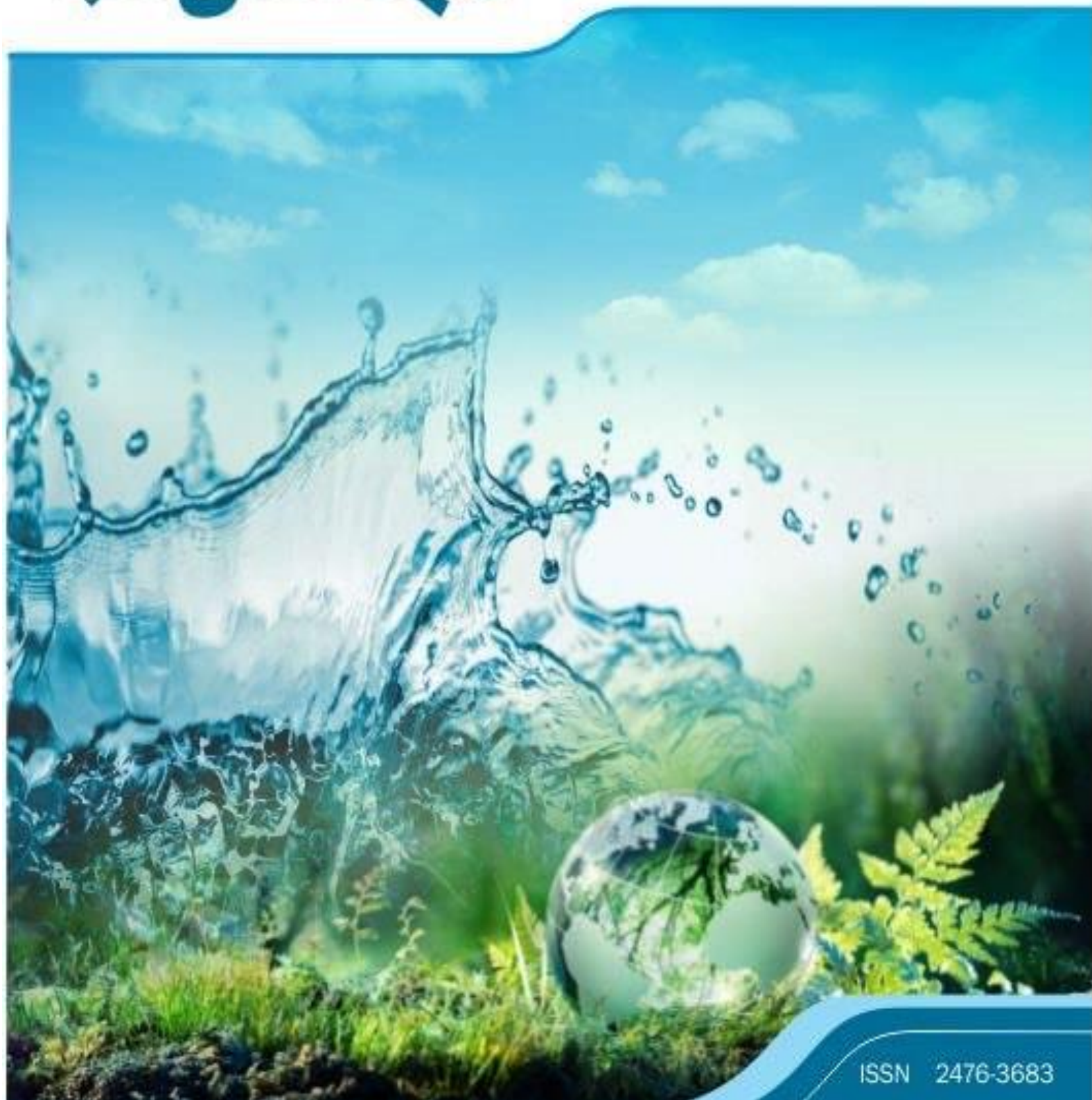




Quarterly Publications

www.jewe.ir

محیط زیست و مهندسی آب



ISSN 2476-3683

Environ. Water Eng., 10 (1), Spring, 2024



Environment and Water Engineering

Homepage: www.jewe.ir



جلد ۱۰ شماره ۱، بهار ۱۴۰۳، صفحات ۱-۱۵۰

صاحب امتیاز

انجمن علمی سیستم های سطوح آگیر باران ایران

مدیر اجرایی و مدیر مسئول

پروفسور بهزاد شاهمرادی (موسس مجله)

سر دبیر

پروفسور عطا امینی (موسس مجله) ..

رئیس هیئت تحریریه

پروفسور مقداد پیرصاحب

ایمیل

infojewe@gmail.com

آدرس پستی

سندج، بلوار پاسداران، پردیس دانشگاه علوم

پزشکی کردستان، دانشکده بهداشت، دکتر بهزاد شاهمرادی

آدرس سایت

www.jewe.ir

شاپا الکترونیکی

2476-3683

این نشریه در سایتهای (بانک های) علمی ملی و بین المللی
زیر نمایه شده است



این نشریه در بررسی و انتشار مقالات علمی از اصول و معیارهای کمیته اخلاق نشر (COPE) پیروی می نماید. همه مقالات ارسالی با نرم افزار مشابهت یاب سمیم نور بررسی می شوند تا از اصالت آنها اطمینان حاصل شود.

