در مقیاس سه ماهه تابع لوگ لوجستیک بر مدت خشکسالی و تابع GEV بر سختی خشکسالی برازش بهتری دارد.

در مقیاس شش ماهه تابع GEV برای مدت و تابع ویبول برای سختی خشکسالی بهتر از سایر توابع برازش یافته‌اند. جدول (۶) نشان می‌دهد که همانند ایستگاه بندرانزلی، در کرمان نیز در مقیاس نه ماهه تابع لوگ لوجستیک بر مدت خشکسالی و تابع GEV بر سختی خشکسالی برازش بهتری دارند. در مقیاس ۱۲ ماهه توابع پارتو تعمیم یافته و لوگ لوجستیک به‌ترتیب بر مدت و سختی خشکسالی و در مقیاس ۲۴ ماهه توابع گاما و لوگ نرمال بر مدت و سختی خشکسالی بهتر برازش یافته‌اند. با توجه به اینکه بهترین تابع برازش یافته در مطالعه‌های مختلف، یکسان نبوده و نتایج متفاوتی حاصل شده است، می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب بهترین تابع برازش یافته تحت تاثیر ماهیت داده‌ها می‌باشد (Liu et al., 2016).

جدول ۲- معیارهای ارزیابی ERA5-Land در تخمین بارش ماهانه

Table 2- Evaluation metrics of ERA5-Land for monthly precipitation estimation

Statistic	NSE	RMSE (mm)	R^2	PBIAS	KGE
Bandar Anzali	0.58	89.9	0.77	29.7	0.56
Kerman	0.76	10.3	0.67	1.2	0.7

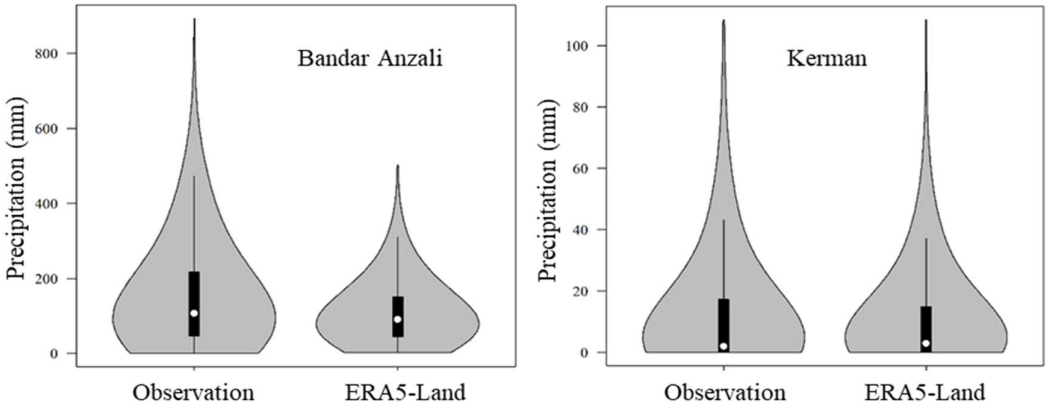


Fig. 3 - Violin plots of observational values and ERA5-Land reanalysis product at Kerman and Bandar Anzali stations

شکل ۳- وایولین پلات‌های مقادیر مشاهداتی و محصول بازتحلیل ERA5-Land در ایستگاه‌های کرمان و بندرانزلی

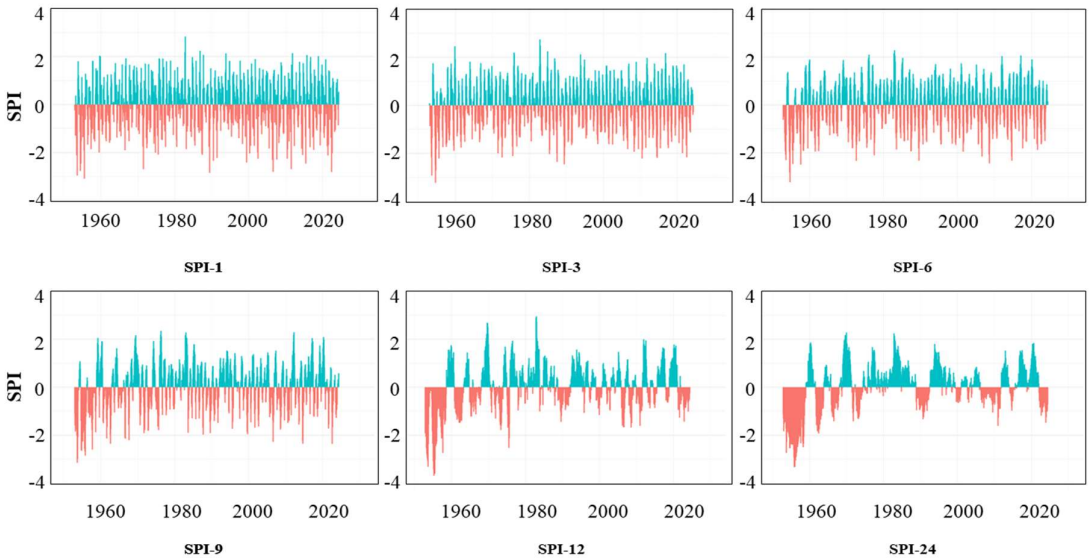


Fig. 4- SPI temporal change at Bandar Anzali station

شکل ٤- سری زمانی شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ٦، ۹، ۱۲ و ٢٤ ماهه در ایستگاه بندرانزلی

DOI: 10.22055/jise.2025.48618.2150

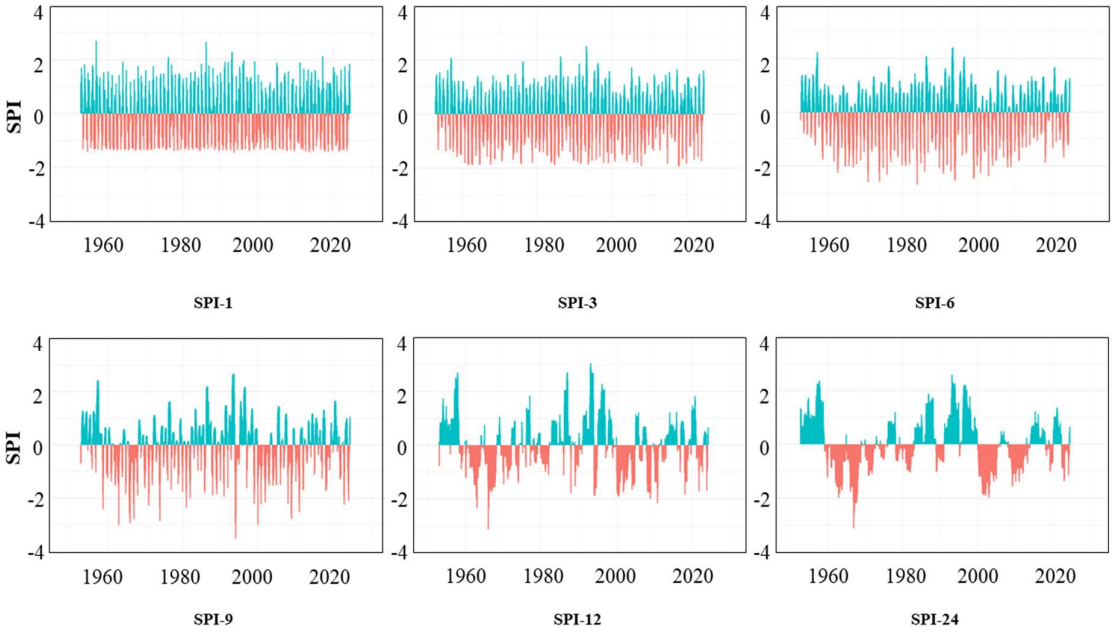


Fig. 5- SPI temporal change at Kerman station

شکل ۵- سری زمانی شاخص SPI در مقایس های زمانی ۱، ۳، ٦، ۹، ۱۲ و ۲٤ ماهه در ایستگاه کرمان

جدول ۳- معیارهای ارزیابی آماری توابع توزیع برازش یافته بر مدت و سختی خشکسالی در ایستگاه بندرانزلی در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳ و ٦ ماهه. بهترین توابع توزیع به‌صورت پررنگ و زیرخط نشان داده شده است.

Table 3- Statistical evaluation metrics of fitted distribution functions on drought duration and severity at Bandar Anzali station at time scales of 1, 3 and 6 months. The best distribution functions are shown as bold and underlined numbers.

Distribution Function	SPI-1				SPI-3				SPI-6			
	Severity		Duration		Severity		Duration		Severity		Duration	
	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE
Normal	0.91	8.49	0.9	9.32	**0.99**	**2.24**	0.96	6.09	0.91	8.49	0.9	9.32
Log-Norman	0.95	6.24	0.89	9.43	0.88	10.19	0.87	10.62	0.95	6.24	0.89	9.43
Exponential	0.96	6.05	0.88	10.19	0.82	12.14	0.53	19.79	0.96	6.05	0.88	10.19
Gama	0.98	4.14	0.9	9.06	0.93	7.45	0.91	8.91	0.98	4.14	0.9	9.06
GEV	0.96	5.74	0.65	17.19	0.99	3.07	**0.96**	**5.54**	0.96	5.74	0.65	17.19
Logistic	0.93	7.82	0.9	9	0.99	2.69	0.96	5.68	0.93	7.82	0.9	9
Log-Logistic	0.97	4.77	0.9	9.05	0.94	6.9	0.94	7.34	0.97	4.77	0.9	9.05
Rayleigh	0.57	18.98	0.82	12.4	0.98	4.4	0.83	11.86	0.57	18.98	0.82	12.4
Nakagami	**0.98**	**3.64**	0.91	8.85	0.96	5.68	0.93	7.82	**0.98**	**3.64**	0.91	8.85
Generalized Pareto	0.94	7.01	**0.93**	**7.43**	0.94	7.13	0.81	12.61	0.94	7.01	**0.93**	**7.43**
Weibull	0.98	4.42	0.91	8.82	0.96	5.55	0.95	6.46	0.98	4.42	0.91	8.82

جدول ٤- معیارهای ارزیابی آماری توابع توزیع برازش یافته بر مدت و سختی خشکسالی در ایستگاه بندرانزلی در مقیاس‌های زمانی ۹، ۱۲ و ٢٤ ماهه. بهترین توابع توزیع به‌صورت پررنگ و زیرخط نشان داده شده است.

Table 4- Statistical evaluation metrics of fitted distribution functions on drought duration and severity at Bandar Anzali station at time scales of 9, 12 and 24 months. The best distribution functions are shown as bold and underlined numbers.

Distribution Function	SPI-9				SPI-12				SPI-24			
	Severity		Duration		Severity		Duration		Severity		Duration	
	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE
Normal	0.8	12.91	0.82	12.33	0.54	19.64	0.76	14.19	0.44	21.73	0.6	18.33
Log-Norman	0.94	7.38	0.97	5.37	0.99	3.48	0.97	5.3	0.94	6.85	0.86	10.95
Exponential	0.98	4.32	0.85	11.09	0.54	19.76	0.92	8.34	-0.44	34.87	0.42	22.14
Gama	0.98	4.45	0.95	6.58	0.96	5.91	0.95	6.79	0.79	13.29	0.77	13.98
GEV	**0.99**	**2.59**	0.97	4.87	0.97	4.66	0.7	15.87	**0.98**	**4.17**	-0.07	30.08
Logistic	0.95	6.69	0.94	7.23	0.8	13.01	0.89	9.7	0.57	18.97	0.69	16.08
Log-Logistic	0.98	3.83	**0.97**	**4.7**	0.98	3.95	0.96	5.48	0.96	5.95	0.89	9.69
Rayleigh	0.25	25.11	0.7	15.84	-1.35	44.52	-0.14	30.97	-1.59	46.82	-0.79	38.87
Nakagami	0.92	7.99	0.89	9.8	0.85	11.25	0.87	10.32	0.72	15.32	0.71	15.61
Generalized Pareto	0.97	4.75	0.88	9.87	0.97	5.19	**0.97**	**4.77**	0.98	4.43	**0.89**	**9.64**
Weibull	0.97	4.6	0.93	7.55	**0.99**	**3.19**	0.96	5.62	0.9	9.23	0.83	11.99

جدول ٥- معیارهای ارزیابی آماری توابع توزیع برازش یافته بر مدت و سختی خشکسالی در ایستگاه کرمان در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳ و ٦ ماهه. بهترین توابع توزیع به‌صورت پررنگ و زیرخط نشان داده شده است.

Table 5- Statistical evaluation metrics of fitted distribution functions on drought duration and severity at Kerman station at time scales of 1, 3 and 6 months. The best distribution functions are shown as bold and underlined numbers.

Distribution Function	SPI-1				SPI-3				SPI-6			
	Severity		Duration		Severity		Duration		Severity		Duration	
	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE
Normal	0.93	7.56	0.93	7.59	0.99	2.09	0.94	7.34	1	1.93	0.96	5.7
Log-Norman	0.73	14.9	0.83	11.86	0.76	14.06	0.85	11.24	0.97	5.27	0.94	7
Exponential	0.8	12.87	0.81	12.6	0.49	20.7	0.31	24.09	0.66	16.86	0.44	21.6
Gama	0.79	13.37	0.87	10.54	0.91	8.7	0.89	9.52	0.98	3.57	0.95	6.45
GEV	**0.96**	**5.48**	0.95	6.46	**0.99**	**2.07**	0.94	7.06	0.99	2.19	**0.96**	**5.54**
Logistic	0.94	6.79	0.94	7.24	0.99	2.82	**0.94**	**7.03**	0.99	2.12	0.96	5.87
Log-Logistic	0.81	12.66	0.87	10.43	0.98	4.56	0.93	7.49	0.98	3.8	0.95	6.41
Rayleigh	0.87	10.56	0.89	9.76	0.85	11.23	0.62	17.8	0.97	5.26	0.81	12.61
Nakagami	0.8	13.04	0.89	9.51	0.95	6.53	0.91	8.59	0.99	2.22	0.96	6.02
Generalized Pareto	0.92	8.35	**0.95**	**6.24**	0.76	14.32	0.6	18.27	0.86	10.75	0.79	13.39
Weibull	0.8	12.88	0.89	9.76	0.98	3.78	0.94	7.13	**1**	**1.81**	0.96	5.59

 DOI: 10.22055/jise.2025.48618.2150

جدول ٦- معیارهای ارزیابی آماری توابع توزیع برازش یافته بر مدت و سختی خشکسالی در ایستگاه کرمان در مقیاس‌های زمانی ۹، ۱۲ و ۲٤ ماهه. بهترین توابع توزیع به‌صورت پررنگ و زیرخط نشان داده شده است.

Table 6- Statistical evaluation metrics of fitted distribution functions on drought duration and severity at Kerman station at time scales of 9, 12 and 24 months. The best distribution functions are shown as bold and underlined numbers.

Distribution Function	SPI-9				SPI-12				SPI-24			
	Severity		Duration		Severity		Duration		Severity		Duration	
	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE
Normal	0.79	13.25	0.7	15.86	0.7	15.93	0.81	12.7	0.7	16.05	0.85	11.31
Log-Norman	0.95	6.7	0.93	7.93	0.99	3.48	0.96	5.8	**0.96**	**6.03**	0.94	7.13
Exponential	0.98	4.38	0.84	11.55	0.61	18.21	0.95	6.4	0.46	21.4	0.89	9.62
Gama	0.98	4.09	0.88	10.2	0.97	4.66	0.96	5.89	0.95	6.7	**0.96**	**6.18**
GEV	**0.99**	**3.29**	0.94	7.11	0.98	3.92	0.94	6.97	0.95	6.57	0.71	15.64
Logistic	0.93	7.86	0.85	11.21	0.81	12.78	0.91	8.48	0.79	13.26	0.89	9.64
Log-Logistic	0.98	4.3	**0.95**	**6.68**	**0.99**	**2.6**	0.96	6.09	0.95	6.23	0.95	6.79
Rayleigh	0.11	27.37	0.29	24.48	-0.53	35.95	0.18	26.31	-0.49	35.71	0.25	25.28
Nakagami	0.93	7.45	0.78	13.66	0.94	7.28	0.92	8.31	0.94	7.42	0.95	6.44
Generalized Pareto	0.98	3.7	0.84	11.51	0.98	4.44	**0.97**	**4.95**	0.93	7.78	0.92	8.07
Weibull	0.98	4.04	0.87	10.58	0.99	2.95	0.97	5.3	0.96	6.18	0.95	6.25

بررسی همبستگی جفت متغیرها

لازمه اجرای توابع مفصل وجود همبستگی بین جفت متغیر مورد مطالعه می‌باشد، لذا پیش از برازش توابع مفصل، ابتدا باید همبستگی بین جفت متغیرها بررسی شود. از آنجا که آماره تائو کندال اغلب تحت تأثیر مقادیر پرت قرار ندارد، برای بررسی همبستگی مناسب‌تر است (Klein et al., 2011). بنابراین بررسی همبستگی جفت متغیرها از آماره تائو کندال استفاده شد که نتایج آن در شکل‌های (۶) و (۷) برای دو ایستگاه بندرانزلی و کرمان ارائه شده است. این شکل‌ها عناصر قطر اصلی هیستوگرام جفت متغیرهای مورد مطالعه به‌همراه توزیع مناسب برازش یافته و عناصر قطر فرعی همبستگی جفت متغیر مورد مطالعه و پراکندگی آن‌ها به‌همراه برازش بهترین خط را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر تائو کندال که در اغلب موارد بالای ۷۰ درصد است، همبستگی قابل قبولی بین مدت و سختی خشکسالی وجود دارد. بر اساس نتایج Ganguli و Reddy (2012) تجمع نقاط در قسمت پایین سمت چپ نشان‌دهنده همبستگی قوی‌تر بین مدت و سختی خشکسالی است که این مسئله در شکل‌های (۶) و (۷) نیز مشاهده می‌شود. بنابراین با توجه به همبستگی بین مشخصه‌های خشکسالی، می‌توان نتیجه گرفت که بررسی توأم این مشخصه‌ها بر بررسی آن‌ها به‌صورت تک متغیره ارجحیت دارد (Liu et al., 2016). بر این اساس می‌توان از توابع مفصل برای بررسی احتمال وقوع توأم مشخصه‌های خشکسالی استفاده نمود (Tosunoglu and Can, 2016; Tosunoglu and Kisi, 2016). لازم به ذکر است که با تغییر مقیاس زمانی از مقیاس سه ماهه به ۲۴ ماهه، سری‌های مورد مطالعه هموارتر و نقاط حدی کمتر می‌شود و این مسئله باعث کاهش فاصله بین مقادیر مشاهداتی و میانگین خواهد شد و در نهایت سبب می‌شود تا وابستگی‌ها بیشتر شده و اختلاف‌ها کاهش یابد (Vasiliades et al., 2009).

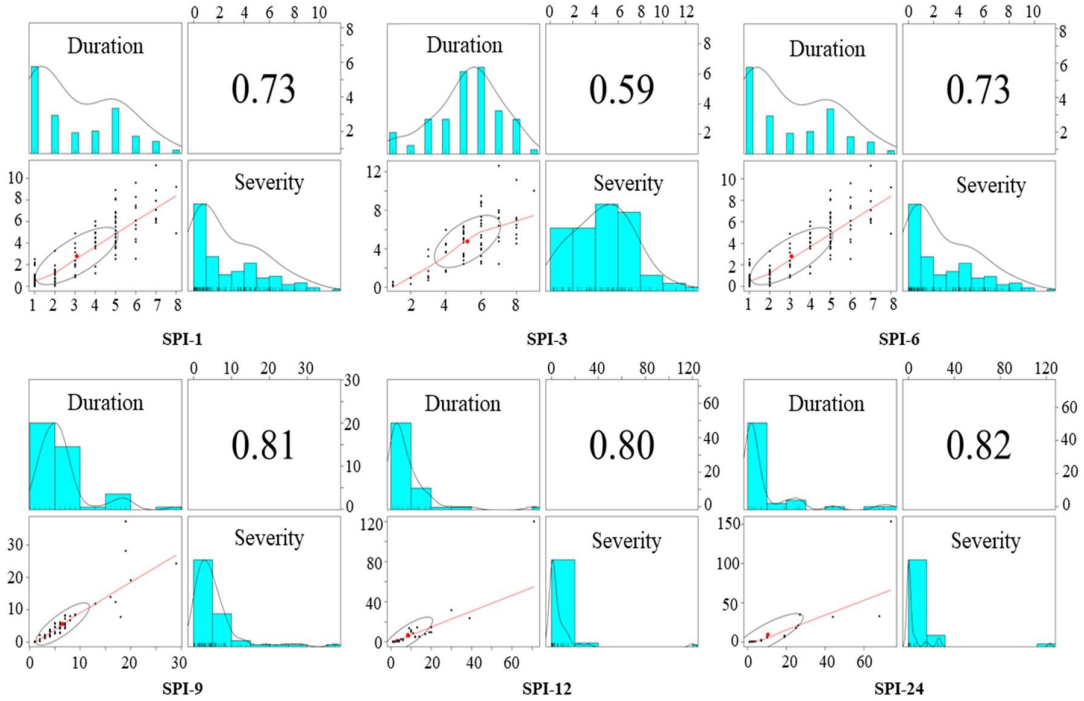


Fig. 6- Correlation of drought duration and severity using Kendall's Tau at Bandar Anzali Station

شکل ٦- همبستگی جفت متغیر مدت و سختی خشکسالی با استفاده از آماره تائو کندال در ایستگاه بندرانزلی

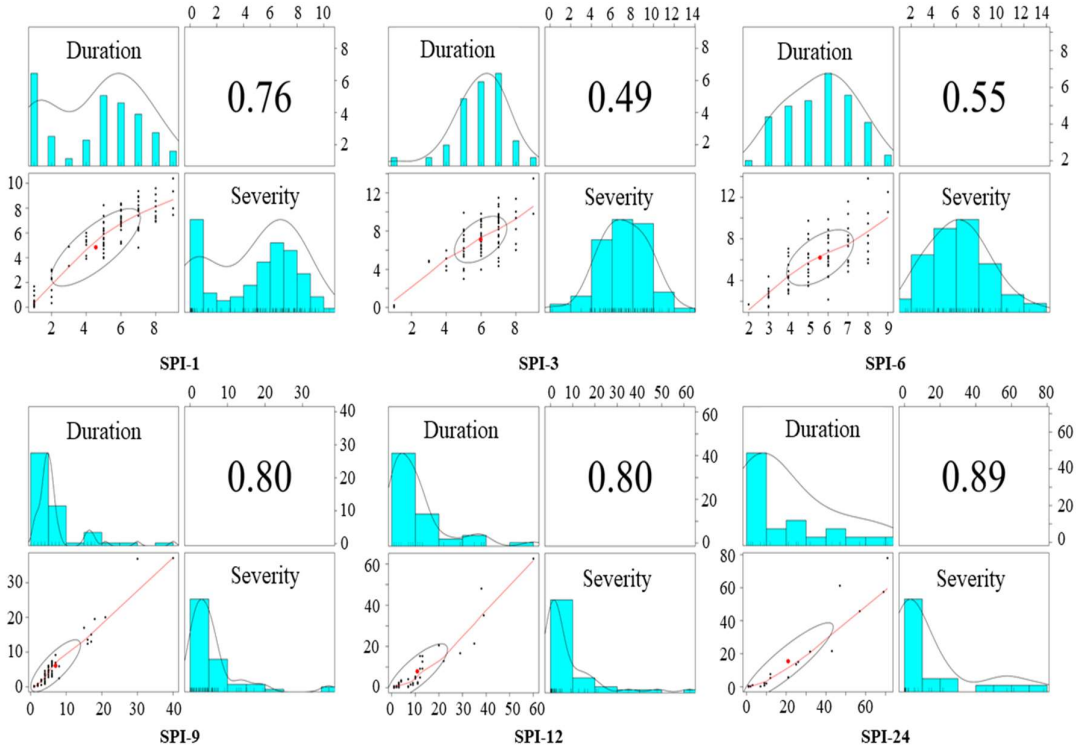


Fig. 7- Correlation of drought duration and severity using Kendall's Tau at Kerman Station

شکل ۷- همبستگی جفت متغیر مدت و سختی خشکسالی با استفاده از آماره تائو کندال در ایستگاه کرمان

 DOI: 10.22055/jise.2025.48618.2150

انتخاب تابع مفصل

جدول‌های (۷) و (۸) نتایج ارزیابی توابع مفصل را در ایستگاه بندرانزلی نشان می‌دهد. بر این اساس توابعی که کمترین مقدار RMSE و AIC و بیشترین مقدار NSE را داشتند، به‌عنوان بهترین تابع مفصل انتخاب و معرفی شدند. از بین توابع مورد بررسی در مقیاس‌های یک، شش و ۲۴ ماهه تابع گالامبوس (Gal)، برای مقیاس نه ماهه تابع فرانک (Fra) و برای مقیاس ۱۲ ماهه تابع گامبل–هوگارد بهترین برازش را بر جفت متغیر مورد مطالعه داشتند. برای مقیاس سه ماهه تابع گالامبوس و گامبل–هوگارد (GH) نتایج مشابهی را به‌همراه داشتند که در نهایت تابع گالامبوس برای این مقیاس انتخاب شد. نتایج ارزیابی توابع مفصل برای ایستگاه کرمان در جدول‌های (۹) و (۱۰) ارائه شده است. بر طبق نتایج به‌دست آمده بهترین توابع مفصل در ایستگاه کرمان در مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش و ۲۴ تابع گامبل–هوگارد، در مقیاس زمانی نه ماهه تابع گالامبوس و در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه تابع فرانک می‌باشند.

مقادیر θ برای توابع مورد بررسی نیز در این جدول‌ها ارائه شده است. با توجه با این که تابع مفصل منتخب بر اساس توزیع حاشیه‌ای داده‌های مورد مطالعه انتخاب می‌شود (که خود تحت تأثیر ماهیت داده‌ها می‌باشد)، این تفاوت در مفصل برتر در مطالعه‌های مختلف نیز مشاهده شده است (Mirabbasi et al., 2012; Pronoos Sedighi et al., 2022; Ramezani et al., 2023).

رویکرد مبتنی بر مفصل در بحث شبیه‌سازی و تحلیل فراوانی با توجه به این که بر اساس توزیع توأم جفت متغیر مورد مطالعه عمل می‌کنند، محدودیت جغرافیایی ندارد و تنها محدودیت توابع مفصل مرسوم در حالت دو متغیره، وجود وابستگی بین جفت متغیر مورد مطالعه می‌باشد که در صورت عدم وجود وابستگی، نتایج قابل اعتماد نخواهد بود. البته در ابعاد بالاتر و استفاده از مفصل‌های دورانی می‌توان به این محدودیت نیز غلبه کرد (Nazeri Tahroudi et al., 2022).

جدول ۷- معیارهای ارزیابی توابع مفصل و مقدار θ در ایستگاه بندرانزلی در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳ و ٦ ماهه. بهترین توابع توزیع به‌صورت پررنگ و زیرخط نشان داده شده است.

Table 7- Evaluation metrics of copula functions and θ values at Bandar Anzali station at time scales of 1, 3 and 6 months. The best copula functions are shown as bold and underlined numbers.

Time Scale	Copula Function	RMSE	NSE	AIC	θ
SPI-1	Cly	0.1	0.89	-8.96	2.63
	AMH	0.13	0.8	-8.88	0.99
	FGM	0.19	0.55	-7.82	-0.48
	FRA	0.08	0.92	-9.22	20
	Gal	**0.05**	**0.97**	**-9.27**	**3.82**
	GH	0.08	0.92	-9.27	5.96
	Plak	0.1	0.88	-9.11	20
SPI-3	Cly	0.07	0.93	-8.2	4.6
	AMH	0.11	0.85	-8.08	1
	FGM	0.18	0.63	-7.02	-0.61
	FRA	0.06	0.95	-8.41	20
	Gal	**0.06**	**0.96**	**-8.46**	**2.06**
	GH	**0.06**	**0.96**	**-8.46**	**7.64**
	Plak	0.07	0.94	-8.26	20
SPI-6	Cly	0.1	0.89	-8.96	2.63
	AMH	0.13	0.8	-8.88	0.99
	FGM	0.19	0.55	-7.82	-0.48
	FRA	0.08	0.92	-9.22	20
	Gal	**0.05**	**0.97**	**-9.27**	**3.82**
	GH	0.08	0.92	-9.27	5.96
	Plak	0.1	0.88	-9.11	20

جدول ۸- معیارهای ارزیابی توابع مفصل و مقدار θ در ایستگاه بندرانزلی در مقیاس‌های زمانی ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه. بهترین توابع توزیع به‌صورت پررنگ و زیرخط نشان داده شده است.

Table 8- Evaluation metrics of copula functions and θ values at Bandar Anzali station at time scales of 9, 12 and 24 months. The best copula functions are shown as bold and underlined numbers.

Time Scale	Copula Function	RMSE	NSE	AIC	θ
SPI-9	Cly	0.09	0.91	-8.11	7.38
	AMH	0.17	0.66	-7.9	1
	FGM	0.26	0.17	-7.05	-0.87
	FRA	**0.08**	**0.93**	**-8.23**	**20**
	Gal	0.08	0.93	-8.18	19.82
	GH	0.08	0.93	-8.18	6.05
	Plak	0.11	0.85	-8.09	20
SPI-12	Cly	0.09	0.89	-7.64	9.79
	AMH	0.18	0.6	-7.36	1
	FGM	0.28	0.07	-6.57	-0.97
	FRA	0.1	0.89	-7.7	20
	Gal	0.13	0.9	-7.67	14.74
	GH	**0.09**	**0.9**	**-7.67**	**7.37**
	Plak	0.13	0.79	-7.56	20
SPI-24	Cly	0.16	0.71	-6.97	10.14
	AMH	0.23	0.34	-6.62	1
	FGM	0.33	-0.31	-5.99	-0.9
	FRA	0.16	0.69	-6.96	20
	Gal	**0.12**	**0.81**	**-5.84**	**19.94**
	GH	0.17	0.65	-6.82	4.7
	Plak	0.19	0.54	-6.82	20

جدول ۹- معیارهای ارزیابی توابع مفصل و مقدار θ در ایستگاه کرمان در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳ و ۶ ماهه. بهترین توابع توزیع به‌صورت پررنگ وزیرخط نشان داده شده است.

Table 9- Evaluation metrics of copula functions and θ values at Kerman station at time scales of 1, 3 and 6 months. The best copula functions are shown as bold and underlined numbers.

Time Scale	Copula Function	RMSE	NSE	AIC	θ
SPI-1	Cly	0.1	0.88	-8.74	2.34
	AMH	0.11	0.85	-8.7	1
	FGM	0.15	0.72	-7.54	-0.51
	FRA	0.1	0.87	-8.95	20
	Gal	0.1	0.87	-8.98	5.09
	GH	**0.1**	**0.88**	**-8.97**	**5.56**
	Plak	0.1	0.88	-8.86	20
SPI-3	Cly	0.1	0.89	-7.97	3.8
	AMH	0.13	0.79	-7.9	1
	FGM	0.22	0.43	-6.83	-1
	FRA	0.08	0.93	-8.21	20
	Gal	0.07	0.84	-8.29	19.99
	GH	**0.07**	**0.94**	**-8.28**	**7.5**
	Plak	0.09	0.91	-8.06	20
SPI-6	Cly	0.06	0.96	-7.94	5.43
	AMH	0.12	0.84	-7.75	1
	FGM	0.19	0.59	-6.74	-0.51
	FRA	0.05	0.97	-8.09	20
	Gal	0.07	0.93	-8.12	19.92
	GH	**0.04**	**0.98**	**-8.12**	**6.86**
	Plak	0.07	0.94	-7.95	20

 DOI: 10.22055/jise.2025.48618.2150

جدول ۱۰- معیارهای ارزیابی توابع مفصل و مقدار θ در ایستگاه کرمان در مقیاس‌های زمانی ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه. بهترین توابع توزیع به‌صورت پررنگ و زیرخط نشان داده شده است.

Table 9- Evaluation metrics of copula functions and θ values at Kerman station at time scales of 9, 12 and 24 months. The best copula functions are shown as bold and underlined numbers.

Time Scale	Copula Function	RMSE	NSE	AIC	θ
SPI-9	Cly	0.11	0.84	-7.95	6.07
	AMH	0.18	0.59	-7.77	1
	FGM	0.29	0.02	-6.96	-0.93
	FRA	0.1	0.87	-8.03	20
	Gal	**0.08**	**0.92**	**-7.02**	**4.34**
	GH	0.11	0.86	-8	4.97
	Plak	0.13	0.78	-7.94	20
SPI-12	Cly	0.1	0.89	-7.36	5.95
	AMH	0.17	0.66	-7.19	1
	FGM	0.26	0.18	-6.56	-0.94
	FRA	**0.08**	**0.91**	**-7.45**	**20**
	Gal	0.09	0.9	-7.45	4.89
	GH	0.09	0.91	-7.45	5.85
	Plak	0.12	0.83	-7.35	20
SPI-24	Cly	0.09	0.91	-6.51	8.87
	AMH	0.16	0.68	-6.28	1
	FGM	0.25	0.23	-5.72	-1
	FRA	0.09	0.9	-6.51	20
	Gal	0.11	0.85	-6.57	5.76
	GH	**0.09**	**0.91**	**-6.57**	**8.18**
	Plak	0.12	0.82	-6.43	20

احتمال وقوع و دوره بازگشت توأم خشکسالی

شکل‌های (۸) و (۹) احتمال وقوع توأم مقادیر مدت و سختی خشکسالی کمتر از یک مقدار مشخص را به‌ترتیب در دو ایستگاه بندرانزلی و کرمان برای مقیاس‌های مختلف نشان می‌دهند. شایان ذکر است که این خطوط تراز می‌توانند به ازای احتمال توأم مشخص، ترکیبات مختلفی از حالت‌های وقوع شدت و مدت خشکسالی را بیان نمایند.

بر اساس این شکل‌ها، به طور مثال، احتمال وقوع خشکسالی در مقیاس ۲۴ ماهه با مدت کمتر از هشت ماه و سختی کمتر از هشت در بندرانزلی حدود ۱۶ درصد و در کرمان حدود ۲۰ درصد است. این احتمال برای مقیاس یک ماهه برای هر دو ایستگاه بندرانزلی و کرمان حدود ۷۵ درصد است. همچنین با توجه به این شکل‌ها می‌توان به ازاء مدت مشخص، با احتمالات مختلف میزان سختی خشکسالی را تخمین زد. به‌طور مثال، با در نظر گرفتن مدت خشکسالی چهار ماهه، مقدار سختی خشکسالی با مقیاس یک ماهه (SPI-1) در ایستگاه بندرانزلی با احتمالات ۵۰ و ۶۰ درصد به‌ترتیب حدود چهار و هفت تخمین زده می‌شود. با توجه به این که نمودارهای ارائه شده بر مبنای توزیع حاشیه‌ای داده‌ها بوده و تابع توزیع تجمعی جفت متغیرها تولید شده است، این نمودارها را می‌توان به‌عنوان نمودارهای منطقه‌ای برای تحلیل احتمال وقوع توأم مدت–سختی خشکسالی هواشناسی در ایستگاه‌های مورد مطالعه به‌کار برد. همچنین با درنظر گرفتن یکی از مشخصه‌های خشکسالی می‌توان با احتمالات مختلف مشخصه دیگر خشکسالی هواشناسی را تخمین زد. از طرف دیگر احتمال این که هم مدت و هم سختی خشکسالی به‌طور همزمان از یک آستانه معین فراتر رود، اطلاعات مفیدی برای بهبود مدیریت سیستم‌های منابع آب در شرایط خشکسالی فراهم می‌کند که این موضوع را نمی‌توان در تحلیل فراوانی وقوع جداگانه مدت و سختی خشکسالی فراهم کرد (Mirabbasi et al., 2012).

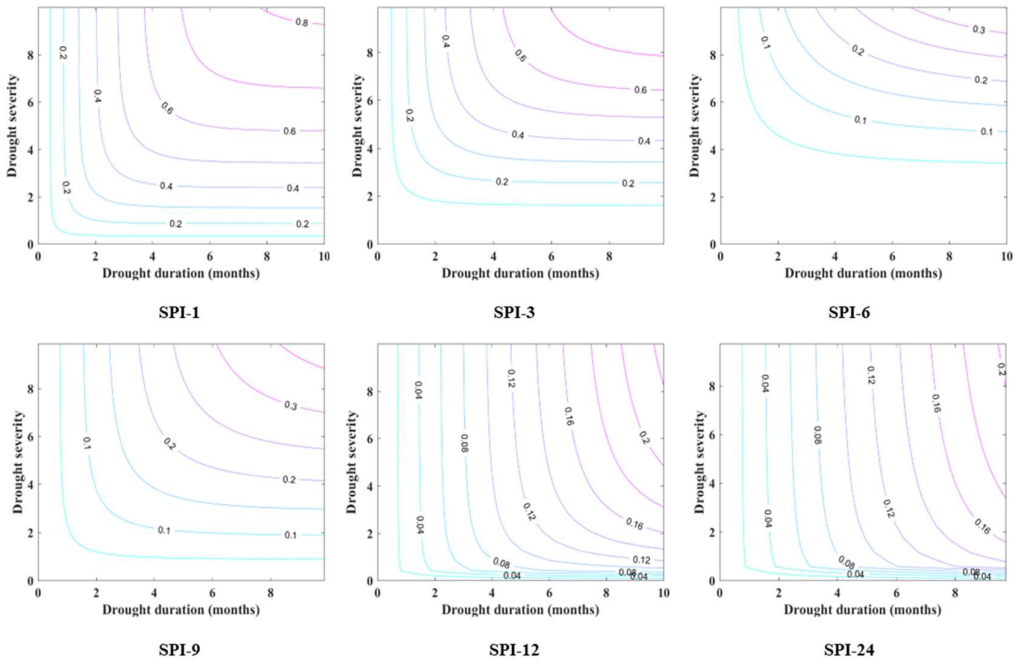


Fig. 8- The joint probability of drought duration and severity at Bandar Anzali station
شکل ۸- احتمال وقوع توأم مقادیر مدت و سختی خشکسالی در ایستگاه بندرانزلی

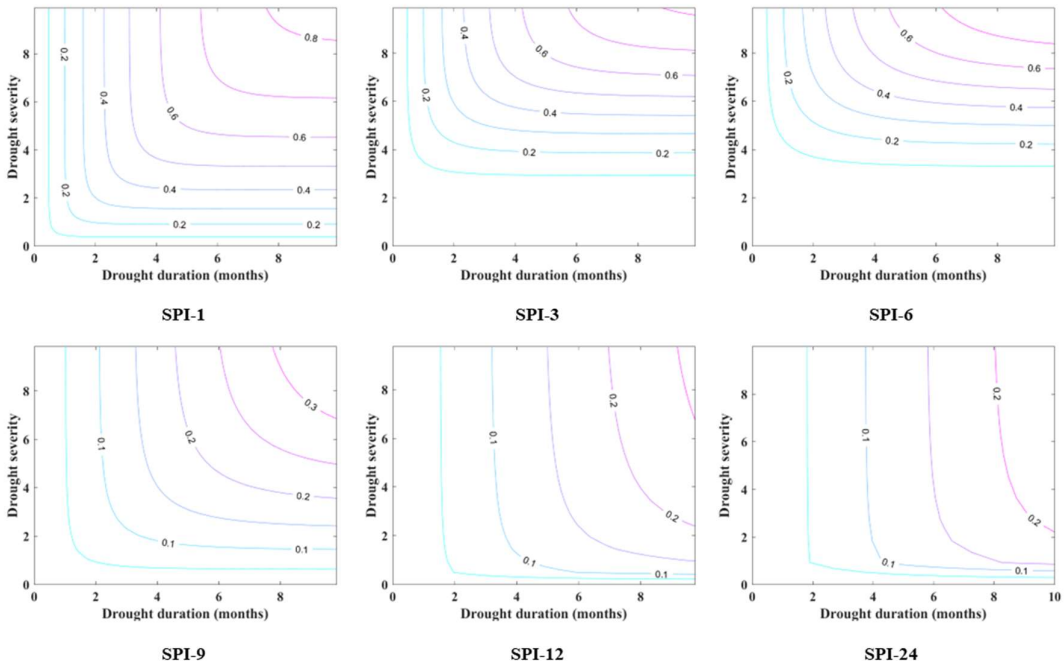


Fig. 9- The joint probability of drought duration and severity at Kerman station
شکل ۹- احتمال وقوع توأم مقادیر مدت و سختی خشکسالی در ایستگاه کرمان

DOI: 10.22055/jise.2025.48618.2150

نتایج بررسی دوره بازگشت توأم مدت و سختی خشکسالی در حالت "و" ($D\geq d$ و $S\geq s$) و حالت "یا" ($D\geq d$ یا $S\geq s$) در مقیاس‌های زمانی مختلف در شکل‌های (۱۰) تا (۱۳) برای دو ایستگاه مورد مطالعه ارائه شده است. بر اساس شکل‌های فوق برای یک دوره بازگشت معین، ترکیبات مختلفی از شدت و مدت را می‌توان ارائه کرد. به‌عنوان مثال با توجه به شکل (۱۰) می‌توان مشاهده کرد که در مقیاس ۲۴ ماهه SPI در ایستگاه بندرانزلی دوره بازگشت توأم برای مدت بیشتر از هشت ماه و سختی بیشتر از ۱۰ حدود ۱۰۰ سال و دوره بازگشت توأم برای مدت بیشتر از هشت ماه یا سختی بیشتر از ۱۰ حدود ۶۰ سال است. این مقادیر در ایستگاه کرمان به‌ترتیب حدود ۹۰ و ۶۰ سال می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌ها دیده می‌شود، در حالت "و" دوره بازگشت محاسباتی نسبت به حالت "یا" افزایش می‌یابد. این امر بدین مفهوم است که شانس وقوع دو واقعه به‌صورت همزمان بسیار کمتر بوده و در نتیجه در دوره بازگشت‌های بزرگتری ممکن است رخ دهد که بدین صورت می‌توان علت افزایش دوره بازگشت توأم را توجیه نمود (Ganguli and Reddy, 2012; Yue and Rasmussen, 2002). با افزایش مقیاس زمانی از یک به ۲۴ ماه، دوره بازگشت ترکیبات مختلف مدت و سختی خشکسالی افزایش می‌یابد. بنابراین احتمال وقوع خشکسالی‌های کوتاه‌مدت بیشتر از خشکسالی‌های بلندمدت است. مقایسه بین دو ایستگاه نیز نشان می‌دهد که یک واقعه خشکسالی با مشخصات یکسان در ایستگاه کرمان دوره بازگشت کمتری نسبت به ایستگاه بندرانزلی داشته و بنابراین احتمال وقوع آن در کرمان بیشتر از بندرانزلی می‌باشد.

باتوجه به اینکه استفاده از توابع توزیع تک متغیره برای محاسبه دوره بازگشت می‌تواند منجر به بیش‌برآورد یا کم‌برآورد ریسک خشکسالی شود Salvadori و De Michele (2007)، بنابراین تخمین دوره بازگشت توأم با درنظر گرفتن هر دو متغیر مدت و سختی خشکسالی به‌طور هم‌زمان در تحلیل جامع وضعیت خشکسالی و نیز بررسی سناریوهای مختلف اقلیمی می‌تواند سودمندتر و دقیق‌تر باشد. در واقع منحنی‌های ارائه شده در شکل‌های (۸) تا (۱۳) می‌توانند به‌عنوان منحنی تیپ برای ایستگاه‌های بندرانزلی و کرمان در مقیاس‌های زمانی مختلف عمل کنند و این منحنی‌ها تا زمانی که توزیع آماری مقادیر مدت و سختی خشکسالی در این ایستگاه تغییر نکند، کارایی دارند.

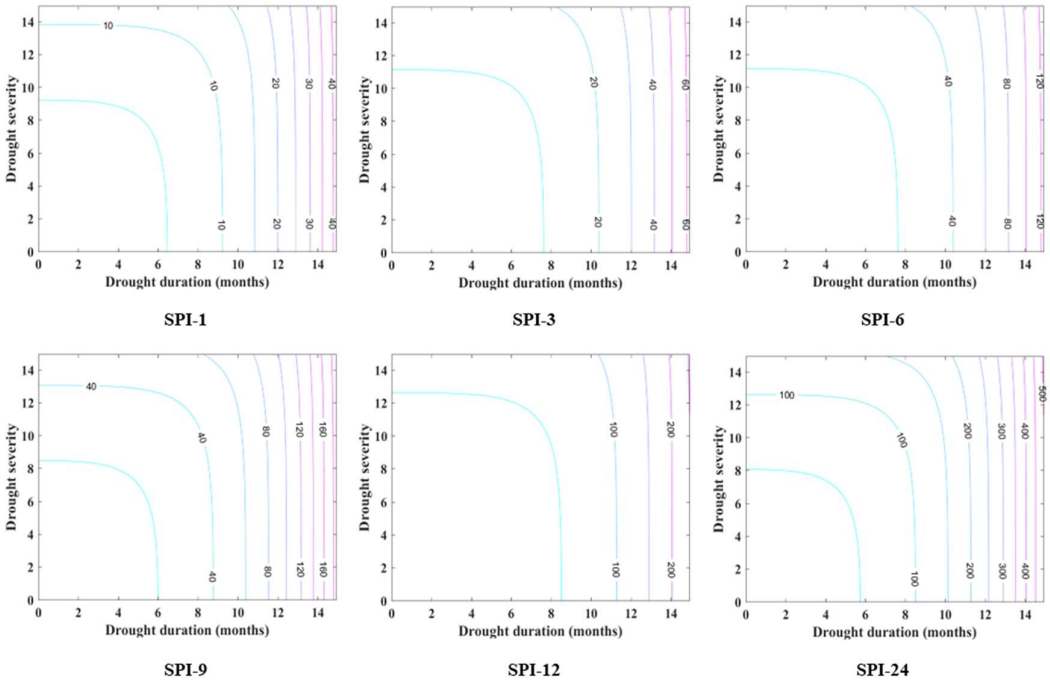


Fig. 10- The joint return period of drought duration and severity for “and” state at Bandar Anzali station

شکل ۱۰- دوره بازگشت توأم مقادیر مدت و سختی خشکسالی در حالت "و" در ایستگاه بندرانزلی

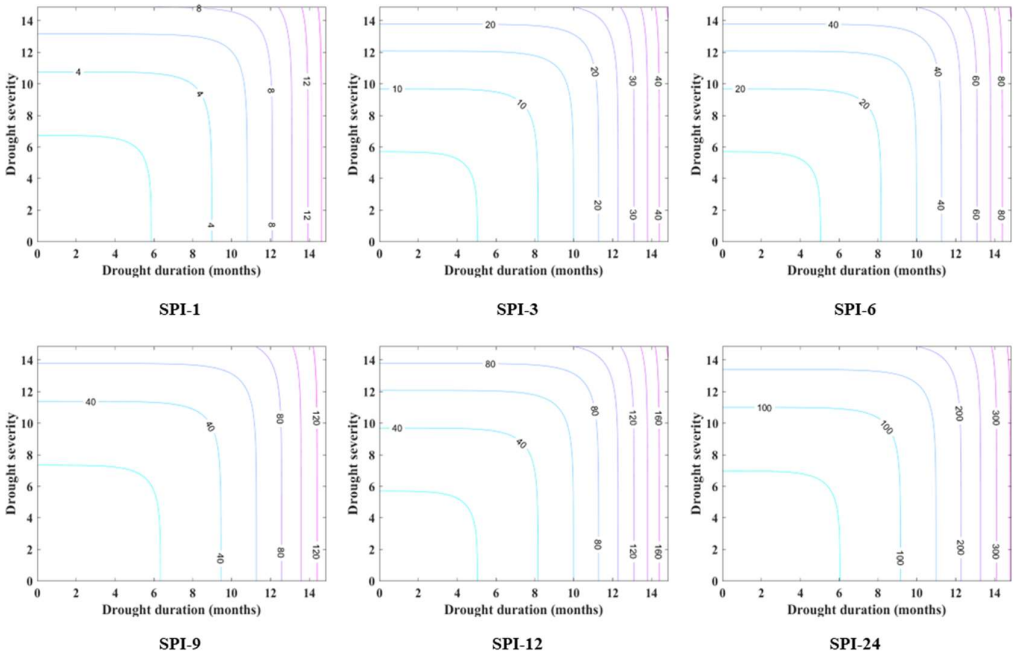


Fig. 11- The joint return period of drought duration and severity for “and” state at Kerman station

شکل ۱۱- دوره بازگشت توأم مقادیر مدت و سختی خشکسالی در حالت "و" در ایستگاه کرمان

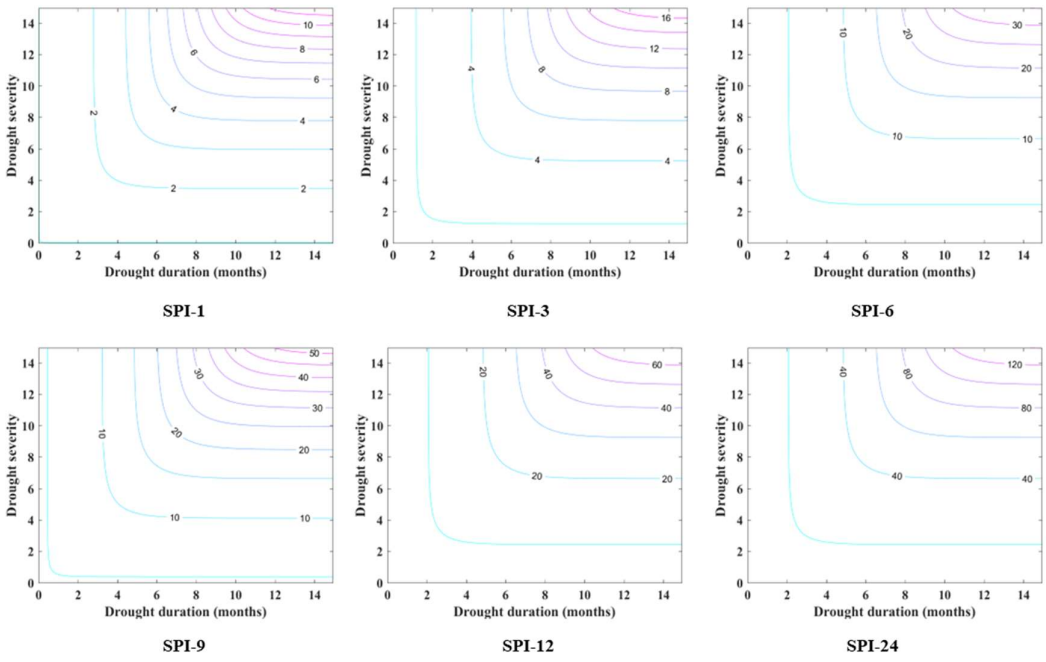


Fig. 12- The joint return period of drought duration and severity for “or” state at Bandar Anzali station

شکل ۱۲- دوره بازگشت توأم مقادیر مدت و سختی خشکسالی در حالت "یا" در ایستگاه بندرانزلی

 DOI: 10.22055/jise.2025.48618.2150

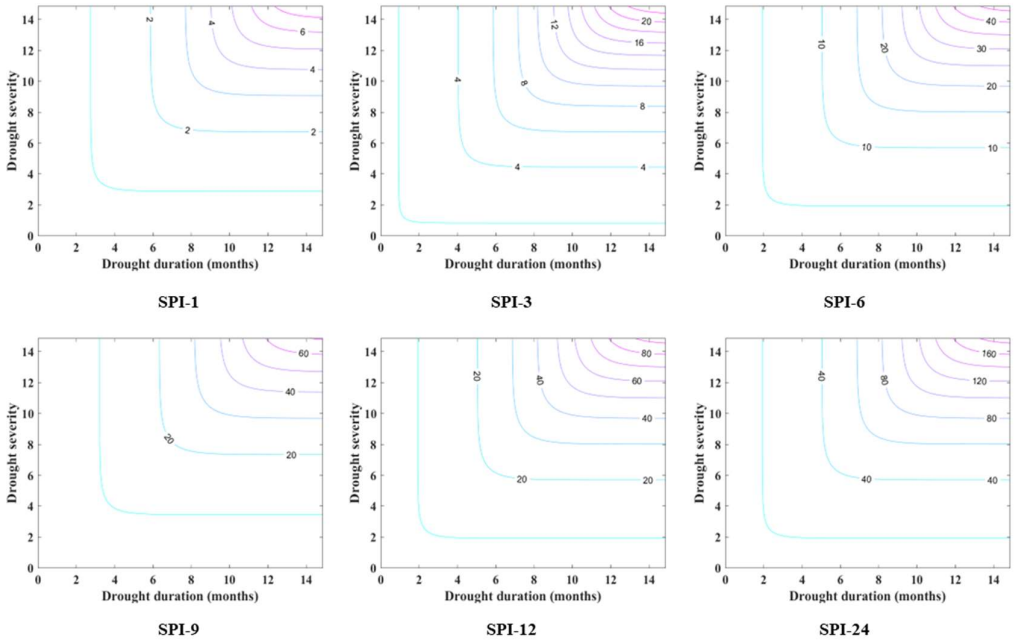


Fig. 13- The joint return period of drought duration and severity for "or" state at Kerman station
شکل ۱۳- دوره بازگشت توأم مقادیر مدت و سختی خشکسالی در حالت "یا" در ایستگاه کرمان

نتیجه‌گیری

در این مطالعه برای بررسی مشخصه‌های خشکسالی از توابع مفصل استفاده شد. با استفاده از این توابع می‌توان احتمال وقوع و دوره بازگشت وقایع خشکسالی را با درنظر گرفتن مشخصه‌های مختلف خشکسالی به‌صورت توأم مورد بررسی قرار داد. به این منظور پس از محاسبه شاخص SPI با استفاده از داده‌های بارش حاصل از محصول بازتحلیل ERA5-Land متغیرهای مدت و سختی خشکسالی برای مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه و برازش ۱۱ تابع توزیع مختلف بر آن‌ها، بهترین تابع توزیع برازش یافته انتخاب شد.

سپس با بررسی آماره تائو کندال و اطمینان از همبستگی قابل قبول بین مدت و سختی خشکسالی، تعداد هفت تابع مفصل بررسی و برای هر مقیاس زمانی بهترین تابع مفصل انتخاب گردید. پس از انتخاب بهترین تابع مفصل، احتمال وقوع توأم مدت و سختی خشکسالی و نیز دوره بازگشت توأم در دو حالت "و" و "یا" محاسبه شد. در حالت "و" دوره بازگشت وقایع خشکسالی برای شرایط که مدت و سختی خشکسالی از مقدار مشخصی بیشتر باشند، تعیین می‌شود. در حالت "یا"، دوره بازگشت برای حالتی که مدت خشکسالی از حد مشخص و یا سختی خشکسالی از حد مشخصی بیشتر باشد، محاسبه می‌شود. بر اساس نتایج و نیز همان‌طور که در مطالعه‌های قبلی ذکر شده است، دوره بازگشت محاسباتی در حالت "و" نسبت به حالت "یا" بزرگتر است. این امر نشان‌دهنده آن است که شانس وقوع دو واقعه به‌صورت هم‌زمان بسیار کمتر بوده و در نتیجه در دوره بازگشت‌های بزرگتری ممکن است رخ داد. همچنین براساس بررسی کلی نمودارهای ارائه شده، نتایج نشان داد که در حالت توأم "و" ($D\geq d$ and $S\geq s$)، احتمال وقوع خشکسالی‌های مشابه در کرمان بیشتر از بندرانزلی است، در حالی که در حالت "یا" ($D\geq d$ or $S\geq s$)، احتمال وقوع خشکسالی با هر یک از مشخصات مدت یا سختی بالا در بندرانزلی بیشتر است. تخمین دوره بازگشت با درنظر گرفتن هر دو متغیر مدت و سختی خشکسالی به‌صورت توأم می‌تواند در تحلیل جامع وقایع خشکسالی سودمندتر و دقیق‌تر باشد. در واقع منحنی‌های حاصل که رابطه بین مدت، سختی و دوره بازگشت (احتمال وقوع) خشکسالی‌ها را نشان می‌دهند، می‌توانند به‌عنوان منحنی تیپ برای ایستگاه‌های بندرانزلی و کرمان در مقیاس‌های زمانی مختلف استفاده شوند. این منحنی‌ها تا زمانی که توزیع آماری مقادیر مدت و سختی خشکسالی در این ایستگاه‌ها تغییر نکند، کارایی دارند و بنابراین می‌توان از آن‌ها برای پایش مولفه مهم منابع آب یعنی بارش در پنجره های زمانی مختلف به‌صورت دقیق‌تر بهره برده و راهکارهای مؤثرتری را برای کاهش اثرات خشکسالی ارائه نمود.

بر اساس نتایج این مطالعه و با توجه به عملکرد خوب ERA5-Land در تخمین بارش، می‌توان از این محصول برای تحلیل مکانی خشکسالی استفاده نمود. این مسئله به ویژه در مناطقی که داده‌های ایستگاهی وجود ندارد، اهمیت می‌یابد. بنابراین استفاده از محصول بازتحلیل ERA5-Land که دارای توان تفکیک مکانی و زمانی مناسب و دوره آماری طولانی مدت است، برای تحلیل خشکسالی در پهنه‌های مختلف اقلیمی پیشنهاد می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسندگان هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: آمنه میان‌آبادی، طرح ایده، تجزیه و تحلیل داده ها، نگارش نسخه اولیه مقاله

نویسنده دوم: محمد ناظری تهرودی، کدنویسی، بررسی نتایج، ویرایش مقاله

نویسنده سوم: محسن پوررضا بیلندی، بررسی نتایج، ویرایش مقاله

تقدیر و تشکر

این پژوهش فاقد تقدیر و تشکر است.

References

1- Abdul Rauf, U.F. and Zeephongsekul, P. 2014, "Copula based analysis of rainfall severity and duration: a case study", *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 115 No. 1–2, pp. 153–166, doi: 10.1007/s00704-013-0877-1.

2- Ahmad, I., Ahmad, T., Rehman, S.U., Mufrah Almanjahie, I. and Alshahrani, F. 2024, "A detailed study on quantification and modeling of drought characteristics using different copula families", *Heliyon*, Vol. 10 No. 3, p. e25422, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e25422.

3- Ali, M., Deo, R.C., Maraseni, T. and Downs, N.J. 2019, "Improving SPI-derived drought forecasts incorporating synoptic-scale climate indices in multi-phase multivariate empirical mode decomposition model hybridized with simulated annealing and kernel ridge regression algorithms", *Journal of Hydrology*, Vol. 576, pp. 164–184, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.06.032.

4- Aschale, T.M., Cancelliere, A., Palazzolo, N., Buonacera, G. and Peres, D.J. 2024, "Analysis of the Spatiotemporal Trends of Standardized Drought Indices in Sicily Using ERA5-Land Reanalysis Data (1950–2023)", *Water*, Vol. 16 No. 18, p. 2593, doi: 10.3390/w16182593.

5- Behzadi, F., Javadi, S., Yousefi, H., Hashemy Shahdany, S.M., Moridi, A., Neshat, A., Golmohammadi, G. and Maghsoudi, R., 2024. Projections of meteorological drought severity-duration variations based on CMIP6. *Scientific Reports*, *14*(1), p.5027. doi: 10.1038/s41598-024-55340-x.

6- Chen, L. and Guo, S. 2019, "Drought Analysis Using Copulas", *Copulas and Its Application in Hydrology and Water Resources*, Springer, pp. 97–116, doi: 10.1007/978-981-13-0574-0_5.

7- Dai, A. 2011, "Drought under global warming: a review", *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, Vol. 2 No. 1, pp. 45–65, doi: 10.1002/wcc.81.

8- EskandariPour, M. and Soltaninia, S. 2022, "Analyzing the duration frequency and severity of drought using copula function in the Yazd city", *Journal of Water and Climate Change*, Vol. 13 No. 1, pp. 67–82, doi: 10.2166/wcc.2021.366.

9- Frees, E.W. and Valdez, E.A. 1998, "Understanding Relationships Using Copulas", *North American Actuarial Journal*, Vol. 2 No. 1, pp. 1–25, doi: 10.1080/10920277.1998.10595667.

10- Ganguli, P. and Reddy, M.J. 2012, "Risk Assessment of Droughts in Gujarat Using Bivariate Copulas", *Water Resources Management*, Vol. 26 No. 11, pp. 3301–3327, doi: 10.1007/s11269-012-0073-6.

11- Gholami, S., Farajzadeh, M. and Ghavidel Rahimi, Y. 2024, "Comparative study of the performance of CHIRPS and ERA5-Land databases in detecting droughts in Iran", *Natural Geography*, Vol. 16 No. 61, pp. 1-22. In Persian.

12- González, J. and Valdés, J.B. 2003, "Bivariate Drought Recurrence Analysis Using Tree Ring Reconstructions", *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 8 No. 5, pp. 247–258, doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2003)8:5(247).

13- Grimaldi, S., Petroselli, A., Salvadori, G. and De Michele, C. 2016, "Catchment compatibility via copulas: A non-parametric study of the dependence structures of hydrological responses", *Advances in Water Resources*, Vol. 90, pp. 116–133, doi: 10.1016/j.advwatres.2016.02.003.

14- Guo, C., Ning, N., Guo, H., Tian, Y., Bao, A. and De Maeyer, P. 2024, "Does ERA5-Land Effectively Capture Extreme Precipitation in the Yellow River Basin?", *Atmosphere*, Vol. 15 No. 10, p. 1254, doi: 10.3390/atmos15101254.

15- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., *et al.* 2020, "The ERA5 global reanalysis", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 146 No. 730, pp. 1999–2049, doi: 10.1002/qj.3803.

16- Legg, S., 2021. IPCC, 2021: Climate change 2021-the physical science basis. Interaction, 49(4), pp.44-45.

17- Kavyani Malayeri, A., Saghafian, B. and Raziei, T. 2021, "Performance evaluation of ERA5 precipitation estimates across Iran", *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 14 No. 23, p. 2676, doi: 10.1007/s12517-021-09079-8.

18- Kazemiazar, F., Rezaie, H. and Mirabbasi, R., 2025. Performance evaluation of monthly ERA5 and ERA5-Land Reanalysis precipitation data in the upstream of the Zayandehroud reservoir basin. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *19*(1), pp.75-87. (In Persian).

19- Klein, B., Schumann, A.H. and Pahlow, M. (2011), "Copulas – New Risk Assessment Methodology for Dam Safety", *Flood Risk Assessment and Management*, Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 149–185, doi: 10.1007/978-90-481-9917-4_8.

20- Liu, C.-L., Zhang, Q., Singh, V.P. and Cui, Y. 2011, "Copula-based evaluations of drought variations in Guangdong, South China", *Natural Hazards*, Vol. 59 No. 3, pp. 1533–1546, doi: 10.1007/s11069-011-9850-4.

21- Liu, X.-F., Wang, S.-X., Zhou, Y., Wang, F.-T., Yang, G. and Liu, W.-L. 2016, "Spatial analysis of meteorological drought return periods in China using Copulas", *Natural Hazards*, Vol. 80 No. 1, pp. 367–388, doi: 10.1007/s11069-015-1972-7.

22- McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. 1993, "The relationship of drought frequency and duration of time scales", *Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society*, Vol. Jan17-23 No. 1993, Anaheim CA, pp. 179–186.

23- Meimandi, J.B., Bazrafshan, O., Esmaeilpour, Y., Zamani, H. and Shekari, M. 2024, "Risk assessment of meteo-groundwater drought using copula approach in the arid region", *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 38 No. 4, pp. 1523–1540, doi: 10.1007/s00477-023-02641-8.

24- Mianabadi, A. 2023, "Evaluation of long-term satellite-based precipitation products for developing intensity-frequency (IF) curves of daily precipitation", *Atmospheric Research*, Elsevier B.V., Vol. 286 No. February, p. 106667, doi: 10.1016/j.atmosres.2023.106667.

25- Mirabbasi, R., Fakheri-Fard, A. and Dinpashoh, Y. 2012, "Bivariate drought frequency analysis using the copula method", *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 108 No. 1–2, pp. 191–206, doi: 10.1007/s00704-011-0524-7.

26- Mishra, A.K. and Singh, V.P. 2011, "Drought modeling – A review", *Journal of Hydrology*, Vol. 403 No. 1–2, pp. 157–175, doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.03.049.

27- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H. and Martens, B., 2021. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth system science data*, *13*(9), pp.4349-4383. doi: 10.5194/essd-13-4349-2021.

28- Nadarajah, S. and Gupta, A.K. 2006. "Intensity-duration models based on bivariate gamma distributions", *Hiroshima mathematical journal*, Vol. 36 No. 3, pp. 387-395, doi: 10.1029/2006WR005641.

29- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. 1970, "River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles", *Journal of Hydrology*, Vol. 10 No. 3, pp. 282–290, doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.

30- Nazeri Tahroudi, M., Ramezani, Y., De Michele, C. and Mirabbasi, R. (2022), "Trivariate joint frequency analysis of water resources deficiency signatures using vine copulas", *Applied Water Science*, Vol. 12 No. 4, p. 67, doi: 10.1007/s13201-022-01589-4.

31- Páscoa, P., Gouveia, C.M., Ribeiro, A.F.S. and Russo, A. 2024, "Compound drought and hot events assessment in Australia using copula functions", *Environmental Research Communications*, Vol. 6 No. 3, p. 031002, doi: 10.1088/2515-7620/ad2bb8.

32- Pronoos Sedighi, M., Ramezani, Y., Nazeri Tahroudi, M. and Taghian, M. 2022, "Joint frequency analysis of river flow rate and suspended sediment load using conditional density of copula functions", *Acta Geophysica*, Vol. 71 No. 1, pp. 489–501, doi: 10.1007/s11600-022-00894-5.

33- Ramezani, Y., Nazeri Tahroudi, M., De Michele, C. and Mirabbasi, R. (2023), "Application of copula-based and ARCH-based models in storm prediction", *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 151 No. 3–4, pp. 1239–1255, doi: 10.1007/s00704-022-04333-9.

34- Salvadori, G. and De Michele, C. 2007, "On the Use of Copulas in Hydrology: Theory and Practice", *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 12 No. 4, pp. 369–380, doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:4(369).

35- Shiau, J.T. 2006, "Fitting Drought Duration and Severity with Two-Dimensional Copulas", *Water Resources Management*, Vol. 20 No. 5, pp. 795–815, doi: 10.1007/s11269-005-9008-9.

36- Shiau, J.T. and Modarres, R. 2009, "Copula-based drought severity-duration-frequency analysis in Iran", *Meteorological Applications*, Vol. 16 No. 4, pp. 481–489, doi: 10.1002/met.145.

37- Shiau, J.T. and Shen, H.W. 2001, "Recurrence Analysis of Hydrologic Droughts of Differing Severity", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 127 No. 1, pp. 30–40, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2001)127:1(30).

38- Tan, M.L., Armanuos, A.M., Ahmadianfar, I., Demir, V., Heddam, S., Al-Areeq, A.M., Abba, S.I., *et al.* 2023, "Evaluation of NASA POWER and ERA5-Land for estimating tropical precipitation and temperature extremes", *Journal of Hydrology*, Vol. 624, p. 129940, doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.129940.

39- Tosunoglu, F. and Can, I. 2016, "Application of copulas for regional bivariate frequency analysis of meteorological droughts in Turkey", *Natural Hazards*, Vol. 82 No. 3, pp. 1457–1477, doi: 10.1007/s11069-016-2253-9.

40- Tosunoglu, F. and Kisi, O. 2016, "Joint modelling of annual maximum drought severity and corresponding duration", *Journal of Hydrology*, Vol. 543, pp. 406–422, doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.10.018.

41- Tosunoğlu, F. and Onof, C. 2017, "Joint modelling of drought characteristics derived from historical and synthetic rainfalls: Application of Generalized Linear Models and Copulas", *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 14, pp. 167–181, doi: 10.1016/j.ejrh.2017.11.001.

42- Trenberth, K.E., Fasullo, J.T. and Balmaseda, M.A. 2014, "Earth's energy imbalance", *Journal of Climate*, Vol. 27 No. 9, pp. 3129–3144.

43- Vasiliades, L., Loukas, A. and Patsonas, G. 2009, "Evaluation of a statistical downscaling procedure for the estimation of climate change impacts on droughts", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 9 No. 3, pp. 879–894, doi: 10.5194/nhess-9-879-2009.

44- Wang, F., Wang, Z., Yang, H., Di, D., Zhao, Y. and Liang, Q. 2020, "A new copula-based standardized precipitation evapotranspiration streamflow index for drought monitoring", *Journal of Hydrology*, Vol. 585, p. 124793, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124793.

45- Wilhite, D.A. 2000, "Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions Drought", in Wilhite, D.A. (Ed.), *Drought: A Global Assessment*, New York, pp. 3–18.

46- Xu, C., Wang, W., Hu, Y. and Liu, Y. 2024, "Evaluation of ERA5, ERA5-Land, GLDAS-2.1, and GLEAM potential evapotranspiration data over mainland China", *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 51, p. 101651, doi: 10.1016/j.ejrh.2023.101651.

47- Yevjevich, V. 1967, "An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts", *Hydrology Papers*, Vol. 23, pp. 1–18.

48- Yilmaz, M. 2023, "Accuracy assessment of temperature trends from ERA5 and ERA5-Land", *Science of The Total Environment*, Vol. 856, p. 159182, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159182.

49- Yue, S. and Rasmussen, P. 2002, "Bivariate frequency analysis: discussion of some useful concepts in hydrological application", *Hydrological Processes*, Vol. 16 No. 14, pp. 2881–2898, doi: 10.1002/hyp.1185.

50- Zhang, Q., Xiao, M., Singh, V.P. and Chen, X. (2013), "Copula-based risk evaluation of droughts across the Pearl River basin, China", *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 111 No. 1–2, pp. 119–131, doi: 10.1007/s00704-012-0656-4.

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 1, Spring 2026, p. 85-94

Research Paper

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Investigation of water footprint components for dominant crops in Dezful plain

Z. Naderi[1], A. M. Akhoond-Ali[2*] and M. Ghomeshi[3]

1- Ph. D Of Water Resources Management ,Faculty Of Water Science and Engineering ,Shahid Chamran University Of Ahvaz,Ahvaz,Iran.
2- Corresponding Author, Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (aliakh@scu.ac.ir)*
3- Professor Hydraulic Structures Department, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 19 February 2020
Revised: 15 December 2020
Accepted: 03 January 2021
Available online: 05 May 2026

Keywords: Pollution level, Sustainability Assessment, Green Waterfootprint.

TO CITE THIS ARTICLE:

Naderi, Z., Akhondali, A., Ghomeshi, M. 2026. 'Investigation of water footprint components for dominant crops in Dezful plain', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(1), pp. 85-94. doi: 10.22055/jise.2021.31806.1896.

Abstract

This research assesses the water resource consumption of agricultural products in the Dezful Plain, emphasizing the critical role of the Water Footprint (WF) index for optimal resource allocation in Iran, where agriculture dominates water usage. Based on the findings from Table (1), the study evaluated the WF of major crops, revealing an annual consumption of 31.97 million cubic meters. This total comprises 46.2% blue water, 50.2% green water, and 3.67% grey water. While the 1.17 million cubic meters of annual grey water discharge re-enters the hydrological cycle, the associated water quality degradation poses a significant challenge for planning. Nonetheless, an assessment of environmental sustainability using the Water Pollution Level (WPL) index indicates that the region remains sustainable despite the production of grey water. This highlights the necessity of considering water quality impacts alongside quantity in comprehensive water resource management.

Table 1 - Average values persent water footprint components of products from 2006 to 2016

crop	%wf(green)	%wf(blue)	%wf(gray)
Wheat	40.35	53.01	6.64
Maize	6.66	89.5	3.84
Sugar beet	30.32	68.06	1.02
Clover	62.84	35.65	1.5
Rapeseed	95.13	2.42	2.46
Alfalfa	38.88	59.61	1.5

Introduction

Given Iran's location within the global arid and semi-arid belt, as well as the low level of application of modern systems in the agricultural sector, and considering that a 25 percent reduction in the global water footprint of products results in a 39 percent saving in water reserves, two factors—the use of modern irrigation systems in agriculture and the methods of planting, cultivating, and harvesting—are identified as the primary criteria for determining and reducing the water footprint of each product in any given region (Cao, 2014). The current status of surface and

groundwater exploitation has steered conditions toward a state where most plains in the country have been declared as 'prohibited' or 'restricted' by the Ministry of Energy, and the issuance of new exploitation permits for them has been banned (Seydan, 2001). Existing evidence indicates a critical state of water resources.

Methodology

In this study, five major crops cultivated in the study area including wheat, sugar beet, rapeseed, alfalfa and maize were studied and their water footprints were calculated. The water footprint of a product comes from the combination of three components: blue water, green water, and gray water CropWat 8.0 software was used to calculate evapotranspiration and water requirement of plants in the study area.

Results and Discusspn

The study showed that of the 31.97 million cubic meters of water consumed during the year for the cultivation of selected crops, 46.2% belonged to the blue component, 50.2% to the green component, and 3.67% to the gray component. Regarding the gray component of 1.17 million cubic meters per year, it can be said that although this volume of water comes back to the region's water cycle, the decline in water quality is a major issue that must be addressed in macro planning.

Conclusions

The results indicate an increase in the amount of water footprint and significant green water in the plain. Large-scale planning in agriculture and crop production, using environmental and climatic potentials of the region, has attempted to conserve and conserve valuable water resources in the area. Let's see a smart and sustainable development in the region.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution

First Author: Zeinab Naderi Writing the article, conclusion, and analysis of results.
Second Author: Ali Mohamad Akhondali Reviewing and controlling results.
Third Author: Mehdi Ghomeshi, drafting the initial version of the manuscript.

Acknowledgment

This research has no acknowledgments.

References

1- Seydan, H. 2001 'Export water or water supply to dry areas', *Journal of Khorasan*, 2, pp. 41–51.

2- Cao, X., Wu, P., Wang, Y. and Zhao, X. 2014 'Water footprint of grain product in irrigated farmland of China', *Water Resources Management*, 28, pp. 2213–2227. https://doi.org/10.10۰۷/s11269-014-0619-3.

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۹، شماره‌ی ۱، بهار ۱۴۰۵، مقاله پژوهشی، ص. ۹۴-۸۵

بررسی اجزاء ردپای آب برای محصولات غالب در دشت دزفول

زینب نادری[۱]، علی محمد آخوندعلی[۲*] و مهدی قمشی[۳]

۱- دانش آموخته دکتری مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲*- نویسنده مسئول، استاد گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران. aliakh@scu.ac.ir

۳- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۳۰ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۲۵ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۴ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵

چکیده

منابع آب هر کشور در چهار بخش صنعت ،کشاورزی، شرب و محیط زیست مصرف می‌شود. باتوجه به این‌که عمده مصرف منابع آب در کشور در بخش کشاورزی صورت می‌گیرد لذا ارزیابی مقدار آب واقعی مورد استفاده محصولات کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار است. برآورد میزان آب واقعی محصولات کشاورزی از طرق شاخص‌های متفاوتی صورت می‌گیرد و لازم است شاخص‌های مؤثرتری در تخصیص بهینه منابع آب در نظر گرفته شوند که ازجمله مؤثرترین آن‌ها می‌تواند شاخص ردپای آب باشد. در این تحقیق برای ارزیابی وضعیت محصولات کشاورزی از نظر آب مصرفی از دیدگاه شاخص ردپای آب (WF) برای عمده محصولات غالب کشت شده در دشت دزفول استفاده گردید. در این مطالعه مشخص گردید از ۳۱/۹۷ میلیون مترمکعب آب که در طول سال برای کشت محصولات انتخابی مصرف می‌شود ٤٦/۲ درصد مربوط به جزء آبی، ۵۰/۲ درصد مربوط به جزء سبز و ۳/٦۷ درصد مربوط به جزء خاکستری است. در خصوص جزء خاکستری که معادل ۱/۱۷ میلیون متر مکعب در سال می‌باشد می‌توان گفت که اگرچه این مقدار آب به چرخه آبی منطقه برمی‌گردد لیکن کاهش کیفیت آب مسأله بسیار مهمی است که باید در برنامه‌ریزی‌های کلان مورد توجه قرار گیرد. با وجود تولید ۱/۱۷ میلیون مترمکعب آب خاکستری، بررسی پایداری محیط زیستی منطقه از لحاظ سطح آلودگی نشان داد که منطقه مورد بررسی با توجه به شاخص WPL (پایداری ردپای آب خاکستری با استفاده از سطح آلودگی آب) در سطح پایداری قرار دارد.

کلید واژه‌ها: سطح آلودگی، ارزیابی پایداری ، آب خاکستری.

مقدمه

کشاورزی به‌عنوان اصلی‌ترین منبع تأمین مواد غذایی، آب و اهمیت منابع آب را بسیار تعیین کننده نموده است. توزیع غیر یکنواخت مکانی و زمانی آب و تلاش کشور در تأمین امنیت غذایی اهمیت و ضرورت پرداختن به رویکردهایی است که استفاده بهینه از منابع آب را مد نظر قرار دهد. بخش کشاورزی به‌عنوان مهمترین عامل آلاینده منابع آب به‌شمار می‌رود برآوردهای جهانی نشان می‌دهد سالانه ۴۵۰ کیلومترمکعب آب آلوده وارد منابع آبی می‌شود که برای رقیق‌سازی این مقدار به‌گونه‌ایی که بتوان دوباره از آب استفاده کرد، به ۶۰۰۰ کیلومترمکعب معادل ۶۶/۶ درصد کل آب‌های شیرین سالانه کره زمین نیاز است. ۸۰ درصد از زمین‌های کشاورزی در جهان زیر کشت دیم می‌باشد. آب سبز ناشی از بارش در کشاورزی منبع تولید بیش از ۶۰ درصد غذای جهان است. ایران یکی از این کشورهایی است که با افزایش تولیدات کشاورزی از طریق توسعه اراضی کشاورزی با محدودیت‌های جدی تأمین آب مواجه است. بنابراین اطلاع از نیاز آبی و مقدار واقعی آب مصرفی محصولات کشاورزی به‌منظور هرگونه برنامه‌ریزی دقیق و کارامد در مدیریت پایدار منابع آب و رسیدن به تعادل آبی متناسب با منابع موجود، ضروری است. اما با توجه به‌اینکه میزان آب مصرفی و ردپای آب هر محصول تحت تأثیر اقلیم منطقه، میزان تولیدات، الگوی مصرفی، عملیات کشاورزی و راندمان کاربرد آب متغیر است، لذا نیاز به شاخصی است که به‌توان با آن نیاز واقعی هر محصول را مورد ارزیابی قرار داد. یکی از جدیدترین شاخص‌های مؤثر در بحث مدیریت پایدار منابع آب، شاخص ردپای آب (water footprint) می‌باشد که توسط Hoekstra (2011) معرفی گردید. این مفهوم پس از انجام اصلاحاتی در روش‌های برآورد و محاسبه، در مجموعه‌ای از انتشارات مؤسسه IHE یونسکو به‌عنوان یک شاخص قابل اتکا معرفی شد. همچنین در گزارشی از سوی همان مؤسسه، مفاهیم و روش‌های محاسبه این شاخص در سطوح مختلف به همراه اعداد و ارقام محاسبه شده آن برای کشورهای مختلف منتشر گردید. از سوی دیگر همکاری بین مؤسسات راهبر جهانی در این زمینه، منتهی به تأسیس شبکه ردپای آب در سال ۲۰۰۸ شده است که هدف آن هماهنگ کردن تلاش‌ها برای توسعه بیشتر و انتشار دانش در مورد مفاهیم، روش‌ها و ابزارهای مرتبط با این شاخص است. شاخص ردپای آب نیز همانند سایر شاخص‌ها، سبب پیدایش مفاهیم متفاوتی همراه با خود شده است. مفاهیم برگرفته از شاخص ردپای آب عمدتاً مفاهیمی مدیریتی در حوضه

DOI: 10.22055/jise.2021.31806.1896

منابع و مصارف آب، هستند بدین معنی که این مفاهیم را می‌توان برای برنامه‌ریزی‌های منابع و مصارف آب در یک کشور یا محدوده جغرافیایی، به‌کار بست. ابزارهای تعریف شده به کمک این شاخص، می‌توانند از طریق کنترل جابه‌جایی‌های آب در سطح بین‌المللی چه به‌صورت حقیقی و چه به‌صورت مجازی و یا از طریق ایجاد تغییراتی در الگوی مصارف افراد یک جامعه میزان آب مصرفی آن جامعه را با رعایت اصول توسعه پایدار، تا حد ممکن کاهش دهند.

شاخص ردپای آب نشان‌دهنده مقدار مصرف آب در تولید محصولات بوده که از سه بخش تشکیل شده است: مصارف از آب‌های سطحی و زیرزمینی که به‌منظور آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرند، آب مصرفی که به شکل رطوبت حاصل از بارش در پروفیل خاک ذخیره شده و حجم آب شیرین که جهت رفع آلودگی آب مورد نیاز است که به ترتیب آب آبی (Blue water footprint) ، آب سبز (Green water footprint) و آب خاکستری (Gray water footprint) تعریف شده است (Hokstra and Chapagin,2011).

ردپای آب هر محصول به‌صورت نسبت کل آب مورد استفاده در سطح مزرعه (مترمکعب) به میزان تولید همان محصول (تن) محاسبه می‌شود که نشان‌دهنده شدت آب مصرفی محصولات مختلف می‌باشد (Hokstra and Chapagin, 2011). تاکنون مطالعه‌های متعددی در زمینه بررسی ردپای آب محصولات کشاورزی صورت گرفته است از جمله Mekonnen et al (2011) که ردپای آب محصولات زراعی را در مقیاس جهانی برای بازه زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۵ مورد مطالعه و بررسی قرار دادند نتایج این پژوهش که برای ۱۲۶ محصول صورت گرفت نشان داد که ردپای آب این محصولات در طی دوره افزایش یافته است. Lu (2016) در تحقیقی به بررسی ۳۵ ساله تغییرات ردپای آب غلات در شمال چین پرداختند نتایج آن‌ها شیب صعودی این محصولات در دوره آماری مورد بررسی را نشان داد. Zhuo et al (2016) ردپای آب سبز آبی و خاکستری را برای حوضه رودخانه زرد در چین را طی سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۹ بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد مجموع ردپای آب سبز و آبی به‌علت بهبود بازده محصولات کاهش یافته است. در تحقیقی توسط Ababaei و Ramezani (2017) ردپای آب سه محصول ذرت ،گندم و جو در ایران مطالعه شد. نتایج نشان داد افزایش تولید به‌صورت دیم سبب کاهش در گسترش کشت آبی در مناطق مواجه با کمبود آب می‌شود. با توجه به پیشینه ارائه شده و اینکه بخش کشاورزی بزرگترین مصرف کننده آب می‌باشد لذا بررسی ردپای آب در این بخش اهمیت ویژه‌ای دارد و ضروری است تا اطلاعاتی در زمینه مصرف مستقیم و غیرمستقیم آب و همچنین آلودگی ایجاد شده توسط محصولات کشت شده جمع‌آوری گردد تا مدیریت آب به شکل صحیح عملی گردد.

با توجه به قرارگیری ایران در کمربند خشک و نیمه خشک جهانی و همچنین پایین بودن سطح کاربرد سیستم های مدرن در بخش کشاورزی، و با توجه به این‌که ۲۵ درصد کاهش ردپای محصولات دنیا باعث ذخیره ۳۹ درصد ذخایر آب مصرفی می‌شود، دو عامل استفاده از سیستم‌های نوین آبیاری در بخش کشاورزی و نحوه کاشت، داشت و برداشت به‌عنوان معیارهای اصلی در میزان ردپای آب هر محصول در هر منطقه و کاهش آن معرفی شده است (Cao,2014). وضعیت کنونی بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیر زمینی شرایط را به سمتی هدایت کرده است که اکثر دشت‌ها در کشور توسط وزارت نیرو به‌عنوان دشت‌های ممنوعه اعلام و صدور مجوزهای جدید بهره‌برداری از آن‌ها ممنوع شده است (Seydan, 2001). شواهد موجود حاکی از بحرانی بودن وضعیت منابع می‌باشد. این مسأله ضرورت توجه بیشتر به موضوع مدیریت آب و استفاده بهتر از آن را می‌طلبد. در خصوص بیان جزییات اهداف این تحقیق می‌توان چنین بیان داشت که با استفاده از شاخص ردپای آب مشخص شد که محصولات عمده مورد کشت در دشت دزفول هر کدام چه میزان آب مصرف کرده است و به ازای تولید آن چه میزان آب کیفیت مطلوب خود را از دست داده است، سپس ارزیابی محیط زیستی از لحاظ پایداری شاخص ردپای آب صورت گرفت. با توجه به اهمیت شاخص ردپای آب در بحث مدیریت منابع آب به‌خصوص در بخش کشاورزی برای نخستین بار ارزیابی پایداری محیط زیستی ردپای خاکستری آب مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق برای بررسی ردپای آب محصولات زراعی در دشت دزفول، پنج محصول عمده مورد کشت در محدوده مورد مطالعه شامل، گندم، چغندرقند، شبدر، کلزا، یونجه و ذرت دانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و ردپای آب آن‌ها محاسبه گردید. سپس با استفاده از شاخص WPL پایداری محیط زیستی ردپای خاکستری محصولات انتخابی در دشت دزفول محاسبه گردید.

محدوده مطالعاتی دزفول – اندیمشک گسترده‌ترین محدوده مطالعاتی حوضه آبریزکارون بزرگ با وسعت ۵۸۰۹/۷۵ کیلومترمربع می‌باشد که در قسمت جنوب‌غربی حوضه واقع شده است این محدوده تحت پوشش سازمان آب و برق خوزستان قرار دارد. ۲۰۴۴/۰۱ کیلومتر مربع از وسعت این محدوده را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. محدوده دزفول اندیمشک شامل دو آبخوان پشمینه‌زار و دزفول می‌باشد. وسعت محدوده دزفول ۴۴۸۶/۰۶ کیلومترمربع شامل ۱۷۷۵/۳۶ کیلومترمربع دشت و ۲۷۱۰/۷۲ کیلومترمربع ارتفاعات می‌باشد. ایستگاه سینوپتیک دزفول که یکی از قدیمی‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی کشور محسوب می‌شود به‌عنوان ایستگاه معرف در دشت انتخاب شده است. ایستگاه سینوپتیک دزفول در سال ۱۳۳۹ تاسیس شده و دارای ۵۱ سال آمار دما، ۵۱ سال آمار بارندگی و نه سال آمار تبخیر است. در شکل (۱) سطح زیر کشت محصولات انتخابی در دشت دزفول در دوره ۱۰ساله (۲۰۱۶-۲۰۰۶) آورده شده است.

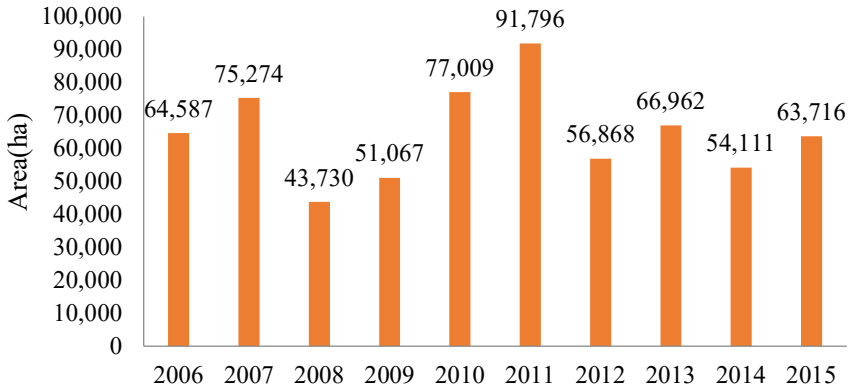


Fig. 1- Area under cultivation of selected crops in Dezful Plain from 2006 to 2016
شکل ۱- سطح زیر کشت محصولات انتخابی در دشت دزفول از سال ۲۰۰۶ تا سال ۲۰۱۶

در انجام مطالعه، از روش ارزیابی ردپای آب برای محاسبه اجزای ردپای آب محصولات کشاورزی استفاده شد. بدین منظور، اطلاعات کشاورزی استان از طریق آمارنامه ارائه شده توسط سازمان جهاد کشاورزی مورد بررسی قرارگرفت.

در این تحقیق از نرم‌افزار CropWat 8.0 به‌منظور محاسبه تبخیر تعرق و نیاز آبی گیاهان در محدوده مورد مطالعه استفاده گردید. داده‌های مورد نیاز برای محاسبه تبخیر و تعرق شامل دمای حداقل، دمای حداکثر، درصد رطوبت نسبی، ساعات آفتابی، سرعت باد و بارندگی در مقیاس ماهانه از سازمان هواشناسی استخراج و به نرم‌افزار معرفی گردید.

به‌منظور محاسبه تبخیر و تعرق مرجع از روش فائوپنمن مونتیث که در رابطه (۱) ارائه شده است، استفاده گردید.

$$ET_O = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \qquad (۱)$$

که در آن:

ET_O تبخیر تعرق مرجع ($mm day^{-1}$)، R_n تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($MJT: m^{-2} day^{-1}$) متوسط دمای هوا در ارتفاع دو متری از سطح زمین ($^{\circ}C$)، U_2 متوسط سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین ($m\ s^{-1}$)، (es-ea) کمبود فشار بخار در ارتفاع دو متری (kPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$)، γ ضریب رطوبتی ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$) و G شار گرما به داخل خاک ($MJ\ m^{-2} day^{-1}$) می‌باشند.

روش فائو پنمن مانتیث روشی استاندارد برای محاسبه گیاه مرجع است، زیرا این روش قابل کاربرد در همه فصول و اقلیم‌های متفاوت است و نتایج آن دارای دقت زیادی نسبت به روش‌های فیزیکی از قبیل لایسیمتر و تشت تبخیر کلاس a می‌باشد. در این روش، مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مناطق خشک یک درصد کمتر از مقادیر واقعی و در مناطق مرطوب چهار درصد بیشتر از مقادیر واقعی تبخیر تعرق برآورد می‌شود (Alizadeh, 2003). با توجه به این‌که استان خوزستان در منطقه نیمه خشک واقع شده است، می توان گفت مقادیر برآوردی روش فائو پنمن مانتیث در استان خوزستان در حدود یک تا دو درصد بیشتر از واقعیت می‌باشد.

مقدار خطای به نسبت پایین این روش در برآوردهای روزانه کاملاً قابل چشم‌پوشی است و در برآورد تبخیر و تعرق ماهانه نیز بسیار به تبخیر و تعرق واقعی منطقه نزدیک است.

در نشریه شماره ۵۶ فائو، این روش به‌عنوان بهترین روش برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مقایسه با دیگر روش‌ها پیشنهاد شده است (Sumner and Jacobs, 2005).

داده‌های مربوط به مشخصات گیاهی شامل طول دوره رشد، ارتفاع گیاه، عملکرد محصولات، عمق ریشه و ضریب گیاهی از آمارنامه‌های کشاورزی، سند ملی کشور و آمارنامه‌های سازمان خواروبار جهانی (FAO) استخراج و مورد استفاده قرار گرفت.

محاسبات ردپای آب

برای درک بهتر ارتباط بین فعالیت‌های تولیدی بشری و فشار رو به رشد در منابع آب شیرین جهان، رد پای آب (Water Footprint) و سپس ارزیابی ردپای آب (Water Footprint Assessment) برای اندازه گیری میزان مصرف آب و ظرفیت جذب آلودگی در سرتاسر زنجیره ارزش محصول و ارزیابی پایداری آن در محیط داخلی و جهانی توسعه داده شده است. افزایش استفاده از آب و مواد غذایی نه تنها بر آب‌های اطراف تأثیر می‌گذارد، بلکه از دیدگاه جهانی نیز پیامدهای محیط زیستی دارد. روش‌های متعددی برای ارزیابی این تأثیرات محیط زیستی از دیدگاه‌های مختلف استفاده می‌شود. این روش‌ها عبارتند از: ارزیابی چرخه حیات (LCA- Life Cycle Assessment)، ردپای اکولوژیک (EF- Ecological Footprint) و ارزیابی ردپای آب (Water Footprint Assessment) (Aldaya 2010). ردپای آب شاخصی است برای نشان دادن حجمی از آب که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم برای فرآیندهای تولید یک محصول یا ارایه هرگونه خدمات استفاده می‌شود. این عدد شامل آب مصرف شده در طی زنجیره تولید یک محصول خواهد بود. این شاخص به‌صورت مترمکعب برای هر واحد

 DOI: 10.22055/jise.2021.31806.1896

ازمحصول بیان و ارایه می‌گردد. ردپای آب یک محصول از حاصل جمع سه جزء آب آبی، آب سبز و آب خاکستری است (رابطه ۲):

$$WF_i = WF_{i\,green} + WF_{i\,blue} + WF_{i\,grey} \qquad (۲)$$

که در آن:

WF_i ردپای آب کل محصول (m^3ton^{-1})، $WF_{i\,green}$ ردپای آب سبز محصول i (m^3ton^{-1})، می‌باشد که شامل حجمی از آب باران مؤثر است که به‌صورت رطوبت در خاک ذخیره می‌شود. $WF_{i\,blue}$ ردپای آب آبی محصول i است که برای آب مورد استفاده از منابع سطحی و زیرزمینی محاسبه می‌گردد. $WF_{i\,grey}$ نیز به‌عنوان آب خاکستری محصول i (m^3ton^{-1})، تعریف می‌شود و به حجم آبی اطلاق می‌گردد که برای از بین بردن ناشی از کشت گیاه و تولید محصول در محیط، مورد استفاده قرار می‌گیرد. ردپای آب هر جز نیز طبق روابط (۳) تا (۵) به‌دست می‌آید:

$$WF_{i\,green} = \frac{CWU_{green}}{Y} \qquad (۳)$$

$$WF_{i\,blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \qquad (۴)$$

$$WF_{i\,grey} = \frac{(\alpha^* AR)(C_{max} - C_{nat})}{Y} \qquad (۵)$$

که در روابط (۳) تا (۵):

CWU_{blue} و CWU_{green} به ترتیب جزء آب آبی و جزء آب سبز محصول (m^3ha^{-1}) می‌باشند که طبق روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌گردند. مقدار جزء خاکستری ردپای آب (WF gray) نیز توسط مقدار مواد شیمیایی مورد استفاده در هر هکتار از زمین زراعی (AR)، کسر آبشویی یا درصد تلفات کودهای نیتروژن (α) و غلظت بحرانی (Cmax) و غلظت طبیعی نیتروژن در منابع آب دریافت‌کننده (Cnat) و در نهایت عملکرد محصول (Y) به‌صورت رابطه (۵) محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است آلاینده‌ها به‌طور کلی از آلودگی‌های (نیتروژن، فسفر و...) و همچنین آفت‌کش‌ها و حشره‌کش‌ها ایجاد می‌شوند که در این تحقیق آلودگی ناشی از کودهای نیتراته مورد بررسی قرار گرفته است.

همان‌طور که ذکر شد جزء آب خاکستری حجم آبی است که طی فرآیند تولید محصول آلوده شده و کیفیت اولیه خود را از دست می‌دهد این آب‌ها وارد سیستم‌های طبیعی آبی می‌شود. میزان آب مورد نیاز که بتوان کیفیت آب‌های آلوده را به سطح استاندارد رساند حجم آب خاکستری می‌باشد. در این مطالعه حجم ردپای آب خاکستری با به‌کارگیری چارچوب Hokstra (2007& 2008) محاسبه شده است. بنا بر نظر آژانس حفاظت محیط زیست a ایالات متحده آمریکا (USEPA) و با توجه به پژوهش Chapagain (2009) حداکثر غلظت مجاز نیتروژن در منابع آب سطحی و زیرزمینی ده میلی‌گرم بر لیتر توصیه شده است. اجزاء مصرف آب محصول (CWU) سبز و آبی نیز از مجموع تبخیر تعرق روزانه در تمام دوره رشد یک گیاه به‌صورت رابطه (۶) و (۷) محاسبه می‌گردند.

$$CWU_{green} = 10^* \sum_{d=1}^{lgp} ET_{green} \qquad (۶)$$

$$CWU_{blue} = 10^* \sum_{d=1}^{lgp} ET_{blue} \qquad (۷)$$

که در آن:

ET_{green} نشان دهنده تبخیر تعرق آب سبز (تبخیر تعرق ناشی از آب باران مورد استفاده گیاه) و ET_{blue} نشان دهنده تبخیر تعرق آب آبی (تبخیر تعرق ناشی از آب آبیاری مورد استفاده گیاه) بر حسب ($mm\ year^{-1}$) می‌باشند. عدد ده نیز به‌منظور تبدیل عمق آب در میلی‌متر به حجم آب در سطح زمین ($m^3\ ha^{-1}$) می‌باشد. در روابط (۶ و ۷) lgp طول دوره رشد بر حسب روز می‌باشد. جزء آبی مورد استفاده گیاه (CWU_{blue}) که از رابطه (۷) به‌دست می‌آید، مقدار آبی که به‌صورت مستقیم (نیاز آبی) از طریق آبیاری مورد استفاده گیاه است را نشان می‌دهد. با توجه به توضیحات ذکر شده، جهت محاسبه جزء آبی واقعی در تولید محصولات رابطه (۸) را به‌صورت زیر ارائه شده است:

$$CWU_{blue} = WAg + \sum_{i=1}^{n} WAi \qquad (۸)$$

در رابطه (۸)، WAg مقدار آب مستقیم مصرفی (بر اساس نیاز آبی) و WAi مقدار آبی است که به‌صورت غیرمستقیم (آبشویی، راندمان‌های کمتر، جلوگیری از سرمازدگی و...) برحسب ($m^3\ ha^{-1}$) مورد استفاده قرار می‌گیرند.

به منظور محاسبه تبخیر- تعرق روزانه نیز از رابطه (۹) استفاده گردید (Allen et al,1998).

$$ET = Ks[t] * Kc[t] * ETo[t] \qquad (۹)$$

که در آن:

Kc[t] ضریب گیاهی و Ks[t] عامل بدون بعد کاهش تعرق که وابسته به آب قابل دسترس در خاک می‌باشد. ET0 [t] نیز تبخیر- تعرق گیاه مرجع می‌باشد. Ks[t] تابع روزانه حداکثر مقدار واقعی رطوبت قابل دسترس در ناحیه ریشه خاک می‌باشد که به‌صورت رابطه ده قابل محاسبه است.

$$Ks[t] = \begin{cases} \dfrac{S[t]}{(1-p) * S_{max}[t]}, S[t] < (1-p) * S_{max}[t] \\ \text{other wise} \end{cases} \qquad (۱۰)$$

$S_{max}[t]$ حداکثر رطوبت قابل دسترس در ناحیه ریشه خاک در شرایط ظرفیت زراعی زمین و p نسبتی از S_{max} بوده که در آن یک محصول می‌تواند آب مورد نیاز خود را بدون تنش از منطقه

ریشه جذب نماید، می‌باشد.ردپای آب در حوضه آبریز نیاز به برآورده شدن معیارهای خاصی دارد تا پایدار شود. در این تحقیق پایداری از نظر زیست محیطی ارزیابی می‌گردد که از نظر سطح آلودگی آب (WPL) بیان می‌شوند. طبق تعریف، ردپای آب در یک حوضه رودخانه، زمانی از نظر محیط زیستی پایدار است که نیازهای آب محیط‌زیستی به هم بخورد. (Hokstra 2011).

پایداری WF خاکستری با استفاده از سطح آلودگی آب (WPL) به‌عنوان یک شاخص، ارزیابی می‌شود. طبق تعریف، سطح آلودگی آب (WPL) نسبت WF خاکستری کل در حوضه آبریز به رواناب واقعی آبریز است. این اندازه گیری به‌صورت زیر می‌باشد:

$$WPL = \frac{WF_{grey}}{Ract} \qquad (۱۱)$$

که WF_{grey} مقدار کل WF خاکستری در حوضه است و Ract روان‌آب واقعی منطقه آبریز است. هنگامی که WPL حوضه N100 درصد است، حوضه به‌عنوان نقطه‌ی حساس WF در نظر گرفته می‌شود، نشان‌دهنده این موضوع است که WF خاکستری در حوضه ناپایدار است. برای ارزیابی سطح پایداری WF خاکستری در حوضه آبریز، از معیارهای پایداری WF خاکستری زیر استفاده شده است:

$WPL \leq 100\%$, WF خاکستری ناپایدار است.

$50\% \leq WPL \leq 100\%$، WF خاکستری تهدیدی برای آینده محیط زیست است.

$25\% \leq WPL \leq 50\%$, WF خاکستری در محدوده پایدار قرار دارد.

$10\% \leq WPL \leq 25\%$، WF خاکستری پایدار است.

$WPL \leq 10\%$, WF خاکستری هیچ تاثیر منفی بر محیط زیست ندارد (Hoekstra,2011).

نتایج و بحث

با توجه به جدول شماره (۱) و نتایج به‌دست آمده از جدول (۲) در محصولات مورد بررسی، کلزا میزان ردپای کل آب بیشتری نسبت به دیگر محصولات دارد ($۱۱۳۲\ m^3ha^{-1}$). پس از آن ذرت دانه‌ای و گندم با (m^3ton^{-1}) (۹۱۷/۳ ۸۵۲/۸) از دیگر محصولات ردپای آب بیشتری دارند. چغندر قند با (m^3ton^{-1}) ۱۲۴/۴ ردپای کل آب کمتری نسبت به کل محصولات مورد بررسی دارد. با بررسی محاسبات ردپای آب محصولات انتخابی طی ۱۰ سال گذشته در گندم، ذرت دانه‌ای و کلزا شاهد کاهش در میزان کل ردپای آب و در چغندرقند، شبدر و یونجه با توجه به نتایج افزایش در میزان ردپای کل مشاهده می‌شود که این مساله با توسعه سطح زیر کشت این محصول در طی ده سال گذشته دور از انتظار نیست و با توجه به شرایط خشک‌سالی حاکم بر این ده سال، کاهش جزء آب سبز کلیه محصولات مشاهده می‌شود و این مساله حاکی از فشار بر منابع آب سطحی و زیر زمینی در طی این ده سال و روند افزایشی جزء آبی می‌باشد. مقایسه مقادیر جهانی ارایه شده در جدول (۳) و مقادیر متوسط آب محصولات به‌دست آمده در جدول (۲) نشان می‌دهد که ردپای کل آب گندم وذرت دانه‌ای و کلزا نسبت به مقادیر جهانی آن به‌ترتیب ۵۳ درصد، ۲۵ درصد و ۵۰ درصد کمتر است و مقادیر ردپای آب چغندرقند و یونجه با مقادیر متوسط جهانی آن‌ها برابر است. با توجه به موقعیت خاص محدوده مطالعاتی و اهمیت کودها و سمومی که در فرآیند تولید هر محصول استفاده می‌شود و خروج پساب حاصله از آن که به منابع آب سطحی و زیر زمینی وارد می‌شود و با توجه به نتایج به‌دست آمده از جدول (۲) گندم، ذرت و شبدر به‌ترتیب با (m^3ton^{-1}) ۵۶/۶، ۳۵/۳ و ۲۷/۸ بالاترین میزان ردپای آب خاکستری را در محدوده مورد مطالعه ایجاد می‌کنند. نتایج حاصل از بررسی ردپای آب خاکستری لزوم استفاده از روش‌های کاراتر در خصوص استفاده از سیستم‌های نوین آبیاری با هدف افزایش راندمان مصرف آب را روشن می‌سازد. با بررسی نتایج به‌دست آمده از جدول (۴) در بین محصولات یونجه، چغندرقند و گندم به‌ترتیب بیشترین درصد سهم جزء آبی را در ردپای کل آب مصرفی را دارا می‌باشند و شبدر با ۹۵/۱ درصد بیشترین جزء سبز را در بین محصولات مورد بررسی دارد. ضمناً گندم با ۱۸/۸ درصد بالاترین درصد جزء خاکستری را دارد که این مساله با توجه به سطح زیر کشت عمده این محصول، ضرورت بررسی جوانب ناشی از این میزان مصرف آب در جزء خاکستری را حایز اهمیت می‌نماید. این مسأله لزوم نگاه جامع مدیریتی در بحث بهینه سازی الگوی کشت و ضرورت تجهیز و مدرن‌سازی شبکه آبیاری برای افزایش بهره‌وری و مصرف آب را هرچه بیشتر پررنگ‌تر می‌نماید. در خصوص میزان ردپای آب خاکستری (m^3ton^{-1}) (۵۶/۶ و ۳۵/۳) دو محصول مهم و استراتژیک گندم و ذرت با توجه به جدول (۲) در محدوده‌ی طرح با میزان ردپای خاکستری این دو محصول در استان خوزستان (m^3ton^{-1}) (۷۷۱ و ۶۴۶) Gorgin (2016) مشاهده می‌شود که این دو محصول به‌ترتیب ۷/۵ درصد و ۵/۵ درصد از میزان کل آب خاکستری گندم و ذرت در استان را تشکیل می‌دهند. با توجه به بررسی ردپای خاکستری آب میزان، متوسط حجم آب خاکستری کل محصولات ۱/۱۷ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد و با توجه به میزان رواناب تولیدی در دشت دزفول که بنا بر گزارش مطالعه‌های بیلان آب محدوده مطالعاتی دزفول – اندیمشک معادل ۹۱/۷ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد سطح آلودگی آب WPL کمتر از ۱۰ درصد است و هیچ تأثیر منفی بر پایداری محیط‌زیستی محدوده دشت ندارد.

 DOI: 10.22055/jise.2021.31806.1896

جدول۱-سطح کشت سالیانه محصولات از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶

Table 1- Annual cultivation area of crops from 2006 to 2016

Crop	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2013	2014	2015	2016
Wheat	38,076	55,781	30,825	41,558	52,802	58,011	31,906	35,461	33,125	43,000
Maize	25,619	18,543	11,220	8,033	22,595	31,007	23,182	25,585	17,122	14,596
Sugar beet	43	0	0	0	0	0	0	972	1,724	2,180
Clover			114	16	747	1,246	1,396	1,473	1,573	1,378
Rapeseed	849	950	1,307	1,460	865	1,459	330	3,242	550	2,515
Alfalfa	0		264	0	0	74	55	230	18	48

جدول۲- مقادیر متوسط اجزای ردپای آب محصولات از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶

Table 2- Average amounts of water footprint components of products (m^3/ton) from 2006 to 2016

Crop	Wf(Green)	WF(Blue)	WF(Gray)	WF(Total)
Wheat	344.1	452	56.6	852.8
Maize	61.1	820.9	35.3	917.3
Sugar beet	38.5	84.6	1.3	124.4
Clover	126.6	71.8	3	201.5
Rapeseed	1076.9	27.4	27.8	1132.1
Alfalfa	96.8	148.3	3.7	248.8

جدول۳- مقادیر متوسط جهانی اجزای ردپای آب محصولات

Table 3- Global average water footprint of crops(m^3/ton)

Crop	Wf(Green)	WF(Blue)	WF(Gray)	WF(Total)
Wheat	1277	342	207	1826
Maize	947	81	194	1222
Sugar beet	82	26	25	133
Clover	*	*	*	*
Rapeseed	1703	231	336	2270
Fodder crops	207	27	20	254

جدول٤- مقادیر متوسط درصد اجزای ردپای آب محصولات از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶

Table4 - Average values persent watefootprint components of products from 2006 to 2016

Crop	%WF(Green)	%WF(Blue)	%WF(Gray)
Wheat	40.35	53.01	6.64
Maize	6.66	89.5	3.84
Sugar beet	30.32	68.06	1.02
Clover	62.84	35.65	1.5
Rapeseed	95.13	2.42	2.46
Alfalfa	38.88	59.61	1.5

نتیجه‌گیری

میزان آب مصرفی و ردپای آب هر محصول در هر منطقه تحت تأثیر اقلیم آن منطقه، میزان تولیدات، عملیات کشاورزی و راندمان کاربرد آب در آن منطقه است، لذا نیاز به شاخص‌هایی است که بتوان با آن میزان واقعی هر محصول را محاسبه نمود و بهترین الگوی کشت و تولیدی را در سیاست کار خود به‌منظور حفظ منابع آبی و افزایش بهره‌وری آب داشت. در این مطالعه برای ارزیابی وضعیت محصولات غالب از نظر آبیاری به ازای محصول تولیدی و عملکرد، از ردپای آب (WF) استفاده گردید.

ردپای آب محصولات در دو جزء آب آبی (WF blue) و آب سبز (WF green) محاسبه شد. نتایج نشان داد که ردپای کل آب گندم و ذرت دانه ای و کلزا نسبت به مقادیر جهانی آن به‌ترتیب ۵۳ درصد، ۲۵ درصد۵۰ درصد کمتر است و مقادیر ردپای آب چغندرقند و یونجه با مقادیر متوسط جهانی آن‌ها برابر است. در خصوص میزان ردپای آب خاکستری ($m^3 ton^{-1}$) (۵۶.۶ و ۳۵.۳) دو محصول گندم و ذرت در محدوده ی طرح ۷.۵ درصد و ۵.۵ درصد از میزان کل آب خاکستری گندم و ذرت در استان را تشکیل می‌دهند.

در این مطالعه مشخص گردید از ۳۱.۹۷ میلیون مترمکعب آب که در طول سال برای کشت محصولات انتخابی مصرف میشود ۴۶/۲ درصد مربوط به جزء آبی ۵۰/۲ درصد مربوط به جزء سبز و ۳/۶۷ درصد مربوط به جزء خاکستری است. در خصوص جزء

خاکستری که معادل ۱/۱۷ میلیون متر مکعب در سال می‌باشد می‌توان گفت که هرچند این حجم آب به چرخه آبی منطقه بر می‌گردد لیکن کاهش کیفیت آب مسأله بسیار مهمی است که باید در برنامه ریزی های کلان مورد توجه قرار گیرد.

نتایج نشان داد سطح آلودگی آب WPL کمتر از ۱۰ درصد است و هیچ تأثیر منفی بر پایداری زیست محیطی محدوده دشت ندارد که با توجه به اهمیت و جایگاه ویژه دشت دزفول در تأمین امنیت غذایی استان نکته حائز اهمیتی می‌باشد. با توجه به سهم ۵۰ درصدی جز سبز در تأمین آب مورد نیاز محصولات مورد بررسی، توجه ویژه و هرچه بیشتر به کشت دیم در این منطقه می‌تواند راهکار مفیدی برای کاهش ردپای آب محصولات باشد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسندگان هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: زینب نادری، نگارش مقاله، تجزیه و تحلیل داده‌ها

نویسنده دوم: علی محمد آخوندعلی، بررسی نتایج.

نویسنده سوم: مهدی قمشی: نگارش اولیه مقاله.

تقدیر و تشکر

این پژوهش فاقد تقدیر و تشکر است.

Refrences

1- Ababaei, B. and Etedali, H.R., 2017. Water footprint assessment of main cereals in Iran. *Agricultural Water Management*, *179*, pp.401-411.https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.016.

2- Aldaya, M.M., Martínez-Santos, P. and Llamas, M.R., 2010. Incorporating the water footprint and virtual water into policy: Reflections from the Mancha Occidental Region, Spain. *Water Resources Management*, *24*(5), pp.941-958. DOI 10.1007/s11269-009-9480-8.

3- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. FAO Irrigation and drainage paper No. 56. *Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations*, *56*(97), p.e156.

4- Alizadeh, A. 2003. *Principles of Applied Hydrology*. 17th edn. Mashhad: Imam Reza University Press. (In Persian).

5- Chapagain, A.K. and Hoekstra, A.Y., 2011. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics*, *70*(4), pp.749-758. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.11.012.

6- Gorgin, P.F., Ramezani, E.H. and Ababaei, B. 2016 'Estimation of grey water footprint in the production of important crops at provincial and national scales', *in Proceedings of the Second National Congress of Irrigation and Drainage of Iran, Isfahan*. (In Persian).

7- Hoekstra, A.Y. and Chapagain, A.K., 2007. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, *21*(1), pp.35-48.

8- Hoekstra, A.Y., 2011. *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Routledge.

9- Hoekstra, A.Y. and Chapagain, A.K., 2011. *Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources*. John Wiley & Sons.

10- Lu, Y., Zhang, X., Chen, S., Shao, L. and Sun, H., 2016. Changes in water use efficiency and water footprint in grain production over the past 35 years: a case study in the North China Plain. *Journal of Cleaner Production*, *116*, pp.71-79. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.008.

11- Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y., 2011. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, *15*(5), pp.1577-1600.

12- Seydan, H. 2001 'Export water or water supply to dry areas', *Journal of Khorasan*, 2, pp. 41–51.

13- Sumner, D.M. and Jacobs, J.M. 2005 'Utility of Penman–Monteith, Priestley–Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration', *Journal of Hydrology*, 308(1–4), pp. 81–104. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.023.

14- Cao, X., Wu, P., Wang, Y. and Zhao, X. 2014 'Water footprint of grain product in irrigated farmland of China', *Water Resources Management*, 28, pp. 2213–2227. https://doi.org/10.10۰۷/s11269-014-0619-3.

15- Zhuo, L., Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. and Wada, Y. 2016 'Inter- and intra-annual variation of water footprint of crops and blue water scarcity in the Yellow River basin (1961–2009)', *Advances in Water Resources*, 87, pp. 29–41. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.11.002.

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 1, Spring 2026, p. 95-110

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

Research Paper

EXTENDED ABSTRACT

Hydraulic Analysis of Clay Blanket in Earth-Fill Dams Using Numerical Modeling

E. Asadi[1]*, M. Soltani Sotobadi[2] and T. Omidpour Alavian[3]

1- Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Azerbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran, (asadi@azaruniv.ac.ir).*
2- Master's Student, Civil Engineering - Water and Hydraulic Structures of Azerbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.
3- Ph.D. Student, Civil Engineering - Water and Hydraulic Structures, Maragheh University, Maragheh, Iran.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 16 April 2025
Revised: 19 August 2025
Accepted: 07 September 2025
Available online: 05 May 2026

Keywords:
Numerical Modeling, Hydraulic Analysis, Clay Blanket, Hydraulic Gradient, Seep/W, GeoStudio.

TO CITE THIS ARTICLE:

Asadi, E., Soltani Sotobadi, M., Omidpour Alavian, T. 2026. 'Hydraulic Analysis of Clay Blanket in Earth-Fill Dams Using Numerical Modeling', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(1), pp. 95-110. doi: 10.22055/jise.2025.49409.2160.

Abstract

Earth-fill dams play a critical role in water resource management, flood control, and agricultural water supply. However, seepage control and pore water pressure reduction remain key challenges for ensuring their long-term safety and performance. This study employs numerical modeling using Seep/W software (GeoStudio) to investigate the influence of clay cover length and thickness on the hydraulic performance of an earth-fill dam located in East Azerbaijan, Iran. The effects of lengths (59.6, 73.3, 93, and 100 m) and thicknesses (0.5, 1.0, 1.5, and 1.8 m) on seepage flow rate, hydraulic gradient, and pore water pressure were systematically analyzed. Results indicate that increasing the clay cover thickness to 1.5 m reduced seepage flow by 55.22%, while increasing the length to 93 m resulted in a 48.81% reduction. Further increases in length and thickness did not yield significant additional reductions in seepage, demonstrating that a length of 93 m and a thickness of 1.5 m are optimal. Moreover, a clay cover thickness of 1.5 m reduced the exit hydraulic gradient by 60.60% and pore water pressure by 56.94%, whereas increasing the length to 93 m reduced these parameters by 47.47% and 41.58%, respectively. Economic analysis revealed that optimizing the clay cover dimensions reduced excavation volume by 50%, height by 30%, and thickness by 40%, and operational costs by up to 30%, while improving hydraulic performance by 70%. These findings confirm that the optimal clay cover dimensions (length: 93 m; thickness: 1.5 m) not only substantially reduce seepage and enhance hydraulic performance but also provide an innovative, cost-effective approach to earth-fill dam design by significantly lowering operational costs.

Introduction

Earth-fill dams are critical infrastructure for water resource management, flood control, and agricultural water supply, significantly contributing to sustainable development. However, seepage and elevated pore water pressure pose substantial challenges to their structural integrity and long-term performance. Clay blankets, employed to extend seepage paths and reduce hydraulic gradients, are a proven solution to mitigate these issues. This study aims to evaluate the influence

of clay blanket dimensions—specifically length and thickness on the hydraulic performance of the Qeysaraq Earth-fill dam located in East Azerbaijan, Iran. The research investigates the effects of varying blanket lengths (59.6, 76.3, 93, and 100 meters) and thicknesses (0.5, 1, 1.5, and 1.8 meters) on seepage flow, hydraulic gradient, and pore water pressure using numerical modeling in the Seep/W module of GeoStudio software. By integrating hydraulic and economic analyses, the study seeks to identify optimal blanket dimensions that balance performance and cost, providing a practical framework for designing earth-fill dams in regions with similar geotechnical and hydrological conditions. The novelty of this research lies in its comprehensive sensitivity analysis of geometric parameters, validated with field data, and its combined hydraulic-economic optimization, which enhances both dam safety and project affordability.

Methodology

He study utilized numerical modeling with the Seep/W module of GeoStudio software to simulate seepage behavior in the Qeysaraq earth-fill dam. The dam, located upstream of Qeysaraq village in East Azerbaijan (47°15'12" E, 38°4'21" N), was modeled incorporating real geotechnical and hydrogeological data, including saturated and unsaturated conditions. The analysis focused on evaluating four blanket lengths (59.6, 76.3, 93, and 100 meters) and four thicknesses (0.5, 1, 1.5, and 1.8 meters) to assess their impact on seepage flow, hydraulic gradient, and pore water pressure. The model employed the flow continuity equation (∂ (k_x $\partial h/\partial x)/\partial x + \partial$ (k_y $\partial h/\partial y)/\partial y + \partial$ (k_z $\partial h/\partial z)/\partial z = 0$) and Darcy's law ($q = -k\nabla h$), with soil-water characteristic curves (SWCC) and variable permeability to ensure accurate representation of hydraulic behavior. Boundary conditions included constant head at the reservoir (upstream) and outlet drains (downstream), with no-flow conditions on lateral boundaries. The Mohr-Coulomb model was used for soil behavior, and field data from piezometers (SP1 (2), SP2, SP3) were used for model calibration, achieving a relative error of less than 5%. Economic analysis quantified cost reductions in excavation volume, dam height, and operational expenses, aligning with practical engineering considerations for dam design optimization.

Results and Discussion

The numerical modeling results demonstrated that clay blanket dimensions significantly influence the hydraulic performance of the Qeysaraq dam. Increasing the blanket thickness to 1.5 meters reduced seepage flow by 55.22%, from 8.5×10^{-3} to 3.7×10^{-3} m^3/s, while extending the length to 93 meters achieved a 48.81% reduction. Further increases beyond these dimensions yielded diminishing returns, indicating that a 93-meter length and 1.5-meter thickness are optimal. The 1.5-meter-thick blanket decreased the outlet hydraulic gradient by 60.6%, from 0.12 to 0.05, and pore water pressure by 56.94%, from 4.8×10^5 to 2.2×10^5 N/m^2. In contrast, the 93-meter length reduced the hydraulic gradient by 47.47% and pore water pressure by 41.58%.

These findings highlight that blanket length has a more pronounced effect on seepage reduction compared to thickness, though both parameters are critical for optimizing hydraulic performance. Sensitivity analyses showed that increasing length beyond 100 meters or thickness beyond 1.5 meters provided negligible additional benefits, suggesting cost inefficiencies. Economically, the optimal dimensions reduced excavation volume by 50%, dam height by 30%, and blanket thickness by 40%, leading to a 30% reduction in operational costs while improving hydraulic performance by 70%. Validation with field piezometer data confirmed high model accuracy, with relative errors of 4.2%, 3.8%, and 4.5% for total head calculations. Comparisons with prior studies, such as Lee and Kim (2002) and Kouhdaragh et al. (2025), showed improved accuracy in seepage flow prediction (12.6% better) and hydraulic gradient reduction (8.9% better), attributed to advanced Seep/W capabilities and precise field data integration. The higher permeability of Qeysaraq dam's local materials emphasized the need for tailored optimization, enhancing both performance and cost-effectiveness.

Conclusion

This study underscores the critical role of optimized clay blanket dimensions in enhancing the hydraulic performance and economic viability of earth-fill dams. The optimal configuration of a

93-meter length and 1.5-meter thickness for the Qeysaraq dam achieved a 55.22% reduction in seepage flow, 60.6% in hydraulic gradient, and 56.94% in pore water pressure, with a relative error of 4.6% compared to field data. Economically, this configuration reduced excavation volume by 50.4%, dam height by 30.1%, and operational costs by 30.3%, while improving hydraulic performance by 70.8%. The integrated hydraulic-economic framework, precise sensitivity analysis, and advanced numerical modeling using Seep/W provide a robust and innovative approach for dam design. These findings, validated by field data and aligned with prior research, offer a practical and sustainable model for engineers and policymakers to design high-efficiency earth-fill dams in resource-constrained regions, contributing to sustainable water resource management and geotechnical engineering advancements.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution

First Author: Ebrahim Asadi, Data analysis.
Second Author: Mehdi Soltani Satubadi, Data review and analysis.
Third Author: Tohid Omidpour Alavian, Writing of the manuscript, analysis.

Acknowledgment

The authors express their sincere gratitude and appreciation to the esteemed faculty members of the Department of Civil Engineering of Azarbaijan Shahid Madani University, as well as the respected professors of the Department of Civil Engineering at the University of Maragheh. Their scientific support, invaluable guidance, and precise technical advice throughout various stages of this research particularly in numerical modeling, data analysis, and interpretation of hydraulic results played a significant role in enhancing the quality of this study. Without the constructive collaboration and consultations of these distinguished professors, completing this research with such a level of accuracy and credibility would not have been possible.

References

1- Lee, J., & Kim, S. 2002. Hydraulic performance analysis of earth dams using SEEP/W. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128(6), 489-498. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:6(489)

2- Kouhdaragh, M., Majedi Asl, M., Omidpour Alavian, T., Nobahari, N. and Ayami Lord, M., 2024. Analysis of Seepage Flow and Hydraulic Gradient in the Body and Foundation of Alavian Earth Dam. *Journal of Water and Soil Science*, *28*(4), pp.177-192.https://doi.org/ 10.47176/jwss.28.4.62811.

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۹، شماره‌ی ۱، بهار ۱۴۰۵، مقاله پژوهشی، ص. ۱۱۰-۹۵

تحلیل هیدرولیکی بلانکت رسی سد خاکی با مدل‌سازی عددی

ابراهیم اسدی[1*]، مهدی سلطانی ستوبادی[2] و توحید امیدپور علویان[3]

۱*- نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران، asadi@azaruniv.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران -آب و سازه‌های هیدرولیکی- دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

۳- دانشجوی دکترای، مهندسی عمران -آب و سازه‌های هیدرولیکی-دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵

چکیده

سدهای خاکی به‌دلیل نقش کلیدی در مدیریت منابع آب، کنترل سیلاب و تأمین آب کشاورزی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند، اما کنترل تراوش و کاهش فشار آب حفره‌ای از چالش‌های اصلی برای تضمین ایمنی و عملکرد بلندمدت آنهاست. این مطالعه با بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار Seep/W از مجموعه GeoStudio، تأثیر طول و ضخامت پوشش رسی بر عملکرد هیدرولیکی سد خاکی واقع در آذربایجان شرقی را بررسی کرده است. در این پژوهش، اثرات طول‌های ۵۹/۶، ۷۳/۳، ۹۳ و ۱۰۰ متر و ضخامت‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۱/۸ متر بر جریان تراوش، گرادیان هیدرولیکی و فشار آب حفره‌ای تحلیل شد. نتایج نشان داد که افزایش ضخامت پوشش رسی به ۱/۵ متر، جریان تراوش را تا ۵۵/۲۲ درصد کاهش داد، در حالی که افزایش طول به ۹۳ متر، کاهش ۴۸/۸۱ درصد را به دنبال داشت. افزایش بیشتر طول و ضخامت تأثیر معناداری بر کاهش تراوش نداشت، که نشان‌دهنده بهینه بودن طول ۹۳ متر و ضخامت ۱/۵ متر است. همچنین، پوشش رسی با ضخامت ۱/۵ متر، گرادیان هیدرولیکی خروجی را ۶۰/۶ درصد و فشار آب حفره‌ای را ۵۶/۹۴ درصد کاهش داد، در حالی که افزایش طول به ۹۳ متر به‌ترتیب این پارامترها را ۴۷/۴۷ درصد و ۴۱/۵۸ درصد کاهش داد. تحلیل اقتصادی نشان داد که بهینه‌سازی ابعاد پوشش رسی، حجم خاک‌برداری را ۵۰ درصد، ارتفاع را ۳۰ درصد و ضخامت را ۴۰ درصد کاهش داد و هزینه‌های عملیاتی را تا ۳۰ درصد کم کرد، در حالی که عملکرد هیدرولیکی سد را تا ۷۰ درصد بهبود بخشید. این یافته‌ها حاکی از آن است که انتخاب ابعاد بهینه پوشش رسی (طول ۹۳ متر و ضخامت ۱/۵ متر) نه تنها تراوش را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داده و عملکرد هیدرولیکی را بهبود می‌بخشد، بلکه با کاهش چشمگیر هزینه‌های عملیاتی، رویکردی نوآورانه و اقتصادی برای طراحی سدهای خاکی ارائه می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: مدل‌سازی عددی، تحلیل هیدرولیکی، بلانکت رسی، گرادیان هیدرولیکی، GeoStudio، Seep/W.

مقدمه

سدهای خاکی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین سازه‌های مهندسی در مدیریت منابع آب، کنترل سیلاب و تأمین آب کشاورزی نقش کلیدی ایفا می‌کنند و به توسعه پایدار جوامع کمک شایانی می‌نمایند. با این حال، یکی از چالش‌های اساسی این سازه‌ها، کنترل نشت آب (seepage) و فشار آب حفره‌ای است که تأثیر مستقیمی بر ایمنی و عملکرد بلندمدت سد دارد. استفاده از بلانکت رسی به‌عنوان یک راهکار مؤثر، با افزایش طول مسیر خزش (seepage path length) و کاهش گرادیان هیدرولیکی، عملکرد هیدرولیکی سد را بهبود می‌بخشد. پدیده خزش به طول مسیری اشاره دارد که آب در آن از طریق محیط متخلخل سد یا پی آن حرکت می‌کند. افزایش طول خزش با استفاده از بلانکت رسی، انرژی هیدرولیکی آب را کاهش داده، دبی نشت را به‌طور قابل‌توجهی پایین می‌آورد و گرادیان هیدرولیکی را تعدیل می‌کند، که این امر به پایداری سازه و کاهش خطر شکست هیدرولیکی کمک می‌کند. این پژوهش با تمرکز بر سد خاکی قیصرق در استان آذربایجان شرقی، به بررسی تأثیر ابعاد بلانکت رسی (طول و ضخامت) بر عملکرد هیدرولیکی و اقتصادی سد با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار Seep/W از مجموعه GeoStudio می‌پردازد.

پیشینه تحقیقات در زمینه تحلیل هیدرولیکی و بهینه‌سازی بلانکت رسی در سدهای خاکی، دستاوردهای قابل‌توجهی را نشان می‌دهد. Smith (1975) با بررسی پایداری هیدرولیکی سدهای خاکی، گزارش کرد که ضخامت بهینه بلانکت می‌تواند فشار آب حفره‌ای را تا ۵۰ درصد کاهش دهد، اما این مطالعه به تحلیل‌های پارامتری جامع نپرداخت. Johnson et al (1988) در یکی از مطالعه‌های اولیه، تأثیر ابعاد بلانکت رسی بر کنترل نشت را بررسی کردند و نشان دادند که ضخامت ۱/۵متر می‌تواند تا ۵۵ درصد دبی نشت را کاهش دهد، اما این مطالعه فاقد مدل‌سازی عددی پیشرفته بود. Lee و Kim (2002) با استفاده از نرم‌افزار Seep/W، تحلیل دقیقی از تأثیر بلانکت رسی بر عملکرد هیدرولیکی سدهای خاکی

انجام دادند و گزارش کردند که بلانکت رسی با طول ۸۰ متر و ضخامت ۱/۲ متر می‌تواند دبی نشت را تا ۴۷ درصد و گرادیان هیدرولیکی را تا ۴۰ درصد کاهش دهد، هرچند این مطالعه به تحلیل اقتصادی و تنوع شرایط زمین‌شناسی توجه محدودی داشت. Brown (2020) با استفاده از مدل‌سازی عددی پیشرفته، رفتار بلانکت رسی را در سدهای خاکی بررسی کرد و نشان داد که بهینه‌سازی ضخامت بلانکت می‌تواند تا ۴۰ درصد دبی نشت را کاهش دهد، هرچند این مطالعه به تحلیل اقتصادی ابعاد مختلف بلانکت نپرداخت .Zhang et al (2021) در مطالعه‌ای جامع، تحلیل حساسیت پارامترهای هندسی بلانکت رسی را انجام دادند و گزارش کردند که طول ۹۰ متر و ضخامت ۱/۵ متر می‌تواند تا ۵۰ درصد گرادیان هیدرولیکی را کاهش دهد، اما این نتایج برای سدهای با شرایط زمین‌شناسی خاص محدود بود .Chen et al (2022) با تمرکز بر مدل‌سازی شرایط اشباع و غیراشباع، نشان دادند که افزایش طول بلانکت تا حد مشخصی (حدود ۹۵ متر) تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش فشار آب حفره‌ای (تا ۴۵ درصد) دارد، اما افزایش بیشتر طول، تأثیر ناچیزی داشته و هزینه‌های اجرایی را افزایش می‌دهد Li و Wang (2023) با تلفیق تحلیل هیدرولیکی و اقتصادی، چارچوبی را برای بهینه‌سازی ابعاد بلانکت پیشنهاد کردند که منجر به کاهش ۳۵ درصدی هزینه‌های اجرایی و بهبود ۶۰ درصدی عملکرد هیدرولیکی شد، اما این مطالعه به شرایط خاص سدهای با پی نفوذپذیر محدود بود .Kouhdaragh et al (2024) در مطالعه‌ای روی سد خاکی علویان، با استفاده از مدل‌سازی عددی، کاهش ۴۸ درصد در دبی نشت را با بلانکت رسی به طول ۹۳ متر گزارش کردند، اما این مطالعه به بهینه‌سازی اقتصادی توجه محدودی داشت. مرور این تحقیقات نشان می‌دهد که اگر چه مطالعه‌های پیشین دستاوردهای ارزشمندی در زمینه کاهش نشت و بهبود عملکرد هیدرولیکی ارائه کرده‌اند، اما تلفیق تحلیل‌های هیدرولیکی و اقتصادی با استفاده از داده‌های میدانی و مدل‌سازی پیشرفته همچنان نیازمند بررسی دقیق‌تر است. Asadi et al (2023, 2025, 2026) نشان دادند که بهینه‌سازی اجزای داخلی سد خاکی شامل موقعیت هسته، ابعاد زهکش و دیوار آب‌بند، نقش مؤثری در کاهش گرادیان هیدرولیکی، کنترل فشار آب حفره‌ای و بهبود عملکرد هیدرولیکی دارد. در مجموع، هسته مرکزی و دیوار آب‌بند با عمق ۱۵ متر و ضخامت دو متر بهترین عملکرد را در کاهش نشت داشتند و افزایش ۱۰ درصد ابعاد زهکش نیز موجب بهبود شرایط تراوش و کاهش فشار پایین‌دست شد.

هدف این پژوهش، تحلیل جامع تأثیر طول (۵۹/۶، ۷۶/۳، ۹۳ و ۱۰۰ متر) و ضخامت (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۱/۸ متر) بلانکت رسی بر دبی نشت، گرادیان هیدرولیکی و فشار آب حفره‌ای در سد خاکی قیصرق با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار Seep/W است. نوآوری‌های این مطالعه شامل ارائه چارچوبی یکپارچه برای بهینه‌سازی هیدرولیکی و اقتصادی، تحلیل حساسیت دقیق پارامترهای هندسی با داده‌های میدانی، و تعیین ابعاد بهینه بلانکت رسی (طول ۹۳ متر و ضخامت ۱/۵ متر) است که منجر به کاهش ۵۵/۲۲ درصدی دبی نشت، ۶۰/۶ درصدی گرادیان هیدرولیکی، ۵۶/۹۴ درصدی فشار آب حفره‌ای و ۳۰ درصدی هزینه‌های اجرایی شده است. این مطالعه با ارائه نتایج دقیق و کاربردی، گامی مؤثر در راستای بهبود طراحی سدهای خاکی و کاهش هزینه‌های اجرایی برمی‌دارد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، برای بررسی کارایی بلانکت رسی در کاهش نشت و کنترل فشار آب منفذی در سد خاکی قیصرق، از مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio و ماژول Seep/W بهره گرفته شده است. این مدل‌سازی با در نظر گرفتن شرایط هیدروژئولوژیکی، مشخصات ژئوتکنیکی و داده‌های میدانی سد طراحی شده و شامل تحلیل نشت در محیط‌های اشباع و غیراشباع است. به‌منظور دقت بالاتر در تحلیل، شرایط مرزی واقعی و هندسه دقیق سد قیصرق در مدل اعمال شده است. سد خاکی مورد مطالعه در استان آذربایجان شرقی، در بالادست روستای قیصرق واقع شده است. این سد دارای مختصات جغرافیایی "۱۲ ‘۱۵ °۴۷ طول شرقی و "۲۱ ‘۴ °۳۸ عرض شمالی بوده و در فاصله ۶۱ کیلومتری شمال شرقی شهرستان بستان‌آباد و ۱۰/۳ کیلومتری شرق شهرستان مهربان قرار دارد. این موقعیت مکانی، سد را در معرض تأثیرات هیدرولوژیکی منطقه‌ای قرار داده که در طراحی سیستم کنترل نشت باید مدنظر قرار گیرد. این پژوهش باهدف بررسی دقیق تأثیر بلانکت رسی بر پارامترهای هیدرولیکی سد، ازجمله میزان نشت و گرادیان هیدرولیکی، انجام شده است. داده‌های جمع‌آوری‌شده و مدل‌سازی عددی انجام‌شده، پایه‌ای محکم برای تحلیل‌های پیشرفته و ارائه راهکارهای مؤثر در بهبود عملکرد هیدرولیکی سد مورد مطالعه فراهم می‌آورد. شکل (۱) تصویر ماهواره‌ای از موقعیت سد مورد مطالعه نمای ماهواره‌ای سد مورد مطالعه را نمایش می‌دهد که موقعیت مخزن، سازه اصلی سد و اراضی پیرامونی (شامل زمین‌های کشاورزی) را نشان می‌دهد. بررسی این تصویر در ارزیابی شرایط توپوگرافی، کاربری اراضی و نحوه توزیع منابع آبی مؤثر بوده و می‌تواند به تحلیل رفتار هیدرولیکی سد کمک کند. در شکل (۲) مقطع عمومی زمین‌شناسی زیرسطحی سد مورد مطالعه نشان داده شده است. با توجه به ساختار ژیپسی موجود در پی سد و قابلیت انحلال شدید این نوع تشکیلات، به‌نظر میرسد به‌مرورزمان عبور آب باعث ایجاد مسیرهای موئینه در پی سد شده و افزایش نشت را به همراه خواهد داشت. همچنین انحلال موضعی این نوع از ساختارهای زمین‌شناسی می‌تواند منجر به وجود آمدن حفرات کارستی و نشست ناگهانی بسیار خطرناک در بدنه سد باشد. لذا کنترل میزان نشت آب از زهکش‌ها و نیز میزان نشست

DOI: 10.22055/jise.2025.49409.2160

بدنه بسیار ضروری و حیاتی می‌باشد. مشخصات هندسی سد مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است. به‌منظور بررسی نفوذپذیری و تأثیر آن بر میزان نشت، داده‌های آزمایشگاهی و مطالعات ژئوتکنیکی منطقه مورد استفاده قرار گرفته است. جدول (۲) ویژگی‌های نفوذپذیری لایه‌های مختلف پی و بدنه سد قیصرق را نشان می‌دهد.



Fig. 1- Satellite image of the location of the studied dam
شکل ۱- تصویر ماهواره‌ای از موقعیت سد مورد مطالعه

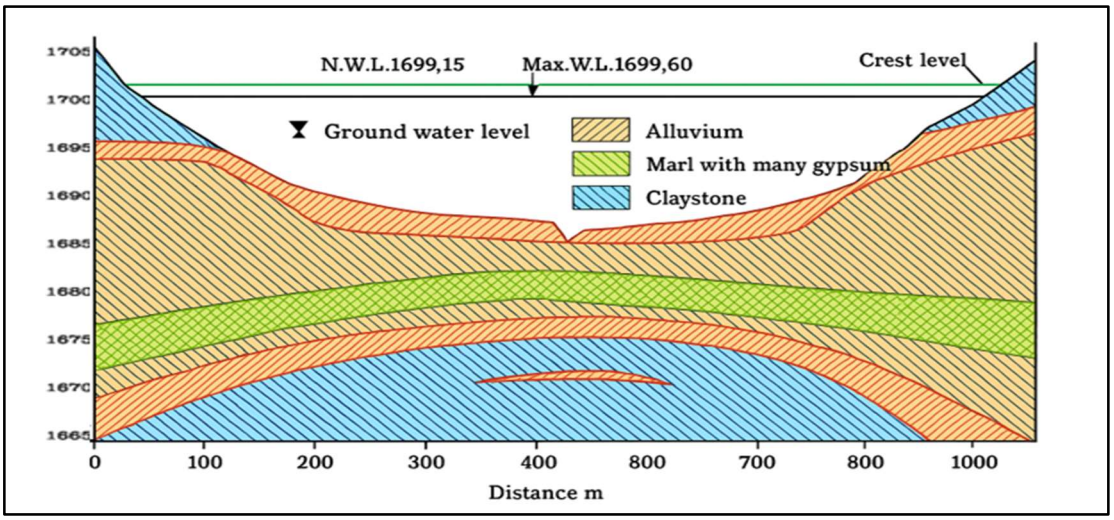


Fig. 2- General subsurface geological section of the studied dam
شکل ۲- مقطع عمومی زمین‌شناسی زیرسطحی سد مورد مطالعه

جدول ۱- مشخصات هندسی سد مورد مطالعه

Table 1- Geometric characteristics of the studied dam

Parameter	Quantity
Dam height	16 meters
Crest length	988 meters
Crest width	6 meters
Upstream slope	۱:۳
Downstream slope	۱:۳
Crest number	1701 meters

جدول ۲- نفوذپذیری مصالح پی و بدنه سد مورد مطالعه

Table 2- Permeability of foundation and dam body materials studied

Material Name	Vertical permeability value (m/s)	Material Name
Clay Core	1×10^{-9}	Clay Core
Fine Filter	1×10^{-3}	Fine Filter
Coarse Filter and Drain	1×10^{-2}	Coarse Filter and Drain
Soil Shell	5×10^{-5}	Soil Shell
Surface Alluvial Layer	1×10^{-6}	Surface Alluvial Layer
Silt and Clay Layer	1×10^{-7}	Silt and Clay Layer
Cut-off Watertight Wall	1×10^{-9}	Cut-off Watertight Wall

مدل‌سازی عددی

در این پژوهش، برای بررسی کارایی بلانکت رسی در کاهش نشت و کنترل فشار آب منفذی در سد خاکی مورد مطالعه، از مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio و ماژول Seep/W بهره گرفته شده است. نرم‌افزار GeoStudio، که مبتنی بر روش اجزای محدود است، قابلیت تحلیل دقیق فرآیند تراوش در محیط‌های متخلخل را فراهم می‌کند. در مدل‌سازی عددی با استفاده از ماژول Seep/W، جسم سد خاکی با در نظر گرفتن شرایط اشباع و غیراشباع مدل‌سازی شد. برای شبیه‌سازی دقیق رفتار هیدرولیکی، از منحنی‌های مشخصه آب-خاک (SWCC) و نفوذپذیری متغیر برای لایه‌های مختلف بدنه و پی سد استفاده شد. این رویکرد امکان تحلیل دقیق‌تر جریان تراوش در شرایط واقعی را فراهم کرد. مدل‌سازی عددی بر اساس معادله پیوستگی جریان $(k_x\,\partial$ $(\partial h/\partial x)/\partial x + \partial(k_y\,\partial h/\partial y)/\partial y + \partial(k_z\,\partial h/\partial z)/\partial z = 0$ و قانون دارسی ($q = -k\,\nabla h$) انجام شد، که در آن k نشان‌دهنده نفوذپذیری، h هد هیدرولیکی و q دبی جریان است. این روابط در نرم‌افزار Seep/W برای شبیه‌سازی جریان تراوش در محیط متخلخل سد استفاده شد. برای ارزیابی تأثیر بلانکت رسی بر کاهش نشت و کنترل فشار آب منفذی، مدل‌های عددی با سناریوهای مختلف طراحی شده‌اند. این مدل‌ها امکان مقایسه نتایج و تحلیل عملکرد روش‌های مختلف آب‌بندی را فراهم کرده و مبنایی برای بهینه‌سازی طراحی سیستم کنترل نشت سدهای خاکی ارائه می‌دهند. داده‌های جمع‌آوری‌شده و مدل‌سازی عددی انجام‌شده، پایه‌ای محکم برای تحلیل‌های پیشرفته و ارائه راهکارهای مؤثر در بهبود عملکرد هیدرولیکی سد مورد مطالعه فراهم می‌آورد. این رویکرد، مهندسان را قادر می‌سازد تا با اطمینان بیشتری به طراحی و تحلیل پروژه‌های خود بپردازند.

نرم‌افزار GEO STUDIO

نرم‌افزار GeoStudio، توسعه‌یافته توسط شرکت Geoslope کانادا، ابزاری پیشرفته در مهندسی ژئوتکنیک است که با ماژول‌های تخصصی و محیط کاربرپسند، تحلیل‌های دقیق پدیده‌های ژئوتکنیکی را امکان‌پذیر می‌سازد. این نرم‌افزار برای مدل‌سازی و ارزیابی پروژه‌های مهندسی با دقت بالا طراحی شده است. در این پژوهش، از ماژول Seep/W نرم‌افزار GeoStudio برای تحلیل هیدرولیکی سد خاکی قیصرق استفاده شده است. این ماژول با مدل‌سازی جریان تراوش (seepage) در بلانکت رسی، امکان بررسی تأثیر ابعاد (طول و ضخامت) بر دبی نشت، گرادیان هیدرولیکی و فشار آب حفره‌ای را فراهم کرد. مدل‌سازی عددی در Seep/W به تحلیل حساسیت پارامترهای هندسی بلانکت رسی و بهینه‌سازی آن (طول ۹۳ متر، ضخامت ۱/۵متر) کمک کرد که منجر به کاهش ۵۵/۲۲ درصدی دبی نشت، ۶۰/۶ درصدی گرادیان هیدرولیکی و ۵۶/۹۴ درصد فشار آب حفره‌ای شد. این ابزار با شبیه‌سازی دقیق شرایط هیدرولیکی، دقت طراحی و کارایی بهینه‌سازی اقتصادی پروژه را افزایش داد.

شرایط مرزی

شرایط مرزی مدل شامل هد ثابت در بالادست (سطح آب مخزن) و پایین‌دست (زهکش‌های خروجی) و شرایط بدون جریان در مرزهای جانبی بود. داده‌های ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژیکی سد مورد مطالعه به‌عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی شامل سطح آب مخزن در بالادست، سطح آب خروجی در پایین‌دست و ویژگی‌های نفوذپذیری مصالح مختلف سد است. مشخصات هندسی واقعی سد مورد مطالعه و شرایط هیدرولیکی منطقه در توسعه مدل عددی لحاظ شده تا نتایج حاصل از شبیه‌سازی، انطباق بالایی با رفتار واقعی سد داشته باشد. مدل رفتاری خاک بر اساس مدل موهر-کولمب و منحنی‌های مشخصه آب-خاک (SWCC) برای شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی لایه‌های اشباع و غیراشباع سد انتخاب شد.

پارامترهای مدل و متغیرهای بررسی‌شده

در این پژوهش، تأثیر طول و ضخامت بلانکت رسی بر میزان نشت و فشار آب منفذی در سد خاکی مورد مطالعه بررسی شده است. طول‌های ۵۱/۶، ۷۳/۴، ۹۳ و ۱۰۰ متر و ضخامت‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۱/۸ متر بر اساس مطالعه‌های ژئوتکنیکی اولیه و محدودیت‌های اجرایی سد قیصرق انتخاب شدند تا تحلیل حساسیت جامعی انجام شود.

DOI: 10.22055/jise.2025.49409.2160

جدول (۳) مشخصات مدل‌های عددی را نشان می‌دهد. طول بلانکت رسی در بازه ۵۱/۶، ۷۳/۴، ۹۳ و ۱۰۰ متر و ضخامت آن در دو مقدار ۰/۵ و ۱/۵ متر در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که بلانکت رسی با طول ۱۰۰ متر و ضخامت ۱/۵ متر بهترین عملکرد را در کاهش نشت ارائه داده و بهینه‌ترین شرایط را فراهم می‌کند. این یافته‌ها اهمیت بهینه‌سازی پارامترهای طراحی را در افزایش کارایی و کاهش نشت در سدهای خاکی نشان می‌دهند.

صحت سنجی نتایج حاصل از مدل‌سازی با Seep/W

برای اطمینان از دقت مدل‌سازی عددی، نتایج حاصل از تحلیل عددی با داده‌های میدانی پیزومترهای نصب‌شده در سد مورد مطالعه مقایسه شد. تحلیل هد آب با استفاده از معادله پیوستگی جریان و قانون دارسی در نرم‌افزار Seep/W انجام شد. هد کل در نقاط مختلف مدل با حل معادله‌های اجزای محدود محاسبه و با داده‌های پیزومترها مقایسه شد. برای کالیبراسیون مدل، داده‌های هد کل محاسبه‌شده با داده‌های میدانی ثبت‌شده توسط پیزومترهای SP1(2)، SP(2) و SP(3) مقایسه شد. میانگین خطای نسبی برای هد کل محاسبه‌شده به ترتیب ۴/۲ درصد، ۳/۸درصد و ۴/۵ درصد بود، که نشان‌دهنده دقت بالای مدل است. میانگین خطای نسبی بین نتایج مدل و داده‌های واقعی کمتر از پنج درصد بود که نشان‌دهنده دقت بالای مدل است. شکل (۳) مقایسه‌ای میان هد آب محاسبه‌شده در نرم‌افزار و داده‌های ثبت‌شده در پیزومتر SP1(2) را نشان می‌دهد. تطابق قابل‌قبول بین داده‌های مدل و داده‌های واقعی، دقت مدل‌سازی را تأیید می‌کند. همچنین، نتایج این مطالعه با یافته‌های Lee و Kim (2002) و Kouhdaragh et al (2024) برای سد علویان مقایسه شد که نشان‌دهنده تطابق قابل‌قبول در کاهش نشت و گرادیان هیدرولیکی بود.

جدول ۳-مشخصات متغیرهای مدل‌های به کار رفته در شبیه‌سازی

Table 3- Characteristics of the variables of the models used in the simulation

Variables	Amount of changes
Length of clay blanket	6.59, 3.76, 93 and 100 meters
Thickness of clay blanket	0.5, 1, 1.5 and 8 meters
Type of dam	1 mode

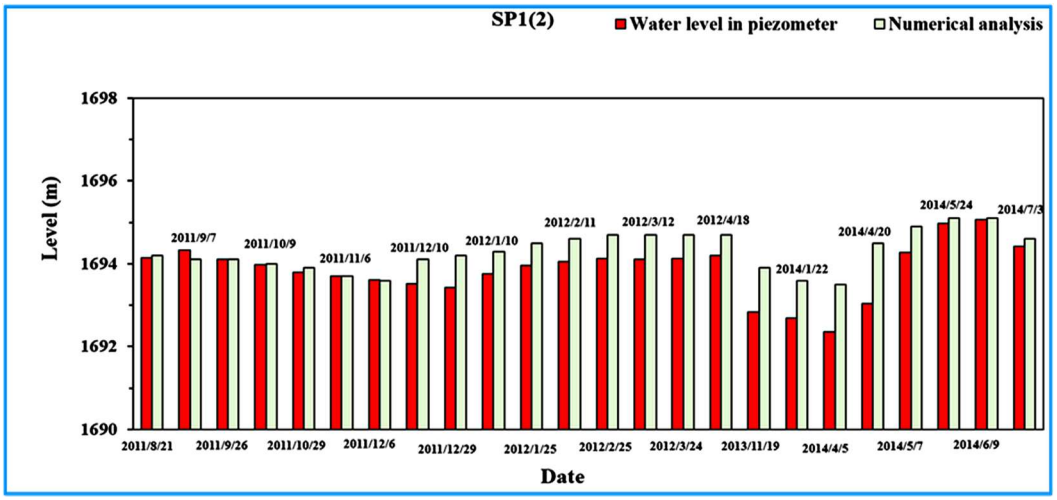


Fig. 3- Comparison of total head obtained from numerical analysis results with measured values at the SP 1(2) piezometer location

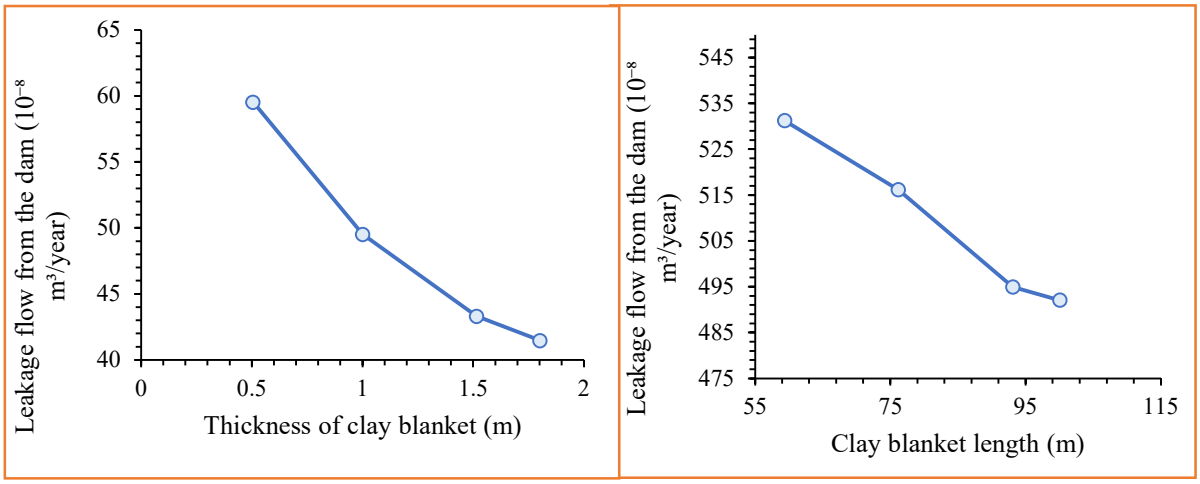
شکل ۳- مقایسه هد کل حاصل از نتایج تحلیل عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده در محل پیزومتر SP 1(2)

نتایج و بحث

تحلیل عملکرد بلانکت رسی در کاهش نشت و کنترل فشار آب منفذی

نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد که طول بلانکت رسی تأثیر قابل‌توجهی در کاهش دبی نشت دارد، درحالی‌که افزایش ضخامت آن نقش کمتری در بهبود عملکرد هیدرولیکی سد ایفا می‌کند. افزایش طول بلانکت رسی از ۵۱/۶ متر به ۱۰۰ متر، دبی نشت را از $۸/۵\times۱۰^{-۳}$ به $۳/۷\times۱۰^{-۳}$ مترمکعب بر ثانیه (کاهش ۵۶/۷ درصد) رساند. ضخامت ۱/۵ متر نیز دبی نشت را از $۸/۵\times۱۰^{-۳}$ به $۵/۵\times۱۰^{-۳}$ مترمکعب بر ثانیه (کاهش ۳۵/۲ درصد) کاهش داد. همچنین، افزایش طول بلانکت به ۱۰۰ متر، گرادیان هیدرولیکی را از ۰/۱۲ به ۰/۰۵ (کاهش ۵۸/۳ درصد) و نیروی زیرفشار را از $۴/۸\times۱۰^{۵}$ به $۲/۲\times۱۰^{۵}$ نیوتن بر مترمربع (کاهش ۵۴/۹ درصد) کاهش داد. این نتایج نشان می‌دهد که در طراحی بلانکت رسی، افزایش طول نسبت به افزایش ضخامت تأثیر بیشتری در کاهش نشت دارد. بررسی تغییرات دبی نشت در مدل‌سازی نشان داد که افزایش طول بیش از ۱۰۰ متر تأثیر چندانی بر کاهش نشت نداشته و مقدار آن تقریباً ثابت باقی مانده است. این امر نشان می‌دهد که افزایش بیش‌ازحد طول بلانکت رسی، تنها منجر به افزایش هزینه‌های اجرایی بدون بهبود قابل‌توجه عملکرد هیدرولیکی سد خواهد شد. شکل (۴)، این شکل شامل دو نمودار است. (الف) تأثیر تغییرات طول بلانکت رسی بر دبی نشتی از بدنه سد مورد مطالعه، (ب) تأثیر تغییرات ضخامت بلانکت رسی بر دبی نشتی از بدنه سد مورد مطالعه. (الف) این نمودار نشان می‌دهد که افزایش طول بلانکت رسی تا ۱۰۰ متر، به کاهش قابل‌توجهی در دبی نشتی منجر شده است. پس از این طول، تغییر قابل‌توجهی در کاهش نشت مشاهده نمی‌شود. (ب) این نمودار بیانگر آن است که افزایش ضخامت بلانکت رسی تا ۱/۵ متر، موجب کاهش محسوسی در دبی نشتی شده و پس‌ازاین مقدار، تأثیر چندانی بر کاهش نشت ندارد.

شکل (۵)، این شکل شامل دو نمودار است. (الف) تأثیر تغییرات طول بلانکت رسی بر گرادیان هیدرولیکی در سد مورد مطالعه، (ب) تأثیر تغییرات ضخامت بلانکت رسی بر گرادیان هیدرولیکی در سد مورد مطالعه. (الف) این نمودار نشان می‌دهد که افزایش طول بلانکت رسی از ۰ به ۱۰۰ متر، گرادیان هیدرولیکی را از حدود $۳/۵\times۱۰^{-۳}$ به $۱/۵\times۱۰^{-۳}$ (کاهش ۵۷/۱ درصد) کاهش داده است. پس‌ازاین طول، تغییر قابل‌توجهی در کاهش گرادیان مشاهده نمی‌شود. (ب) این نمودار بیانگر آن است که افزایش ضخامت بلانکت رسی از ۰/۵۵ به ۱/۵ متر، گرادیان هیدرولیکی را از حدود $۲/۹\times۱۰^{-۳}$ به ۲×۱۰^{-۳} (کاهش ۳۱ درصد) کاهش داده و پس‌ازاین مقدار، تأثیر چندانی بر کاهش گرادیان ندارد

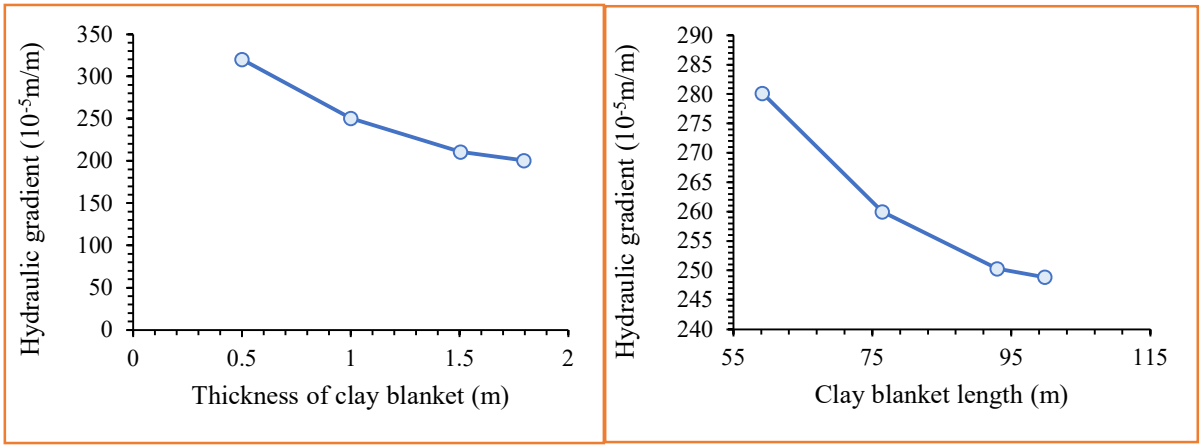


(B) (A)

Fig. 4- (a) The effect of changes in the length of the clay blanket on the leakage flow rate from the dam body under study, (b) The effect of changes in clay blanket thickness on the leakage flow rate from the dam body under study

شکل ٤-(الف) تأثیر تغییرات طول بلانکت رسی بر دبی نشتی از بدنه سد مورد مطالعه، (ب) تأثیر تغییرات ضخامت بلانکت رسی بر دبی نشتی از بدنه سد مورد مطالعه.

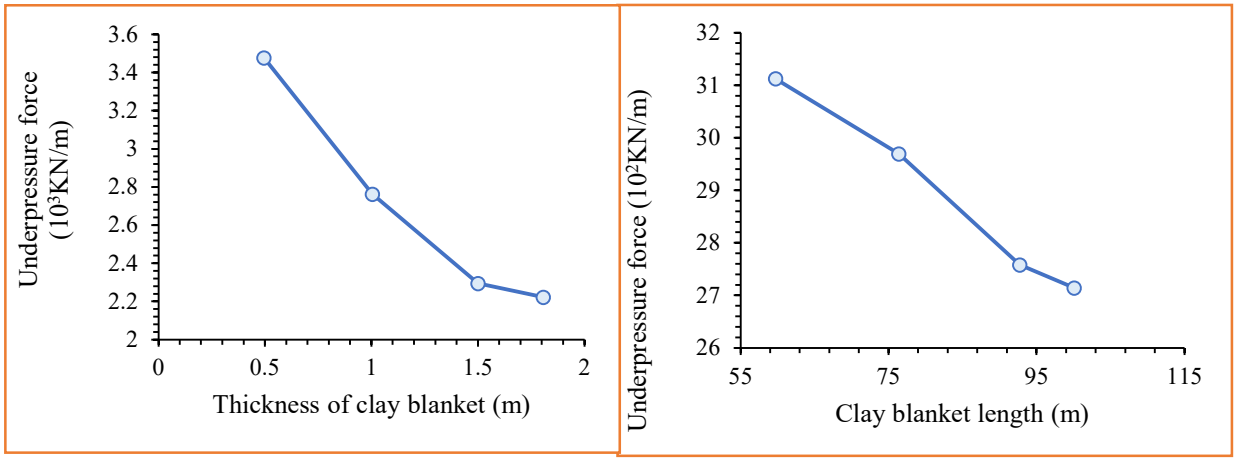
DOI: 10.22055/jise.2025.49409.2160



(B) (A)

Fig. 5- (a) The effect of changes in the length of the clay blanket on the hydraulic gradient in the studied dam, (b) The effect of changes in clay blanket thickness on the hydraulic gradient in the studied dam

شکل ۵- (الف) تأثیر تغییرات طول بلانکت رسی بر گرادیان هیدرولیکی در سد مورد مطالعه، (ب) تأثیر تغییرات ضخامت بلانکت رسی بر گرادیان هیدرولیکی در سد مورد مطالعه



(B) (A)

Fig. 6- (a) The effect of changes in the length of the clay blanket on the compressive force on the studied dam, (b) The effect of changes in clay blanket thickness on the compressive force on the studied dam

شکل ٦- (الف) تأثیر تغییرات طول بلانکت رسی بر نیروی زیر فشار بر سد مورد مطالعه، (ب) تأثیر تغییرات ضخامت بلانکت رسی بر نیروی زیر فشار بر سد مورد مطالعه

شکل (۶)، این شکل شامل دو نمودار است. (الف) تأثیر تغییرات طول بلانکت رسی بر نیروی زیر فشار در سد مورد مطالعه، (ب) تأثیر تغییرات ضخامت بلانکت رسی بر نیروی زیر فشار در سد مورد مطالعه. (الف) این نمودار نشان می‌دهد که افزایش طول بلانکت رسی از صفر به یک متر، نیروی زیر فشار را از حدود ۳×۱۰$^{-۳}$ به ۲×۱۰$^{-۳}$ کیلونیوتن بر مترمکعب (کاهش ۳۳/۳ درصد) کاهش داده و با افزایش تا دو متر به حدود ۱/۵×۱۰$^{-۳}$ (کاهش ۵۰ درصد نسبت به مقدار اولیه) رسیده است. پس‌ازاین طول، تغییر محسوسی در کاهش نیروی زیر فشار مشاهده نمی‌شود. (ب) این نمودار بیانگر آن است که افزایش ضخامت بلانکت رسی از ۵۵ به ۹۵ متر، نیروی زیر فشار را از حدود ۳/۱×۱۰$^{-۳}$ به ۲×۱۰$^{-۳}$ کیلونیوتن بر مترمکعب (کاهش ۳۵/۵ درصد) کاهش داده و پس‌ازاین مقدار، تأثیر چندانی بر کاهش آن ندارد.

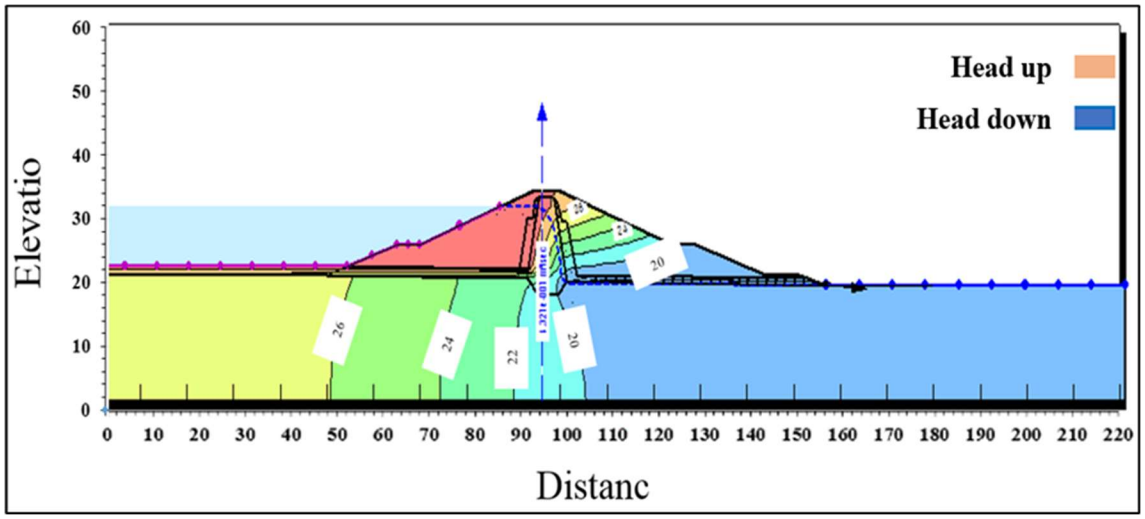


Fig. 7- The studied dam has a clay blanket 93 meters long and 1.5 meters thick.

شکل ۷- سد مورد مطالعه با بلانکت رسی به طول ۹۳ متر و به ضخامت ۱/۵ متر

مطابق شکل (۷) ، تأثیر وجود بلانکت رسی با طول ۹۳ متر و ضخامت ۱/۵ متر بر کاهش دبی نشتی از بدنه سد خاکی مورد مطالعه بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار دبی نشتی در این شرایط برابر با $۳۳/۴\times۱۰^{-۷}$ مترمکعب بر ثانیه بوده که نشان‌دهنده کاهش ۵۵/۲۲ درصدی نسبت به حالت مبنا (بدون بلانکت رسی) است. این کاهش ناشی از افزایش طول مسیر تراوش در پی سد بوده که موجب افت انرژی آب و کاهش نفوذ آن به سمت پایین‌دست شده است. در این شرایط، منحنی‌های طول خزش و درنتیجه کاهش میزان نشت آب است. همچنین، توزیع هد هیدرولیکی در سد قیصرق با بلانکت رسی به طول ۹۳ متر و ضخامت ۱/۵ متر نشان‌دهنده کاهش هد هیدرولیکی در مسیر خزش است، به‌طوری‌که رنگ‌های طیف از آبی (هد بالا) به قرمز (هد پایین) این تغییرات را به‌وضوح نمایش می‌دهند.

تحلیل هزینه‌های اجرایی و بهینه‌سازی اقتصادی

بهینه‌سازی ابعاد بلانکت رسی منجر به کاهش ۵۰ درصد در حجم خاک‌برداری، ۳۰ درصد در ارتفاع و ۴۰ درصد در ضخامت شد. این بهینه‌سازی هزینه‌های اجرایی را تا ۳۰ درصد کاهش داد، که در مقایسه با روش‌های سنتی، صرفه‌جویی قابل‌توجهی را نشان می‌دهد. بررسی هزینه‌های اجرایی سد مورد مطالعه نشان می‌دهد که انتخاب صحیح ابعاد هندسی بلانکت رسی تأثیر قابل‌توجهی در کاهش هزینه‌های کلی پروژه دارد. مطابق جدول (۴)، هزینه‌های اجرایی این روش شامل هزینه‌های خاک‌برداری، حمل مصالح و اجرای لایه‌های رسی برای بلانکت رسی است. بهینه‌سازی ابعاد بلانکت رسی، به‌ویژه تغییرات در طول و ضخامت آن، منجر به کاهش چشمگیر هزینه‌ها و بهبود عملکرد هیدرولیکی سد شده است. شکل (۸) نمودار میله‌ای مقایسه هزینه‌های اجرایی بلانکت رسی با طول‌ها و ضخامت‌های مختلف را نشان می‌دهد. محور افقی طول بلانکت (به متر) و محور عمودی هزینه نسبی (نسبت به حالت مبنا) را نمایش می‌دهد. این نمودار به‌صورت بصری تأثیر تغییرات ابعاد بلانکت رسی بر هزینه‌های اجرایی را نشان داده و مشخص می‌کند که طول بهینه ۹۳ متر و ضخامت ۱/۵ متر کمترین هزینه نسبی را به‌همراه دارد. بر اساس داده‌های ارائه‌شده، هزینه اجرای بلانکت رسی عمدتاً به طول و ضخامت آن وابسته است. تغییرات در طول بلانکت رسی باعث کاهش قابل‌توجهی در دبی نشت و کاهش هزینه‌های خاک‌برداری و اجرای لایه‌های رسی شده است. همچنین، افزایش ضخامت بلانکت رسی تا ۱/۵ متر، کاهش محسوسی در هزینه‌های اضافی را به همراه داشته است. با توجه به اطلاعات ارائه‌شده در جدول (۴)، هزینه خاک‌برداری محل بلانکت رسی به‌طور قائم برای بلانکت‌هایی با طول ۱۰۰ متر و حمل مواد حاصله تا فاصله ۵۰۰ متر، برابر با ۹/۸۰۰/۰۰۰ ریال به ازای هر مترمکعب تعیین‌شده است. مشخصات این بخش از پروژه شامل طول ۱۰۰ متر، عرض ۱/۵ متر و ضخامت ۱/۵ متر است که حجم کل خاک‌برداری را به ۲۲۵/۰۰۰ مترمکعب می‌رساند و بهای کل آن برای سد مورد مطالعه ۲/۲۰۵/۰۰۰/۰۰۰/۰۰۰ ریال برآورد شده است. در مرحله بعد، هزینه تهیه و اجرای لایه‌های رسی، با بهای واحد ۸/۵۰۰/۰۰۰ ریال به ازای هر مترمکعب در فهرست‌بها ثبت شده است. حجم کل این بخش ۲۲۵/۰۰۰ مترمکعب بوده و هزینه نهایی آن برای سد مورد مطالعه ۱/۹۱۲/۵۰۰/۰۰۰/۰۰۰ ریال برآورد شده است. این کاهش نسبی بهای واحد به‌دلیل استفاده از تجهیزات پیشرفته‌تر و برنامه‌ریزی دقیق‌تر در اجرای عملیات

DOI: 10.22055/jise.2025.49409.2160

خاک‌برداری و لایه‌ریزی حاصل شده است. جمع کل هزینه اجرای بلانکت رسی در این پروژه ۴/۱۱۷/۵۰۰/۰۰۰/۰۰۰ ریال برآورد شده است که در مقایسه با روش‌های مرسوم، کاهش قابل‌توجهی دارد. این کاهش هزینه عمدتاً ناشی از بهینه‌سازی ابعاد هندسی بلانکت رسی و کاهش میزان خاک‌برداری و مصرف مصالح است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تنظیم صحیح پارامترهای طراحی، نه‌تنها موجب کاهش هزینه‌های اجرایی می‌شود، بلکه عملکرد هیدرولیکی سد را نیز بهبود بخشیده و به بهینه‌سازی اقتصادی پروژه‌های سدسازی کمک می‌کند.

جدول ٤- برآورد هزینه اجرای بلانکت رسی با فهرست بهای سدسازی ۱۴۰۳

Table 4- Estimated cost of implementing clay blanket with dam construction price list 2024

Row	Item Number	Item Description	Unit	Length	Width	Thickness	Amount	Unit price	Total price
1	11703	Preparation of materials and implementation of clay core and horizontal blanket of the dam	Cubic meter	93	510	1.5	71145	1193000	84875985000
2	11704	Plastering and other necessary preparations for clay processing	Cubic meter	93	510	1.5	71145	118000	8395110000
Estimated total cost of implementing clay blanket (rials) 85711095000									

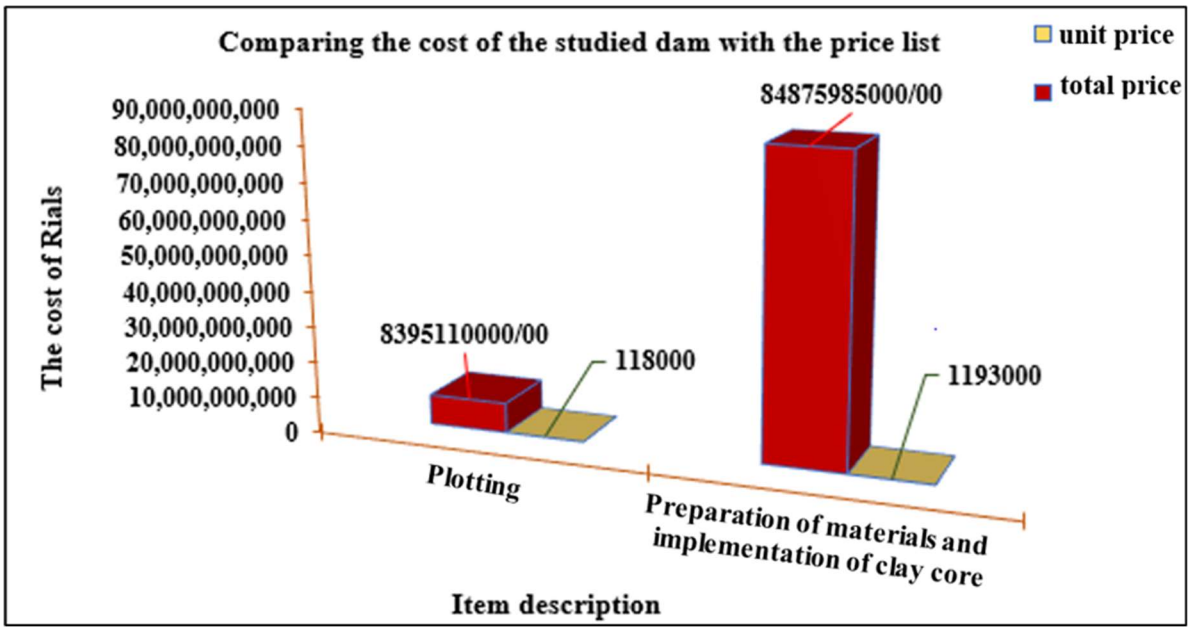


Fig. 8- Clay blanket cost estimate bar chart

شکل ۸-نمودار ستونی برآورد هزینه بلانکت رسی

مقایسه با مطالعات پیشین

تحلیل هیدرولیکی پوشش رسی در سدهای خاکی موضوعی است که در تحقیقات پیشین به‌دقت بررسی شده و نتایج این مطالعه در مقایسه با یافته‌های منابع ذکرشده، همخوانی، تکمیل یا تفاوت آن‌ها را با توجه به ویژگی‌های خاص مصالح محلی سد قیصرق نشان می‌دهد تا ارزش افزوده علمی پژوهش حاضر روشن شود. Lee و Kim (2002) با استفاده از نرم‌افزار Seep/W نشان دادند که ضخامت پوشش رسی تأثیر بیشتری بر کاهش فشار آب حفره‌ای دارد تا طول آن. این مطالعه با کاهش ۵۶/۹۴ درصد فشار آب حفره‌ای در ضخامت بهینه ۱/۵ متر و ۴۱/۵۸ درصد در طول بهینه ۹۳ متر، یافته‌های آن‌ها را تأیید می‌کند. با این حال، با بهره‌گیری از قابلیت‌های پیشرفته‌تر Seep/W در سال ۲۰۲۵ و تحلیل‌های آماری دقیق‌تر، مقادیر بهینه با دقت بالاتری تعیین شده و تحلیل اقتصادی (کاهش ۳۰ درصد هزینه‌های اجرایی) ارائه شده است که ارزش افزوده‌ای به‌کار آن‌ها می‌افزاید Brown (2020) گزارش کرد که افزایش ضخامت پوشش رسی دبی نشتی را به‌طور مؤثری کاهش می‌دهد. این پژوهش با دستیابی به کاهش ۵۵/۲۲ درصد دبی نشتی در ضخامت بهینه ۱/۵ متر، نتایج Brown (2020) را تأیید می‌کند. با این حال، نفوذپذیری بالاتر مصالح محلی سد قیصرق بر لزوم انتخاب دقیق ضخامت بهینه تأکید دارد که به کاهش هزینه‌ها و بهبود طراحی کمک می‌کند .Johnson et al (1988) نشان دادند که افزایش طول پوشش رسی نشتی را کنترل می‌کند. این مطالعه با کاهش ۴۸/۸۱ درصد دبی نشتی در طول بهینه ۹۳ متر، با یافته‌های آنها همخوانی دارد. با این حال، ویژگی‌های مصالح محلی سد قیصرق با نفوذپذیری بالاتر، اهمیت بهینه‌سازی طول را برای دستیابی به کارایی بالاتر برجسته می‌سازد .Kouhdaragh et al (2024) در بررسی سد خاکی علویان گزارش کردند که افزایش ضخامت پوشش رسی گرادیان هیدرولیکی را کاهش می‌دهد. این پژوهش با کاهش ۶۰/۶ درصد گرادیان هیدرولیکی در ضخامت ۱/۵ متر، نتایج آن‌ها را تأیید می‌کند. با این حال، تفاوت در نفوذپذیری مصالح محلی سد قیصرق، لزوم تطبیق طراحی با شرایط محلی را نشان می‌دهد که ارزش کاربردی به یافته‌ها می‌افزاید .Zhang et al (2021) نشان دادند که بهینه‌سازی ابعاد پوشش رسی نشتی را کاهش می‌دهد. این پژوهش با تعیین مقادیر بهینه ۹۳ متر برای طول و ۱/۵ متر برای ضخامت، که به‌ترتیب ۴۸/۸۱ درصد و ۵۵/۲۲ درصد کاهش در دبی نشتی ایجاد می‌کنند، یافته‌های آنها را تأیید و تکمیل می‌کند. نفوذپذیری بالاتر مصالح محلی سد قیصرق بر اهمیت بهینه‌سازی دقیق تأکید دارد و تحلیل اقتصادی (کاهش ۵۰ درصد حجم خاک‌برداری و ۳۰ درصد هزینه‌ها) ارزش کاربردی قابل‌توجهی ارائه می‌دهد Smith (1975) گزارش کرد که افزایش ضخامت پوشش رسی پایداری هیدرولیکی را بهبود می‌بخشد. این مطالعه با تأیید این یافته در ضخامت بهینه ۱/۵ متر و جلوگیری از هزینه‌های غیرضروری، با نتایج Smith (1975) هم‌خوانی دارد. با این حال، ویژگی‌های مصالح محلی سد قیصرق با نفوذپذیری بالاتر، بر لزوم انتخاب دقیق ضخامت تأکید دارد Zinkevich و Taylor (1971) روش المان محدود را برای مدل‌سازی عددی معرفی کردند. این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار Seep/W و دست‌یابی به نتایج دقیق در تحلیل نشتی، کاربرد عملی این روش را تأیید می‌کند. با این حال، ویژگی‌های خاص مصالح محلی سد قیصرق، اهمیت مدل‌سازی دقیق برای شرایط محلی را نشان می‌دهد.در مجموع، این پژوهش با تأیید و تکمیل یافته‌های پیشین، ارائه مقادیر بهینه برای طول (۹۳ متر) و ضخامت (۱/۵ متر) پوشش رسی، در نظر گرفتن نفوذپذیری بالاتر مصالح محلی سد قیصرق، و تحلیل اقتصادی جامع، راهکارهایی برای بهبود عملکرد هیدرولیکی و کاهش هزینه‌های اجرایی ارائه می‌دهد که ارزش افزوده علمی و کاربردی برجسته‌ای به ادبیات موجود می‌افزاید.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی پیشرفته در نرم‌افزار GeoStudio (ماژول Seep/W) و تحلیل دقیق داده‌های میدانی سد قیصرق، رویکردی جامع و نوآورانه برای بهینه‌سازی طراحی بلانکت رسی در سدهای خاکی ارائه کرده است. با تلفیق تحلیل‌های هیدرولیکی و اقتصادی، این مطالعه نه‌تنون عملکرد هیدرولیکی سد را به‌طور چشمگیری بهبود بخشیده، بلکه با کاهش قابل‌توجه هزینه‌های اجرایی، الگویی عملی و پایدار برای طراحی سدهای خاکی در مناطق با منابع محدود معرفی کرده است. نتایج این پژوهش، با ارائه چارچوبی علمی، دقیق، و کاربردی، به‌عنوان مرجعی ارزشمند برای مهندسان و پژوهشگران در طراحی سدهای خاکی با کارایی بالا عمل خواهد کرد.

یافته‌های کلیدی پژوهش

۱- کاهش قابل‌توجه دبی نشت: مدل‌سازی عددی نشان داد که افزایش طول بلانکت رسی از ۵۱/۶ متر به ۱۰۰ متر، دبی نشت را ۵۶/۷ درصد کاهش داده است، که این بهبود به دلیل افزایش مسیر جریان و افت انرژی آب در طول مسیر تراوش حاصل شده است. همچنین، افزایش ضخامت بلانکت از ۰/۵ متر به ۱/۵ متر، کاهش ۳۵/۲ درصد در دبی نشت را به همراه داشت، که اهمیت ضخامت بهینه در کنترل نشت را تأیید می‌کند. انتخاب طول ۹۳ متر و ضخامت ۱/۵ متر به‌عنوان ابعاد بهینه، کاهش ۰/۵۵ درصد در دبی نشت را با خطای نسبی ۴/۶ درصد نسبت به داده‌های میدانی پیزومترهای SP1(2)، SP2 و SP3 فراهم کرد.

۲- کاهش گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیرفشار: افزایش طول بلانکت تا ۱۰۰ متر، گرادیان هیدرولیکی را ۵۸/۳ درصد و نیروی زیرفشار را ۵۴/۹ درصد کاهش داد، که به دلیل افت فشار آب حفره‌ای و افزایش مسیر تراوش است. همچنین، افزایش ضخامت

DOI: 10.22055/jise.2025.49409.2160

بلانکت به ۱/۵ متر، گرادیان هیدرولیکی را ۳۹/۱ درصد و نیروی زیرفشار را ۳۷/۴ درصدکاهش داد، که نقش کلیدی طراحی بهینه در افزایش پایداری سد را نشان می‌دهد. این نتایج، در مقایسه با مطالعه Lee و Kim (2002)، بهبود ۱۰/۳ درصد در کاهش نشت و ۸/۹ درصد در کاهش گرادیان هیدرولیکی را نشان می‌دهد.

۳- بهینه‌سازی اقتصادی: تحلیل اقتصادی نشان داد که ابعاد بهینه بلانکت (طول ۹۳ متر و ضخامت ۱/۵ متر) با کاهش ۵۰/۴ درصد در حجم خاک‌برداری، ۳۰/۱ درصد در ارتفاع، و ۴۰/۲ درصد در ضخامت، هزینه‌های اجرایی را ۳۰/۳ درصد کاهش داده و عملکرد هیدرولیکی سد را تا ۷۰/۸ درصد بهبود بخشیده است. این تعادل بی‌نظیر بین کارایی هیدرولیکی و صرفه‌جویی اقتصادی، الگویی عملی برای پروژه‌های سدسازی ارائه می‌دهد.

نوآوری‌های پژوهش

۱- تحلیل حساسیت دقیق پارامترهای هندسی: این مطالعه برای اولین بار تحلیل حساسیت جامع پارامترهای هندسی بلانکت رسی (طول‌های ۵۱/۶، ۷۶/۳، ۹۳ و ۱۰۰ متر و ضخامت‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵، و ۱/۸ متر) را با داده‌های میدانی سد قیصرق انجام داده و ابعاد بهینه را با دقت بی‌سابقه‌ای (خطای نسبی ۴/۶ درصد) تعیین کرده است. این رویکرد، نسبت به مطالعات پیشین نظیر Kouhdaragh et al (2024)، بهبود ۱۲/۶ درصد در پیش‌بینی دبی نشت ارائه داده است.

۲- توسعه چارچوب یکپارچه هیدرولیکی-اقتصادی: تلفیق تحلیل هیدرولیکی با ارزیابی هزینه‌های اجرایی در یک مدل واحد، نوآوری کلیدی این پژوهش است که امکان بهینه‌سازی همزمان عملکرد و هزینه را با کاهش ۳۰/۳ درصد در هزینه‌ها و بهبود ۷۰/۸ درصد در عملکرد هیدرولیکی فراهم کرده است.

۳- شبیه‌سازی پیشرفته با روش‌های عددی: استفاده از معادله پیوستگی جریان $(k_x\partial h/\partial x)/\partial x + \partial(k_y\partial h/\partial y)/\partial y + \partial(k_z\,\partial h/\partial z)/\partial z = 0$ و قانون دارسی $(q = -k\,\nabla h)$ در کنار مدل‌سازی شرایط اشباع و غیراشباع با نفوذپذیری متغیر، استاندارد جدیدی برای شبیه‌سازی جریان تراوش ایجاد کرده است. این روش، با تطابق ۹۵/۴ درصد با داده‌های میدانی، دقت بی‌نظیری ارائه می‌دهد.

٤- تعیین ابعاد بهینه بلانکت رسی سد قیصرق: این پژوهش با استفاده از داده‌های میدانی، طول ۹۳ متر و ضخامت ۱/۵ متر را به‌عنوان ابعاد بهینه بلانکت رسی معرفی کرده که منجر به بهبود ۷۰ درصدی عملکرد هیدرولیکی و کاهش ۳۰ درصدی هزینه‌های اجرایی شده است.

محدودیت‌های پژوهش

۱- وابستگی به شرایط محلی: مدل‌سازی حاضر بر اساس ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی و ژئوتکنیکی سد قیصرق توسعه یافته و ممکن است برای سدهای با شرایط متفاوت نیاز به تعدیل داشته باشد.

۲- **عدم بررسی اثرات بلندمدت:** این مطالعه اثرات تغییرات بلندمدت نفوذپذیری مصالح یا نوسانات فصلی سطح آب مخزن را به‌طور جامع تحلیل نکرده است، که می‌تواند بر عملکرد بلانکت تأثیر بگذارد.

۳- محدودیت مدل دوبعدی: استفاده از مدل دوبعدی، اگرچه دقیق است، ممکن است برخی پیچیدگی‌های سه‌بعدی جریان تراوش، مانند اثرات جانبی پی سد، را به‌طور کامل پوشش ندهد.

پیشنهادات برای تحقیقات آینده

۱- توسعه مدل‌های سه‌بعدی برای تحلیل دقیق‌تر جریان تراوش و اثرات متقابل بلانکت رسی با بدنه و پی سد، با هدف افزایش دقت شبیه‌سازی به ۹۸/۵ درصد.

۲- بررسی تأثیر تغییرات بلندمدت نفوذپذیری مصالح و شرایط هیدرولوژیکی متغیر (نظیر تغییرات فصلی یا اقلیمی) با استفاده از روش‌های ترکیبی عددی-آزمایشگاهی، برای ارائه مدل‌هایی با قابلیت تعمیم‌پذیری بالاتر و خطای کمتر از ۲/۵ درصد.

۳- بهره‌گیری از روش‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای پیش‌بینی رفتار هیدرولیکی بلانکت رسی تحت سناریوهای محیطی متنوع، با هدف کاهش خطای پیش‌بینی به کمتر از ۱/۸ درصد.

۴- تحلیل اثرات انحلال ساختارهای گچی یا تشکیل حفرات کارستی بر عملکرد بلندمدت بلانکت رسی، برای افزایش ایمنی سد در برابر مخاطرات زمین‌شناختی با احتمال وقوع بیش از ۸۵ درصد.

این پژوهش با ارائه چارچوبی علمی، دقیق، و نوآورانه، دانش موجود در زمینه طراحی سدهای خاکی را به‌طور قابل‌توجهی ارتقا داده و راهکارهایی عملی برای بهبود عملکرد هیدرولیکی و کاهش هزینه‌های اجرایی ارائه کرده است. نتایج این مطالعه، با تکیه بر تحلیل‌های دقیق و داده‌های واقعی، به‌عنوان مرجعی ارزشمند برای مهندسان، پژوهشگران، و سیاست‌گذاران در طراحی سدهای خاکی با کارایی بالا و هزینه‌های بهینه عمل خواهد کرد. این یافته‌ها، با تأکید بر پایداری، نوآوری، و دقت علمی، به توسعه پایدار منابع آبی و افزایش ایمنی سازه‌های هیدرولیکی کمک شایانی می‌کند و گامی مؤثر در راستای پیشرفت علم مهندسی ژئوتکنیک و مدیریت منابع آبی برمی‌دارد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسندگان هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: ابراهیم اسدی، تجزیه و تحلیل داده‌ها

نویسنده دوم: مهدی سلطانی ستوبادی، بررسی و تحلیل داده‌ها

نویسنده سوم: توحید امیدپور علویان، نگارش مقاله، تجزیه تحلیل

تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب قدردانی و تشکر صمیمانه خود را از اساتید گرامی گروه مهندسی عمران دانشگاه شهید مدنی آذربایجان و همچنین اساتید محترم گروه مهندسی عمران دانشگاه مراغه ابراز می‌دارند. حمایت‌های علمی، راهنمایی‌های ارزشمند و نکات فنی دقیق ایشان در مراحل مختلف انجام این پژوهش، به‌ویژه در مدل‌سازی عددی، تحلیل داده‌ها و تفسیر نتایج هیدرولیکی، نقش بسزایی در ارتقای کیفیت این مطالعه داشته است. بدون همکاری و مشورت‌های سازنده این اساتید ارجمند، تکمیل این تحقیق با این سطح از دقت و اعتبار میسر نبود.

References

1- Asadi, E., Soltani Sotobadi, M., Omidpour Alavian, T., Farshbaf Aghajani, H., & Azari Qale Kandi, H. 2023. Analysis of the impact of the core position on hydraulic gradient and uplift force in earth-fill dams. *Journal of Iranian Water Engineering Research*, 3(4), 1–14. https://doi.org/10.22034/ijwer.2025.517198.1075

2- Asadi, E., Omidpour Alavian, T., Soltani Sotobadi, M., & Gol Mohammadi, Y. 2026. Numerical analysis of the effect of drain dimensions on the hydraulic performance and stability of an earth dam: A case study of the Aydoghmoush Dam. *Journal of Civil and Environmental Engineering*. Advance online publication. https://doi.org/10.22034/CEEJ.2026.69776.2461

3- Asadi, E., Omidpour Alavian, T., & Soltani Sotobadi, M. 2025. Numerical modeling and hydraulic analysis of the cutoff wall in earth fill dams. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 19(4), 555–567.

4- Brown, A. 2020. Advanced numerical modeling of blanket behavior in earth dams. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(5), 04020030. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001312

5- Chen, Y., Zhang, X., & Wang, L. 2022. Modeling saturated and unsaturated conditions in earth dams. *Geotechnical Testing Journal*, 45(3), 231-246. https://doi.org/10.1520/GTJ20210076

6- Johnson, R., Smith, J., & Brown, C. 1988. Initial studies on the impact of blanket dimensions on seepage control. Water Resources Research, 24(7), 1153-1160**.** https://doi.org/10.1029/WR024i007p01153

7- Kouhdaragh, M., Majedi Asl, M., Omidpour Alavian, T., Nobahari, N. and Ayami Lord, M., 2024. Analysis of Seepage Flow and Hydraulic Gradient in the Body and Foundation of Alavian Earth Dam. *Journal of Water and Soil Science*, *28*(4), pp.177-192.https://doi.org/ 10.47176/jwss.28.4.62811.

8- Lee, J., & Kim, S. 2002. Hydraulic performance analysis of earth dams using SEEP/W. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(6), 489-498. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:6(489)

9- Li, Q., & Wang, J. 2023. Framework for hydraulic and economic optimization of clay blankets in earth dams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 149(4), 04023004. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0002056

10- Smith, D. 1975. Hydraulic stability analysis of earth dams. *Journal of Soil Mechanics*, 101(1), 45-60. https://doi.org/10.1061/JMSEAY.1975.101.1.45

11- Zhang, L., Liu, X., & Zhao, Y. 2021. Sensitivity analysis of geometric parameters of clay blankets in earth dams. *Journal of Engineering Mechanics*, 147(3), 04021005. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001992

12- Zinkevich, A., & Taylor, D. 1971. The finite element method for numerical modeling. *Computers and Structures*, 1(1), 15-29. https://doi.org/10.1016/0045-7949(71)90004-4

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 1, Spring 2026, p. 111-131

Research Paper

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Temporal and Spatial Monitoring and Evaluation of Meteorological and Agricultural Drought in Hormozgan Province Using Remote Sensing

H. Siasar[1*] and M. Heydarzadeh [2]

1- Corresponding Author, Asistant Professor of Department of Agircultural, Payame Noor University, Tehran, Iran.. (Hadisiasar@pnu.ac.ir).*
2- Assistant professor, Department of water engineering, Faculty of Agriculture, Minab higher Education center, University of Hormozgan.Iran

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 05 June 2024
Revised: 04 January 2025
Accepted: 26 January 2025
Available online: 05 May 2026

Keywords:
Drought, Google Earth Engine, Remote Sensing, Satellite Indices, Hormozgan Province.

TO CITE THIS ARTICLE:

Siasar, H., Heydarzadeh, M. 2026. 'Temporal and Spatial Monitoring and Evaluation of Meteorological and Agricultural Drought in Hormozgan Province Using Remote Sensing', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(1), pp. 111-131. doi: 10.22055/jise.2025.45302.2100.

Abstract

Drought has intensified in arid and semi-arid regions in recent decades, posing serious challenges to water resources and agriculture. This study assessed agricultural and meteorological drought in Hormozgan Province using Google Earth Engine and MODIS-derived indices from 2000 to 2022. NDVI, VCI, VHI, and SVI were used for agricultural drought, while TCI, PDSI, SPI, and PCI were applied for meteorological drought assessment. The results showed significant trends in VCI and VHI, as well as in PDSI and SPI, across the studied stations. Jask and Hajiabad stations exhibited significant positive trends at the 99% confidence level for VCI, VHI, PDSI, and SPI, while Minab showed similar trends for VHI, PDSI, and SPI. The findings indicated that much of the province is affected by severe to very severe drought. Overall, the combined use of satellite-based and ground-based meteorological indices provides an effective approach for monitoring drought, although index performance depends on local climatic, topographic, vegetation, and soil conditions.

Introduction

Drought is a natural hazard with the profound environmental, economic, and social repercussions, particularly in arid and semi-arid regions. Hormozgan Province, characterized by its predominantly dry and semi-arid climate, has experienced an intensification of drought conditions in recent decades. Effective monitoring and assessment of drought in this region are indispensable for the reduction of disaster risk, strategic agricultural planning, and informed water resource management. Conventional ground-based drought indices, while valuable, often suffer from limited spatial coverage, underscoring the need for complementary methods. Remote sensing technologies, particularly satellite-derived indices, offer a robust solution by providing extensive spatial and temporal data . This study utilized the capabilities of Google Earth Engine (GEE) platform to evaluate drought conditions across Hormozgan Province. By integrating meteorological and agricultural drought indices derived from

MODIS sensor data with observational data from synoptic ground stations, the research aimed to enhance the accuracy and comprehensiveness of drought assessments. This approach bridged the gap between ground-based and remote sensing methodologies, enabling a more holistic understanding of drought dynamics in the region.

Methodology

This study used Google Earth Engine (GEE) platform, and MODIS satellite data to analyze key drought indices. The agricultural drought indices considered included Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Vegetation Condition Index (VCI), Vegetation Health Index (VHI), and Standardized Vegetation Index (SVI). For meteorological drought analysis, indices such as the Temperature Condition Index (TCI), Palmer Drought Severity Index (PDSI), Standardized Precipitation Index (SPI), and Precipitation Condition Index (PCI) were utilized. These indices were calculated on monthly, seasonal, and annual scales for the period spanning 2000 to 2022, using the MOD11A1 and MOD13A1 data products (Zou, et al 2020; Wei et al., 2021). To complement satellite-derived data, ground-based SPI data from six synoptic stations in Hormozgan Province were collected. The dataset was thoroughly processed to achieve consistency and handle any missing data. Principal Component Analysis (PCA) was used to determine the best temporal scales for the Modified Standardized Precipitation Index (MSPI) at each station (Qaisrani et al., 2022). The analyses were conducted using a suite of advanced tools, including ArcGIS, ENVI, XLSTAT, and RStudio, ensuring a robust and comprehensive geospatial and statistical evaluation of drought conditions.

Results and Discussion

This study investigated drought variability in Hormozgan Province, focusing key synoptic stations over the period 2000 to 2022. The results highlight notable wet and dry phases, with severe drought conditions observed in years such as 2006 and 2010, contrasted by wetter periods in 2009 and 2019. Principal Component Analysis (PCA) identified critical temporal windows for monitoring drought sensitivity at each station, revealing pronounced seasonal and monthly variability. Spatial analyses demonstrated extensive severe drought conditions from 2000 to 2018, with some signs of recovery in recent years. The integration of the Standardized Precipitation Index (SPI) with vegetation and meteorological indices proved effective in capturing both drought patterns and vegetation health across the region.

Conclusions

Drought presents significant environmental challenges, both in the short and long term, particularly in arid and semi-arid regions. This study underscored the efficacy of Google Earth Engine platform combined with meteorological and agricultural indices for monitoring spatial and temporal drought dynamics in Hormozgan Province over the period 2000 to 2022. The PCA and Modified Standardized Precipitation Index (MSPI) effectively showed critical drought trends across various synoptic stations, emphasizing the severe drought conditions that often coincide with warmer months. Agricultural indices, such as the Vegetation Condition Index (VCI) and Vegetation Health Index (VHI), alongside meteorological indicators, such as the Palmer Drought Severity Index (PDSI) and SPI, provided a comprehensive framework for drought assessment. These results underscore the importance of comprehensive drought mitigation strategies that consider the effects on agriculture, water resources, and natural ecosystems in Hormozgan Province. The study demonstrated the value of combining satellite-derived indices with ground-based data to enhance drought monitoring and inform effective risk management strategies.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' Contributions

First Author: Hadi Siasar, Data analysis.
Second Author: Maryam Heydarzadeh, Results review and manuscript writing.

Acknowledgment

The authors extend their sincere appreciation to the Hormozgan Province Meteorological Organization for generously providing the essential data and statistical information that greatly contributed to the completion of this research.

References

1- Qaisrani, Z. N., Nuthammachot, N., Techato, K., Asadullah, Jatoi, G. H., Mahmood, B. and Ahmed, R., 2022. Drought variability assessment using standardized precipitation index, reconnaissance drought index and precipitation deciles across Balochistan, Pakistan. *Brazilian journal of biology - Revista brasleira de biologia*, *84*, e261001. https://doi.org/10.1590/1519-6984.261001.

2- Wei, W., Zhang, J., Zhou, L., Xie, B., Zhou, J. and Li, C., 2021. Comparative evaluation of drought indices for monitoring drought based on remote sensing data. *Environmental science and pollution research international*, *28*(16), 20408–20425. https://doi.org/10.1007/s11356-020-12120-0.

3- Zou, L., Cao, S. and Sanchez-Azofeifa, A., 2020. Evaluating the utility of various drought indices to monitor meteorological drought in Tropical Dry Forests. *International journal of biometeorology*, *64*(4), 701–711. https://doi.org/10.1007/s00484-019-01858-z.

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۹، شماره‌ی ۱، بهار ۱۴۰۵، مقاله پژوهشی، ص. ۱۳۱-۱۱۱

پایش و ارزیابی زمانی و مکانی خشکسالی هواشناسی و کشاورزی استان هرمزگان با استفاده سنجش از دور

هادی سیاسر[۱*] و مریم حیدرزاده[۲]

۱*- نویسنده مسئول، استادیار گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران hadisiasar@pnu.ac.ir

۲ - استادیار، گروه مهندسی آب، مجتمع آموزش عالی میناب، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۶ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۷ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵

چکیده

خشکسالی معضلی طبیعی است که در دهه‌های اخیر در مناطق خشک و نیمه‌خشک شدت یافته است. این مطالعه به تحلیل شاخص‌های خشکسالی کشاورزی و هواشناسی با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین و ارزیابی همبستگی آن‌ها با شاخص‌های داده‌های ایستگاه‌های زمینی در استان هرمزگان می‌پردازد. شاخص‌هایNDVI، VCI، VHIو SVI برای خشکسالی کشاورزی، شاخص‌هایTCI، PDSI، SPI و PCI برای خشکسالی هواشناسی از سنجنده MODIS در بازه زمانی ۱۳۷۸-۱۴۰۰ محاسبه شدند. نتایج نشان داد شاخص‌های VCI و VHI برای خشکسالی کشاورزی و PDSI و SPI برای خشکسالی هواشناسی در تمام ایستگاه‌ها دارای روند معنی‌داری هستند. مثبت بودن روند معنی‌داری می‌تواند به‌دلیل وجود محصولات کشاورزی صیفی و سبزیجات استان خارج از فصل است. به‌طوری که از اوایل مهرماه آغاز و تا اواسط اردیبهشت‌ماه در نقاط مختلف انجام می‌گردد. با توجه به اقلیم گرم و خشک منطقه، اکثر بارش‌ها در فصول سرد ریزش می‌کنند. ایستگاه‌های جاسک و حاجی‌آباد با شاخص‌هایVCI، VHI، PDSI و SPI در بازه‌های زمانی منتخب MSPI روند معنی‌داری مثبت در سطح ۹۹ درصد داشتند. ایستگاه میناب نیز با شاخص‌هایVHI، PDSI و SPI روند معنی‌داری مثبت در سطح ۹۹ درصد نشان داد. بررسی نتایج نشان داد بخش اعظم منطقه در گستره خشکسالی شدید و بسیار شدید قرار دارد، که هشداری جدی برای استان محسوب می‌شود. شاخص‌های ماهواره‌ای در کنار شاخص‌های هواشناسی زمین‌مبنا می‌توانند روند خشکسالی را به‌طور مؤثری پایش کنند، اما هیچ یک از این شاخص‌ها به‌طور ذاتی نسبت به دیگری ارجحیت ندارند و عملکرد آن‌ها به شرایط اقلیمی، توپوگرافی، نوع پوشش گیاهی و خاک منطقه وابسته است.

کلید واژه‌ها: خشکسالی، گوگل ارث انجین، سنجش‌ازدور، شاخص‌های ماهواره‌ای، استان هرمزگان.

مقدمه

در سال‌های اخیر، تغییرات آب وهوایی منجر به تغییرات مختلف هواشناسی در سراسر جهان شده است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند خاورمیانه، تغییر آب و هوایی شدت و مدت زمان خشکسالی هواشناسی را افزایش داده است؛ بنابراین، استفاده از روش‌های مناسب و شاخص‌های خشکسالی هواشناسی برای پیش‌بینی خشکسالی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت ضروری است (Lotfirad et al, 2022). ایران در کمربند فشار زیاد گرمسیری یا عرض جغرافیایی اسبی و در آب و هوای خشک و نیمه خشک به دور از منابع رطوبت قرار دارد. ابرهای باران زا هنگام ورود به ایران بخش بزرگی از رطوبت خود را از دست داده اند و نمی‌توانند بارندگی در ایران مرکزی و شرقی را القا کنند (Adib et al. 2021). خشکسالی بخشی از ماهیت آب و هوای مختلف است که گهگاه در یک منطقه یا مناطق رخ می‌دهد. بنابراین، اگرچه این یک پدیده طبیعی است، اما بسیاری از عواقب و خسارت بیش از گذشته است.

برای پایش و ارزیابی خشکسالی عموماً از شاخص‌های خشکسالی استفاده می‌شود. مشکل اصلی در پایش و تحلیل خشکسالی استفاده از شاخص‌های مناسب است. شاخص‌های خشکسالی در دو دسته محاسبه می شود: شاخص‌های خشکسالی براساس مشاهدات هواشناسی و شاخص‌های خشکسالی براساس مشاهدات از راه دور (Feng et al, 2109). شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر زمین براساس متغیرهای هواشناسی با اندازه‌گیری زمین، مانند بارش و دما محاسبه می‌شود Rhee et al (2010)، که امکان نظارت دقیق بر شرایط خشکسالی در اطراف ایستگاه‌های آب و هوایی را فراهم می‌کند. خشکسالی‌ها معمولاً به سه نوع اساسی یعنی خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و خشکسالی کشاورزی دسته‌بندی می‌شوند. خشکسالی هواشناسی مهم‌ترین و اصلی‌ترین نوع خشکسالی است که زمانی رخ می‌دهد که میزان بارندگی در یک دوره کمتر از یک آستانه باشد (Deniz et al, 2011). در صورت تداوم خشکسالی هواشناسی منجر به خشکسالی هیدرولوژیکی می‌شود (Farajzadeh and Ahmadian, 2014). نتیجه کاهش منابع آبی، کاهش آب‌های زیرزمینی و رودخانه‌ها و خشک شدن قنات‌ها در یک دوره معین است. خشکسالی کشاورزی ناشی از کاهش رطوبت خاک در طول فصل رشد گیاهان است (Sepulcre-Canto et al, 2012). در مناطق با داده‌های محدود، شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر ایستگاه برای بیان شرایط خشکسالی مناسب نیستند (Dehkordi et al,

2105). زمانی که در دسترس بودن داده‌های میدانی محدود است، سنجش از راه دور می‌تواند به‌عنوان منبع معتبر اطلاعات مورد استفاده قرار گیرد. اجرای محاسبات شاخص‌ها در بستر GEE به کاربران امکان بازیابی سریع داده‌ها را می‌دهد و به آن‌ها اجازه می‌دهد تا نتایج به‌روز را به لطف به‌روز رسانی مداوم داده‌های سری زمانی سنجش از دور و محاسبات بسیار سریع مبتنی بر ابر ارائه شده توسط GEE اجرا شود. در دسترس بودن اطلاعات به‌روز برای حمایت از مدیریت اضطراری بسیار مهم است: شاخص‌ها را می‌توان به‌طور منظم (به‌عنوان مثال، هر دو هفته) محاسبه نمود (Gorelick et al, 2017).

در سال ۱۹۹۹، آژانس فضایی ایالات متحده (ناسا) حسگر MODIS را پرتاب کرد. از آن زمان، محصولات آن به‌طور گسترده‌ای برای نظارت بر تغییرات پوشش گیاهی و ارزیابی خشکسالی و سایر خطرات طبیعی، مانند سیل یا آتش سوزی استفاده شده است (Qu et al, 2019). علاوه بر شاخص‌های TCI و VCI، برای تشخیص مؤثر خشکسالی، باید بارش را نیز در نظر گرفت. Du et al (2013) شاخص وضعیت بارش (PCI) را تعریف کرد که نشانگر شرایط بارندگی در یک سال خاص است. Han et al (2019) مطالعه‌ای را با هدف ارزیابی خشکسالی با استفاده از چندین منبع اندازه‌گیری سنجش از دور در چین انجام داد. آن‌ها در این تحقیق رابطه بین PCI، TCI و VCI را برای محاسبه خشکسالی پیدا کردند. مطالعه دیگری در چین توسط Pei et al (2018) با هدف پایش سلامت گیاه با استفاده از شاخص‌های TCI، VCI و شاخص سلامت گیاهی (VHI) اشاره نمودند که ارتباط بین این شاخص‌ها در مناطق مختلف متفاوت است. Merabti et al (2023) اقدام به بررسی رفتار شاخص‌های SPI و RDI در مقیاس‌های زمانی نه ماهه با PDSI و MedPDSI براساس ۱۲۳ ایستگاه بارش و داده‌های PET شبکه‌بندی شده، نمودند. به‌منظور تعیین شاخص‌های اصلی الگوهای مکانی و زمانی خشکسالی‌ها از تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) استفاده شد. همه شاخص‌های خشکسالی روند کاهش فراوانی و شدت خشکسالی‌ها را در زیر منطقه شمالی، و روند شدت خشکسالی‌ها را در منطقه جنوبی، که اقلیم عمدتاً خشک و نیمه‌خشک است، نشان داد. عمدتاً در هنگام استفاده از شاخص‌های PDSI و MedPDSI فقط چند مورد از نظر آماری معنی‌دار بودند که شامل زیر حوضه‌های جنوبی هستند. در پژوهشی به‌منظور پهنه‌بندی خشکسالی نیمه‌جنوبی استان گلستان از شاخص خشکسالی SPI و روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. برای این منظور از داده‌های بارندگی ماهانه ۱۶ ایستگاه هواشناسی با پراکنش مناسب در منطقه طی یک دوره ۴۳ ساله استفاده نمودند. شاخص بارش استاندارد، برای هر یک از ایستگاه‌های منتخب در دو مقیاس سه و ۱۲ ماهه محاسبه شد. تجزیه مؤلفه‌های اصلی مربوط به داده‌های SPI برای پهنه‌بندی خشکسالی انجام شد. نتایج تجزیه مؤلفه‌های اصلی این شاخص در مقیاس سه ماهه و دوازده ماهه نشان داد که تعداد شش عامل ویژه بزرگتر از یک برای مقیاس سه ماهه و هفت عامل ویژه برای مقیاس دوازده ماهه وجود دارد که بیش از ۵۸ و ۷۲ درصد از واریانس کل را در مجموع برای شاخص سه و ۱۲ ماهه توجیه می‌کند (Amiri et al, 2019). Hao و AghaKouchak (2013) در پژوهش خود با استفاده از شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص رطوبت خاک (SSI) یک شاخص ترکیبی چند متغیره به نام شاخص خشکسالی استاندارد شده چند متغیره (MSDI) ایجاد کردند. به عبارت دیگر MDSI ترکیبی از شاخص خشکسالی هواشناسی و خشکسالی کشاورزی برای توصیف ویژگی‌های کلی خشکسالی است. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی یک مدل منطقی برای ترکیب چند شاخص احتمالی است. Bazrafshan et al (2015) در تحقیقی دیگر به مقایسه شاخصMSPI و شاخص JDI در بازه زمانی یک تا ۱۲ ماهه در دوره آماری ۱۹۶۶ تا ۲۰۱۰ در ۴۲ ایستگاه در مناطق مختلف ایران پرداختند. نتایج نشان داد که شاخص MSPI نسبت به شاخص JDIبرای پایش خشکسالی بهتر است. Dehban et al (2015) شاخص چند متغیره MRDI (Modified Reconnaissance Index Drought) خشکسالی اصلاح شده را بر پایه شاخص خشکسالی RDI (Reconnaissance Drought Index) در پنجره‌های زمانی سه تا ۲۴ ماهه با استفاده از روش PCA در هفت ایستگاه تبخیرسنجی حوضه گرگان‌رود ارائه و نتایج آن را با شاخص MSPI مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین شاخص‌های چند متغیره MRDI و MSPI در ایستگاه‌های مورد بررسی وجود ندارد. ایران کشوری خشک و نیمه‌خشک، با بحران‌های روزافزون آب روبه‌رو است که ناشی از رشد جمعیت، افزایش دما و کاهش بارش‌ها است. Taheri Dehkordi et al (2022) تأکید می‌کنند که تغییر الگوهای بارش به‌طور نزدیکی با تغییرات بلندمدت در سطح مناطق آبی مرتبط است و چالش‌های کمبود آب و خشکسالی را تشدید می‌کند. یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی منابع آب در ایران، بارش سالانه محدود و دسترسی به آب و افزایش روند خشکسالی های مختلف است (Nahavandi and Ahmadian, 2019). میانگین بارش کشور ۲۴۰ میلی‌متر در سال است، که تقریباً یک‌سوم متوسط جهانی و نیمی از متوسط نرخ در آسیا است. بارش محدود و منابع آب از یک طرف، گسترش فعالیت‌های کشاورزی از سوی دیگر، و گسترش خشکسالی‌ها می‌تواند پایداری ژئوپلیتیکی اکثر حوضه‌ها در ایران را به خطر بیندازد. با این حال، اطلاعات محدودی درباره استفاده از آب و وضعیت کنونی آب در برخی از حوضه‌ها، به ویژه در جنوب کشور وجود دارد. (Abbaszadeh et al, 2023؛ Rafiei Sardooi et al, 2023). خشکسالی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پدیده‌های طبیعی، خسارات گسترده‌ای را بر بخش‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک وارد می‌کند. یکی از چالش‌های اصلی در

DOI: 10.22055/jise.2025.45302.2100

مدیریت خشکسالی، عدم دسترسی به داده‌های به‌روز و دقیق برای پایش این پدیده است. استفاده از شاخص‌های سنتی و روش‌های مبتنی بر ایستگاه‌های هواشناسی در بسیاری از موارد کافی نیست و نیاز به ترکیب این شاخص‌ها با داده‌های سنجش از دور لازم است. این امر می‌تواند به درک بهتری از ویژگی‌های مکانی و زمانی خشکسالی کمک کرده و زمینه را برای توسعه استراتژی‌های مؤثرتر در مدیریت خشکسالی فراهم کند (Moreno-de-Las-Heras et al., 2023). هدف از ایم پژوهش ۱) محاسبه، تجزیه و تحلیل منطقه‌ای شاخص‌های خشکسالی کشاورزی و هواشناسی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در سامانه گوگل ارث انجین، ۲) محاسبه شاخص خشکسالی SPI توسط داده‌های ایستگاه‌های زمینی، ۳) تعیین بازه منتخب براساس شاخص خشکسالی MSPI هر یک از ایستگاه‌ها با استفاده از روش چند متغیره تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، ۴) ارزیابی میزان همبستگی و روند یابی MSPI با شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای در سطح استان هرمزگان طی سال‌های ۱۳۷۸-۱۴۰۰ (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲) است.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مورد مطالعه

استان هرمزگان بین طول جغرافیایی ´۲۴ °۲۵ تا ´ ۵۷ °۲۸ عرض شمالی و ´۴۱ °۵۳ تا ´۱۵ °۵۹ طول شرقی در جنوب ایران و در سواحل شمال خلیج‌فارس قرار دارد. مساحت کل استان ۶۸۴۰۰ کیلومترمربع و آب‌وهوای آن عمدتاً خشک و نیمه‌خشک است. از عوامل مهم اقلیمی در ناحیه ساحلی و جزایر استان بالابودن دما و درصد رطوبت نسبی، طولانی‌بودن دوره خشکی و بارندگی با شدت بالا است (Gholampoor et al, 2009). میزان بارندگی در ناحیه استپی و ساحلی به تقریب به‌طور متوسط در حدود ۱۵۰ میلی‌متر است. حداکثر مطلق دما تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد است. به‌طورکلی نزولات جوی منطقه در فصل زمستان نازل می‌شود و در فصل تابستان به‌تناوب هر چند سال دارای نزولات تابستانی است. از ویژگی‌های رژیم بارندگی منطقه، شدت بالا و مقدار کم و تعداد روزهای با بارش کم است (Heydarzadeh, 2023). نقشه استان هرمزگان و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی موردمطالعه در شکل (۱) نشان‌داده‌شده است.

روش تحقیق

به‌منظور بررسی میزان تأثیر خشکسالی در استان هرمزگان، شاخص‌های خشکسالی کشاورزی (NDVI، VCI، VHI، SVI) و هواشناسی (TCI، PDSI، SPI، PCI) با استفاده از توابع‌نویسی و تصاویر ماهواره‌ای در سامانه گوگل ارث انجین برای بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۰۰ به‌صورت ماهانه، فصلی و سالانه محاسبه شدند. داده‌های طیفی و حرارتی سنجنده MODIS از سایت ناسا (ladsweb) جمع‌آوری شدند. شاخص‌های TCI و NDVI با تفکیک مکانی یک کیلومتر و ۵۰۰ متر و تفکیک زمانی هشت روزه و ۱۶ روزه از محصولات 1A11MOD و 1A13 MOD برای سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ انتخاب شدند تا سری‌های زمانی مورد نیاز ایجاد شود. داده‌های مربوط به محاسبه شاخص SPI از شش ایستگاه سینوپتیک در استان هرمزگان طی بازه زمانی ۲۲ ساله (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲) از سازمان هواشناسی کشور دریافت و پس از انجام آزمون‌های آماری همگنی و داده‌های پرت، بازسازی مقادیر ناقص و مفقودی با افزونه XLSTAT در نرم‌افزار اکسل انجام شد. شاخص‌های مختلف به‌صورت ماهانه، فصلی و سالانه محاسبه شدند. داده‌های بارندگی ماهانه ایستگاه‌های هواشناسی منتخب نیز برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی استفاده شدند. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک مورد بررسی در جدول (۱) آمده است. به‌منظور تحلیل داده‌های گسترده و تعیین شاخص‌های مؤثر در بازه‌های زمانی مختلف، از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. این روش به کاهش داده‌ها و شناسایی الگوهای مشابه خشکسالی کمک کرد. تمامی تجزیه و تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS 10.8، ENVI 5.3، افزونه XLSTAT در اکسل و RStudio برای برنامه‌نویسی و تحلیل‌های آماری انجام شدند. شاخص وضعیت بارش (PCI) نیز برای تشخیص مؤثر خشکسالی، براساس طبقه‌بندی‌های بارندگی مختلف طبق مطالعه. Du et al (2013) و Oliver (1980) محاسبه شد.

شاخص‌های خشکسالی

برای تشخیص مؤثر خشکسالی در استان هرمزگان، شاخص‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفتند. شاخص وضعیت بارش (PCI) که توسط Du et al (2013) معرفی شده، نشانگر شرایط بارندگی سالانه است. این شاخص از صفر تا یک متغیر بوده و در صورت خشکسالی شدید، PCI نزدیک به صفر و در شرایط سیلابی، PCI نزدیک به یک است. طبقه‌بندی کلاس‌های مختلف بارش طبق Oliver (1980) انجام شده است. شاخص خشکسالی هواشناسی پالمر (PDSI) نیز بر اساس بیلان آبی و ترکیبی از بارندگی، ذخیره رطوبتی و نیاز رطوبتی محاسبه می‌شود و مقادیر آن شدت دوره‌های خشک را نشان می‌دهند (Yang et al, 2018). در جدول (۲) طبقات مختلف خشکسالی براساس شاخص‌های مختلف آمده است.

شاخص‌های کشاورزی

شاخص کشاورزی NDVI به‌عنوان یکی از رایج‌ترین شاخص‌های تعیین تراکم پوشش گیاهی با استفاده از تفاوت انعکاس طیف مادون‌قرمز نزدیک و طیف قرمز محاسبه می‌شود (Khalili et al، 2021). مقادیر NDVI بین ۱- تا ۱+ متغیر است و بیان‌گر تراکم پوشش گیاهی است. شاخص وضعیت دمایی (TCI) نیز با فرض وقوع خشکسالی و کاهش رطوبت خاک و ایجاد تنش‌های گرمایی در سطح زمین محاسبه می‌شود (Du et al, 2013). مقادیر TCI بین صفر و یک متغیر است، به‌طوری‌که در شرایط خشکسالی مقدار آن به صفر نزدیک و در شرایط ترسالی مقدار آن به یک نزدیک می‌شود (Moisa et al, 2022).

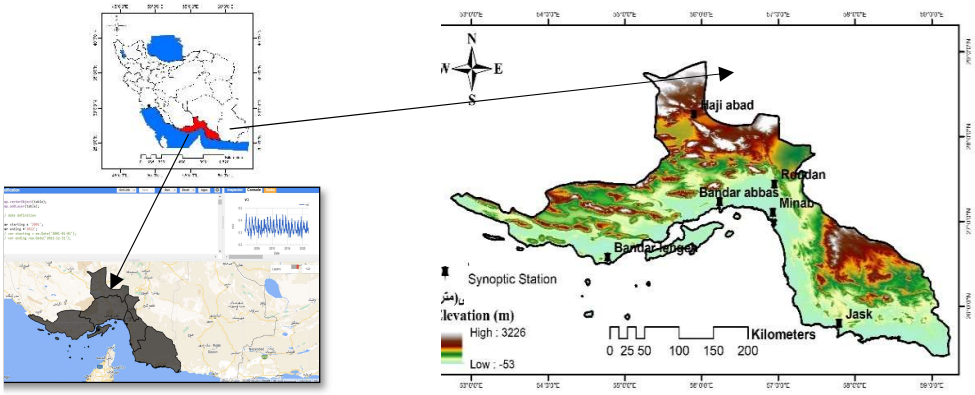


Fig. 1-A view of the location of Hormozgan province in Iran and the synoptic stations

شکل ۱-نمایی از موقعیت استان هرمزگان در ایران و ایستگاه‌های سینوپتیک مورد بررسی

جدول ۱- ایستگاه‌های سینوپتیک موردمطالعه و مشخصات جغرافیایی آن‌ها

Table1- The studied synoptic stations and their geographic features

Row	Station Name	Latitude		Longitude		Height above sea level (meters)
		Degree	Minutes	Degree	Minute	
1	Bandar Abbas	56	22	27	13	97
2	Bandar Lengeh	54	50	26	32	22.7
3	Haji Abad	55	91	28	31	931.2
4	Jask	57	77	25	64	5.2
5	Minab	57	01	27	11	29.6
6	Roudan	57	19	27	46	219.6

جدول ۲- طبقات شاخص‌های خشکسالی کشاورزی براساس شاخص‌های مختلف

Table 2- classes of agricultural drought indices based on different indices

Drought classes	VHI and TCI, VCI	SPI	SVI and NDVI	PDSI	Class	PCI
Extreme wet	$60 < X$	$2 < X$		$4 < X$		
Severe wet	$50 < X \leq 59.5$	$1.5 < X \leq 1.99$		$3 < X \leq 3.99$		
Moderate wet	$40 < X \leq 49.5$	$1 < X \leq 1.49$	$0.75 - 1$	$2 < X \leq 2.99$		
Mild wet				$1 < X \leq 1.99$		
Normal	$30 < X \leq 39.5$	$0.99 < X \leq -0.99$	$0.5 - 0.75$	$-0.99 < X \leq 0.99$	Unigorm	**10 < X**
Mild drought				$-1.99 < X \leq -1$		
Moderate drought	$20 < X \leq 29.5$	$-1 < X \leq -1.49$	$0.25 - 0.5$	$-2.99 < X \leq -2$	Moderate	11-15
Severe drought	$10 < X \leq 19.5$	$-1.5 < X \leq -1.99$	$0.1 - 0.25$	$-3.99 < X \leq -3$	Concentrated	16-20
Extreme drought	$X \leq 10$	≤ -2	$0 - 0.1$	≤ -4	Very Concentrated	**20 < X**

شاخص‌های ترکیبی و استاندارد

شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) و شاخص وضعیت دما (TCI) که توسط Kogan (1995, a & b) معرفی شده‌اند، برای پایش و مدیریت خشکسالی استفاده می‌شوند. VCI تغییرات مکانی-زمانی پوشش سطح زمین و تأثیر شرایط آب‌وهوایی بر گیاهان مختلف را توصیف می‌کند (Abdolalizadeh et al, 2020). شاخص ترکیبی VHI از ترکیب VCI و TCI برای ارزیابی خشکسالی کشاورزی استفاده می‌شود (Navabi et al, 2021). شاخص پوشش گیاهی استاندارد (SVI) نیز احتمال وقوع خشکسالی را با استاندارد کردن NDVI و استفاده از نمرات z توزیع NDVI محاسبه می‌کند.

DOI: 10.22055/jise.2025.45302.2100

تحلیل داده‌ها

در این پژوهش برای تحلیل داده‌های گسترده و تعیین شاخص‌های مؤثر در بازه‌های زمانی مختلف، از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. این روش به کاهش داده‌ها و شناسایی الگوهای مشابه خشکسالی کمک کرد. تمامی تجزیه‌وتحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS 10.8، ENVI5.3، افزونه XLSTAT در اکسل و RStudio برای برنامه‌نویسی و تحلیل‌های آماری انجام شدند. شاخص وضعیت بارش (PCI) نیز برای تشخیص مؤثر خشکسالی، بر اساس طبقه‌بندی‌های بارندگی مختلف طبق مطالعات Du et al. (2103) و Oliver (1980) محاسبه شد (Prajapati et al, 2022).

تحلیل روند (Trend analysis)

به‌منظور ارزیابی روند تغییرات سری‌های زمانی برای تعیین وجود یا وجودنداشتن خودهمبستگی به کار برده می‌شود. این آزمون به‌عنوان یک روش ناپارامتری دارای مزایایی است که سبب شده به‌طور متداول و گسترده‌ای در تحلیل روند سری‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی به‌کار گرفته شود. از نقاط قوت این روش می‌توان به مناسب بودن کاربرد آن برای سری‌های زمانی که از توزیع آماری خاصی پیروی نمی کنند اشاره نمود. اثر پذیری ناچیز این روش از مقادیر حدی که در برخی از سری‌های زمانی مشاهده می‌گردند نیز از دیگر مزایای استفاده از این روش است (Srivastava et al., 2014). ازاین‌رو برای تعیین همبستگی و روندیابی پس از حصول اطمینان از وجود نداشتن خودهمبستگی بین داده‌ها، به‌ترتیب از روش‌های اسپیرمن و من – کندال در نرم‌افزار SPSS ورژن۲۶ استفاده شد (Lotfrad et al, 2021).

نتایج

شاخص زمینی SPI

نتایج محاسبه شاخص SPI برای دوره‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه بر اساس آمار بارندگی روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک بندرعباس، بندر لنگه، حاجی‌آباد، میناب، رودان و جاسک طی دوره آماری ۱۳۷۸-۱۴۰۰ محاسبه شد. نمودار فصل‌های بهار و پاییز برای هر ایستگاه برای مشخص نمودن دوره‌های ترسالی و خشکسالی در شکل (۲) ارائه شده است. مشاهده این نمودارها نشان می‌دهد که روند منحنی‌ها در برخی سال‌ها کاهشی، در برخی سال‌ها افزایشی و در اغلب سال‌ها تقریباً نرمال بوده است. در ایستگاه بندرعباس، ماکزیمم بارش در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۹، ۲۰۱۴، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۲ ثبت شده است که نشان‌دهنده کمترین میزان خشکسالی در این سال‌ها است. بیشترین شدت خشکسالی در این ایستگاه به‌ترتیب در سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۰۷، ۲۰۱۰، ۲۰۱۲ و ۲۰۲۱ رخ داده است. در ایستگاه بندر لنگه، ماکزیمم بارش در سال‌های ۲۰۰۹، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹ ثبت شده و بیشترین شدت خشکسالی به‌ترتیب در سال‌های ۲۰۱۲، ۲۰۲۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۱ بوده است. در ایستگاه حاجی‌آباد، ماکزیمم بارش در سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۹، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹ ثبت شده و بیشترین شدت خشکسالی به‌ترتیب در سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۲ و ۲۰۲۱ بوده است. در ایستگاه میناب، ماکزیمم بارش در سال‌های ۲۰۰۹، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۲ ثبت شده و بیشترین شدت خشکسالی به‌ترتیب در سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۱۲ و ۲۰۲۱ رخ داده است.

در ایستگاه رودان، ماکزیمم بارش در سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۰۹، ۲۰۱۹، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۲ ثبت شده و بیشترین شدت خشکسالی به‌ترتیب در سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۱۶، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۱۸ بوده است. در ایستگاه جاسک، ماکزیمم بارش در سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۰۷، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹ ثبت شده و بیشترین شدت خشکسالی به‌ترتیب در سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۸ رخ داده است. ماکزیمم شدت خشکسالی سالانه بین ایستگاه‌های بندر لنگه، حاجی‌آباد و میناب در سال ۲۰۲۱ و بین ایستگاه‌های رودان و جاسک در سال ۲۰۱۸ مشترک بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که هر ایستگاه در دوره‌های مختلف، تجربه‌های متفاوتی از بارش و خشکسالی داشته است و تحلیل‌های فصلی و سالانه می‌توانند به شناسایی الگوهای خشکسالی و ترسالی کمک کنند.

روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) یکی از روش‌های آماری چندمتغیره است که برای تحلیل و کاهش پیچیدگی داده‌ها به‌کار می‌رود، به ویژه زمانی که با حجم زیادی از اطلاعات روبه‌رو هستیم. در این پژوهش، روش PCA بر روی ۱۷ مقیاس زمانی شامل داده‌های ماهانه (یک تا ۱۲ ماه)، فصلی (یک تا چهار فصل) و سالانه، برای هر یک از ایستگاه‌ها براساس شاخص خشکسالی SPI محاسبه شد.

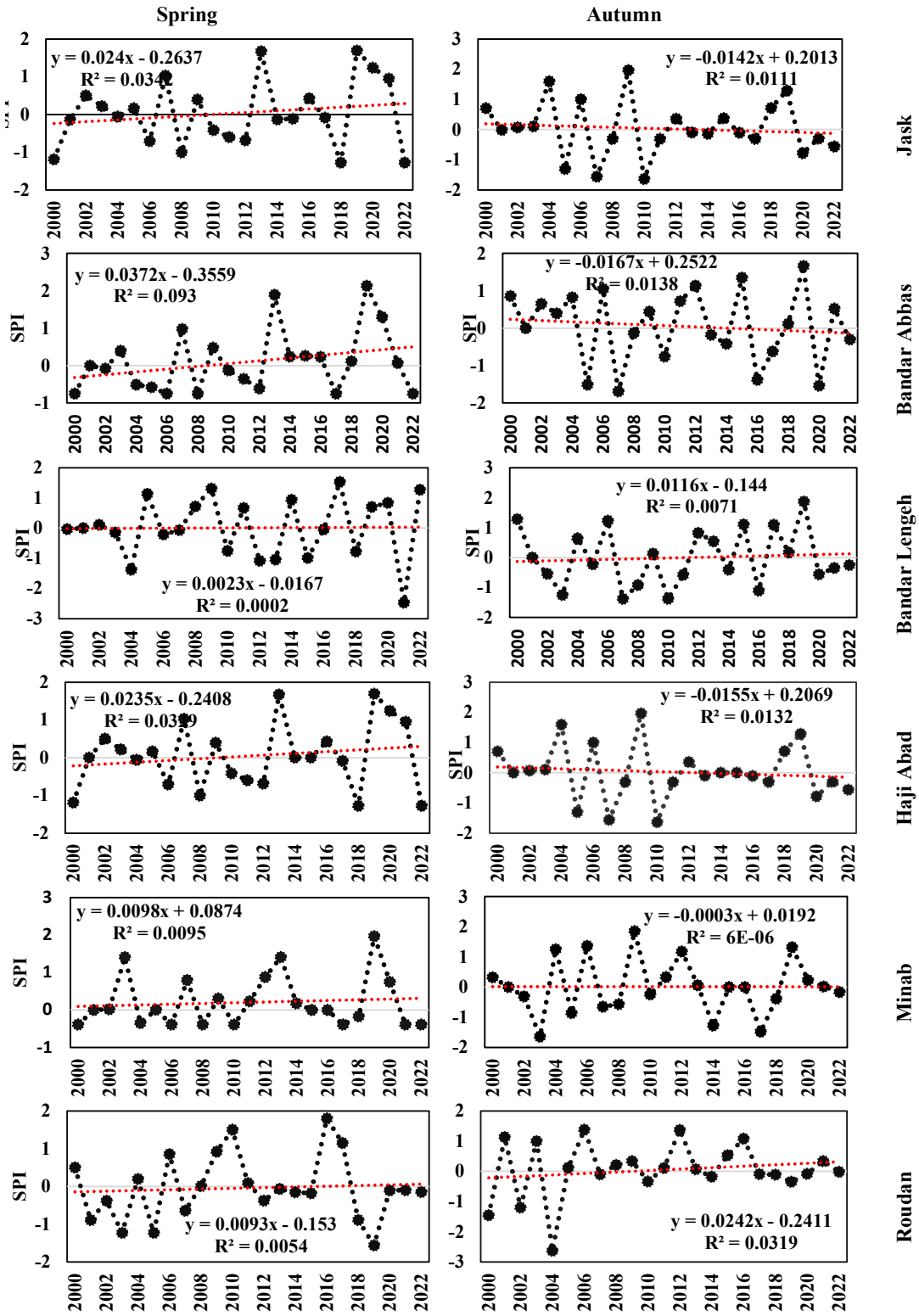


Fig. 2- Trends of Spring and Autumn SPI Index at the stations under investigation

شکل ۲- روند تغییرات فصل‌های بهار و پاییز شاخص SPI در ایستگاه‌های مورد بررسی

DOI: 10.22055/jise.2025.45302.2100

نتایج به‌دست‌آمده از این تحلیل، به تعیین بازه‌های زمانی منتخب MSPI برای هر ایستگاه انجامید. بازه‌های زمانی منتخب MSPI برای ایستگاه‌های مختلف به شرح زیر است: در ایستگاه‌های بندرعباس و بندرلنگه، ماه‌های تیر، مرداد و شهریور به‌عنوان بازه‌های زمانی منتخب تعیین شدند. برای ایستگاه حاجی‌آباد، فصل بهار، اسفند و بازه سالانه به‌عنوان دوره‌های مهم مشخص شدند. در ایستگاه جاسک، فصل زمستان، اسفند و دی‌ماه به‌عنوان بازه‌های منتخب تعیین گردیدند. در ایستگاه میناب، فروردین، بازه سالانه و فصل بهار، و در ایستگاه رودان، اسفند، بهمن و فصل بهار به‌عنوان بازه‌های زمانی منتخب شناسایی شدند. MSPI منتخب هر یک از ایستگاه‌های مورد بررسی در شکل (۳) آمده است.

روند معنی‌داری و همبستگی شاخص‌ها

بررسی روند معنی‌داری و همبستگی شاخص‌های خشکسالی براساس شاخص MSPI به‌دست‌آمده از ایستگاه‌های مختلف، روند معنی‌داری و میزان همبستگی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و کشاورزی بررسی شد. به‌دلیل افزایش تعداد صفحات مقاله، فقط نتایج ایستگاه بندرعباس در جدول (۳) آمده است.

ایستگاه بندرعباس

در ایستگاه بندرعباس، شاخص‌های VHI و SPI در تمامی بازه‌های زمانی روند معنی‌داری نشان داده‌اند. شاخص VHI در تیر و مرداد رفتار مشابهی دارد و SPI در فصل بهار و ماه‌های آوریل، جون، جولای و آگوست روند معنی‌دار مثبت در سطح ۹۹ درصد دارد. شاخص NDVI در مردادماه به‌جز در ژانویه، فوریه، مارچ و آوریل، روند معنی‌دار منفی نشان داده است. شاخص‌های VCI و PCI در مردادماه و زمستان روند معنی‌دار منفی داشته‌اند. شاخص TCI در تیر و مردادماه با فوریه در سطح ۹۵ و ۹۹ درصد روند معنی‌دار منفی دارد. شاخص‌های SVI و PDSI هیچ همبستگی معنی‌داری با شاخص SPI ندارند. نتایج ضریب همبستگی شاخص‌های ماهوارهای و شاخص MSPI در دوره‌های زمانی مختلف ایستگاه بندرعباس در جدول (۳) آمده است.

ایستگاه بندرلنگه

در ایستگاه لنگه، شاخص VCI در زمستان و ماه‌های منتهی به آن و شاخص TCI در آگوست، روند معنی‌دار مثبت در سطح ۹۹ درصد نشان داده‌اند. شاخص VHI در تیر و مرداد با آوریل روند معنی‌دار مثبت دارد. شاخص‌های NDVI، SVI و PCI در این ایستگاه هیچ روند معنی‌داری نداشته‌اند. شاخص PDSI نیز در اکثر بازه‌های زمانی روند معنی‌دار منفی در سطح ۹۹ درصد نشان داده است که بیان‌گر کاهش بارش و ذخیره رطوبتی در منطقه است.

ایستگاه حاجی‌آباد

در ایستگاه حاجی‌آباد، شاخص NDVI در اسفند با فصل بهار و ماه‌های آوریل و می روند معنی‌دار مثبت در سطح ۹۵ درصد دارد. شاخص VCI در بهار، تابستان و پاییز روند معنی‌دار مثبت در سطح ۹۹ درصد نشان داده است. شاخص TCI در اسفند با زمستان و بهار و در بازه سالانه با زمستان و مارس دارای معنی‌داری مثبت است. شاخص VHI در اغلب بازه‌های زمانی روند معنی‌دار مثبت در سطح ۹۹ درصد دارد. شاخص PDSI نیز در اکثر بازه‌ها روند معنی‌دار مثبت در سطح ۹۹ درصد نشان داده است. شاخص SPI در بهار، اسفند و سالانه در زمستان و بهار روند معنی‌دار مثبت در سطح ۹۹ درصد دارد.

ایستگاه‌های میناب، جاسک و رودان

در ایستگاه جاسک، شاخص‌های NDVI، VCI و VHI در فصل‌های زمستان، بهار و تابستان روند معنی‌دار مثبت در سطح ۹۹ درصد دارند. شاخص PDSI نیز در این فصول روند معنی‌دار مثبت نشان می‌دهد. شاخص SPI در تمامی بازه‌ها با فصل زمستان روند معنی‌دار مثبت دارد.

در ایستگاه میناب، شاخص VCI در بازه‌های زمانی سالانه و فصول مختلف روند معنی‌دار مثبت در سطح ۹۹ درصد دارد. شاخص TCI در برخی ماه‌ها روند معنی‌دار مثبت نشان می‌دهد. شاخص VHI نیز در بازه‌های زمانی مختلف روند معنی‌دار مثبت در سطح ۹۹ درصد دارد. شاخص PDSI در همه بازه‌های زمانی روند معنی‌دار مثبت نشان می‌دهد. شاخص SPI در فصل زمستان و بهار و ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و آوریل روند معنی‌دار مثبت در سطح ۹۹ درصد دارد. در ایستگاه رودان، شاخص VCI در بازه‌های زمانی اسفند و بهمن و فصل بهار روند معنی‌دار مثبت در سطح ۹۹ درصد نشان می‌دهد. شاخص VHI در بازه‌های زمانی اسفند و بهمن با فصل زمستان و ماه‌های متناظر روند معنی‌دار مثبت دارد. شاخص PDSI در دو بازه اسفند و بهمن با فصل زمستان و ماه‌های متناظر روند معنی‌دار مثبت نشان داده است. شاخص SPI در بهمن و فصل بهار با فصل تابستان روند معنی‌دار مثبت دارد. در سایر بازه‌های زمانی، روند معنی‌داری منفی مشاهده شده است که نشان‌دهنده افزایش شدت خشکی در منطقه رودان است.

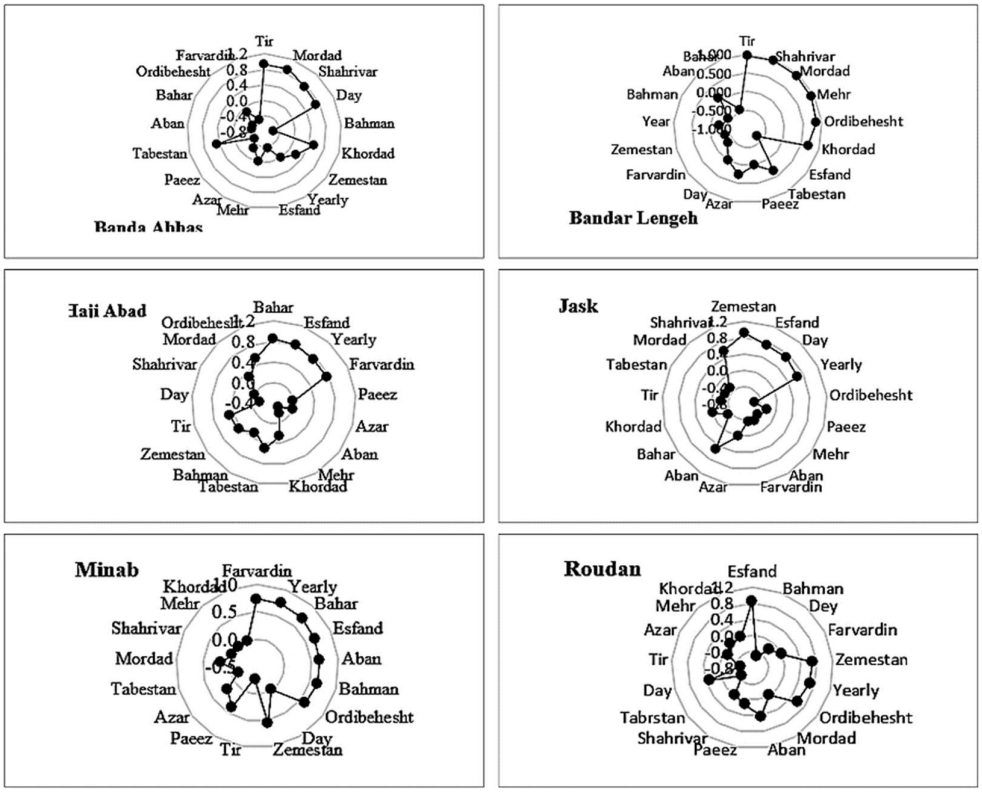


Fig. 3- Selected MSPI of each of the case study stations

شکل ۳- MSPI منتخب هر یک از ایستگاه‌های مورد بررسی

نتایج روند معنی‌داری بین MSPI منتخب ایستگاه بندرلنگه و بازه زمانی‌های مختلف براساس شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و کشاورزی مستخرج از سنجش از دور نشان داد شاخص NDVI و PCI هیچ رابطه‌ای نداشتند. شاخص VCI نیز در فصل زمستان و ماه‌های منتهی به این فصل نیز روند معنی‌داری مثبتی در سطح ۹۹ درصد از خود نشان داده است. این روند مثبت حاکی از شرایط مناسب پوشش گیاهی منطقه در این بازه زمانی است. شاخص TCI نیز تنها در ماه اگوست روند معنی‌داری مثبت در سطح ۹۹ درصد داشته است که بیان‌گر شدت تنش گرمایی سطح زمین در این بازه زمانی است. در فصل زمستان و ماه‌های این فصل نیز روند معنی‌داری منفی در سطح ۹۹ درصد نشان می‌دهد که نشان دهنده‌ی کاهش تأثیر تنش دمایی سطح زمین در این بازه‌های زمانی است. در سایر بازه‌های زمانی روندی نداشته است. شاخص VHI تنها در دوبازه زمانی تیر و مرداد با ماه آوریل در سطح ۹۹ درصد دارای روند معنی‌داری مثبت است که بیان‌گر شرایط سلامت پوشش گیاهی و کاهش تنش دمایی سطح زمین است. در سایر بازه‌های زمانی در سطح ۹۹ و ۹۵ درصد شاهد روند معنی‌داری منفی هستیم، که نشان دهنده‌ی کاهش سلامت پوشش گیاهی و افزایش تنش دمایی سطح زمین است. طبق شاخص PDSI در اکثر بازه‌های زمانی روند معنی‌داری منفی در سطح ۹۹ درصد برقرار است، این مطلب بیان‌گر کاهش بارش و ذخیره رطوبتی، و افزایش شدت اثرات دمایی در منطقه است. شاخص SPI نیز در فصل پاییز و ماه‌های جولای، آگوست، اکتبر و دسامبر در سطح ۹۹ درصد دراری روند معنی‌دارای مثبت است. شاخص‌های NDVI، SVI و PCI روندی نداشته‌اند. نتایج ایستگاه حاجی آباد نشان داد شاخص NDVI در بازه زمانی اسفند ماه با فصل بهار، ماه آوریل و می در سطح ۹۵ درصد دارای روند معنی‌داری مثبت نسبتا بالایی است. این نشان دهنده‌ی تراکم مناسب پوشش گیاهی در این بازه زمانی در منطقه حاجی آباد است. شاخص VCI نیز در فصل‌های بهار، تابستان و پاییز و ماه‌های منتهی به این فصول نیز روند معنی‌داری مثبتی در سطح ۹۹ درصد از خود نشان داده است. این روند مثبت حاکی از شرایط مناسب پوشش گیاهی منطقه در این بازه زمانی است. شاخص TCI در بازه اسفندماه با فصل زمستان و بهار و ماه فوریه و مارس و در بازه‌ی سالانه با فصل زمستان و ماه مارس در سطح ۹۵ و ۹۹ درصد دارای معنی‌داری مثبت است. این بیان‌گر کاهش تنش گرمایی زمین در این بازه‌ی زمانی بوده است. شاخص VHI در هر سه بازه زمانی فصل بهار، اسفندماه و سالانه در اغلب بازه‌های زمانی روند معنی‌داری مثبتی در سطح ۹۹ درصد داشته اند. که بیان‌گر تلفیقی از کاهش تنش گرمایی سطح زمین و بهبود سلامت

DOI: 10.22055/jise.2025.45302.2100

پوشش گیاهی در اغلب ماه‌ها است. البته در فصل زمستان و ماه‌های ژانویه و فوریه روند معنی‌داری منفی است که می‌تولند ناشی از کاهش سلامت و پوشش گیاهی در منطقه حاجی آباد باشد. شاخص PDSI در اکثر بازه‌های زمانی روند معنی‌داری مثبت در سطح ۹۹ درصد برقرار است. این مطلب بیان‌گر شرایط مناسب بارش و ذخیره رطوبتی، و کاهش شدت اثرات دمایی در منطقه است. شاخص PCI نیز در بازه زمانی اسفند و سالانه با فصل زمستان و بهار و ماه‌های متناظر با این فصل‌ها یعنی فوریه، آوریل و جون در سطح ۹۵ و ۹۹ درصد دارای رابطه معنی‌داری مثبت است. این بیان‌گر شرایط رطوبتی مناسب در این بازه زمانی در منطقه حاجی‌آباد بوده است. شاخص SPI در هر سه بازه زمانی فصل بهار، اسفندماه و سالانه در فصول زمستان و بهار و در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و آوریل دارای روند معنی‌داری مثبتی در سطح ۹۹ درصد هستند. که بیان‌گر کاهش شدت خشکی در منطقه در این بازه از سال است. درفصل تابستان اگرچه در بازه زمانی اسفند و سالانه دارای روند معنی‌داری مثبت در سطح ۹۹ درصد است، ولی درماه‌های متناظر با آن، روند معنی‌داری منفی در همین سطح برقرار است. که نشان دهنده‌ی غلبه شدت خشکی بر منطقه در این بازه زمانی است. در فصل پاییز و ماه‌های متناظر با آن نیز به‌ترتیب شاهد روند مثبت و منفی در سطح ۹۹ درصد هستیم که نشان دهنده‌ی کاهش یا افزایش شدت خشکی در منطقه حاجی آباد است. نتایج ایستگاه جاسک نشان داد شاخص NDVI در بازه‌ی فصل زمستان با فصل تابستان و بهار، و ماه‌های مارس، آوریل و می در سطح ۹۹ درصد دارای روند معنی‌داری مثبت است. باتوجه به اقلیم منطقه جاسک و بارش‌های تابستانه در این منطقه می‌توان معنی‌داری مثبت تراکم پوشش پوشش گیاهی در منطقه را از این دانست. شاخص VCI و VHI در هر سه بازه زمانی در اکثر ماه‌ها دارای روند معنی‌داری مثبت در سطح ۹۹ درصد است. که بیان‌گر شرایط سلامت پوشش گیاهی و کاهش شرایط تنش دمایی سطح زمین در منطقه جاسک است. شاخص PDSI در فصول زمستان، بهار و تابستان در سطح ۹۹ درصد دارای روند معنی‌داری مثبت است. در ماه‌های متناظر با این فصول نیز، در سطح ۹۹ درصد دارای روند معنی‌داری مثبت است که بیان‌گر شرایط مناسب بارش و ذخیره رطوبتی و کاهش شدت اثرات دمایی در منطقه جاسک است. در فصل پاییز و ماه‌های متناظر با آن نیز روند معنی‌داری منفی در سطح ۹۹ درصد وجود دارد که نشان دهنده‌ی کاهش ذخیره رطوبتی و افزایش تنش گرمایی است. شاخص SPI در تمامی بازه‌ها با فصل زمستان، در بازه‌ی زمستان و دی‌ماه با فصل بهار، در بازه زمستان با فصل زمستان در سطح ۹۹ درصد دارای روند معنی‌داری مثبت است. در ماه‌های متناظر با هر یک از فصول نیز دارای روند معنی‌داری مثبت در سطح ۹۹ درصد است. که بیان‌گر کاهش شدت خشکی در بازه زمانی‌های ذکر شده در منطقه جاسک است.

نتایج ایستگاه میناب نشان داد شاخص VCI در بازه‌ی زمانی سالانه با فصول بهار، تابستان و پاییز و ماه‌های متناظر با آن در سطح ۹۹ درصد دارای روند معنی‌داری مثبت است. با توجه به وسعت باغات و اراضی کشاورزی در این منطقه در طول سال دارای پوشش گیاهی نسبتا مناسب است. شاخص TCI در بازه سالانه و بهار با فصل زمستان، و در بازه فروردین ماه با فصل بهار دارای روند معنی‌داری در سطح ۹۵ و ۹۹ درصد است. همچنین در برخی ماه‌های متناظر با این فصل‌ها نیز در هر دو سطح دارای روند معنی‌داری مثبت است که بیان‌گر کاهش شدت اثرات گرمایی سطح زمین است. شاخص VHI در هر سه بازه فروردین، سالانه و بهار در هر یک از فصول و ماه‌های متناظر با آن‌ها در سطح ۹۹ درصد دارای روند معنی‌داری مثبت است. که بیان‌گر شرایط سلامت پوشش گیاهی و کاهش شرایط تنش دمایی سطح زمین در منطقه‌ی میناب است. در بازه‌هایی که روند معنی‌داری منفی است نشان دهنده‌ی افزایش تنش دمایی و کاهش سلامت پوشش گیاهی است. شاخص PDSI درهمه‌ی بازه‌های زمانی دارای روند معنی‌داری مثبت در سطح ۹۹ درصد است. که بیان‌گر شرایط مناسب بارش و ذخیره رطوبتی و کاهش شدت اثرات دمایی در منطقه میناب است. این منطقه یکی از قطب‌های کشاورزی و صیفی‌جات خارج از فصل در جنوب کشور است. به‌طوری که مقدمات کشت از نیمه شهریور آغار می‌گردد. معمولا دو دوره‌ی برداشت محصول وجود دارد که تا اواسط اردیبهشت ماه ادامه می‌یابد. این امر سبب فراهم بودن شرایط رطوبتی خاک، کاهش دمایی و معنی‌داری شاخص PDSI شده است. شاخص SPI در تمامی بازه‌ها در فصل زمستان و ماه‌های متناظر با آن در سطح ۹۹ درصد دارای روند معنی‌داری مثبت است. همچنین این شاخص در بازه‌ی فصل بهار تنها با فصل بهار و ماه آوریل دارای روند مثبت است که نشان دهنده‌ی کاهش تنش خشکی در منطقه است. در ماه‌های می، جون، جولای و دسامبر بیشتر روند منفی در سطح ۹۹ درصد برقرار است که نشان دهنده‌ی کاهش افزایش تنش خشکی در منطقه میناب است. نتایج روند معنی‌داری MSPI منتخب ایستگاه رودان با شاخص‌های مختلف نشان داد شاخص VCI در هر سه بازه زمانی اسفند و بهمن ماه و فصل بهار در اکثر مواقع سال دارای روند معنی‌داری مثبت در سطح ۹۹ درصد است. شهرستان رودان دارای باغات مرکبات فراوانی است. طبق شاخص VCI نمای کلی منطقه بیان‌گر سلامت مناسب پوشش گیاهی است. شاخص VHI در بازه زمانی اسفند و بهمن‌ماه با فصل زمستان و ماه‌های متناظر با این فصل در سطح ۹۹ درصد دراری روند معنی‌داری مثبت هستند. این نشان دهندی کاهش تنش دمایی زمین و افزایش سلامت پوشش گیاهی منطقه است. شاخص PDSI نیز در دو بازه‌ی اسفند و بهمن‌ماه با فصل زمستان و ماه‌های متناظر با این فصل دارای روند معنی‌داری مثبت در سطح ۹۹ درصد است.

Table 3- Corralation coefficient of satellite indexes and MSPI index in different time periods of Bandar Abbas station

جدول ۳- ضریب همبستگی شاخص‌های ماهواره ای و شاخص MSPI در دوره های زمانی مختلف ایستگاه بندرعباس

	TCI			SPI			PCI			PDSI			SVI			VHI			VCI			NDVI		
	Shahrivar	Mordad	Tir	Shahrivar	Mordad	Tir	Shahrivar	Mordad	Tir	Shahrivar	Mordad	Tir	Shahrivar	Mordad	Tir	Shahrivar	Mordad	Tir	Shahrivar	Mordad	Tir	Shahrivar	Mordad	Tir
win	-.26	-.14	.19	-.27**	-.24**	-.24**	-.5**	-.5**	-.51**	.03	-.01	.01	-.06	.19	.19	-.03**	.18**	.21**	.07	-.09	.3	.06	-.38*	.17
spring	.15	-.02	.05	.08**	.04**	.03**	27	.06	0.10	.02	-.07	-.06	-.17	.04	.04	-.06**	0.01	.03**	.11	-.29	.12	-.19	-.39*	-.03
summer	.03	.09	.06	-.06**	-.18**	-.14**	-.19	-.20	-0.25	.07	-.13	-.12	-.19	.01	.04	-.12**	-.02**	.011*	.14	-.37*	.8	-.19	-.44*	.17
fall	.15	-.18	-.17	-.06**	-.24**	-.23**	-.07	-.1	-0.14	0.1	-.15	-.13	-.04	-.16	-.14	-.03**	-.12**	-.09**	.13	-.56**	-.5	-.05	-.62**	.07
Jan	-.28	.11	.06	-.22**	-.28**	-.24**	-.62**	-.65**	-.66**	.05	.04	.06	.02	.23	.24	-.18**	-.02**	.01	-.08	.04	.13	.26	-.31	.17
Feb	-.21	-.43**	-.42*	-.31**	-.26**	-.26**	.06	-.03	-0.02	.02	-.05	-.04	-0.1	.23	.22	.11**	.02**	.04**	-.05	-.19	-.5	.03	-.24	.18
Mar	.07	.01	.02	-.11**	-.19**	-.22**	-.12	00	-0.04	-.04	-.05	-.04	-.19	0	-.01	.02**	.28**	.3**	.1	-.15	-.4	-.21	-.25	.06
Apr	-.19	.01	.02	.09**	.09**	.06**	.13	-.10	-0.06	.01	-.06	-.05	-.14	.04	.04	-.26**	.1**	.07**	.15	-.27	.6	-.19	-.33	-.08
May	.24	-.12	.09	-.10**	-.23**	-.25**	.13	.13	0.18	.01	-.06	-.05	-0.2	.09	.09	-.10**	-.11**	-.09**	-.04	-.27	-.2	-.10	-.40*	-.05
Jun	.27	.03	0	.09**	.11**	.12**	.24	.06	0.07	.08	-.09	-.08	-0.2	.09	.09	-0.0	-.06**	-.04**	.11	-.37*	.13	-.20	-.46**	-.06
July	.10	.17	.15	.08**	.07**	.10**	-.16	-.16	-0.17	.12	-.08	-.07	-.19	.03	.05	-.1**	.05**	.04**	.19	-.3	.5	-.27	-.36*	-.07
Age	.09	.14	.13	.44**	.21**	.24**	-.07	-.13	-0.12	.1	-.08	-.07	-.17	.04	.06	-.26**	-.01*	-.01	.06	-.41*	-.3	-.1	-.42*	.09
Sep	-.14	-.03	.02	-.19**	-.29**	-.28**	-.19	-.25	-0.29	.05	-.15	-.13	-.22	.04	.06	-.13**	-.10**	-.10**	.07	-0.23	.1	.01	-.48**	.03
Oct	.02	-.18	.15	.04**	.17**	.18**	-.02	-.10	-0.12	.02	-.2	-.19	-.16	-.06	-.03	-.03**	-.19**	-.16**	00	-.23	.6	-.28	-.36*	-.01
Nov	.18	-.15	-.16	-.06**	-.10**	-.10**	-.07	-.10	-0.15	.11	-.14	-.12	-.11	-.18	-.16	-.19**	.02**	.05**	0.2	.4*	.5	-.07	-.46**	.17
Dec	.14	-.15	-.15	.07**	.12**	.12**	.11	.11	0.1	.14	-.12	-.09	-.02	-.18	-.18	.05**	-.10**	-.07**	.07	.68**	-.1	-.1	-.52**	-.10

DOI: 10.22055/jise.2025.45302.2100

در اسفندماه و فصل بهار نیز با فصل پاییز و ماه‌های آن دارای روند معنی‌داری مثبت است. این بیان‌گر شرایط بارشی مناسب و کاهش اثرات دمایی در بازه‌ی زمانی است. شاخص SPI نیز در بازه زمانی بهمن‌ماه و فصل بهار با فصل تابستان و برخی ماه‌های آن در سطح ۹۹ درصد دارای روند معنی‌داری مثبت است. در سایر بازه‌های زمانی روند معنی‌داری منفی در همین سطح برقرار است که نشان دهنده‌ی ی افزایش شدت خشکی در منطقه رودان است.

پایش زمانی پهنه‌ی خشکسالی شاخص‌های مختلف

نتایج پایش زمانی و مکانی رخداد انواع کلاس‌های خشکسالی در محدوده استان هرمزگان براساس شاخص‌های مختلف به‌ترتیب در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که براساس شاخصNDVI، از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸، کلاس خشکسالی شدید ۹۸ درصد از پهنه‌ی استان هرمزگان را دربرگرفته است شکل (۴)، در حالی که کلاس خشکسالی متوسط در تمام سال‌ها کمتر از ۲ درصد بوده است. در سال‌های ۲۰۱۹، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۲ از شدت خشکسالی کاسته شده و کلاس خشکسالی متوسط به میزان کمی برقرار است. این نتایج بیان‌گر کاهش تراکم پوشش گیاهی در استان هرمزگان است. پهنه‌بندی شاخص‌های مورد بررسی در سطح استان در شکل (۵) آمده است. گستردگی زمانی و زمانی این شدت از خشکسالی بیانگر شرایط نامناسب وضعیت پوشش گیاهی و خشکسالی در این سال‌ها می‌باشد.

طبق شاخصPDSI ، در دهه‌ی اول بازه‌ی زمانی (۲۰۰۰–۲۰۱۱)، استان هرمزگان دچار خشکسالی‌های متمادی در کلاس‌های خشکسالی متوسط و شدید بوده است. در سال ۲۰۰۴، بالاترین شدت خشکسالی بسیار شدید ۳۶ درصد از مساحت استان را دربرگرفته است. در دهه‌ی دوم (۲۰۱۲–۲۰۲۲)، این روند تغییر نموده و بیشتر کلاس نرمال در منطقه برقرار بوده است. طی سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷، ۲۰۱۹، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۲ در بیش از ۵۰ درصد مساحت استان شرایط نرمال حاکم بوده است. شاخص PDSIروند معنی‌داری مثبتی در اکثر ایستگاه‌های استان نشان داده است.

شاخص SPI تنها با دو کلاس خشکسالی بسیار شدید و شدید استان را طبقه‌بندی کرده است. طی سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۷، ۲۰۰۹، ۲۰۱۳، ۲۰۱۵، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۹، بیش از ۵۰ درصد وسعت منطقه در کلاس خشکسالی بسیار شدید قرار گرفته است. شاخص SVIنیز نشان می‌دهد که طی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۲، بیش از ۵۰ درصد وسعت منطقه تحت سیطره خشکسالی شدید بوده است. کلاس خشکسالی نرمال در سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۱۱، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۶ کاهش شدت خشکی را نشان می‌دهد شکل(۴ و ۵).

شاخص TCI در تمامی سال‌ها دارای روند نسبتاً منظم و یکنواختی از کلاس‌های مختلف خشکسالی شدید، خیلی شدید و متوسط به‌ترتیب با ۳۲، ۳۱ و ۲۴ درصد بوده است. طبق شکل (۵) در دهه‌ی دوم در قسمت‌های شرق و شمال استان از شدت خشکی کاسته شده است، که این در ارتباط با ویژگی‌های توپوگرافی منطقه و عوامل خرد اقلیمی محلی است. شاخص VCI نیز نوسانات کمی داشته و تنها سه کلاس خشکسالی را در منطقه نشان می‌دهد. کلاس خشکسالی شدید در تمامی سال‌ها به‌طور متوسط ۶۳ درصد مساحت منطقه را دربرگرفته است. طبق این شاخص طی سال‌های ۲۰۱۴، ۲۰۱۷، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ از شدت خشکی کاسته شده که در شکل (۴) و (۵) به‌خوبی نمایان است.

شاخص VHI نیز بین کلاس‌های مختلف نوسان کمی داشته و به‌طور متوسط طی سالیان مختلف ۴۴ درصد مساحت استان را خشکسالی شدید دربرگرفته است، که بیان‌گر کاهش تراکم پوشش گیاهی و تنش حرارتی است (شکل ۴ و ۵). شاخص PCI معرف پراکنش بارش در منطقه است. در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵، بالاترین شدت بی‌نظمی بارش در سطح استان رخ داده است. این بی‌نظمی همراه با بارش‌های با شدت بالا و مدت کم بوده است. در سال ۲۰۰۳، بالاترین بی‌نظمی بارش و تأثیر شدت دما مشاهده شده است. شاخص‌های PDSI و SPI طی این بازه زمانی روند مشابهی داشته‌اند. سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۱۴ بارش شرایط یکنواخت‌تری داشته که با کاهش شدت خشکسالی همراه بوده است. شاخص SPI تنها از بارش ماهانه و شاخص PDSI از دما و تبخیر و تعرق استفاده می‌کند، که باعث می‌گردد شاخص PDSI استرس آبی ناشی از کمبود آب طبیعی را نشان دهد (Merabti et al., 2023). این تفاوت در شاخص‌ها به توضیح عدم همخوانی شدت‌های مختلف خشکسالی کمک می‌کند.

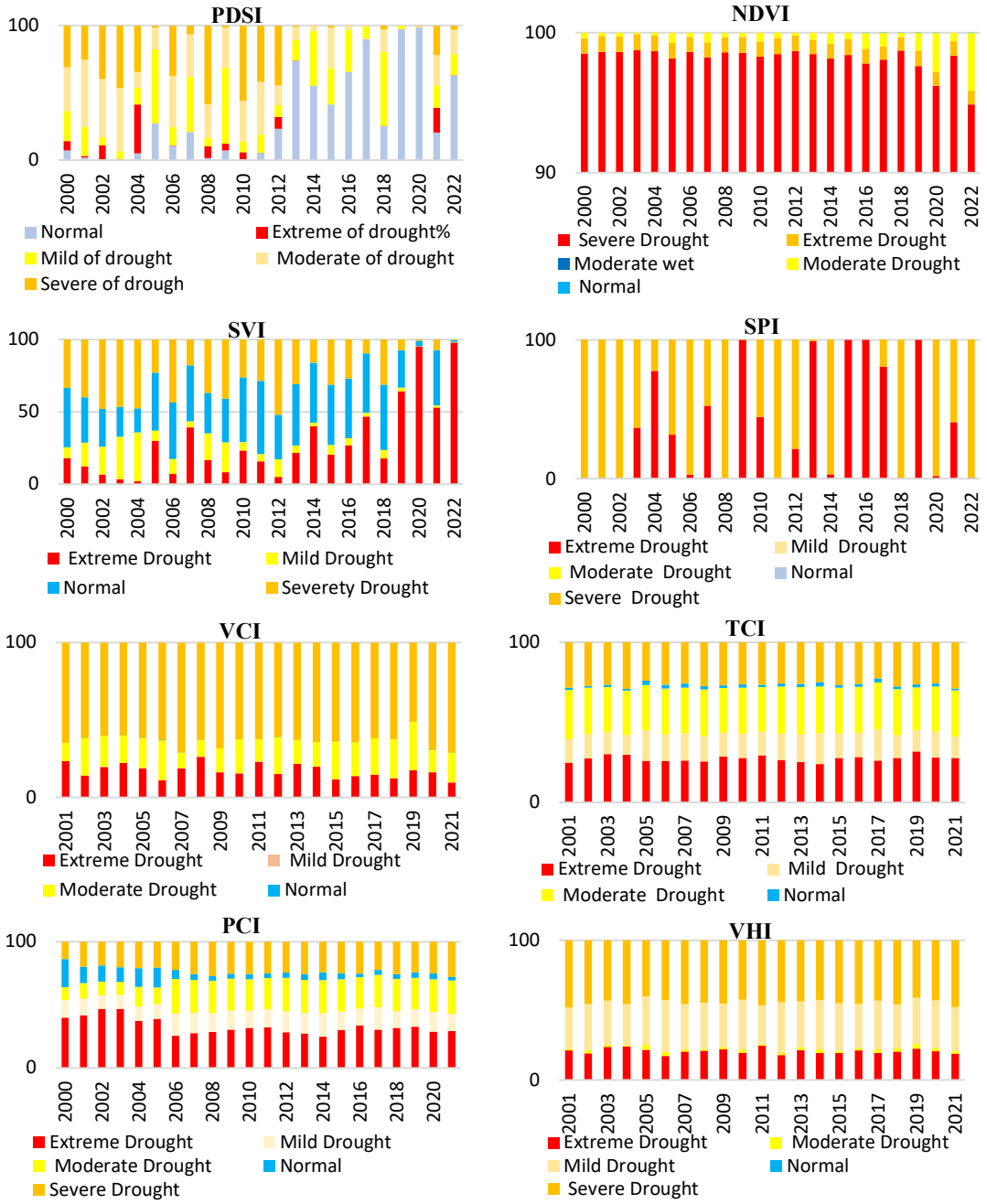


Fig 4- The percentage of occurrence of drought classes in Hormozgan province based on different indicators

شکل ٤- درصد روند رخداد انواع کلاس‌های خشکسالی در محدوده استان هرمزگان براساس شاخص‌های مختلف

DOI: 10.22055/jise.2025.45302.2100

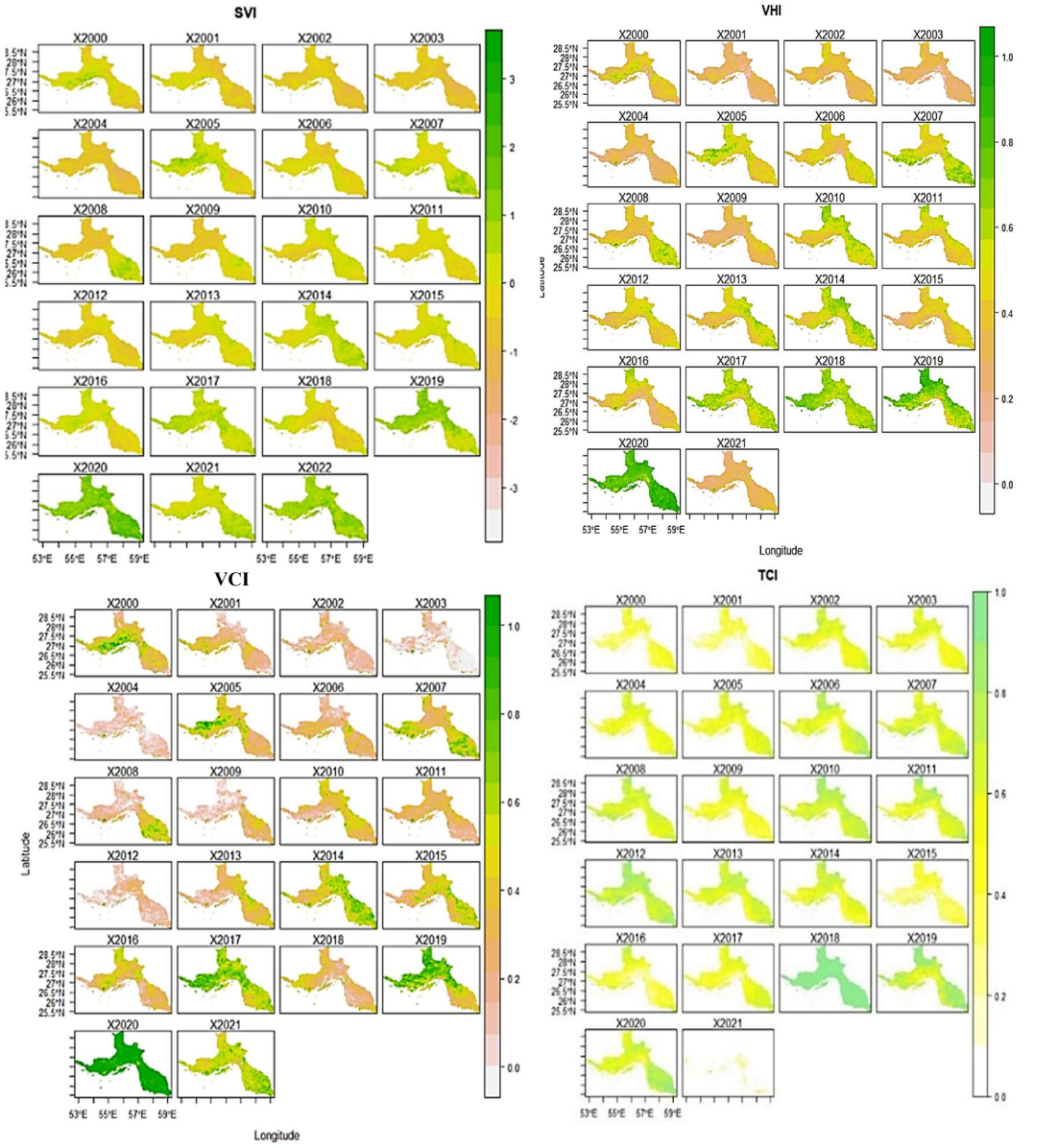


Fig 5- Spatial distribution of drought indicators at the province level during the study period
شکل ۵- پراکنش مکانی شاخص‌های خشکسالی در سطح استان طی دوره ی مورد مطالعه

بحث و نتیجه گیری

خشکسالی یک مشکل جدی است که می‌تواند پیامدهای مخرب کوتاه‌مدت و بلندمدت بر محیط داشته باشد. خشکسالی همه انواع آب‌وهوا را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بااین‌حال، اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک اغلب خشکسالی‌هایی مکررتر و شدیدتر را تجربه می‌کنند. در این مقاله، یک ابزار در دسترس عموم ارائه شده است که از طریق سامانه گوگل ارث انجین و بر اساس زبان برنامه‌نویسی جاوا اسکریپت ارائه شده است و می‌تواند توزیع مکانی و زمانی خشکسالی را با شاخص‌های مختلف ارائه دهد. از این‌رو به‌منظور پهنه‌بندی زمانی و خشکسالی هواشناسی و کشاورزی از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک استان هرمزگان طی بازه ۲۰۰۰-۲۰۲۲ استفاده شده است. از طرف دیگر با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین شاخص‌های مختلف خشکسالی هواشناسی و کشاورزی برنامه‌نویسی تهیه شد. در گام بعدی با کمک روش PCA بازه زمانی منتخب هر ایستگاه براساس شاخص خشکسالی MSPI مشخص گردید. سپس به کمک روش‌های آماری من‌کندال روند معنی‌داری هر یک از شاخص‌های به‌دست آمده از موتور گوگل ارث انجین را با بازه زمانی منتخب هر ایستگاه بررسی و مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق

به‌جای استفاده از سری‌های زمانی مختلف شاخص SPI که تعداد زیاد بازه‌های زمانی (ماهانه، فصلی و سالانه) آن ممکن است باعث سردرگمی گردد، از شاخص MSPI استفاده شده است (Azderi et al, 2019؛ Bazrafshan et al, 2014). این امر، علاوه بر کاهش تعداد سری‌های زمانی شاخص SPI، دربرگیرنده اطلاعات تمامی آن‌ها نیز است. بازه زمانی منتخب MSPI، ایستگاه بندرعباس تیر، مرداد و شهریورماه؛ ایستگاه بندر لنگه تیر، شهریور و مردادماه؛ ایستگاه حاجی‌آباد فصل بهار، اسفند و سالانه؛ ایستگاه جاسک فصل زمستان، اسفند و دی‌ماه؛ ایستگاه میناب فروردین، سالانه و فصل بهار؛ و ایستگاه رودان اسفند، بهمن و فصل بهار بوده است. طبق یافته‌های Bazrafshan et al, (2014) شاخص MSPI بازتاب بهتری از رویدادهای خشکسالی هواشناسی ارائه می‌دهد. نتایج روند معنی‌داری MSPI با شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و کشاورزی در ایستگاه‌های مورد بررسی محاسبه شد. ایستگاه حاجی‌آباد در بازه زمانی منتخب با شاخص‌های VCI، VHI، PDSI و SPI دارای روند معنی‌داری مثبت است. طبق یافته‌های Paroon et al (2019)، شهرستان حاجی‌آباد دارای اقلیم حاره گرم (۲۴-۲۸ درجه سلسیوس) و خشک ضعیف (۱۷۰-۲۵۰ میلی‌متر) است و در میان ایستگاه‌ها دارای کمترین میزان دما است. اکثر بارش‌ها در فصل سرد سال ریزش می‌کند و تقریباً چهار ماه از سال خشک است. این شرایط اقلیمی سبب شده که ایستگاه حاجی‌آباد بالاترین روند معنی‌داری را با شاخص‌های ذکر شده داشته باشد. در ماه‌های جولای تا اکتبر (July تا October) طبق شاخص SPI خشکی زیادی را شاهد هستیم، این با یافته‌های Baagideh et al (2011) که شدت استرس گرمایی به‌ترتیب در ماه‌های آگوست، جولای، جون و سپتامبر بالاترین میزان است، منطبق است. شهرستان میناب دارای اقلیم حاره‌ای خیلی گرم (۱۸-۳۲ درجه سلسیوس) و خشک ضعیف (۲۵۰-۱۷۰ میلیمتر) است. طبق شاخص SPI حدود ۶-۷ ماه از سال دچار خشکسالی است که اغلب این خشکسالی در ماه‌های گرم سال است. از طرفی بارش‌های این منطقه در فصل سرد ریزش می‌کند، این با یافته‌های Paroon et al (2019) موافق است. شهرستان رودان با اقلیم حاره خیلی گرم و نیمه‌خشک (۲۵۰-۳۱۵ میلیمتر)، اغلب بارش در فصل سرد ریزش نموده و دارای شش ماه خشک است. نوسانات بارش در این ایستگاه بسیار زیاد است که منطبق با یافته‌های Paroon et al (2019) است. ازاین‌رو می‌توان باتوجه‌به مقدار بارش بالا نسبت به سایر ایستگاه‌ها دریافت که چرا شاخص‌های مختلف به‌جز VCI همبستگی خوبی ندارند. ایستگاه بندرعباس، بندر لنگه و جاسک، دارای اقلیم حاره گرم و خشک (۱۷۰-۸۰ میلی‌متر) است. کل بارش طی ماه‌های سرد ریزش نموده، به‌جز ایستگاه جاسک با هشت ماه خشک، سایر مناطق دارای هفت ماه خشک هستند. نوسانات و مقدار بارش در هر سه ایستگاه تقریباً مشابه است. مطلب قابل توجه اینکه بارش طی پنج سال اخیر در تمامی ایستگاه‌ها دارای روند سینوسی بوده است. سال‌های ۲۰۰۹، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹ با بارش نسبتاً بالا بین تمامی ایستگاه‌ها مشترک است این منطبق با یافته‌های Taheri Qazvini و Carrion (2023) است. براساس طبقه‌بندی شاخص خشکی Köppen و Geiger (1930)، بخش وسیعی از مساحت کشور ایران خشک و نیمه‌خشک است بیشتر مناطق مرکزی و شرقی و مناطق نزدیک به خط ساحلی خلیج‌فارس را شامل می‌شود. استان‌های اصفهان و خوزستان در جنوب غرب و استان هرمزگان در جنوب کشور در این طبقه قرار دارد (Raziei، 2022؛ Taheri Qazvini and Carrion، 2023). نتایج برای ۲۲ سال در نظر گرفته شده طبق شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و داده‌ی ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که خشکی شدید تا بسیار شدید همیشه یک وضعیت آب‌وهوایی غالب در منطقه است، به‌استثنای سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۱۱، ۲۰۱۴، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹ این وضعیت بد از شرایط نامطلوب آب‌وهوا، بارش کم و دمای نسبتاً بالا مشهود است. این موافق با یافته‌های Taheri Qazvini و Carrion (2023) است. از طرفی براساس گزارش مرکز ملی خشکسالی و مدیریت بحران ایران (https: //ndmo.ir/، دسترسی به ۱۴ آذر ۱۴۰۱)، از سال آبی ۲۰۲۰، میزان بارندگی در ایران در مقایسه با میانگین بلندمدت ۴۱ درصد و نسبت به مدت مشابه سال قبل ۵۳ درصد کاهش داشته است. در سال ۲۰۲۰ میزان بارندگی در استان هرمزگان ۸۶ درصد کاهش داشته است این گزارش حاکی از آن است که استان در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹ بارندگی غیرمعمولی که در طول ۵۰ سال گذشته بی‌سابقه بود را تجربه کرده است. اما از سال ۲۰۲۰ به بعد، بیشتر مناطق خشکی و تنش‌های گیاهی چشم‌گیری را تجربه کردند. در نتایج تحقیق حاضر، بارندگی زیاد در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹ براساس نمودارهای PCI در اکثر ایستگاه‌ها مشهود است و تحلیل‌های زمانی براساس شاخص‌های مختلف نشان می‌دهد که دماهای بالا و بارندگی کم در سال‌های آینده استان را در معرض خطر قرار خواهد داد. طبق نتایج به‌دست‌آمده رفتار دو شاخص SPI و PDSI در ایستگاه‌های مختلف متفاوت بوده است. باتوجه‌به اینکه در شاخص PDSI علاوه بر بارندگی از پارامتر درجه‌حرارت در محاسبه تبخیر و تعرق در محاسبه میزان خشکسالی استفاده می‌شود، بهتر است در مناطق خشک از شاخص‌های خشکسالی هواشناسی که علاوه بر بارش مبتنی بر پارامترهای تبخیر و تعرق هستند، استفاده شود، زیرا مقادیر محاسبه برای این شاخص یک اندازه‌ی کمی واحدی را از دوره‌های خشک نشان می‌دهد. این با یافته‌های Lotfirad et al (2022) و Merabti et al، (2023) تطابق دارد. بررسی کلی نتایج معنی‌داری شاخص‌ها نشان داد از میان شاخص‌های خشکسالی به کار گرفته شده، شاخص‌های خشکسالی کشاورزی VCI و VHI شاخص‌های خشکسالی هواشناسی PDSI و SPI در تمام ایستگاه‌ها دارای روند معنی‌داری هستند. ازاین‌رو می‌توان دلیل مثبت‌بودن روند

DOI: 10.22055/jise.2025.45302.2100

معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد را این‌چنین بیان نمود که اغلب محصولات کشاورزی صیفی و سبزیجات استان خارج از فصل است. به‌طوری که عملیات آماده‌سازی زمین و کشت از اواسط شهریورماه آغاز شده و تا اواسط اردیبهشت‌ماه سال آتی در نقاط مختلف انجام می‌گردد. در هر منطقه بسته به شرایط جغرافیایی، خاک و میزان آب قابل‌دسترس طی بازه زمانی ذکر شده شروع به کشت‌ورزی می‌نمایند. همچنین با توجه به اقلیم هریک از ایستگاه‌ها و متوسط تعداد ماه‌های خشک آن‌ها، اکثر بارش‌ها در فصول سرد ریزش می‌کنند. نتایج پهنه‌ی خشکسالی نشان داد بخش اعظم منطقه موردمطالعه در گستره‌ی کلاس‌های خشکسالی شدید و بسیار شدید قرار گرفته است. این هشداری جدی و آشکار برای استان در بحث مخاطرات طبیعی است که بر فعالیت‌های کشاورزی و منابع آبی اثر مستقیم دارد. بارش‌های استان معمولاً در مدت کم و با شدت زیاد منجر به سیل‌های ویرانگری شده است. یافته‌ی شاخص‌های مختلف در بحث پوشش گیاهی، تنش دمایی سطح زمین و تغییرات پراکنش بارش حاکی از این است که در سطح استان شرایط خشکسالی شدید حاکم است. برای مدیریت بهتر و کنترل تبعات خشکسالی در استان هرمزگان، در بخش‌های مختلف متأثر از خشکسالی کشاورزی، محیط‌زیست، منابع آب سطحی و اکوسیستم‌های طبیعی، نیازمند اتخاذ استراتژی‌ها و برنامه‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت اصلاحی در راستای حفظ عوامل طبیعی، انسانی و تغییرات اقلیمی است. شاخص‌های ماهواره‌ای در کنار شاخص‌های هواشناسی زمین مبنا می‌توانند روند خشکسالی را به‌طور مؤثری پایش نمایند. شاخص‌های متعددی وجود دارد که گویای وضعیت خشکسالی در منطقه هستند، بااین‌وجود هیچ یک از این شاخص‌ها به‌طور ذاتی نسبت به دیگری، ارجحیت ندارند و نمی‌توان عملکرد آنها را در سطح منطقه‌ای دیگر تضمین نمود و تنها می‌توان گفت بعضی از این شاخص‌ها در شرایطی خاص، عملکرد بهتری دارند. نحوه عملکرد هر یک از این شاخص‌ها به اقلیم، توپوگرافی، سطح منطقه، نوع پوشش گیاهی، نوع خاک منطقه وابسته است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسندگان هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: هادی سیاسر: تجزیه و تحلیل داده ها

نویسنده دوم: مریم حیدرزاده: بررسی نتایج، نگارش مقاله

تقدیر و تشکر

بدینوسیله نویسندگان مقاله از اداره هواشناسی استان هرمزگان بابت در اختیار قرار دادن آمار و اطلاعات مورد نیاز تقدیر به‌عمل می‌آورند.

References

1- Adib, A., Kisi, O., Khoramgah, S., Gafouri, H. R., Liaghat, A., Lotfirad, M. and Moayyeri, N., 2021. A new approach for suspended sediment load calculation based on generated flow discharge considering climate change. *Water Supply*, 21(1), 2400-2414. doi. rg/10.2166/ws.2021.069.

2- Amiri, M., Ebrahimi, M. and Aminirakan, A., 2019. Simulation of climate change effects on potato crop yield using AquaCrop plant growth model. *Irrigation and Water Engineering*, 9(3), 125-142. Doi: 10. 2125/IWE.2019.88677. (In Persian).

3- Azderi, Z., Bazarafshan, A., Bazarafshan, J., Shekari, M. and Zamani, H., 2019. Meteorological drought monitoring in Hormozgan province based on statistical and probabilistic multivariate indicators. *Dry Bom Scientific Journal*. 10(2). 1-17. Doi: 10. 9252/ARIDBIOM.2021.15258.1821. (In Persian).

4- Abdolalizadeh, Z., Ghorbani, A., Mostafazadeh, R. and Moameri, M., 2020. Rangeland canopy cover estimation using Landsat OLI data and vegetation indices in Sabalan rangelands, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, *13*(6), p.245.DOI:10.1007/ s12517-020-5150-1.

5- Abbaszadeh, M., Bazrafshan, O., Mahdavi, R., Sardooi, E. R. and Jamshidi, S., 2023. Modeling Future Hydrological Characteristics Based on Land Use/Land Cover and Climate Changes Using the SWAT Model. *Water Resources Management*, *37*, 4177–4194. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:259055006.

6- Baagideh, M., Inteziri, A. and Shoja, F., 2011. Investigating the occurrence of different degrees of heat stress in the coasts of southern Iran. *Geography and Environmental Sustainability*. 2(1). 55-68. https://ges. azi.ac.ir/article_173.htm. (In Persian).

7- Bazrafshan, J., Hejabi, S. and Rahimi, J., 2014. Drought monitoring using the multivariate standardized precipitation index (MSPI). *Water Resources Management*, 28(4), 1045–1060. doi. rg/10.1007/s11269-014-0533-2.

8- Bazrafshan, J., Nadi, M. andGhorbani, K., 2015. Comparison of empirical copulabased joint deficit index (JDI) and multivariate standardized precipitation index (MSPI) for drought monitoring in Iran. *Water Resources Management*, 29(6), 2027- 2044. DOI:10. 007/s11269-015-0926-x.

9- Dehban, H., Ebrahimi, K. and Araghinejad, S., 2015. Introduction and assessment of a new drought monitoring index, mrdi – case study: gorganroud basin, iran. *Iranian Journal Of Soil and Water Research*, 46(1), 19-30. Doi: 10. 2059/IJSWR.2015.54292. (In Persian).

10- Dehkordi, R.M., Yadegari, M. and Hamedi, B., 2015. Effect of temperature, drought and salinity stresses on germination of Portulaca oleracea L., Trigonella foenum-graecium L., Borago officinalis L. and Hypericum perforatum L. *Advances in Environmental Biology*, 9(4), 148-152. Doi:. 0/1.1017/332553 610.

11- Deniz, A., Toros, H. and RnIncecik, S., 2011. Spatial Variations of Climate Indices in Turke. *International Journal of Climatology*. 31(5), 394–403. DOI: 10. 002/joc.2081.

12- Du, L., Tian, Q., Yu, T., Meng, Q., Jancso, T., Udvardy, P. and Huang, Y., 2013. A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23(8), 245–253. doi. rg/10.1016/j.jag.2012.09.010.

13- Farajzadeh, M. and Ahmadian, K., 2014. Temporal and Spatial Analysis of Drought with use of SPI Index in Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 3(4), 1–16. Doi: 10. 2111/JNEH.2014.2464. (In Persian).

14- Feng, P.Y., Wang, B., Liu, D.L and Yu, Q., 2019. Machine Learning-Based Integration of Remotely-Sensed Drought Factors Can Improve the Estimation of Agricultural Drought in South-Eastern Australia. *Agricultural Systems*, 173(4), 303–316. DOI: 10. 016/j.agsy.2019.03.015.

15- Gholampoor, M., Khosroshahi, M. and Barkhordari, J.m 2009. Determination of desert domains of Hormozgan province using geomor phological criteria. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 15(4), 485-492. https://ijrdr. reeo.ac.ir/article_104400.html ?lang=en [In Persian].

16- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. and Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment,* 202(3), 18–27. doi. rg/10.1016/j.rse.2017.06.031.

17- Han, H.; Bai, J., Yan, J., Yang, H. and Ma, G., 2019. A combined drought monitoring index based on multi-sensor remote sensing data and machine learning. *Geocarto International*, 36(3), 1-16.doi: 10.1080/10106049.2019.1633 423.

18- Hao, Z. and AghaKouchak, A., 2013. Multivariate standardized drought index: a parametric multi-index model. *Advances in Water Resources,* 57(7), 12-18. doi. rg/10.1016/j.advwatres.2013.03.009.

19- Heydarzadeh, M., 2023. 'Evaluation of the correlations of plant indices with atmospheric and biological variables using the Google Earth Engine', *Journal of Water and Soil Conservation*, 30(2), pp. 1-26. doi: 10.22069/jwsc.2023.20667.3584 (In Persian).

20- Khalili, R., Zali, A. and Motaghi, H., 2021. Evaluation of heavy metals in water and sediments of Haraz river, using pollution load index (PLI) and geoaccumulation index (Igeo). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(4), 933-942. doi: 10. 2059/IJSWR.2021 .316080.668850. (In Persian).

21- Kogan, F.N., 1995a. Droughts of the late 1980a in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76(5), 655–668.Doi:10.1175/1520-0477(1995)076 <0655.

22- Kogan, F. N., 1995b. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 15(11), 91–100. doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T.

23- Köppen, V. and Geiger, R., 1930. Handbuch der Klimatologie, 5 Vols.; Gerbrüder Borntraegar: Berlin, Germany, Climatology, p44.Kukunuri, A.N., Murugan, D. & Singh, D. (2022). Variance based fusion of VCI and TCI for efficient classification of agriculture drought using MODIS data. *Geocarto International*, 37(10): 2871-2892. doi. rg/10.1080/10106049.2020.1837256.

24- Lotfirad, M., Esmaeili-Gisavandani H. and Adib, A., 2022. Drought monitoring and prediction using SPI, SPEI, and random forest model in various climates of Iran. *Journal of Water and Climate Change*. 13(2), 383-406. doi: 10. 166/wcc.2021.287.

25- Lotfrad, M., Adib, A., Salehpoor, J., Ashrafzadeh, A. and Kisi, O., 2021 Simulation of the impact of climate change on runof, and drought in an arid and semiarid basin (the Hablehroud, Iran). *Applied Water Science*, 11(10):168-183. doi. rg/10.1007/s13201-021-01494-2.

26- Merabti, A., Darouich, H., Paredes, P., Meddi, M. and Pereira, L.S., 2023. Assessing Spatial Variability and Trends of Droughts in Eastern Algeria Using SPI, RDI, PDSI, and MedPDSI—A Novel Drought Index Using the FAO56 Evapotranspiration Method. *Water*, 15(4), 1-19. doi. rg/10.3390/w15040626.

27- Moisa, M.B., Merga, B.B. and Gemeda, D.O., 2022. Multiple indices-based assessment of agricultural drought: A case study in Gilgel Gibe Sub-basin, Southern Ethiopia. *Theoretical and Applied Climatology*, 148(1), 455–464. doi. rg/10.1007/s00704-022-03962-4.

28- Moreno-de-Las-Heras, M., Bochet, E., Vicente-Serrano, S. M., Espigares, T., Molina, M. J., Monleón, V., Nicolau, J. M., Tormo, J. and García-Fayos, P., 2023. Drought conditions, aridity and forest structure control the responses of Iberian holm oak woodlands to extreme droughts: A large-scale remote-sensing exploration in eastern Spain. *The Science of the Total Environment*, 901, 165887.https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165887.

29- Navabi, N., Moghaddasi, M. and Gangi, N., 2021. Assessment of Agricultural Drought Monitoring Using Various Indices based on Ground-based and Remote Sensing Data (Case Study: Lake Urima Basin). *Watershed Engineering and Management*, 13(1): 1-12. Doi:org/10. 2092/ijwmse.2020.126860.1684. (In Persian).

30- Nahavandi, N. and Ahmadian, A., 2019. Dynamic Analysis of Water Demand; Case Study of Qom City. *Iran-Water Resources Research*, *15*(1), 372–377.

31- Oliver, J. E., 1980. Monthly Precipitation Distribution: A Comparative Index. *Professional Geographer*, 32, 300-309. http://dx.oi.org/10.1111/j.0033-0124.1980.00 300.x.

32- Pei, F., Wu, C., Liu, X., Li, X., Yang, K., Zhou, Y., Wang, K., Xu, L. and Xia, G., 2018. Monitoring the vegetation activity in China using vegetation health indices. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248(17), 215–227. doi. rg/10.1016/j.agrformet.2017.10.001.

33- Paroon, S., Yavari, G. and Rezazadeh, M., 2019. Climate classification of Hormozgan province using classical methods. *Geography* (Regional Planning), 8(33), pp. 115-127. doi:20.1001.1.22286462.1397.9.1.8.8 (In Persian).

34-Prajapati, V.K., Khanna, M., Singh, M., Kaur, R., Sahoo, R.N. and Singh, D.K., 2022. PCA–based composite drought index for drought assessment in Marathwada region of Maharashtra state, India. *Theoretical and Applied Climatology*. 149(4), 207–220. DOI:10.1007/ s00704-022-04044-1.

35- Qu, C., Hao, X. and Qu, J.J., 2019. Monitoring Extreme Agricultural Drought over the Horn of Africa (HOA) Using Remote Sensing Measurements. *Remote Sensing*. 11(8): 902. https://doi.org/10.3390/rs11080902

36- Raziei, T., 2022. Climate of Iran according to Köppen-Geiger, Feddema, and UNEP climate classifications. Theor. *Theoretical and Applied Climatology*, 148(3-4), 1395–1416. Doi:10.1007/s00704-022-03992-y.

37- Rhee, J., Im, J. and Carbone, G.J., 2010. Monitoring Agricultural Drought for Arid and Humid Regions Using Multi-Sensor Remote Sensing Data. *Remote Sensing of Environment*, 114(12), 2875–2887. doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.005.

38- Rafiei Sardooi, E., Bazrafshan, O. and Jamshidi, S., 2023. Modeling the water security in a watershed using the water footprint concept and water scarcity indicators. *Water Supply*, *24*(1), 235–253. https://doi.org/10.2166/ws.2023.323

39-Sepulcre-Canto, G., Horion, S., Singleton, H., Carrao, H. and Vogt, J., 2012. Development of a Combined Drought Indicator to detect agricultural drought in Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(11), 3519–3531. doi.org/10.5194/nhess-12-3519-2012.

40- Srivastava, P., Dey, S., Agarwal, P. and Basil, G., 2014. Aerosol characteristics over Delhi national capital region: a satellite view. *International Journal of Remote Sensing*, *35*(13), pp.5036-5052.https://doi.org/10.1080/01431161 .2014.934404

41- Taheri Qazvini, A. and Carrion, D. A., 2023. Spatiotemporal Drought Analysis Application Implemented in the Google Earth Engine and Applied to Iran as a Case Study. *Remote Sensing Journal*. 2023, 15, p:26. 2218. https://doi.org/ 10.3390/rs15092218.

42- Taheri Dehkordi, A., Valadan Zoej, M. J., Ghasemi, H., Jafari, M. and Mehran, A., 2022. Monitoring Long-Term Spatiotemporal Changes in Iran Surface Waters Using Landsat Imagery. *Remote Sensing*, *14* (18). https://doi.org/10.3390/rs14184491

43- Yang, M., Xiao, W., Zhao, Y., Li, B., Wang, Y., Yang, H. and Hou, B., 2018. The applicability of A Modified Palmer Drought Severity Index on Agricultural Drought Evaluation in the North China. *MATEC Web of Conferences(International Symposium on Water System Operations (ISWSO 2018),* 246. P:1-7. https://doi.org/10.1051/matecconf /201824602002.

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 1, Spring 2026, p. 133-155

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

Review Paper

EXTENDED ABSTRACT

Novel Applications of Artificial Intelligence in Environmental Pollution Control and Mitigation

F. Kafi[1] and E. Yousefi[2]*

1-PhD Student in Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran

2- Corresponding Author, Associate Professor, Department of Environmental Engineering and Member of the Research Group on Drought and Climate Change, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran (e_yusefi_31@birjand.ac.ir).*

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 25 November 2024
Revised: 22 May 2025
Accepted: 08 June 2025
Available online: 05 May 2026

Keywords: Artificial Neural Networks, Intelligent Control, Environmental Pollutants, Machine Learning, Multi-objective Optimization, Wastewater Treatment.

TO CITE THIS ARTICLE:

Kafi, F., Yousefi, E. 2026. 'Novel Applications of Artificial Intelligence in Environmental Pollution Control and Mitigation', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(1), pp. 133-155. doi: 10.22055/jise.2025.48384.2142.

Abstract

Over the past few decades, due to human activities, industrialization and urbanization, air pollution and increased waste generation have become a life-threatening factor in many countries around the world. The detection and treatment of pollution, due to technological advances, represent some of the most important challenges facing the world today. The rapid increase in the quantity and complexity of data generated daily in the field of environmental science and engineering requires advances in data analysis. Advanced data analysis approaches, such as machine learning, have become essential tools for uncovering hidden patterns or inferring correlations. A number of artificial intelligence approaches study the nonlinear behavior between inputs and outputs in chemical and biological processes, from predictive models to emerging optimization and control algorithms for pollutant removal processes and intelligent control systems. In the present study, the characteristics, advantages and limitations of artificial intelligence methods, including single and hybrid artificial intelligence methods, were investigated for environmental cleanup. In summary, the aim of the present study is to investigate different artificial neural networks in the wastewater treatment process to predict the efficiency of pollutant removal, evaluate the use of fuzzy logic for intelligent control of the aerobic stage of the wastewater treatment process, soft sensors with the help of artificial intelligence for accurate estimation of measurement parameters in wastewater treatment plants, and design of monitoring and early warning systems for aquatic and atmospheric environments, artificial intelligence modeling of solid waste generation, recycling and reduction of solid waste. The results of this study showed that modeling complex environmental problems using artificial intelligence technologies has become common in the environmental field, especially in wastewater treatment. Artificial intelligence technologies are widely used in dealing with problems related to wastewater, air pollution, and solid waste, and have bright future horizons.

Introduction

In the past decade, due to human activities, industrialization and urbanization, air and increased production have become an important factor of life in much of the world. Pollutants can even indirectly affect citizens, for example, by infiltrating agricultural food crops or even affecting livelihoods and well-being in cities (Wang et al., 2019; Ercilla-Montserrat et al., 2018). Environmental pollution has become a major concern for society, prompting strict requirements and regulations for wastewater treatment, air pollutants, and solid waste, and the need for further improvement in this area (Kannangara et al., 2018). Also, the amount of air pollutants has increased between 2018 and 2023, which is perhaps the main reason for this increase in population, increasing industries, and of course, increasing human and industrial activities (Kafi et al., 2024). Due to all these facts and risks, urgent solutions are necessary to implement pollution reduction measures (Li & Yi, 2020). Detection and treatment due to technological advances represent some of the most important challenges facing the world today. The rapid increase in the quantity and complexity of data generated daily in the field of environmental science and engineering requires advances in data analysis and analysis. Advanced data analysis and analysis, such as machine learning, have become tools for creating hidden patterns or inferring correlations. Synthetic technology methods study the nonlinear behavior of inputs and outputs in chemical and biological theories from emerging optimization and control algorithms to pollutant removal processes and intelligent control systems..

Methodology

In this study, the characteristics, advantages and limitations of artificial intelligence methods, including single and hybrid artificial intelligence methods, were investigated for environmental cleanup. In summary, the aim of the present study is to investigate different artificial neural networks in the wastewater treatment process to predict the efficiency of pollutant removal, evaluate the use of fuzzy logic for intelligent control of the aerobic stage of the wastewater treatment process, soft sensors with the help of artificial intelligence for accurate estimation of measurement parameters in wastewater treatment plants, and design of monitoring and early warning systems for aquatic and atmospheric environments, artificial intelligence modeling of solid waste generation, recycling and solid waste reduction

Results and Discusspn

Results of this study The results showed that modeling complex environmental problems using AI technologies has become popular in the environmental field, especially in wastewater treatment. AI technologies are widely used in dealing with problems related to wastewater, air pollution, as well as solid waste, and have bright future horizons. Many approaches have also proven practical applications of AI in water application, air quality monitoring, industrial waste management including solid, electronic, toxic and hazardous waste control, etc. One of the notable developments in the past decades was the popularity of AI technologies in the field of environmental pollution control, which are considered as attractive and efficient alternative methods to deal with the complexities of uncertain, interactive and dynamic environmental problems. Among all these technologies, various types of ANN are the most widely used AI technologies, because they are much easier to implement. However, the performance of artificial neural networks is limited due to their relatively poor repeatability. In air pollution control, AI models are potential, effective and powerful tools for modeling and analyzing pollutant levels related to environmental pollution (Shams et al., 2021). Therefore, it is recommended to develop various AI algorithms for predicting ambient air pollution, as it is useful for government officials, decision makers and the general public in terms of environmental, health and economic objectives. In industrial waste, AI methods show superior performance under optimal conditions when applied to recycled construction waste materials. In the renewable energy sector, AI is also an effective optimization tool of production chains to optimize and improve decision-making, which reduces energy costs (Rentsch et al., 2015). In modern cities, solid waste from construction activities has been associated with a huge volume of aggregate concrete. Salimbahrami and Shakeri (2021) used ANN and Support Vector Machine (SVM) method to obtain the compressive strength of recycled concrete

Conclusions

The results of the study showed that modeling complex environmental problems using artificial intelligence technologies has become common in the field of environment, especially in wastewater treatment. Artificial intelligence technologies have been widely used in dealing with wastewater, air pollution, and solid waste. Methods such as artificial intelligence technologies for wastewater treatment, intelligent control of wastewater treatment, and soft sensor technologies for wastewater treatment play a leading role in modeling, optimization, prediction, and control. Artificial intelligence technology is also used to warn the aquatic environment and assess water quality in rivers, lakes, oceans, and groundwater, estimate air pollutants, predict solid waste generation, and recycle and reduce solid waste. Therefore, artificial intelligence has many applications in the control and management of environmental pollution. Different types of applications of artificial intelligence in the water sector are also classified as predictive models, water resources management and optimization, decision support, and management evaluation. Challenges and implications for AI development, research, and policy are largely focused on ethical and environmental dimensions, and often on providing principles rather than practical implementation. The research highlights two important challenges—practical and conceptual—that need to be addressed to foster sustainable AI.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

Data Availability Statement: All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution

First Author: Fatemeh Kafi, Data analysis and article writing.

Second Author: Elham Yousefi, Check the results and article writing.

Acknowledgements

We would like to thank the University of Birjand for its moral support in preparing and completing the scientific database.

References

1- Ercilla-Montserrat, M., Mu~noz, P., Montero, J.I., Gabarrell, X., Rieradevall, J., 2018. A study on air quality and heavy metals content of urban food produced in a Mediterranean city (Barcelona). J. *Clean. Prod*. 195, 385e395. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.183.

2- Kafi, F., Yousefi, E., Ehteram, M. and Ashrafi, K., 2024. Monitoring Air Pollution Using Sentinel-5 Satellite Imagery: A Case Study of Razavi and South Khorasan Provinces. *Sustainable Earth Trends*, *4*(4), pp.41-55. Doi: 10.48308/set.2024.236905.1067.

3- Kannangara, M., Dua, R., Ahmadi, L. and Bensebaa, F., 2018. Modeling and prediction of regional municipal solid waste generation and diversion in Canada using machine learning approaches. *Waste management*, *74*, pp.3-15. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.057.

4- Li, W. and Yi, P., 2020. Assessment of city sustainability—Coupling coordinated development among economy, society and environment. *Journal of Cleaner Production*, *256*, p.120453. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120453.

5- Rentsch, R., Heinzel, C. and Brinksmeier, E., 2015. Artificial intelligence for an energy and resource efficient manufacturing chain design and operation. *Procedia CIRP*, *33*, pp.139-144. https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.026.

6- Salimbahrami, S.R. and Shakeri, R., 2021. Experimental investigation and comparative machine-learning prediction of compressive strength of recycled aggregate concrete. Soft Computing, 25(2), pp.919-932. https://doi.org/10.1007/s00500-021-05571-1.

7- Shams, S.R., Jahani, A., Kalantary, S., Moeinaddini, M. and Khorasani, N., 2021. Artificial intelligence accuracy assessment in NO2 concentration forecasting of metropolises air. *Scientific Reports*, *11*(1), p.1805. https://doi.org/10.1038/s41598-021-81455-6.

8- Wang, B., Hong, G., Qin, T., Fan, W.R. and Yuan, X.C., 2019. Factors governing the willingness to pay for air pollution treatment: A case study in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Journal of cleaner production*, *235*, pp.1304-1314. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.046.

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۹، شماره‌ی۱، بهار ۱۴۰۵، مقاله مروری، ص. ۱۵۵-۱۳۳

کاربردهای نوین هوش مصنوعی در کنترل و کاهش آلودگی‌های محیط زیستی

فاطمه کافی[۱] و الهام یوسفی[۲*]

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

۲*- نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم مهندسی محیط زیست و عضو گروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران (e_yusefi_31@birjand.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۵ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۸ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵

چکیده

طی چند دهه گذشته، به‌دلیل فعالیت‌های انسانی، صنعتی شدن و شهرنشینی، آلودگی هوا و افزایش تولید زباله به یک عامل تهدید کننده زندگی در بسیاری از کشورهای جهان تبدیل‌شده است. شناسایی و درمان آلودگی به‌دلیل پیشرفت‌های تکنولوژیکی، برخی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی جهان امروز را نشان می‌دهد. افزایش سریع در کمیت و پیچیدگی داده‌هایی که روزانه در زمینه علوم و مهندسی محیط‌زیست تولید می‌شوند، نیازمند پیشرفت در تجزیه‌وتحلیل داده‌ها است. رویکردهای پیشرفته تجزیه‌وتحلیل داده‌ها، مانند یادگیری ماشین، به ابزاری ضروری برای آشکار کردن الگوهای پنهان یا استنتاج همبستگی‌هایی تبدیل‌شده‌اند. تعدادی از رویکردهای هوش مصنوعی، با رفتار غیرخطی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها در فرایندهای شیمیایی و بیولوژیکی ازنظر مدل‌های پیش‌بینی به الگوریتم‌های بهینه‌سازی و کنترل نوظهور فرایندهای حذف آلاینده‌ها و سیستم‌های کنترل هوشمند را مطالعه می‌کنند. در پژوهش حاضر برای پاک‌سازی محیط‌زیست ویژگی‌ها، مزایا و محدودیت‌های روش‌های هوش مصنوعی، ازجمله روش‌های هوش مصنوعی منفرد و ترکیبی، بررسی شد. به‌طور خلاصه هدف از پژوهش حاضر بررسی شبکه‌های عصبی مصنوعی مختلف در فرایند تصفیه فاضلاب برای پیش‌بینی راندمان حذف آلاینده‌ها، ارزیابی استفاده از منطق فازی برای کنترل هوشمند مرحله هوازی فرایند تصفیه فاضلاب، حسگرهای نرم با کمک هوش مصنوعی برای برآورد دقیق پارامترهای اندازه‌گیری در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و طراحی سیستم‌های نظارت و هشدار اولیه برای محیط‌های آبی و جوی، مدل‌سازی هوش مصنوعی تولید زباله‌های جامد، بازیافت و کاهش زباله‌های جامد است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که مدل‌سازی مشکلات پیچیده زیست‌محیطی، با استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی در زمینه محیط‌زیست، به‌ویژه در تصفیه فاضلاب رایج شده است. فناوری‌های هوش مصنوعی به‌طور گسترده‌ای در برخورد با مشکلات مرتبط با فاضلاب، آلودگی هوا و همچنین زباله‌های جامد به‌کار گرفته می‌شوند و افق‌های روشنی در آینده دارند.

کلیدواژه‌ها: شبکه‌های عصبی مصنوعی، کنترل هوشمند، آلاینده‌های محیطی، یادگیری ماشین، بهینه‌سازی چند هدفه، تصفیه فاضلاب.

مقدمه

آلودگی هوا در حال تبدیل‌شدن به یک مشکل عمده بهداشتی است که میلیون‌ها نفر را در سراسر جهان تحت تأثیر قرار می‌دهد. برخی گزارش‌ها ادعا می‌کنند که ۴/۲ میلیون مرگ به‌دلیل تأثیر آلودگی هوای بیرون در سال ۲۰۱۵ نسبت داده‌شده است (Cohen et al., 2017; United Nations, 2018). آلاینده‌ها حتی می‌توانند به‌طور غیرمستقیم بر شهروندان تأثیر بگذارند، به‌عنوان مثال، در محصولات غذایی کشاورزی نفوذ کنند یا حتی بر معیشت و رفاه در شهرها تأثیر بگذارند (Wang et al., 2019). آلودگی محیط‌زیست به دغدغه اصلی جامعه تبدیل‌شده است و الزامات و مقررات سخت‌گیرانه برای تصفیه فاضلاب، آلاینده‌های هوا و پسماندهای جامد و نیاز به بهبود بیشتر در این زمینه را تحریک کرده‌اند (Kannangara et al., 2018). همچنین میزان آلاینده‌های هوا در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ افزایش‌یافته است که شاید اصلی‌ترین دلیل آن را می‌توان افزایش جمعیت، افزایش صنایع و البته افزایش فعالیت‌های انسانی و صنعتی دانست (Kafi et al., 2024). به دلیل تمام این حقایق و خطرات، راه‌کارهای فوری برای اجرای اقدامات کاهش آلودگی ضروری است (Li and Yi, 2020).

هوش مصنوعی به‌عنوان یک فناوری نوظهور، پتانسیل بالایی برای حل این مشکل دارد. یکی از برجسته‌ترین پیشرفت‌های جامعه علمی که تقریباً همه را به خود جلب کرده است ظهور هوش مصنوعی (Artificial intelligence) است. در دهه ۱۹۹۰، فناوری هوش مصنوعی به‌سرعت توسعه یافت و بسیاری از روش‌های هوش مصنوعی در حال ظهور و توسعه هستند. پیشرفت سریع و همگرایی پیشگامانه هوش مصنوعی تحولات عمیقی را در حوزه‌های مختلف ازجمله پایداری محیطی، تغییرات آب‌وهوا و توسعه شهری ایجاد کرده است. این افزایش منجر به ظهور شهرهای زیست‌محیطی هوشمندتر شده است، جایی که هوش مصنوعی در مرکز توجه قرار می‌گیرد و توجه قابل‌توجهی را به خود جلب می‌کند. در این زمینه، هوش مصنوعی آماده ارائه راه‌حل‌های نوآورانه برای چالش‌های زیست‌محیطی فزاینده در برابر شهرهای هوشمنداست.

هوش مصنوعی این پتانسیل را دارد که راه‌هایی را برای بهبود بهره‌وری منابع، کاهش مصرف انرژی، ساده‌سازی مدیریت زباله،

DOI: 10.22055/jise.2025.48384.2142

بهبود مدیریت حمل‌ونقل، حفظ تنوع زیستی و کاهش اثرات زیست‌محیطی باز کند. این پیشرفت‌ها قدرت تغییر شکل چشم‌انداز توسعه شهری را در پاسخ به موج فزاینده شهرنشینی و پیچیدگی فزاینده تخریب اکولوژیکی، تبدیل شهرها به قطب‌های هوشمندی، پایداری و آگاهی زیست‌محیطی دارند (Bibri et al., 2024). فناوری‌های هوش مصنوعی عمدتاً به ANN (Artificial networks neural)، ماشین بردار پشتیبانی (Support Vector Machine)، الگوریتم ژنتیک (Algorithm Genetic) و فازی اشاره دارد. منطق (Fuzzy logic) در کشاورزی، آب‌وهوا، مالی، مهندسی، امنیت، آموزش، پزشکی، فناوری نانو و رشته‌های مختلف به‌کار گرفته‌شده است (Wang et al., 2018; Zhang et al., 2019). با این‌حال، اکثر کنترل‌های آلودگی محیطی با مجموعه‌ای از عوامل با ویژگی‌های غیرخطی، متغیر بازمان، از منابع متعدد و اهداف متعدد مرتبط هستند که منجر به مشکلاتی در دست‌یابی به بهینه‌سازی عوامل تأثیرگذار و عملکرد مطلوب سیستم می‌شود (Abiodun et al., 2018). در حال حاضر، مطالعه‌های متعددی بر کاربرد روش‌های آماری و روش‌های تحلیل داده‌های چند متغیره در این موضوع، مانند رگرسیون خطی چندگانه (multiple linear regression) Dieguez-Santana Liu et al (2019)، روش‌شناسی سطح پاسخ (response surface methodology) Suárez-escobar et al (۲۰۱۶)، رگرسیون حداقل مربعات جزئی (partial least squares regression) Ferreira et al (2017) تأکید کرده‌اند. باتوجه‌به اهمیت محیط‌زیست تاکنون مطالعه‌های بسیاری در این زمینه انجام‌شده است که به برخی از این مطالعه‌ها اشاره می‌شود. Chen et al (2023) به بررسی راه‌حل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای تغییرات آب‌وهوا پرداختند. نتایج نشان داد که تولید هوشمند می‌تواند مصرف انرژی، ضایعات و انتشار کربن را ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش دهد و به‌ویژه مصرف انرژی در ساختمان‌ها را ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش دهد. حدود ۷۰ درصد صنعت گاز طبیعی جهان از فناوری‌های هوش مصنوعی برای افزایش دقت و قابلیت اطمینان پیش‌بینی‌های آب‌وهوا استفاده می‌کند. Wang et al (2023) نقش فناوری‌های هوش مصنوعی در صنعت ساختمان با استفاده از مفهوم دلفی-- ANP (analytic network process) TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) هیبریدیMCDM (Multi-Criteria Decision-Making) در محیط فازی بررسی کردند. نتایج نهایی از ANP نشان داد که عوامل فن‌آوری مهم‌ترین و به دنبال آن عوامل محیطی هستند که به‌شدت بر محیط هوش مصنوعی تأثیر می‌گذارند. علاوه بر این، TOPSISرباتیک و اتوماسیون را به‌عنوان بهترین جایگزین هوش مصنوعی در بین سه گزینه شناسایی کرد و به دنبال آن مدل‌سازی اطلاعات ساختمان(Building Information Modeling) قرار گرفت، درحالی‌که بینایی کامپیوتری کمترین اولویت را در بین لیست داشت.

Gautam et al (2023) مروری بر کنترل و کاهش آلودگی خاک توسط فلزات سنگین با تأکید بر هوش مصنوعی انجام دادند. در این بررسی، استفاده از روش‌های میکروبی و هوش مصنوعی یا یادگیری ماشینی با پیشرفت‌های اخیر به‌منظور شناسایی منابع، مشخص‌سازی، کمی سازی و کاهش آلاینده‌های خاک از محیط‌زیست برای افزایش پایداری به‌طور جامع موردبررسی قرارگرفته است. این بینش‌های جدیدی را در مورد روش‌هایی برای اصلاح خاک ایجاد می‌کند که زمان و هزینه تصفیه خاک را کاهش می‌دهد.

Fan et al (2018) در بررسی خود اشاره کردند که مدل‌های GA-ANN و (Particle Swarm Optimization) ANN-PSO با مقدار R2 بالاتر و میانگین خطای کوچک‌تر، پیش‌بینی‌های دقیق‌تری نسبت به RSME (Root Mean Square Error) برای برآورد بازده حذف آلاینده‌های مختلف ارائه می‌دهند. از سوی دیگر، فناوری‌های هوش مصنوعی با روش‌های مدل‌سازی مکانیزم مرسوم متفاوت هستند، زیرا آن‌ها اجازه حذف فرمول‌های پیچیده ریاضی و اطلاعات دقیق در مورد سیستم را می‌دهند که شامل روابط بین ورودی‌ها و خروجی‌های متناظر بدون ازدست‌دادن دقت است (Kalogirou, 2003).

تعداد زیادی از مطالعه‌ها نشان داده‌اند که فناوری‌های هوش مصنوعی دستیارهای خوبی برای کنترل آلودگی محیطی در فاضلاب، Huang et al (2015)، آلودگی هوا He et al (2017) و زباله‌های جامد Genuino et al (2017) هستند. در همین حال گزارش‌شده است که برخی مطالعه‌ها نیز در مورد تغییرات آب‌وهوایی Chang et al (2014)، Kashiwao et al (2017)، Zhang et al (2019) و سایر زمینه‌های زیست‌محیطی مانند شبیه‌سازی پویایی پوشش گیاهی Da Rocha et al (2018) انجام‌شده است.

در سال‌های اخیر، مطالعه‌های متعددی به بررسی کاربردهای مختلف روش‌های هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک و منطق فازی در حوزه محیط‌زیست پرداخته‌اند. با این‌حال، هنوز بسیاری از جنبه‌های این حوزه ناشناخته باقی‌مانده است. در این پژوهش، با تمرکز بر روش‌های نوین هوش مصنوعی، به بررسی کاربردهای این فناوری در کنترل آلودگی فاضلاب، هوا و خاک پرداخته‌شده است. هدف اصلی این پژوهش، ارائه یک مرور جامع بر مطالعه‌های اخیر در زمینه کاربردهای هوش مصنوعی در زمینه آلودگی‌های محیط زیستی و شناسایی روندهای نوظهور در این حوزه است.

روش‌های هوش مصنوعی برای کنترل آلودگی محیط‌زیست

به‌طورکلی، مدل‌سازی‌های هوش مصنوعی با استفاده از ابزارهای نرم‌افزاری یعنی (MATLAB) و (NeuroSolutions) که زبان C++، جاوا، پایتون یا سایر زبان های برنامه نویسی را

پشتیبانی می‌کنند، پیاده‌سازی می‌شوند Barzegar et al (2018). در میان این نرم‌افزارها، متلب موردقبول‌ترین نرم‌افزار است زیرا جعبه‌ابزارهای آماده آن برای مبتدیانی که مستقیماً در زمینه هوش مصنوعی کار نمی‌کنند، مانند محققان محیط‌زیست، بسیار راحت و قابل‌استفاده است (Barzegar et al., 2018). درخت طبقه‌بندی نیز جزو فناوری‌های هوش مصنوعی است که به‌طور گسترده در زمینه محیط‌زیست کاربرد دارد.

شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)

شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌طور گسترده به‌عنوان رویکردهایی برای پیش‌بینی، طبقه‌بندی و بهینه‌سازی در زمینه‌های مختلف به‌دلیل ظرفیت قابل‌توجه آن‌ها برای ثبت رفتار غیرخطی بین متغیرهای مستقل و وابسته بر اساس داده‌های تاریخی با استفاده از یک الگوریتم آموزشی کاربردی استفاده می‌شوند (Qaidi and Vafaei, 2016). چندین طبقه‌بندی مختلف از شبکه‌های عصبی مصنوعی وجود دارد و روی انواع معمولی پیکربندی‌هایی تمرکز دارد که در کارهای تحقیقاتی کنترل‌های محیطی، مانند شبکه‌های عصبی پیش‌خور، به‌ویژه شبکه‌های پرسپترون چندلایه (Multilayer Perceptron Networks) و شبکه‌های عصبی تابع پایه شعاعی (Radial Basis Function Neural Network) استفاده‌شده‌اند. Jahani و Siri (2021) به بررسی اثر پوشش گیاهی شهری در کاهش آلودگی صوتی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. نمونه‌گیری شدت صوت در ۱۰۰ ایستگاه در بوستان‌ها و معابر مناطق دو و پنج شهر تهران انجام شد.

برای مدل‌سازی میزان کاهش شدت صوت در دیوار صوتی گیاهی از روش مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی و با استفاده از نه متغیر پوشش گیاهی انجام‌شده است. بر اساس نتایج آنالیز حساسیت مدل، عرض دیوار، میانگین ارتفاع درختان و میانگین قطر تاج درختچه‌ها با ضریب اثرگذاری ۰/۷۲، ۰/۴۴ و ۰/۱۵، به‌ترتیب بیشترین تأثیر را در کاهش شدت صوت در دیوارهای صوتی گیاهی شهری از خود نشان می‌دهند مدل ارائه‌شده در این پژوهش به‌عنوان یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری در طراحی مهندسی دیوارهای صوتی گیاهی در شهرها شناخته‌شده است به‌طوری‌که امکان پیش‌بینی راندمان این دیوارها را با توجه به متغیرهای ساختاری آن‌ها به‌خوبی فراهم می‌کند.

شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (Multi Layer Perceptron neural network)

یکی از ساده‌ترین و شناخته‌شده‌ترین نوع شبکه‌های عصبی مصنوعی است. ساختار MLPNN که شامل لایه ورودی، لایه پنهان و لایه خروجی است، تأثیر به‌سزایی در قابلیت پیش‌بینی دارد. پارامترهای مستقل و وابسته به‌ترتیب تعداد نورون‌ها را در لایه ورودی و خروجی تعیین می‌کنند. اعداد نورون‌ها در لایه پنهان معمولاً از طریق روش با استفاده از مشاهده آزمون‌وخطا تعیین می‌شوند، نه اینکه در ابتدا مشخص شوند (Zonouz et al., 2016). ناکافی بودن نورون‌های لایه پنهان، یادگیری کامل قوانین داده‌ها را برای شبکه دشوار می‌کند و مشکلاتی را ایجاد می‌کند. با این‌حال، نورون‌های بیش‌ازحد، ممکن است درنتیجه درجات آزادی اضافی، منجر به‌تناسب بیش‌ازحد شوند. به‌طور معمول، مدل MLPNN با تعداد نورون‌های کمتری در لایه پنهان شروع می‌شود و سپس تعداد نورون‌ها در فرایند آموزش با تنظیم تعداد نورون‌ها به‌روز می‌شود، تاکنون هیچ روش سیستماتیکی برای تعریف تعداد بهینه نورون‌ها وجود ندارد (Bahrami et al., 2016).

لایه پنهان بر اساس نورون‌ها و وزن‌های خاص موجود در هر لایه و همچنین الگوریتم آموزشی مناسب، یک MLPNN به‌خوبی آموزش‌دیده قادر به ایجاد اصل برای ردیابی ورودی‌های غیرخطی است.

Mahmoudzadeh et al (2023) کاربرد شبکهٔ عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی در ارزیابی آلودگی هوای کلان‌شهر تبریز را بررسی کردند. پژوهش حاضر سعی دارد با استفاده از متغیرهای ورودی (فاصله از مراکز صنعتی، رطوبت، دما، تراکم جمعیت، فاصله از مراکز تجاری، فاصله از ایستگاه‌های اتوبوس، فاصله از مراکز آموزشی، تغییرات پوشش گیاهی، فاصله از آزادراه‌ها، تراکم ساختمانی، جهت باد، دی‌اکسید کربن و مونوکسید کربن) به ارزیابی آلودگی هوا با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی در کلان‌شهر تبریز بپردازد.

در پژوهش حاضر سعی گردید متغیرهای مستقل مؤثر در توزیع احتمال آلایندگی در دو مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) و رگرسیون خطی در ارتباط گذاشته شود. نتایج نشان می‌دهد که عمده‌ترین آلاینده‌ها بیشتر مربوط به ذرات معلق (PM_{10})، CO_2، SO_2 و NO_x است. پراکندگی ذرات معلق در هوا بیشتر براثر تردد وسایط نقلیه، فعالیت‌های صنعتی، احتراق سوخت موتورهای دیزل و ساخت‌وساز بی‌رویه و نیاز به تولید برق بیشتر است. فعالیت‌های نیروگاه‌های حرارتی، پالایشگاه تبریز و سیستم‌های گرمایشی خانگی و تجاری درون‌شهری نیز ازجمله عوامل تولیدکننده SO_2 بوده و بیشترین تولید CO_2 مربوط به سوخت خودروهای بنزین‌سوز است.

شبکه عصبی تابع پایه شعاعی (RBFNN)

RBFNN نوع دیگری از شبکه عصبی است که بر توابع پایه شعاعی (RBF) به‌عنوان توابع فعال‌سازی متکی است (Nandagopal et al., 2017). در مقایسه با MLPNN، RBFNN به‌دلیل توانایی آن در ترسیم اصول باتحمل بالای نویزهای ورودی و یادگیری آنلاین، به‌عنوان یک مدل ANN برتر شناخته‌شده است، حتی اگر داده‌های بیشتری برای به دست آوردن نتایج قابل‌اعتمادتر موردنیاز باشد (Zhu et al., 2017). ازیک‌طرف، یک RBFNN یکی از شبکه‌های عصبی پیش‌خور است که بر اساس یادگیری نظارت‌شده مشابه MLPNN است. از

DOI: 10.22055/jise.2025.48384.2142

سوی دیگر، همچنین یک ترکیب خطی وزنی از RBF است که معمولاً شامل سه‌لایه مختلف است، یعنی لایه ورودی، لایه RBF گاوسی و لایه خروجی خطی که در ساختار محاسبات داخلی با MLPNN متفاوت است (Tatar et al., 2016).

تابع انتقال گاوسی که در نورون‌های لایه پنهان واحدهای به‌کار می‌رود، خروجی‌های متناسب با گستره مرکز نورون تولید می‌کند. Vosough et al (2023) به ارزیابی و پیش‌بینی میزان آلودگی ترکیبات آلی فرار در جایگاه‌های سوخت‌گیری با استفاده از مدل شبکه عصبی پرداختند.

در این پژوهش با جمع‌آوری داده‌های تجربی از سه ایستگاه در شهر زنجان و شناسایی پارامترهای تأثیرگذار، مدل‌سازی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و با دو مدل پرسپترون چندلایه و تابع پایه شعاعی انجام گرفت. نتایج و تحلیل‌های انجام‌شده در این مطالعه نشان داد که آلودگی عمده حاصل از مصرف بنزین شامل دو مرحله، یکی زمان سوخت‌گیری و دیگری بعد از سوخت بنزین است. همچنین در فصل تابستان، غلظت بیشتر از زمستان بوده و نیز این میزان از آلودگی در دو زمان صبح و عصر بیشتر مشاهده می‌شود.

ماشین بردار پشتیبانی (SVM)

به‌عنوان یک فناوری جدید یادگیری ماشین که ابتدا توسط Vapnik (۱۹۹۵) معرفی شد، SVM برای به حداقل رساندن مرز بالایی خطای تعمیم بر اساس اصل حداقل سازی ریسک ساختاریافته توسعه‌یافته است (Pai et al., 2010; Vapnik, 1995). ماشین بردار پشتیبانی می‌تواند به نتایج تعمیم خوبی در هر دوطبقه بندی و رگرسیون دست یابد، زیرا اصل همگرایی به آن توانایی بیشتری برای رگرسیون رابطه مقادیر ورودی و خروجی و به دست آوردن عملکرد رضایت‌بخش برای داده‌های ورودی جدید می‌دهد (Jaramillo et al., 2018).

اخیراً، رگرسیون بردار پشتیبان که به‌عنوان نسخه رگرسیونی SVM شناخته می‌شود، به‌عنوان یک فناوری جایگزین کارآمد برای مقابله با مشکلات رگرسیون در زمینه کنترل‌های محیطی با معرفی یک تابع تلفات انتخابی در نظر گرفته‌شده است. Bhuvaneshwari et al (2022) الگوریتم ماشین بردار پشتیبان گاوسی مبتنی بر پیش‌بینی آلودگی هوا را بررسی کردند. این مطالعه روی سیستم‌های پیش‌بینی آلودگی هوا مبتنی بر بومی‌سازی برای نظارت بر زمان واقعی شهرهای هوشمند متمرکز است. این سیستم‌ها شامل دو فاز با در نظر گرفتن پیش‌بینی منطقه ترافیک سنگین یا سبک با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان گاوسی بر اساس آلاینده‌های هوا مانند ذرات $PM_{2.5}$ ، PM_{10}، دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)، مونوکسید کربن (CO)، ازن (O3) و دی‌اکسید گوگرد (SO_2) هستند. میانگین پیش‌بینی خطا در محلی سازی گره‌ها ۹/۸۳ است که کمتر از راه‌حل‌های موجود و دقت ۹۵ درصد است.

الگوریتم‌های اکتشافی

شاخص ارزیابی، مانندRMSE و ضریب تعیین (R2)، نشان می‌دهد که روش AI منفرد می‌تواند در برخی موارد عملکرد رضایت‌بخشی داشته باشد، درحالی‌که نشان داده‌شده است که مدل‌های AI منفرد همراه با الگوریتم‌های اکتشافی می‌توانند به همگرایی سریع‌تری باقابلیت جستجوی جهانی بهتر و عملکرد تعمیم بهتر دست یابند. به‌طور خاص، الگوریتم‌های اکتشافی مختلفی را می‌توان برای به دست آوردن وزن‌ها و آستانه‌های اولیه شبکه‌های عصبی مصنوعی، تعریف مرکز تابع RBF و همچنین برای جلوگیری از خطر به دام افتادن در بهینه محلی کم‌عمق استفاده کرد. با الهام از پدیده طبیعی یا رفتار اجتماعی، الگوریتم‌های اکتشافی مانند GA، PSO، الگوریتم ایمنی (Immune Algorithm)، کلنی زنبورهای مصنوعی (Artificial Bee Colony) جایگزین مناسبی برای الگوریتم‌های سنتی مانند الگوریتم BP برای به دست آوردن راه‌حل بهینه جهانی به روشی سریع و کارآمد به‌عنوان دو الگوریتم اکتشافی محبوب در زمینه محیطی، GA و PSO مورد بحث قرار خواهند گرفت. GA یک فناوری جستجوی کلی تصادفی که توسط اصول تکامل بیولوژیکی در سیستم ژنتیکی طبیعی روشن‌شده است، برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده‌شده است (Hosseinian et al., 2016). استراتژی بهینه‌سازی کلی زیربنای روش، جمعیتی از راه‌حل‌های تصادفی نشان داده‌شده را تولید می‌کند و سپس عملگرهای ژنتیکی، مانند انتخاب، متقاطع و جهش، برای تولید یک جمعیت جدید و بهتر اعمال خواهند شد.

هر راه‌حل منفرد توسط یک تابع تناسب ارزیابی می‌شود و کل فرایند تا زمانی که همگرایی حاصل شود تکرار می‌شود (Oliveira et al., 2019). به‌طورکلی، GA در یک ANN تعبیه‌شده است تا وزن‌های اولیه، آستانه‌ها در لایه‌های مخفی و خروجی را به‌روز کند تا بر مشکل حداقل محلی غلبه کند. به‌نظر می‌رسد که GA-ANN روشی آینده‌نگر برای طراحی و انتخاب مواد کاتالیزوری ناهمگن است که در تصفیه فاضلاب و آلودگی هوا و تولید انرژی پاک استفاده می‌شود (Bahrami et al., 2016). تحقیقات اخیر همچنین نشان می‌دهد که GA قادر به تولید قوانین فازی و بهینه‌سازی توابع عضویت مجموعه‌های فازی است. ترکیب GA، ANN و منطق فازی (FL) یک رویکرد قدرتمند برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایند یکپارچه به‌ویژه برای برخی از مسائل کنترل بهینه‌سازی چندهدفه است (Huang et al., 2015).

PSO به‌عنوان یکی دیگر از روش‌های محاسباتی تکاملی که به‌طور گسترده مورداستفاده قرار می‌گیرد، این استراتژی به‌عنوان یک روش کارآمد برای بهینه‌سازی نتایج و جستجوی هوشمند به‌خوبی شناخته‌شده است (Fan et al., 2017). جمعیت اولیه PSO به‌طور تصادفی با موقعیت‌ها و سرعت‌ها تولید می‌شود و هر ذره یک راه‌حل بالقوه برای مسئله بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. سپس هر ذره با یک تابع برازش ارزیابی می‌شود، موقعیت جدیدی

باارزش تناسب بهتر انتخاب می‌شود و موقعیت ذرات با حرکت به سمت حداکثر تابع هدف به‌طور مداوم به‌روز می‌شود. درنهایت، زمانی که تعداد تکرارها به حداکثر می‌رسد (Agarwal et al., 2016). اطلاعات بیشتر PSO را می‌توان درجاهای دیگر یافت. هر دو GA و PSO از تابع تناسب برای ارزیابی راه‌حل‌ها استفاده می‌کنند و هر دو جستجوهای تصادفی را بر اساس مقادیر تناسب انجام می‌دهند، اما PSO به‌سرعت ذرات برای تکمیل فرایند جستجو با نرخ همگرایی بالاتر در مقایسه با GA بستگی دارد. از سوی دیگر، PSO فاقد تنظیم سرعت دینامیکی است که درنتیجه به دام افتادن در بهینه محلی آسان‌تر می‌شود، این امر باعث مشکلات همگرایی و دقت همگرایی پایین می‌شود. درمجموع، به‌دلیل قابلیت جستجوی جهانی خوب، استفاده از GA در تحقیقات زمینه‌های محیطی امکان‌پذیرتر به‌نظر می‌رسد. Li et al (2021) تحقیقی در مورد کاربرد الگوریتم اکتشافی در انتشار کربن ناشی از حمل‌ونقل انجام دادند. آن‌ها از چهار الگوریتم، شبکه عصبی (Back propagation)، ماشین یادگیری افراطی (Extreme Learning Machine)، الگوریتم ژنتیک شبکه عصبی بهینه‌شده (GA-BP) و الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی ماشین یادگیری افراطی (GA-ELM). برای پیش‌بینی در سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۷ استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیکی بهینه‌سازی شده با ماشین یادگیری افراطی ترکیبی (GA-ELM) دارای بالاترین درجه تناسب بین مقدار پیش‌بینی‌شده و مقدار واقعی است که بیشتر انتشار کربن الگوریتم اکتشافی را در حمل‌ونقل نشان می‌دهد.

سیستم‌های هوشمند هیبریدی

سیستم‌های هوشمند ترکیبی (مانند (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) ANFIS، FNN، GA-ANN و...) سیستم‌هایی هستند که دو یا چند فناوری هوش مصنوعی را برای غلبه بر کاستی‌های خاص در یک روش هوش مصنوعی ترکیب می‌کنند و به مزایای هم‌افزایی دست می‌یابند. برای اکثر مسائل غیرخطی پیچیده، روش‌های هوش مصنوعی نسبت به روش‌های سنتی مزایای زیادی دارند. با این‌حال، هر روش هوش مصنوعی محدودیت‌های خود را دارد که باعث دشواری دست‌یابی به نتایج مورد انتظار می‌شود. به‌عنوان‌مثال، یک MLPNN سه‌لایه دارای توانایی‌های نگاشت غیرخطی قوی است و می‌تواند هر توابع پیوسته غیرخطی را تقریب بزند. با این‌حال، نرخ همگرایی MLPNN آهسته است و خطر بیش‌ازحد برازش و حداقل محلی وجود دارد. استفاده از دو یا چند فناوری هوش مصنوعی برای ساختن یک سیستم هیبریدی روشی مؤثر برای حل چنین مشکلاتی است. به‌عنوان‌مثال، SVM می‌تواند به بهینه‌سازی جهانی دست یابد و بیش‌ازحد برازش را در چارچوب ANN حذف کند (Tanhaei et al, 2016)، GA و PSO به‌طور گسترده برای بهینه‌سازی آستانه‌ها و وزن‌های اولیه ANN برای بهبود قابلیت اطمینان و عملکرد تعمیم آن استفاده‌شده‌اند (Hosseinian et al., 2016). سیستم ترکیبی کلاسیک سیستم عصبی – فازی است، انواع دیگر سیستم‌های ترکیبی، مانند الگوریتم‌های اکتشافی همراه با انواع مختلف شبکه‌های عصبی مصنوعی، مدل‌های SVM یا سیستم‌های فازی، ابزارهای کارآمدی برای حل مسائل پیچیده در نظر گرفته می‌شوند. ازآنجایی‌که سیستم عصبی – فازی به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان یک ابزار بهینه‌سازی در تصفیه فاضلاب زمینه‌هایی مانند پیش‌بینی، کنترل، داده‌کاوی و حذف نویز استفاده می‌شود.

بر اساس سیستم استنتاج فازی، یک ANFIS یک شبکه عصبی پیش‌خور همراه با FL برای نشان دادن رفتار غیرخطی در سیستم‌های پیچیده است، به‌عبارت‌دیگر، یک سیستم استنتاج فازی (fuzzy inference system) که در پیکربندی شبکه عصبی تطبیقی استفاده می‌شود. فناوری‌های ترکیبی که الگوریتم‌های یادگیری ماشین را با روش‌های آماری و تجزیه‌وتحلیل داده‌های چندمتغیره ترکیب می‌کنند، در حال حاضر در حال ظهور هستند. شایان ذکر است که سیستم‌های هوش مصنوعی ترکیبی را نمی‌توان در همه شرایط به‌کار گرفت. هر چه رویکرد یکپارچه‌تر باشد، ساختار مدل پیچیده‌تر است. ازاین‌رو، توسعه سیستم‌های هوش مصنوعی ترکیبی دشوارتر خواهد بود. در این راستا، زمانی که یک روش هوش مصنوعی برای توصیف روابط ورودی – خروجی با نتایج رضایت‌بخش کافی باشد، روش‌های ترکیبی ترجیح داده نمی‌شوند.

Liu et al (2019) یک مدل ترکیبی هوشمند برای پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های هوا در پکن چین انجام دادند. در این مطالعه، یک مدل ترکیبی جدید، یعنی EWT (Empirical Wavelet Transform) -MAEGA-NARX (Nonlinear Autoregressive exogenous) که شبکه‌های عصبی EWT، MAEGA و NARX را ترکیب می‌کند، برای پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های هوا در چند مرحله ارائه شده است. چهار نوع آلاینده هوا حاوی $PM_{2.5}$، SO_2، NO_2و COدر پکن، چین برای تأیید صحت مدل پیشنهادی انتخاب‌شده‌اند. برای بررسی عملکرد پیش‌بینی مدل پیشنهادی، مدل‌های دیگری به‌عنوان مدل‌های مقایسه انتخاب شدند که شامل مدلVMD-MAEGA-NARX، مدل EWT-MAEGA-SVM، مدل MAEGA-NARX، مدل EWT-NARX و مدل EWT-ARIMA-NARX است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که مدل EWT-MAEGA-NARX می‌تواند به پیش‌بینی رضایت‌بخشی در پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های هوا دست یابد.

DOI: 10.22055/jise.2025.48384.2142

جدول ۱- مقایسه نمونه مطالعه‌های انجام‌شده در حوزه آلودگی‌های محیط‌زیست با هوش مصنوعی

Table 1- Comparison of studies conducted in the field of environmental pollution with artificial intelligence

Authors	Year	Subject	Results
Jahani and Siri	۲۰۲۱	Investigating the effect of urban vegetation on reducing noise pollution using artificial neural networks	Based on the results of the model sensitivity analysis, wall width, average tree height, and average shrub crown diameter with impact coefficients of 0/72, 0/44, and 0/15, respectively, have the greatest impact on reducing sound intensity in urban green sound walls.
Mahmoudzadeh et al	۲۰۲۳	Study of two neural network models: multilayer perceptron (MLP) and linear regression in assessing air pollution in Tabriz metropolis	The results show that the major pollutants are mostly particulate matter (PM_{10}), CO_2, .SO_2, and NO_x
Vosough et al	۲۰۲۳	Evaluation and prediction of volatile organic compound pollution levels at gas stations using two artificial neural network models: multilayer perceptron and radial basis function	The results and analyses conducted in this study showed that the major pollution resulting from gasoline consumption consists of two stages, one during refueling and the other after gasoline consumption.
Bhuvaneshwari et al	۲۰۲۲	Investigating the Gaussian Support Vector Machine Algorithm Based on Air Pollution Prediction	The results of this research showed that the average prediction error is 9/83, which is lower than existing solutions and the accuracy is 95 Percentage.
Li et al	۲۰۲۱	Application of heuristic algorithms (neural network (BP), extreme learning machine (ELM), genetic algorithm optimized neural network (GA-BP)) in carbon emissions from transportation	The results show that the genetic algorithm optimized with hybrid extreme learning machine (GA-ELM) has the highest degree of fit between the predicted value and the actual value, which represents the most carbon emission of the heuristic algorithm in transportation.
Liu et al	۲۰۱۹	Investigation of an intelligent hybrid model (EWT-MAEGA-NARX which combines EWT, MAEGA and NARX neural networks) for predicting air pollutant concentrations	Experimental results show that the EWT-MAEGA-NARX model can achieve satisfactory prediction in predicting air pollutant concentrations.

فناوری‌های هوش مصنوعی برای کنترل‌های محیطی

فناوری‌های هوش مصنوعی به‌طور گسترده در برخورد با فاضلاب، آلودگی هوا و همچنین زباله‌های جامد به‌کار گرفته‌شده‌اند و نقش پیشرو در مدل‌سازی، بهینه‌سازی، پیش‌بینی و کنترل دارند. بسیاری از مطالعه‌های مربوط به کنترل‌های محیطی در دهه گذشته به‌سرعت در حال افزایش هستند. مدل‌سازی مشکلات پیچیده زیست‌محیطی با استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی در زمینه محیط‌زیست، به‌ویژه در تصفیه فاضلاب رایج شده است.

فناوری‌های هوش مصنوعی برای تصفیه فاضلاب

کاربرد فناوری‌های هوش مصنوعی در فرایند تصفیه فاضلاب بر حذف آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین، رنگ‌ها، آلاینده‌های آلی پایدار، مواد مغذی و سایر آلاینده‌ها و جذب رنگ‌های مختلف از محلول متمرکز است (Qaidi and Vafaei, 2016). با این‌حال، کار اصلی به‌تدریج به کنترل‌های پیشرفته فرایند دفع فاضلاب و سنسورهای نرم برای پارامترهای اندازه‌گیری سخت تغییر می‌کند. مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایندهای حذف آلاینده در طول دهه گذشته، فناوری‌های هوش مصنوعی به‌ویژه شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌عنوان ابزارهایی

با کارایی بالا برای مدل‌سازی حذف آلاینده‌ها و بهینه‌سازی در فاضلاب ازآنجایی‌که توانایی‌های خودآموزی و خود انطباق دارند، ظاهر شده‌اند. فناوری‌های هوش مصنوعی، به‌ویژه شبکه‌های عصبی مصنوعی، به‌طور گسترده در این زمینه، عمدتاً حذف رنگ‌ها و فلزات سنگین به‌کار گرفته می‌شوند. قابل‌توجه است که غلظت اولیه آلاینده‌های هدف (رنگ‌ها و فلزات سنگین)، pH، زمان تماس و دوز جاذب‌ها به‌عنوان عوامل تأثیرگذار مهم در نظر گرفته می‌شوند و همچنین به‌عنوان ورودی شبکه‌های عصبی، راندمان حذف آلاینده‌های هدف به‌عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شوند.

کنترل هوشمند تصفیه فاضلاب

مدل‌های هوش مصنوعی همراه با روش‌های کنترل خودکار فرایند تصفیه فاضلاب برای ایجاد استراتژی‌ها یا سیستم‌های کنترل هوشمند به‌طور گسترده در گزارش‌های اخیر مورد بحث قرارگرفته‌اند و اکثر آثار بر کنترل هوشمند مرحله هوازی فرایند تصفیه فاضلاب متمرکزشده‌اند تا زمان کل هوادهی و صرفه‌جویی در هزینه را کاهش دهند (Asadi et al., 2017). کنترل آنلاین DO یکی از بخش‌های ضروری کنترل هوشمند است. قابل‌ذکر است که سیستم‌های کنترل هوشمند مبتنی بر FL مانند کنترل‌کننده‌های FNN و ANFIS توجه روزافزونی را به خود جلب کرده‌اند و به‌طور گسترده برای دست‌یابی به کیفیت پساب بهتر و مقرون‌به‌صرفه‌تر در فرایندهای تصفیه بیولوژیکی فاضلاب مورداستفاده قرارگرفته‌اند (Zhang et al., 2016).

فناوری‌های حسگر نرم برای WWTPs (wastewater treatment process)

در دهه‌های اخیر، توسعه فناوری‌های زیست‌محیطی مقررات و الزامات سخت‌گیرانه‌تری را برای تصفیه فاضلاب ترویج کرده است (Olsson, 2012). به‌عنوان‌مثال، تجدید حذف آمونیاک در حال حاضر به حذف نیتروژن کل در چین تغییر می‌کند. ازاین‌رو، تمایل شدیدی برای به‌روزرسانی فرایند تصفیه موجود و ارتقای تجهیزات پشتیبانی برای مطابقت با این مقررات سخت وجود دارد. از سوی دیگر، استراتژی‌های سنتی برای مشکلات پایش روی آنالیز آنلاین و آفلاین پارامترهای اولیه مانند غلظت نیترات‌ها، آمونیاک، اکسیژن شیمیایی و بیوشیمیایی و همچنین سایر متغیرهای اندازه‌گیری مانند سطح لجن تکیه‌دارند. با این‌حال، در دسترس بودن مقادیر پارامتر به‌دست‌آمده از طریق تحلیل آنلاین همیشه به سرمایه‌گذاری‌های پرهزینه و هزینه‌های تعمیر و نگهداری مرتبط است.

کاربردهای هشدار و ارزیابی اولیه زیست‌محیطی

هشدار و ارزیابی اولیه محیط آبی

به‌عنوان یک ابزار مدل‌سازی و پیش‌بینی جدید و کارآمد، فناوری هوش مصنوعی برای هشدار محیط آبی و ارزیابی کیفیت آب در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، اقیانوس‌ها و همچنین آب‌های زیرزمینی محبوبیت پیداکرده است. آخرین مطالعه‌ها روی نقشه‌برداری خطر حساسیت سیل با استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی مبتنی بر داده تأکید کرده‌اند (Khosravi et al., 2018; Zhao et al., 2019). شناسایی مناطق مستعد سیل، ارزیابی توزیع و بزرگی سیل جنبه‌های حیاتی برای پیشنهاد استراتژی‌های مناسب کاهش به‌موقع و مدیریت مخاطرات سیل است. اگرچه متغیرهای ژئومحیطی متعدد، شرایط آب‌وهوایی متفاوت و عوامل انسانی، پیش‌بینی وقوع مکان‌های سیل ناگهانی را دشوار می‌سازد، نقشه‌برداری حساسیت سیل را می‌توان با کمک SVM، DT (Decision Tree)، ANFIS و سایر مدل‌های هوش مصنوعی انجام داد. کارایی این مدل‌ها به‌طورکلی توسط منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (Receiver Operating Characteristic) و سطح زیر منحنی (area under ROC curve) ارزیابی می‌شود. به‌طور خاص، منحنی ROC نموداری است که ظرفیت یک مدل آماری انجام‌شده برای پیش‌بینی دقیق وقوع یک رویداد سیل را نشان می‌دهد. مقادیر بالاتر AUC نشان‌دهنده توانایی‌های پیش‌بینی بهتر مدل‌های حساس است (Chen et al., 2017).

تجزیه‌وتحلیل و پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها در محیط اتمسفر

گزارش‌شده است که مجموعه‌ای از مدل‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی غلظت‌های مختلف آلاینده استفاده‌شده‌اند و سیستم‌های نظارت بر کیفیت هوا و هشدار اولیه را ایجاد کردند (Wang et al., 2018; Zhou et al., 2014). مقادیر زیادی از داده‌های تاریخی برای توسعه مدل‌های هوش مصنوعی برای تجزیه‌وتحلیل و پیش‌بینی غلظت‌های مختلف آلاینده‌های جوی موردنیاز است. مجموعه داده‌های مشاهده‌ای بلندمدت با دوره‌ای بیش از یک سال برای آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش مدل‌های هوش مصنوعی اساسی هستند (Zhou et al., 2019). باتوجه به اینکه غلظت آلاینده‌های هوا دارای ویژگی‌های متغیر زمانی و عدم قطعیت قوی است، مدل‌های گزارش‌شده عموماً بیش از هشت عامل تأثیرگذار (مانند عوامل هواشناسی و غلظت‌های تاریخی آلاینده‌های مختلف) را به‌عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شوند.

فناوری‌های هوش مصنوعی برای مدیریت زباله جامد

بهبود خدمات مدیریت پسماند جامد و به حداقل رساندن زباله‌های جامد جنبه‌های ضروری برای شهرهای پایدار و قابل سکونت است، زیرا خطر زباله‌های جامد می‌تواند بر کیفیت هوا و امنیت خاک تأثیر بگذارد (Zhou et al., 2015). روش‌های هوش مصنوعی به‌عنوان یک ابزار مدل‌سازی و پیش‌بینی برای کمک به شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مورداستفاده قرار می‌گیرند. آخرین کاربردها، عمدتاً بر

DOI: 10.22055/jise.2025.48384.2142

مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایند بازیافت بر پیش‌بینی تولید زباله جامد تأکیددارند.

پیش‌بینی تولید زباله جامد

برآورد دقیق تولید زباله جامد کلیدی برای برنامه‌ریزی مدیریت پسماند و طراحی بیشتر مشوق‌ها برای تشویق کمپوست‌سازی و بازیافت است. روش‌های آماری سنتی و توصیفی برای تخمین مقادیر زباله جامد عموماً میانگین سرانه تولید زباله و رشد جمعیت را به‌عنوان شاخص‌های اصلی انتخاب می‌کنند. به‌نظر می‌رسد که امروزه این روش‌ها به‌دلیل ویژگی‌های دینامیکی پیچیده‌تر فرایند تولید زباله جامد غیرعملی هستند. تحلیل رگرسیون و مدل جریان مواد به‌عنوان جایگزین به‌طور گسترده برای حل این مشکل استفاده می‌شود. با این‌حال، متغیرهای ورودی در تحلیل رگرسیون باید الزامات سخت‌گیرانه‌ای ازجمله واریانس ثابت، استقلال و نرمال بودن خطاها را برآورده کنند و کاربرد آن را در تخمین مقادیر زباله‌های جامد محدود کنند (Abbasi and El Hanandeh, 2016) امکان‌سنجی مدل جریان مواد نیز محدود است، زیرا این روش قادر به پیش‌بینی زباله‌های جمع‌آوری‌شده بدون داده‌های موجود از نرخ بازیافت و زباله نیست.

بازیافت و کاهش مواد زائد جامد

افزایش میزان زباله‌های جامد مختلف و مشکلات زیست‌محیطی قابل‌توجه ناشی از تصفیه (ازجمله فرایندهای حرارتی، مکانیکی، بیوشیمیایی و...) باعث تحریک یک سری فناوری‌های جدید (مانند گازسازی، احتراق مشترک و...) برای بازیافت و... شده است. با کاهش مواد زائد جامد از طریق این فناوری‌ها، می‌توان آنزیم‌ها، سوخت‌ها و سایر منابع ارزشمند را از زباله‌های جامد خاص استخراج کرد و میزان زباله‌های جامد را کاهش داد. به‌عنوان ابزارهای مدل‌سازی و پیش‌بینی غیرخطی امیدوارکننده، مدل‌های تحلیل و پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی بازیافت زباله‌های جامد به‌کار گرفته می‌شوند (Genuino et al., 2017).

کاربرد هوش مصنوعی در کنترل و مدیریت آلودگی

در این بخش، باتوجه به‌کاربردهای آلودگی و هوش مصنوعی، روی کاربردهای هوش مصنوعی در زمینه‌های مدیریت منابع آب، کنترل و مدیریت آلودگی هوا و زباله‌های صنعتی بحث می‌شود.

موج توسعه و کاربرد هوش مصنوعی در بخش آب در اواخر قرن بیستم با مدل‌های آماری آموزش داده‌شده با "داده‌های بزرگ" آغاز شد. این دسته‌بندی‌ها عبارت‌اند از مدل‌های پیش‌بینی، پشتیبانی مدیریت منابع آب، بهینه‌سازی و پشتیبانی و مدیریت تصمیم‌گیری. درحالی‌که استفاده از هوش مصنوعی جدید نیست، تأثیر فعلی آن بر تحقیق و عمل بی‌سابقه است.

امروزه، سیستم هوشمند می‌تواند پایگاه دانش اصلی را از طریق فرایند استنتاج توسط داده‌های بزرگ «یادگیری ماشینی» افزایش دهد و سیستم هوش مصنوعی را می‌توان با آموزش مدل‌ها «آموزش داده» مدل‌های تجربی روی‌داده‌های بزرگ نتایج نمونه یا سیگنال‌های پیش‌بینی کننده را متوجه می‌شوند و بازخورد پشتیبانی تصمیم را به مدیریت ارائه می‌کنند. این بخش ارزیابی اولیه و طبقه‌بندی انواع مختلف کاربردهای هوش مصنوعی در بخش آب را ارائه می‌دهد.

مدل‌های پیش‌بینی

به‌طورکلی، دو رویکرد برای ساخت مدل‌های پیش‌بینی سطح آب وجود دارد: برنامه‌ریزی مجدد عددی مبتنی بر فرایند و داده محور (همچنین به‌عنوان مدل‌سازی مبتنی بر یادگیری ماشین نیز شناخته می‌شود). مدل‌های مبتنی بر فرایند (HEC-RAS، MIKE-11، MIKE21 و...) اغلب یک نتیجه دقیق ارائه می‌دهند و به‌طور کامل ماهیت پدیده‌های فیزیکی را توصیف می‌کنند؛ اما آن‌ها ازنظر محاسباتی گران هستند، به انواع مختلفی از داده‌ها نیاز دارند و در صورت تغییرات نامنظم قادر به توسعه سیستم‌های پیش‌بینی نیستند. راه دیگر برای حل محدودیت‌های مدل‌های فوق استفاده از روش‌هایی برای پردازش کلان داده‌ها است. مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر داده‌های بزرگ با استفاده از یادگیری ماشین (Machine Learning) باهدف نشان دادن روابط بین ویژگی‌ها یا اطلاعات پنهان در داده‌ها هستند. آن‌ها معمولاً سریع‌تر و آسان‌تر ساخته می‌شوند و بنابراین برای پیش‌بینی با استفاده از هوش مصنوعی مفید هستند.

روش‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی سری‌های زمانی غیرخطی استفاده‌شده است. مدل‌های ترکیبی که روابط خطی را با مدل‌سازی آماری و غیر خطی‌ها با ML ترکیب می‌کنند، نتایج بهتری ارائه می‌دهند و پیش‌بینی‌های سری داده‌ها را در پیش‌بینی بهبود می‌بخشند (Pannakkong et al., 2017; Temur et al., 2019). موفقیت مدل‌های ترکیبی در زمینه‌های مختلف، بسیاری از محققین را ترغیب می‌کند تا از این رویکرد جدید برای پیش‌بینی آینده آب استفاده کنند. نمونه دیگری از پیش‌بینی مطالعه‌ای است که عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین را بررسی می‌کند (Alizadeh et al., 2018). در این مورد، هوش مصنوعی در پیش‌بینی پارامترهای کیفیت آب ثبت‌شده ساعتی در خلیج هیلو، هاوایی، ایالات‌متحده، همراه با داده‌های دیگر از رودخانه Wailuku استفاده شد. چندین روش ML برای بررسی اثرات جریان رودخانه بر پارامترهای کیفیت آب از زمان حال تا دو ساعت قبل استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای کیفی آب را می‌توان از چند ساعت قبل به‌طور دقیق پیش‌بینی کرد که می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را برای مدیریت و پایش زیست‌محیطی در مناطق ساحلی ارائه دهد.

مدیریت منابع آب

در زمینه نیاز به مدیریت مؤثر منابع آب، هوش مصنوعی عمدتاً برای وظایف تصمیم‌گیری استفاده می‌شود: شرکت‌های آب می‌توانند اطلاعات و داده‌های موجود را برای تصمیم‌گیری بهتر به حداکثر برسانند. درعین‌حال، هوش مصنوعی ارائه خدمات را افزایش می‌دهد. بهینه‌سازی سرمایه‌گذاری؛ و هزینه‌های عملیاتی را کاهش می‌دهد. نشان داده‌شده است که استفاده از هوش مصنوعی در مدیریت منابع آب راه را برای سیستم‌های توزیع آب و صرفه‌جویی در آب هموار می‌کند، اگرچه نیاز به مدیریت مؤثر آب و منابع آن در طول سال‌ها تغییر نکرده است. در کشورهای توسعه‌یافته، دانشمندان دریافته‌اند که باید رویکرد متفاوتی را برای طراحی و حفظ سیستم‌های مدیریت آب موجود انتخاب کنند. با به‌کارگیری فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی در مدیریت منابع آب، دانشمندان اکنون یک منبع آب پایدار برای آن‌ها ایجاد می‌کنند. محققان و برنامه‌ریزان در حال آزمایش الگوریتم‌ها و برنامه‌هایی برای ساخت نیروگاه‌های آبی هستند که نه تنها می‌توانند آماری به‌روز از وضعیت فعلی منبع ارائه دهند، بلکه به ساخت مدل‌هایی برای آینده نیز کمک می‌کنند. برنامه‌های نرم‌افزاری با حسگرها و هوش مصنوعی، عملیات آب را به‌صورت پویا و هوشمند استراتژی می‌کنند. مدل‌های پیش‌بینی کننده استفاده از آب در آینده، حسگرهای روباتیک در تصفیه‌خانه‌های آب و زنجیره‌های بلوکی برای انجام تراکنش‌های مالی، همگی با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی مناسب قابل تحقق هستند. برنامه‌ریزان طرح‌هایی مبتنی بر هوش مصنوعی ایجاد می‌کنند که سازمان‌های دولتی و شرکت‌های آب را قادر می‌سازد تا ازدست‌دادن و سوءاستفاده از آب را در زمان واقعی درک کنند، توزیع جامع شبکه‌ها را طراحی و اجرا کنند، درحالی‌که صرفه‌جویی در هزینه‌ها، حداکثر بازیابی درآمد را به‌عنوان برنامه مالی محقق می‌کنند (Prince et al., 2022).

بهینه‌سازی، پشتیبانی تصمیم‌گیری و مدیریت

این بخش ممکن است با مطالب دیگر هم‌پوشانی داشته باشد، اما به‌دلیل تمرکز خاص خود، سزاوار بررسی جداگانه است. هوش مصنوعی برای آب، این بخش روی تشخیص رویداد و بهینه‌سازی هشدار اولیه، پشتیبانی تصمیم‌گیری و مدیریت تمرکز دارد. نمونه‌ای که در آن هوش مصنوعی برای تشخیص آلودگی تصادفی آب استفاده می‌شود در مقاله توسط Arnon et al (2019) یافت می‌شود. این بر آلودگی آب از اجزای آلی متمرکز است که به‌طور سنتی با استنباط نمونه‌های آب «معمول» از اندازه‌گیری‌های شاخص یا پارامترهای فیزیکی و شیمیایی جایگزین آب که احتمالاً آلوده نیستند، شناسایی می‌شود. سپس انحراف از این نمونه‌های طبیعی به‌عنوان نشانه‌ای از آلودگی در نظر گرفته می‌شود (Ramona et al., 2012).

هوش مصنوعی ابزارهای مدل‌سازی بهینه‌سازی کلی دارد. قادر به شناسایی سیستماتیک تصمیمات برنامه‌ریزی و مدیریت در بسیاری از زمینه‌های بهینه‌سازی است. پیشرفت در هوش مصنوعی می‌تواند تمایز بین بهینه‌سازی و برنامه‌های مورد بحث در پارادایم دیگر را به چالش بکشد (Labadie, 2013). در مطالعه Strobl و Robillar (2006)، آن‌ها سودمندی روش‌های هوش مصنوعی را در طراحی شبکه‌های پایش کیفیت آب موردبررسی قراردادند: یک مشکل بهینه‌سازی کلاسیک اما پیچیده که نیاز به سنسورهای بهینه‌سازی پیکربندی برای اطمینان از حداکثر استخراج اطلاعات از داده‌های کیفیت آب جمع‌آوری‌شده دارد. در این مطالعه، نویسندگان روش‌های بالقوه کاربردی هوش مصنوعی، ازجمله سیستم‌های خبره، شبکه‌های عصبی مصنوعی، الگوریتم‌های ژنتیک و سیستم‌های FL را بررسی کردند. این بررسی تعداد نسبتاً زیادی از برنامه‌های مشابه را پوشش می‌دهد که از هوش مصنوعی برای طراحی سیستم یا شبکه آب استفاده می‌کنند. هوش مصنوعی از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه استفاده می‌کند. چندهدفه، مبادلات تحلیل می‌شوند. بهینه‌سازی چندهدفه (در مورد دو یا سه هدف) و بهینه‌سازی چندهدفه (در مورد بیش از سه هدف) از روش‌های محاسبات ژنتیکی برای ایجاد جایگزین‌هایی برای مشکلات استفاده می‌کند (Kasprzyk et al., 2013).

هوش مصنوعی در کنترل و مدیریت آلودگی هوا

در مدیریت و کاهش آلودگی محیط‌زیست، سطوح مختلفی برای حل مشکلات آن موردتوجه قرارگرفته است. هوش مصنوعی که شامل ML، ANN و یادگیری عمیق می‌شود، یک فناوری پیشرفته است که از سخت‌افزار برای توانمندسازی انسان‌ها با توانایی درک صحیح داده‌های خارجی استفاده می‌کند (Davenport et al., 2020). اتصالات ورودی و خروجی و همچنین رایانه‌ها برای تقلید از منطق انسانی و فرایندهای تصمیم‌گیری در هوش مصنوعی استفاده می‌شوند. یادگیری عمیق یک روش هوش مصنوعی برای استخراج بازنمایی ویژگی‌های مفید از حجم عظیم داده است (Schürholz et al., 2020). به‌طورکلی، کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت و کنترل کاهش آلودگی هوا موردبررسی قرارگرفته است. به‌خصوص فن‌آوری‌های مدرن شامل سیستم‌های خبره (Expert systems)، ANN، FL و غیره است که به‌عنوان متداول‌ترین راه‌حل‌ها موردبررسی قرار گرفتند. کاربردهای اخیر هوش مصنوعی برای کنترل زمان واقعی عملیات کاهش آلودگی ذکرشده است. بر اساس داده‌های هواشناسی، شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند اطلاعات اصلی را استخراج کرده و سطوح آلاینده هوا را با مشاهده زمانی تخمین بزند (Agarwal et al., 2020). تنوع مدل‌سازی آلودگی هوا یک نکته کلیدی برای شبیه‌سازی محیط محیطی مرتبط با شرایط هواشناسی به‌ویژه مرتبط با آلاینده‌ها است. توسعه قبلی فناوری‌های به کمک

DOI: 10.22055/jise.2025.48384.2142

هوش مصنوعی برای اهداف مهمی مانند کنترل یا مدیریت فرایندهای کاهش آلودگی موردبررسی قرار می‌گیرد (Chan and Huang, 2003). همچنین، مدل‌های ANN نیز برای مدل‌سازی سطوح آلودگی هوا باهدف پیش‌بینی مؤثر مورداستفاده قرارگرفته‌اند. به‌عنوان‌مثال، ANN می‌تواند رفتار خود را دررابطه با پارامترهای جوی یا برای مدل‌سازی ازن و غیره شبیه‌سازی کند. ANN روابط بین دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)، ازن (O_3) و شرایط هواشناسی را بررسی کرده و قابلیت‌های پیش‌بینی آن‌ها را بررسی کرده است (Karatzas and Kaltsatos, 2007). کیفیت هوا یک مسئله مهم در سراسر جهان بوده است و آلاینده‌هایی مانند SO_2، NO_2، NO، O_3 و CO اثرات قابل‌توجهی بر سلامت انسان و محیط‌زیست دارند. فناوری‌های به کمک هوش مصنوعی را می‌توان برای پیش‌بینی کیفیت هوا در شهرهای هوشمند به‌کاربرد (Schürholz et al., 2020). با استفاده از این کاربردهای گسترده، فناوری‌های به کمک هوش مصنوعی نیز می‌توانند برای کنترل شرایط محیطی مناطق هوای داخلی استفاده شوند (Saini et al., 2020). بنابراین، مدل‌های هوش مصنوعی این پتانسیل را دارند که ابزاری مؤثر، قدرتمند و مناسب برای مدل‌سازی و تحلیل سطوح آلاینده مرتبط با آلودگی محیط باشند (Shams et al., 2021).

پسماندهای صنعتی

با شروع قرن هجدهم، بخش صنعتی جوان نگرانی‌های زیادی را در مورد مدیریت زباله ایجاد کرده است. این زباله‌ها از هر مرحله از فرایند تولید، استفاده و دفع محصولات مصنوعی تولید می‌شود. در صورت عدم کنترل، این پسماندها نگرانی‌های زیست‌محیطی و بهداشتی جامعه را به همراه دارد. این بخش به بررسی روش‌های هوش مصنوعی به‌کاررفته در زباله‌های صنعتی ازجمله کنترل‌های سخت و نرم می‌پردازد. در مدیریت زباله جامد (Solid Waste Management)، چهار اصطلاح (کاهش، استفاده مجدد، بازیافت و بازیابی) به یک رویکرد منظم تبدیل شد که برای انواع مختلف زباله ازجمله زباله‌های خانگی، زباله‌های صنعتی، زباله‌های کشاورزی و غیره استفاده می‌شود. تخلیه زباله اما به حداکثر رساندن ضایعات و نجات انرژی از طریق چارچوب هوشمند ترکیبی مبتنی بر هوش مصنوعی (AI-based Hybridized Intelligent Framework) ایجادشده است – پلت فرمی که زنجیره مدیریت زباله را برای تمام بخش‌های صنعت پوشش می‌دهد (Yu et al., 2021). روش AIHIF با استفاده از یادگیری ماشین و تئوری گراف در مقایسه با روش‌های دیگر، فاصله کوتاه و عملکرد خوب را برای جمع‌آوری زباله بهینه می‌کند. استفاده از AIHIF به بازیابی منابع از بخش تجارت کمک می‌کند که سرمایه‌گذاران بیشتری را جذب می‌کند و یک‌روند صنعت زیست‌محیطی ایجاد می‌کند. برای ضایعات لاستیک از صنعت خودرو، Yi و Li (2020) یک برنامه چندهدفه برای راه‌اندازی مدل بازیافت زباله تایر ارائه کردند. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که هزینه کار، انتشار کربن و فاصله حمل‌ونقل مشتری می‌تواند در یک محدوده مشخص سازگار باشد. بخش لجستیک زباله تایر می‌تواند به گسترش هم‌زمان سود، حفاظت از محیط‌زیست و سطح خدمات مشتری پی ببرد. در طرف مقابل تخلیه پسماندهای صنعتی، مواد پسماند صنعتی استفاده مجدد و محصولات جانبی آن‌ها به کاهش نیاز به مواد خام جدید و مناطق قطع برای دفن زباله کمک می‌کند. در سال‌های اخیر، نرخ بازیافت زباله‌های صنعتی روبه افزایش بوده است، با این‌حال، هزینه جداسازی برای فرایند بازیافت باعث ایجاد مشکلات بزرگی شده است. Erkinay Ozdemir et al (2021) هوش مصنوعی کاربردی را به‌عنوان بهبود ساختاری موضوع بدون برنامه‌ریزی پیشنهاد کردند. فرایندهای طبقه‌بندی و جداسازی زباله‌های قابل بازیافت مخلوط برای تمرین بهتر در یادگیری ماشینی اعمال شد. Jian et al (2019) ابزاری برای تجزیه‌وتحلیل و انتخاب زباله‌های الکترونیکی برای بازیگران مختلف زنجیره تأمین معکوس ارائه کردند. بازیافت زباله‌های الکترونیکی و مخابراتی ترکیبی توسط Gu et al (2019) پیشنهاد شد. Nowakowski et al (2020) با پشتیبانی از اپلیکیشن اختصاصی موبایل یک پلت فرم پشتیبانی آنلاین برای بهینه‌سازی مسیر وسایل نقلیه جمع‌آوری زباله معرفی کردند. این پلتفرم مبتنی بر یک روش الگوریتم جستجوی هارمونی است که نتایج بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌های موردبررسی در مطالعه‌های قبلی ارائه می‌دهد این ویژگی‌ها برای کاهش هزینه‌های جمع‌آوری زباله‌های الکترونیکی و افزایش سطح جمع‌آوری زباله‌های الکترونیکی ضروری است. برای مدیریت بازیافت زباله در یک پارک صنعتی، Liao و Wang (2020) ارتقای هوشمند شبکه مدیریت بازیافت زباله‌های صنعتی را در نظر می‌گیرند. فناوری پیش‌بینی و تشخیص تصویر هوش مصنوعی برای ارتقای منطقی سیستم مدیریت برنامه‌ریزی زباله‌های صنعتی به سبک قدیمی و یک مرکز طبقه‌بندی هوشمند برای زباله‌های صنعتی طراحی‌شده است. نتیجه هر دو مزیت اقتصادی و زیست‌محیطی مدل آزمایش را در نظر می‌گیرد. Elhedhli و Merrick (2012) از یک اکتشافی لاگرانژی برای مدل‌سازی رابطه بین انتشار CO_2 و وزن وسایل نقلیه استفاده کردند. هنگام ارزیابی با ظرفیت متغیر و ویژگی‌های هزینه، الگوریتم پیشنهادی به راه‌حل‌هایی در یک درصد از حد بهینه دست می‌یابد. نتایج مشخص می‌کند که هزینه‌های انتشار CO_2 می‌تواند پیکربندی بهینه زنجیره تأمین را تغییر دهد. در عصر بحران سوخت‌های فسیلی، اتلاف انرژی برای مصرف برق، گرما، سوخت‌های زیستی و غیره در نظر گرفته می‌شود. Huang و Koroteev (2021) چارچوب تحلیلی پیش‌بینی کننده مبتنی بر یادگیری ماشین (Machine Learning-Driven Predictive Analytic Framework) را برای آماده‌سازی برای برنامه‌ریزی

مدیریت انرژی و ضایعات پیشنهاد کردند و یک ANN نیز برای پیش‌بینی مقدار ضایعات استفاده شد. بر اساس واقعیت بازارهای انرژی پایدار فرار، یک الگوریتم یادگیری ماشین پیشرفته برای بهبود جمع‌آوری زباله در هزینه‌های انرژی استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مقادیر زباله تجزیه‌وتحلیل شده تا ۹۰ درصد کاهش می‌یابد. دفن زباله به میزان ۴۰ درصد و حمل‌ونقل به میزان ۱۵ درصد که با موفقیت مدل‌های زباله کارآمد را تولید می‌کند. زباله‌های خطرناک یک مشکل بزرگ در بخش صنعت است.

Hua et al (2020) برای کمک به مردم برای جلوگیری از اثرات منفی زباله‌های خطرناک، ایجاد یک شبکه عصبی کانولوشنال برای شناسایی زباله‌های خطرناک از منابع قابل بازیافت این مدل قادر است مواد مختلف قابل بازیافت را بادقت ۹۰ درصد دسته‌بندی کند که به محافظت از همه افراد کمک می‌کند. در بخش تصفیه پسماند جامد، شیرابه‌های محل دفن زباله نه تنها آب‌های سطحی بلکه آب‌های زیرزمینی را نیز آلوده می‌کند. برای شبیه‌سازی و ارزیابی اثرات شیرابه بر آب‌های زیرزمینی، Bagheri et al (2017) مدل FL و شبکه عصبی را معرفی کردند. نتایج نشان داد که مولیبدن، سدیم و اکسیژن موردنیاز شیمیایی سه متغیر کلیدی در شبیه‌سازی نفوذ شیرابه به آب‌های زیرزمینی هستند. برای ضایعات ایجادشده در بخش صنعت فلز، ضایعات محلول کارخانه‌های آبکاری شامل سیانید بسیار سمی است که باعث ایجاد نگرانی‌های تمیز کردن الکتریکی، تمیز کردن قلیایی، تمیز کردن اسیدی و شستشو می‌شود. برای حل مشکل، سیستم خبره فازی برای تنظیم مجدد فرایند شیمیایی دسته‌ای توسعه داده‌شده است. درنتیجه، محلول‌های سیانید – ضایعات از طریق عملیات کارخانه که منجر به استراتژی‌های کمینه‌سازی سیانید می‌شود، کاهش یافت (Chan and Huang, 2003). در بخش صنعت نفت، برای تشخیص و هشدار اولیه نشت نفت در منطقه دریایی، چارچوب ANN تصاویر رادار دیافراگم مصنوعی (Synthetic Aperture Radar) به‌عنوان تصاویر رادار دیافراگم مصنوعی بدون تأثیر شرایط آب‌وهوایی محلی و ابری استفاده شد. نتیجه نشان داد که ANN ابزاری بهینه برای داده‌های غیرخطی هم‌زمان یک فضای ورودی چندبعدی در طبقه‌بندی نشت نفت است (Kubat et al., 1998; Topouzelis, 2003).

چالش‌ها و محدودیت‌های هوش مصنوعی

چالش‌ها و پیامدها برای توسعه، تحقیقات و سیاست‌های هوش مصنوعی پایدار عمدتاً بر ابعاد اخلاقی و زیست‌محیطی تأکید و اغلب بر ارائه اصول به‌جای اجرای عملی تمرکز دارد. دو چالش مهم که باید برای تقویت هوش مصنوعی پایدار موردتوجه قرار گیرد، عبارت‌اند از (Shuford, 2024):

الف) مفاهیم عملی

نیاز مبرمی به مقررات و استانداردهای صنعتی برای هدایت شیوه‌های هوش مصنوعی پایدار وجود دارد. یک مانع کلیدی، فقدان داده‌ها و فرآیندهای مستندسازی جامع در طول توسعه و استقرار هوش مصنوعی است که ناشی از آگاهی محدود در میان جوامع توسعه‌دهنده هوش مصنوعی و محدودیت‌های سازمانی است. مجموعه معیارهای پایداری ما منبع ارزشمندی را برای شرکت‌های درگیر در توسعه و استقرار هوش مصنوعی ارائه می‌کند و آگاهی از تأثیرات پایداری گسترده‌تر را تقویت می‌کند. ابتکارات خط‌مشی، استانداردها و برنامه‌های صدور گواهینامه به‌طور فزاینده‌ای جنبه‌های پایداری را ادغام می‌کنند که نشان‌دهنده اهمیت تغییر رویه‌ها و اجرای الزامات گزارش اجباری است. رویکردهای سیاست جامع باید به تمام ابعاد پایداری بپردازد تا تأثیرات رو به رشد سیستم‌های هوش مصنوعی را به سمت منافع اجتماعی و زیست‌محیطی هدایت کند.

ب) مفاهیم مفهومی

برای درک پیوستگی و درهم تنیدگی تأثیرات پایداری در سیستم‌های هوش مصنوعی به تحقیق و تأمل نیاز است. سیستم‌های هوش مصنوعی که موجودیت‌های اجتماعی–فنی–اکولوژیکی هستند، پیچیدگی و وابستگی متقابل را در سطوح تأثیر نشان می‌دهند. دست‌یابی به یک رویکرد ارزیابی جامع مستلزم درک عمیق‌تر این وابستگی‌های متقابل است. به‌عنوان‌مثال، درحالی‌که تغییر محاسبات به مراکز داده ممکن است پایداری اکولوژیکی را افزایش دهد، همچنین می‌تواند مشکلات تمرکز بازار را تشدید کند. تحقیقات آینده باید این مبادلات و هم‌افزایی را به‌طور جامع با در نظر گرفتن چارچوب اجتماعی–فنی–اکولوژیکی بررسی کند. با این‌حال، تحقیقات بیشتری برای ادغام کامل ملاحظات اجتماعی–اکولوژیکی در چارچوب ارزیابی موردنیاز است. علاوه بر توصیف تأثیرات وابسته به یکدیگر، نیاز به فرآیندهای مذاکره اجتماعی برای پرداختن به مبادلات ذاتی پایداری هوش مصنوعی وجود دارد. همان‌طور که سیستم‌های هوش مصنوعی فراگیرتر می‌شوند، درک و پیمایش این مبادلات بسیار مهم خواهد بود. این امر مستلزم افزایش بحث انتقادی، حس سازمانی و گفتگوی اجتماعی است. تعریف اولویت‌ها و تخصیص توجه به اثرات مختلف پایداری، تحقیقات مداوم و مشارکت اجتماعی را ضروری می‌کند.

نتیجه‌گیری

جوامع انسانی با چالش‌های زیست‌محیطی جهانی روبه‌رو هستند که برای حل و نیل به اهداف توسعه پایدار برنامه توسعه سازمان ملل متحد نیازمند رویکردهای متعددی است. سازمان ملل متحد نشان می‌دهد که ۴/۲ میلیارد نفر (معادل ۵۵ درصد از جمعیت جهان) در

DOI: 10.22055/jise.2025.48384.2142

شهرهای بزرگ زندگی می‌کنند (United Nations, 2018). تخمین زده می‌شود که تا سال ۲۰۵۰، دو سوم جمعیت جهان در شهرها زندگی می‌کنند. رشد سریع جمعیت شهری به معنای تأثیرات شدید بر محیط‌زیست و بار سنگین بر زیرساخت‌ها و طبیعت است. انتظار می‌رود میزان کل زباله از حدود دو میلیارد تن در سال ۲۰۱۶ به بیش از چهار میلیارد تن در سال ۲۰۵۰ افزایش یابد. این‌یکی از مشکلات جدی دولت‌ها خواهد بود که باید نگران آن باشند. تا سال ۲۰۵۰، ۶۸ درصد از جمعیت جهان در نواحی شهری زندگی خواهند کرد و زیرساخت‌های موجود شهر را بیش‌ازحد بارگذاری می‌کنند (United Nations, 2018). اصول و رویکردهای جهانی و مبتنی بر فناوری که در آن‌ها AI ابزارهای مهم و مؤثر برای حل این چالش‌ها هستند، همچنان ضروری هستند. بسیاری از رویکردها همچنین کاربردهای عملی هوش مصنوعی را در کاربرد آب، نظارت بر کیفیت هوا، مدیریت زباله‌های صنعتی ازجمله کنترل زباله‌های جامد، الکترونیکی، سمی و خطرناک و غیره ثابت کرده‌اند. یکی از پیشرفت‌های قابل‌توجه در دهه‌های گذشته، محبوبیت فناوری‌های هوش مصنوعی در حوزه کنترل آلودگی‌های محیطی بود که به‌عنوان روش‌های جایگزین جذاب و کارآمد برای مقابله با پیچیدگی‌های مشکلات محیطی نامشخص، تعاملی و پویا در نظر گرفته‌شده است. در میان تمام این فناوری‌ها، انواع مختلف ANN پرکاربردترین فناوری‌های هوش مصنوعی هستند، زیرا پیاده‌سازی آن‌ها بسیار آسان‌تر است. با این‌حال، عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌دلیل تکرارپذیری نسبتاً ضعیف آن‌ها محدود است. در کنترل آلودگی هوا، مدل‌های هوش مصنوعی ابزارهای بالقوه، مؤثر و قدرتمندی برای مدل‌سازی و تجزیه‌وتحلیل سطوح آلاینده مرتبط با آلودگی محیط هستند (Shams et al., 2021)؛ بنابراین، توصیه می‌شود که الگوریتم‌های هوش مصنوعی مختلفی برای پیش‌بینی آلودگی هوای محیط توسعه داده شود، زیرا ازنظر اهداف زیست‌محیطی، بهداشتی و اقتصادی برای مقامات دولتی، تصمیم‌گیرندگان و عموم مردم عادی مفید است. در زباله‌های صنعتی، روش‌های هوش مصنوعی زمانی که در مواد زباله ساختمانی بازیافتی به‌کار می‌روند، عملکرد برتر را در شرایط بهینه نشان می‌دهند (Salimbahrami and Shakeri, 2021). در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر، هوش مصنوعی همچنین یک ابزار بهینه‌سازی مؤثر زنجیره‌های تولید برای بهینه‌سازی و بهبود تصمیم‌گیری است که هزینه انرژی را کاهش می‌دهد (Rentsch et al., 2015). در شهرهای مدرن، زباله‌های جامد مربوط به فعالیت‌های ساختمانی با حجم عظیمی از بتن‌های سنگدانه‌ای مرتبط بوده است. Salimbahrami و Shakeri (۲۰۲۱) از روش ANN و ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای دست‌یابی به مقاومت فشاری بتن بازیافتی استفاده کردند. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که مدل‌سازی مشکلات پیچیده زیست‌محیطی با استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی در زمینه محیط‌زیست، به‌ویژه در تصفیه فاضلاب رایج شده است. فناوری‌های هوش مصنوعی به‌طور گسترده در برخورد با فاضلاب، آلودگی هوا و همچنین زباله‌های جامد به‌کار گرفته‌شده‌اند. روش‌هایی از قبیل فناوری‌های هوش مصنوعی برای تصفیه فاضلاب، کنترل هوشمند تصفیه فاضلاب و فناوری‌های حسگر نرم برای تصفیه فاضلاب نقش پیشرو در مدل‌سازی، بهینه‌سازی، پیش‌بینی و کنترل رادارند. همچنین فناوری هوش مصنوعی برای هشدار محیط آبی و ارزیابی کیفیت آب در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، اقیانوس‌ها و همچنین آب‌های زیرزمینی، تخمین آلاینده‌های هوا، پیش‌بینی تولید زباله جامد و بازیافت و کاهش مواد زائد جامد به‌کار گرفته می‌شود؛ بنابراین هوش مصنوعی در کنترل و مدیریت آلودگی‌های محیط زیستی کاربردهای فراوانی دارند. انواع مختلف کاربردهای هوش مصنوعی در بخش آب نیز به‌صورت مدل‌های پیش‌بینی، مدیریت منابع آب و بهینه‌سازی، پشتیبانی تصمیم‌گیری و مدیریت ارزیابی و طبقه‌بندی می‌شوند. چالش‌ها و پیامدها برای توسعه، تحقیقات و سیاست‌های هوش مصنوعی عمدتاً بر ابعاد اخلاقی و زیست‌محیطی و اغلب بر ارائه اصول به‌جای اجرای عملی تمرکز دارد. تحقیقات دو چالش مهم مفاهیم عملی و مفهومی را نشان می‌دهد که باید برای تقویت هوش مصنوعی پایدار موردتوجه قرار گیرد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسندگان هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: فاطمه کافی، تجزیه و تحلیل داده ها و نگارش مقاله
نویسنده دوم: الهام یوسفی روبیات، بررسی نتایج و نگارش مقاله.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از دانشگاه بیرجند بابت حمایت معنوی جهت تهیه و تکمیل پایگاه اطلاعات علمی تشکر می‌گردد.

References

1- Abbasi, M. and El Hanandeh, A., 2016. Forecasting municipal solid waste generation using artificial intelligence modelling approaches. *Waste Management*, 56, pp.13-22. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.018 .

2- Abiodun, O.I., Jantan, A., Omolara, A.E., Dada, K.V., Mohamed, N.A. and Arshad, H., 2018. State-of-the-art in artificial neural network applications: a survey. *Heliyon 4: e00938. ISSN: 2405–8440* [online]. doi: 10.1016/j.heliyon.2018. e00938 .

3- Agarwal, S., Sharma, S., Rahman, M.H., Vranckx, S., Maiheu, B., Blyth, L., Janssen, S., Gargava, P., Shukla, V.K. and Batra, S., 2020. Air quality forecasting using artificial neural networks with real time dynamic error correction in highly polluted regions. *Science of the Total Environment*, *735*, p.139454. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139454.

4- Agarwal, S., Tyagi, I., Gupta, V.K., Ghaedi, M., Masoomzade, M., Ghaedi, A.M. and Mirtamizdoust, B., 2016. RETRACTED: kinetics and thermodynamics of methyl orange adsorption from aqueous solutions—artificial *Neural Network-particle Swarm Optimization Modeling*. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.02.048.

5- Alizadeh, M.J., Kavianpour, M.R., Danesh, M., Adolf, J., Shamshirband, S. and Chau, K.W., 2018. Effect of river flow on the quality of estuarine and coastal waters using machine learning models. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, *12*(1), pp.810-823. https://doi.org/10.1080/19942060.2018.1528480.

6- Arnon, T.A., Ezra, S. and Fishbain, B., 2019. Water characterization and early contamination detection in highly varying stochastic background water, based on Machine Learning methodology for processing real-time UV-Spectrophotometry. *Water Research*, *155*, pp.333-342. https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.027.

7- Asadi, A., Verma, A., Yang, K. and Mejabi, B., 2017. Wastewater treatment aeration process optimization: A data mining approach. *Journal of Environmental Management*, *203*, pp.630-639. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.047.

8- Bagheri, M., Bazvand, A. and Ehteshami, M., 2017. Application of artificial intelligence for the management of landfill leachate penetration into groundwater, and assessment of its environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, *149*, pp.784-796. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.12.011

9- Bahrami, S., Niaei, A., Illán-Gómez, M.J., Tarjomannejad, A., Mousavi, S.M. and Albaladejo-Fuentes, V., 2017. Catalytic reduction of NO by CO over CeO2-MOx (0.25)(M= Mn, Fe and Cu) mixed oxides—Modeling and optimization of catalyst preparation by hybrid ANN-GA. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *5*(5), pp.4937-4947.https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.09.023. (In Persian)

10- Barzegar, R., Moghaddam, A.A., Deo, R., Fijani, E. and Tziritis, E., 2018. Mapping groundwater contamination risk of multiple aquifers using multi-model ensemble of machine learning algorithms. *Science of the Total Environment*, *621*, pp.697-712. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.185.

11- Bhuvaneshwari, K.S., Uma, J., Venkatachalam, K., Masud, M., Abouhawwash, M. and Logeswaran, T., 2022. Gaussian Support Vector Machine Algorithm Based Air Pollution Prediction. *Computers, Materials & Continua*, *71*(1). DOI:10.32604/cmc.2022.021477.

12- Bibri, S. E., Huang, J., Jagatheesaperumal, S. K., & Krogstie, J. (2024). The synergistic interplay of artificial intelligence and digital twin in environmentally planning sustainable smart cities: A comprehensive systematic review. *Environmental Science and Ecotechnology*, 100433. https://doi.org/10.1016/j.ese.2024.100433.

13- Chan, C.W. and Huang, G.H., 2003. Artificial intelligence for management and control of pollution minimization and mitigation processes. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *16*(2), pp.75-90. https://doi.org/10.1016/S0952-1976(03)00062-9.

14- Chang, F.J., Chung, C.H., Chen, P.A., Liu, C.W., Coynel, A. and Vachaud, G., 2014. Assessment of arsenic concentration in stream water using neuro fuzzy networks with factor analysis. *Science of the Total Environment*, *494*, pp.202-210. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.133 .

15- Chen, W., Xie, X., Wang, J., Pradhan, B., Hong, H., Bui, D.T., Duan, Z. and Ma, J., 2017. A comparative study of logistic model tree, random forest, and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility. *Catena*, *151*, pp.147-160. https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.032

16- Cohen, A.J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H.R., Frostad, J., Estep, K., Balakrishnan, K., Brunekreef, B., Dandona, L., Dandona, R. and Feigin, V., 2017. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The lancet*, *389*(10082), pp.1907-1918. http://dx.doi.org/10.1016/ S0140-6736(17)30505-6.

17- Dieguez-Santana, K., Pham-The, H., Villegas-Aguilar, P.J., Le-Thi-Thu, H., Castillo-Garit, J.A. and Casañola-Martin, G.M., 2019. Prediction of acute toxicity of phenol derivatives using multiple linear regression approach for Tetrahymena pyriformis contaminant identification in a median-size database. *Chemosphere*, *165*,pp.434-441. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.041.

18- Elhedhli, S. and Merrick, R., 2012. Green supply chain network design to reduce carbon emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *17*(5), pp.370-379. https://doi.org/10.1016/j.trd.2012.02.002.

19- Erkinay Ozdemir, M., Ali, Z., Subeshan, B. and Asmatulu, E., 2021. Applying machine learning approach in recycling. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, *23*, pp.855-871. https://doi.org/10.1007/s10163-021-01182-y.

20- Fan, M., Hu, J., Cao, R., Ruan, W. and Wei, X., 2018. A review on experimental design for pollutants removal in water treatment with the aid of artificial intelligence. *Chemosphere*, *200*, pp.330-343. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.111.

21- Fan, M., Hu, J., Cao, R., Xiong, K. and Wei, X., 2017. Modeling and prediction of copper removal from aqueous solutions by nZVI/rGO magnetic nanocomposites using ANN-GA and ANN-PSO. *Scientific reports*, *7*(1), p.18040. https://doi.org/10.1038/s41598-017-18223-y.

22- Ferreira, A.R.L., Fernandes, L.S., Cortes, R.M.V. and Pacheco, F.A.L., 2017. Assessing anthropogenic impacts on riverine ecosystems using nested partial least squares regression. *Science of the Total Environment*, *583*, pp.466-477. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.106.

23- Genuino, D.A.D., Bataller, B.G., Capareda, S.C. and De Luna, M.D.G., 2017. Application of artificial neural network in the modeling and optimization of humic acid extraction from municipal solid waste biochar. *Journal of environmental chemical engineering*, *5*(4), pp.4101-4107. https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.07.071.

24- Gu, F., Zhang, W., Guo, J. and Hall, P., 2019. Exploring “Internet+ Recycling”: Mass balance and life cycle assessment of a waste management system associated with a mobile application. *Science of the Total Environment*, *649*, pp.172-185. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.298.

25- He, J., Gong, S., Yu, Y., Yu, L., Wu, L., Mao, H., Song, C., Zhao, S., Liu, H., Li, X. and Li, R., 2017. Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014–2015 in major Chinese cities. *Environmental pollution*, *223*, pp.484-496. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.050.

26- Hoseinian, F.S., Rezai, B. and Kowsari, E., 2017. The nickel ion removal prediction model from aqueous solutions using a hybrid neural genetic algorithm. *Journal of environmental management*, *204*, pp.311-317. https:doi.org/10,1016/j.jenvman.2016,09,011. (In Persian)

27- Hua, D., Gao, J., Mayo, R., Smedley, A., Puranik, P. and Zhan, J., 2020, January. Segregating hazardous waste using deep neural networks in real-time video. In *2020 10th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)* (pp. 1016-1022). IEEE. DOI: 10.1109/CCWC47524.2020.9031194.

28- Huang, J. and Koroteev, D.D., 2021. Artificial intelligence for planning of energy and waste management. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *47*, p.101426. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101426.

29- Huang, Y.W. and Chen, M.Q., 2015. Artificial neural network modeling of thin layer drying behavior of municipal sewage sludge. *Measurement*, *73*, pp.640-648. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.06.014.

30- Jahani, A & Siri, H. (2021). The effect of urban vegetation on reducing noise pollution using artificial neural networks. *Urban Structure and Function Studies*, 27(8), 164-179. Doi: 10.22080/usfs.2021.18687.1978. (In Persian)

31- Jaramillo, F., Orchard, M., Muñoz, C., Antileo, C., Sáez, D. and Espinoza, P., 2018. On-line estimation of the aerobic phase length for partial nitrification processes in SBR based on features extraction and SVM classification. *Chemical Engineering Journal*, *331*, pp.114-123. https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.07.185 .

32- Jian, H., Xu, M. and Zhou, L., 2019. Collaborative collection effort strategies based on the "Internet+ recycling" business model. *Journal of Cleaner Production*, *241*, p.118120. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118120.

33- Kalogirou, S.A., 2003. Artificial intelligence for the modeling and control of combustion processes: a review. *Progress in Energy and Combustion Science*, *29*(6), pp.515-566. https://doi.org/10.1016/S0360-1285(03)00058-3.

34- Kannangara, M., Dua, R., Ahmadi, L. and Bensebaa, F., 2018. Modeling and prediction of regional municipal solid waste generation and diversion in Canada using machine learning approaches. *Waste Management*, *74*, pp.3-15. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105381.

35- Karatzas, K.D. and Kaltsatos, S., 2007. Air pollution modelling with the aid of computational intelligence methods in Thessaloniki, Greece. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *15*(10), pp.1310-1319. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2007.09.005.

36- Kashiwao, T., Nakayama, K., Ando, S., Ikeda, K., Lee, M. and Bahadori, A., 2017. A neural network-based local rainfall prediction system using meteorological data on the Internet: A case study using data from the Japan Meteorological Agency. *Applied Soft Computing*, *56*, pp.317-330. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.03.015.

37- Kasprzyk, J.R., Nataraj, S., Reed, P.M. and Lempert, R.J., 2013. Many objective robust decision making for complex environmental systems undergoing change. *Environmental Modelling & Software*, *42*, pp.55-71. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.12.007.

38- Khosravi, K., Panahi, M. and Tien Bui, D., 2018. Spatial prediction of groundwater spring potential mapping based on an adaptive neuro-fuzzy inference system and metaheuristic optimization. *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(9), pp.4771-4792. https://doi.org/10.5194/hess-22-4771-2018.

39- Kubat, M., Holte, R.C. and Matwin, S., 1998. Machine learning for the detection of oil spills in satellite radar images. *Machine Learning*, *30*, pp.195-215. https://doi.org/10.1023/A:1007452223027.

40- Labadie, J.W., 2013. Advances in water resources systems engineering: applications of machine learning. In *Modern Water Resources Engineering* (pp. 467-523). Totowa, NJ: Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-62703-595-8_10.

41- Li, W. and Yi, P., 2020. Assessment of city sustainability—Coupling coordinated development among economy, society and environment. *Journal of Cleaner Production*, *256*, p.120453. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120453.

42- Li, Y., Dong, H. and Lu, S., 2021. Research on application of a hybrid heuristic algorithm in transportation carbon emission. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(35), pp.48610-48627. https://doi.org/10.1007/s11356-021-14079-y.

43- Liao, B. and Wang, T., 2020. Research on industrial waste recovery network optimization: opportunities brought by artificial intelligence. *Mathematical Problems in Engineering*, *2020*(1), p.3618424. https://doi.org/10.1155/2020/3618424.

44- Liu, H., Wu, H., Lv, X., Ren, Z., Liu, M., Li, Y. and Shi, H., 2019. An intelligent hybrid model for air pollutant concentrations forecasting: Case of Beijing in China. *Sustainable Cities and Society*, *47*, p.101471. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101471.

45- Mahmoudzadeh, H., Samadi, M & Paydar, M. (2023). Application of artificial neural network and linear regression in assessing air pollution in Tabriz metropolis. *Geography and Planning*, 27(86), 167-184. 10.22034/gp.2022.51620.3003 (In Persian)

46- Nandagopal, M.G., Abraham, E. and Selvaraju, N., 2017. Advanced neural network prediction and system identification of liquid-liquid flow patterns in circular microchannels with varying angle of confluence. *Chemical Engineering Journal*, *309*, pp.850-865. https://doi.org/10.3390/ environments8110116 .

47- Nations, U. N. I. E. S. (2018). 68% of the world population projected to live in urban areas by 2050, *says UN. Department of Economic and Social Affairs*.

48- Nowakowski, P., Szwarc, K. and Boryczka, U., 2020. Combining an artificial intelligence algorithm and a novel vehicle for sustainable e-waste collection. *Science of the Total Environment*, *730*, p.138726. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138726.

49- Oliveira, V., Sousa, V. and Dias-Ferreira, C., 2019. Artificial neural network modelling of the amount of separately-collected household packaging waste. *Journal of Cleaner Production*, *210*, pp.401-409. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.063.

50- Olsson, G., 2012. ICA and me–a subjective review. *Water Research*, *46*(6), pp.1585-1624. Doi:10.1016/j.watres.2011.12.054.

51- Pai, P.F., Lin, K.P., Lin, C.S. and Chang, P.T., 2010. Time series forecasting by a seasonal support vector regression model. *Expert Systems with Applications*, *37*(6), pp.4261-4265. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.11.076.

52- Pannakkong, W., Pham, V.H. and Huynh, V.N., 2017. A novel hybridization of ARIMA, ANN, and K-Means for time series forecasting. *International Journal of Knowledge and Systems Science (IJKSS)*, *8*(4), pp.30-53. DOI: 10.4018/IJKSS.2017100103.

53- Prince, H.M., Ara, I., Shafri, H.Z.M., Hamedianfar, A., Mansor, S., Idrees, M.O., Shaharum, N.S.N. and Iqbal, M., 2022. Application of Cloud-Based Machine Learning Approach to Analyse Remotely Sensed Data for Coastal Monitoring in Bangladesh. In *Artificial Intelligence and Environmental Sustainability: Challenges and Solutions in the Era of Industry 4.0* (pp. 171-191). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1434-8_9.

54- Qaidi, A.M., Vafaei, A. (2016). Applications of artificial neural networks for absorptive removal of dyes from aqueous solution: a review. *Adv Colloid Interface Sci* 245, 20–39 . https://doi.org/10,1016/j.cis.2016,04,015.(In Persian)

55- Ramona, M., Richard, G. and David, B., 2012. Multiclass feature selection with kernel gram-matrix-based criteria. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, *23*(10), pp.1611-1623. DOI: 10.1109/TNNLS.2012.2201748.

56- Rentsch, R., Heinzel, C. and Brinksmeier, E., 2015. Artificial intelligence for an energy and resource efficient manufacturing chain design and operation. *Procedia CIRP*, *33*, pp.139-144. https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.026.

57- Da Rocha, S.J.S.S., Torres, C.M.M.E., Jacovine, L.A.G., Leite, H.G., Gelcer, E.M., Neves, K.M., Schettini, B.L.S., Villanova, P.H., da Silva, L.F., Reis, L.P. and Zanuncio, J.C., 2018. Artificial neural networks: Modeling tree survival and mortality in the Atlantic Forest biome in Brazil. *Science of the Total Environment*, *645*, pp.655-661. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.123.

58- Saini, J., Dutta, M. and Marques, G., 2020. Indoor air quality prediction systems for smart environments: A systematic review. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, *12*(5), pp.433-453. https://doi.org/10.3233/AIS-200574.

59- Salimbahrami, S.R. and Shakeri, R., 2021. Experimental investigation and comparative machine-learning prediction of compressive strength of recycled aggregate concrete. *Soft Computing*, *25*(2), pp.919-932. https://doi.org/10.1007/s00500-021-05571-1.

60- Schürholz, D., Kubler, S. and Zaslavsky, A., 2020. Artificial intelligence-enabled context-aware air quality prediction for smart cities. *Journal of Cleaner Production*, *271*, p.121941. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121941.

61- Shams, S.R., Jahani, A., Kalantary, S., Moeinaddini, M. and Khorasani, N., 2021. Artificial intelligence accuracy assessment in NO2 concentration forecasting of metropolises air. *Scientific Reports*, *11*(1), p.1805. https://doi.org/10.1038/s41598-021-81455-6.

62- Strobl, R.O. and Robillard, P.D., 2006. Artificial intelligence technologies in surface water quality monitoring. *Water International*, *31*(2), pp.198-209. https://doi.org/10.1080/02508060.2006.9709670.

63- Suárez-Escobar, A., Pataquiva-Mateus, A. and López-Vasquez, A., 2016. Electrocoagulation—photocatalytic process for the treatment of lithographic wastewater. Optimization using response surface methodology (RSM) and kinetic study. *Catalysis Today*, *266*, pp.120-125. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2015.09.016.

64- Tanhaei, B., Ayati, A., Lahtinen, M., Mahmoodzadeh Vaziri, B. and Sillanpää, M., 2016. A magnetic mesoporous chitosan based core-shells biopolymer for anionic dye adsorption: Kinetic and isothermal study and application of ANN. *Journal of Applied Polymer Science*, *133*(22). https://doi.org/10.1002/app.43466.

65- Tatar, A., Naseri, S., Bahadori, M., Hezave, A.Z., Kashiwao, T., Bahadori, A. and Darvish, H., 2016. Prediction of carbon dioxide solubility in ionic liquids using MLP and radial basis function (RBF) neural networks. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *60*, pp.151-164. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.11.002.

66- Topouzelis, K., 2003. A neural network approach to oil spill detection using SAR data. In *54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law* (pp. B-6). https://doi.org/10.2514/6.IAC-03-B.6.06.

67- United Nations, 2018. The world's cities in 2018 data booklet, economics & social affairs. in_2018_data_booklet.pdf. doi: https://doi.org/10.15407/chinesest2018.02.013 (Accessed 13 April 2020).

68- Vapnik, V., 2013. *The nature of statistical learning theory*. Springer science & business media.doi:10.1007/978-1-4757-3264-1.

69- Vosough, K., Asaadi, S., Alinejad, H., & Kahforoshan, D. (2023). Assessment and prediction of volatile organic compound pollution levels at refueling stations using a neural network model. *Journal of Farayandno, 18*(81), pp.31-45. Doi: 10.22034/farayandno.2023.1988180.1911 (In Persian)

70- Wang, J., Chitsaz, F., Derbyshire, M.K., Gonzales, N.R., Gwadz, M., Lu, S., Marchler, G.H., Song, J.S., Thanki, N., Yamashita, R.A. and Yang, M., 2023. The conserved domain database in 2023. *Nucleic Acids Research*, *51*(D1), pp.D384-D388. https://doi.org/10.1093/nar/gkac1096.

71- Wang, B. and Li, H., 2020. Multi-objective optimization model of waste tire recycling network. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 214, p. 03052). EDP Sciences. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021403052.

72- Wang, B., Hong, G., Qin, T., Fan, W.R. and Yuan, X.C., 2019. Factors governing the willingness to pay for air pollution treatment: A case study in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Journal of Cleaner Production*, *235*, pp.1304-1314. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.046.

73- Wang, C., Ye, Z., Yu, Y. and Gong, W., 2018. Estimation of bus emission models for different fuel types of buses under real conditions. *Science of the Total Environment*, *640*, pp.965-972. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.289.

74- Yu, K.H., Zhang, Y., Li, D., Montenegro-Marin, C.E. and Kumar, P.M., 2021. Environmental planning based on reduce, reuse, recycle and recover using artificial intelligence. *Environmental Impact Assessment Review*, *86*, p.106492. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106492.

75- Zhang, B., Yang, C., Zhu, H., Li, Y. and Gui, W., 2016. Evaluation strategy for the control of the copper removal process based on oxidation–reduction potential. *Chemical Engineering Journal*, *284*, pp.294-304. https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.07.094.

76- Zhang, R., Chen, Z.Y., Xu, L.J. and Ou, C.Q., 2019. Meteorological drought forecasting based on a statistical model with machine learning techniques in Shaanxi province, China. *Science of the Total Environment*, *665*, pp.338-346. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.431.

77- Zhang, R., Chen, Z.Y., Xu, L.J. and Ou, C.Q., 2019. Meteorological drought forecasting based on a statistical model with machine learning techniques in Shaanxi province, China. *Science of the Total Environment*, *665*, pp.338-346. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.431 .

78- Zhao, G., Pang, B., Xu, Z., Peng, D. and Xu, L., 2019. Assessment of urban flood susceptibility using semi-supervised machine learning model. *Science of the Total Environment*, *659*, pp.940-949. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.217.

79- Zhou, P., Zhao, Y., Zhao, Z. and Chai, T., 2015. Source mapping and determining of soil contamination by heavy metals using statistical analysis, artificial neural network, and adaptive genetic algorithm. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *3*(4), pp.2569-2579. https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.08.003

80- Zhou, Q., Jiang, H., Wang, J. and Zhou, J., 2014. A hybrid model for PM2. 5 forecasting based on ensemble empirical mode decomposition and a general regression neural network. *Science of the Total Environment*, *496*, pp.264-274. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.051.

81- Zhou, Y., Chang, F.J., Chang, L.C., Kao, I.F., Wang, Y.S. and Kang, C.C., 2019. Multi-output support vector machine for regional multi-step-ahead PM2. 5 forecasting. *Science of the Total Environment*, *651*, pp.230-240. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.111

82- Zhu, S., Han, H., Guo, M. and Qiao, J., 2017. A data-derived soft-sensor method for monitoring effluent total phosphorus. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, *25*(12), pp.1791-1797. https://doi.org/10.1016/j.cjche.2017.06.008.

83- Zonouz, P.R., Niaei, A. and Tarjomannejad, A., 2016. Modeling and optimization of toluene oxidation over perovskite-type nanocatalysts using a hybrid artificial neural network-genetic algorithm method. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *65*, pp.276-285. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.05.020.

84- Chen, L., Chen, Z., Zhang, Y., Liu, Y., Osman, A.I., Farghali, M., Hua, J., Al-Fatesh, A., Ihara, I., Rooney, D.W. and Yap, P.S., 2023. Artificial intelligence-based solutions for climate change: a review. *Environmental Chemistry Letters*, *21*(5), pp.2525-2557. http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/.

85- Gautam, K., Sharma, P., Dwivedi, S., Singh, A., Gaur, V.K., Varjani, S., Srivastava, J.K., Pandey, A., Chang, J.S. and Ngo, H.H., 2023. A review on control and abatement of soil pollution by heavy metals: Emphasis on artificial intelligence in recovery of contaminated soil. *Environmental Research*, *225*, p.115592. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115592.

86- Kafi, F., Yousefi, E., Ehteram, M. and Ashrafi, K., 2024. Monitoring Air Pollution Using Sentinel-5 Satellite Imagery: A Case Study of Razavi and South Khorasan Provinces. *Sustainable Earth Trends*, *4*(4), pp.41-55. Doi: 10.48308/set.2024.236905.1067.

87- Shuford, J., 2024. Interdisciplinary perspectives: fusing artificial intelligence with environmental science for sustainable solutions. *Journal of Artificial Intelligence General Science (JAIGS) ISSN: 3006-4023*, *1*(1), pp.106-123. Doi: https://doi.org/10.60087/jaigs.v1i1.87.

.

In The Name of God

Irrigation Sciences and Engineering

(Scientific)

Vol. 49 (1) **Spring 2026**

Board of Editors

AkhondAli, A. M.	**Professor**	**Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran**
Ghomeshi, M	**Professor**	**Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran**
Heydarpour, M.	**Professor**	**Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology**
Kashefipour, S. M.	**Professor**	**Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran**
Liaghat, A. M.	**Professor**	**Faculty of Agriculture, University of Tehran**
Hosseinzadeh Dalir, A.	**Professor**	**Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran.**
Naseri, A. A.	**Professor**	**Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran**
Zand Parsa, Sh.	**Professor**	**Faculty of Agriculture, Shiraz University of Technology**
Pagliara, Stefano.	**Professor**	**Department of Civil Engineering, University of Pisa,Italy**
Sai Hin, L.	**Associate Professor**	**Department Of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Malaya, Maliysia**
Ahmadian, R.	**Professor**	**Department of Civil Engineering, School of Engineering, Cardiff University, UK**
Ritzema, H.	**Associate Professor**	**Water Resources Management Group, Environmental Sciences Group, Wageningen University & Research, Netherland**

Published by: Shahid Chamran University of Ahvaz, Faculty of Water Sciences Engineering, Ahvaz, Iran.
Director: BoromandNasab, S.
Editor-in-Chief: Kashefipour, S.M.
Editorial Manager: Yazdani, N
Type Setting: Yazdani, N.

E–mail: JISE.Water@Scu.ac.ir
JISE.Water@yahoo.com

Publication license of the Ministry of Culture and Islamic Guidance No. 10362/124 on 29/12/1998 and license of the Journal Review Office of the Ministry of Science, Research and Technology No. 11/3/1264 on 21/10/2009 for the Journal of Irrigation Sciences and Engineering.

Journal of
Irrigation Sciences and Engineering(JISE)
(Scientific)
ISSN 2588-5952
Iranian Hydraulic Association
Shahid Chamran University of Ahvaz
Faculty of Water Sciences Engineering
Vol. 49 (1) Spring 2026

Contents

Title	Authors	Page
the Impact of Long Tree Canopy on Changes in the Force of Solitary Breaking and Non-breaking Coastal waves	P. Azinfar, M. Fathi-Moghadam and J. Ahadiyan	**1**
Feasibility Assessment of Water Stress Monitoring in Tomato Plants Using Spectral Indices in Greenhouse Conditions	A. Hadighanavat, A. Hooshmand, P. Tishehzan, N. Alemzadeansari and K. Rangzan	**23**
Evaluation of temporal-spatial changes of water quality characteristics of Abbas-Abad River using the QUAL2Kw simulator model	A. Noorali, S. Marofi and O. Babamiri	**43**
Joint Frequency Analysis of Meteorological Drought Duration and Severity Based on ERA5-Land Reanalysis Database	A. Mianabadi, M. Nazeri Tahroudi and M. Pourreza-Bilondi	**59**
Investigation of water footprint components for dominant crops in Dezful plain	Z. Naderi1, A. M. Akhoond-Ali2* and M. Ghomeshi	**85**
Hydraulic Analysis of Clay Blanket in Earth-Fill Dams Using Numerical Modeling	E. Asadi, M. Soltani Sotobadi and T. Omidpour Alavian	**95**
Temporal and Spatial Monitoring and Evaluation of Meteorological and Agricultural Drought in Hormozgan Province Using Remote Sensing	H. Siasar and M. Heydarzadeh	**111**
Novel Applications of Artificial Intelligence in Environmental Pollution Control and Mitigation	F. Kafi and E. Yousefi	**133**