درباره نشریه

نشریه محیط زیست و مهندسی آب، فصلنامه ای با دسترسی باز (به متن مقالات) است که از سیاست داوری تخصصی دو سو ناشناس در بررسی مقالات استفاده نموده و به مباحث مهم و اساسی محیط زیست و مهندسی آب می پردازد. این نشریه در بررسی و انتشار مقالات علمی از اصول و معیارهای کمیته اخلاق نشر (COPE) پیروی می نماید. همه مقالات ارسالی به وسیله نرم افزار مشابهت یاب سمیم نور بررسی می شوند تا از اصالت آنها اطمینان حاصل شود. سپس همه مقالات توسط داوران معتبر و مجرب به دقت مورد ارزیابی قرار می گیرند. این نشریه مقالات پژوهشی، مطالعه موردی، مقالات مروری و مقالات کوتاه را منتشر می نماید.

اهداف انتشار مجله محیط زیست و مهندسی آب:

- ایجاد و ارتقای دانش در حوزه پژوهش های محیط زیست و مهندسی آب
- ایجاد بستر تبادل دانش و نظر در حوزه مشکلات محیط زیستی و دغدغه های مربوط به مدیریت و مهندسی منابع آب
- تعامل دانش در حوزه های تخصصی محیط زیست و مهندسی آب
- ارزیابی مدیریت منابع آب و ایجاد زمینه مناسب بهره گیری از تجارب گذشته در راستای ارتقای این مدیریت ها
- تلاش برای تبیین اصول توسعه پایداری با معرفی مولفه های زیست محیطی و اصول مدیریت یکپارچه منابع آب

محورهای موضوعی نشریه

حوزه مطالب این مجله شامل موارد زیر است، اما محدود به آنها نیست:

- پژوهشهای نو با تمرکز بر ارائه راه حل های علمی و عملی برای بهبود مدیریت محیط زیست و منابع آب
- پژوهش های بنیادی و کاربردی در کلیه حوزه های علمی و فنی مرتبط با مدیریت محیط زیست، کیفیت آب و آبخیزداری
- روشهای نوین و سنتی مدیریت آب در بخش کشاورزی در شرایط خشکسالی
- تحلیل مصرف آب، آلودگی، و خطرات زیست محیطی آلودگی آب
- مدیریت یکپارچه منابع آب و آبخیزداری
- مدیریت آب در کشاورزی و روشهای ارتقای بهره وری آب
- تحلیل همبستهای آب-انرژی-غذا- و محیط زیست
- تغییر اقلیم، مهندسی آب و محیط زیست، هیدرولوژی اجتماعی، و مهندسی رودخانه
- بازیافت فاضلاب و برداشت آب و تصفیه آب/فاضلاب
- مدیریت پسماند
- کاربرد فنون و دانش جدید در حل مسائل زیست محیطی و مدیریت منابع آب

داوران محترمی که مقالات این جلد را در مجله « محیط زیست و مهندسی آب » داوری کرده‌اند:

نام	نام خانوادگی	شناسه پژوهشگر (ORCID)
هدیه	احمدپری	0000-0002-3639-1651
فرانک	رنجبر	0000-0002-2648-4969
جعفر	عظمت	0000-0003-3939-6455
مهدی	دشت بزرگ	-
الهام	دانائی	ID00000000324942011
هوشنگ	قمرنیا	0000-0003-2106-1075
امید	بهمنی	-
حسن	اوجاقلو	-
رئوف	مصطفی زاده	0000-0002-0401-0260
رضا	نوروزی	0000-0002-3756-8746
مجید	پاسبانی	-
رسول	دانشفراز	0000-0003-1012-8342
حسین	خزیمه نژاد	-
سید محمد	اشرفی	0000-0001-7884-9029
رسول	زمانی احمد محمودی	-
سهیل	سبحان اردکانی	0000-0002-6038-0514
ناصر	آریا آذر	0000-0002-6132-7707
مهدی	کرمی مقدم	-
سامی	قوردویی میلان	0000-0001-8404-6679
سمیرا	صدری	0000-0003-0246-205X

فهرست مقالات منتشر شده در دوره ۱۰، جلد ۱، بهار ۱۴۰۳

صفحه	مشخصات مقالات
۴	عنوان: استفاده از الگوریتم درخت تصمیم برای مدل سازی فرایند حذف علف کش ۲,۴-D از آب به وسیله بیوچار نویسندگان: مهدی بهرامی؛ آناهیتا زارع؛ محمدجواد امیری
۱۹	عنوان: مهندسی ساختار الیاف کربن فعال مشتق شده از ته سیگار برای جذب سریع مواد نفتی نویسندگان: زهرا رنجکش؛ فاطمه سادات موسوی؛ کمیل نصوری
۳۴	عنوان: اثر کودهای زیستی قارچ مایکوریزا و جلبک دریایی بر ویژگی های فیزیکوشیمیایی خاک در شرایط کم آبیاری تحت کشت شنبلیله نویسندگان: ندا علیپور یوسفوند؛ افسانه عالی نژادیان بیدآبادی؛ امیر لکزیان؛ عباس ملکی
۴۹	عنوان: پهنه بندی کیفیت آب های زیرزمینی دشت بیجار - دیواندره در استان کردستان از نظر رسوب گذاری و خوردگی نویسندگان: هوشنگ قمرنیا؛ سیده سمیه عنایتی حسینی
۶۴	عنوان: ارزیابی پایگاه های داده شبکه ای بارش در حوزه آبخیز بلوچستان جنوبی نویسندگان: محسن رضایی؛ مهدی اژدري مقدم؛ غلامرضا عزیزان؛ علی اکبر شمسی پور
۷۹	بررسی مدل ریاضی و توسعه روش I-JAYA به منظور برآورد بهینه پارامترهای منحنی نگهداشت آب خاک نویسندگان: رضا عسکری؛ محسن نجارچی؛ حسین مظاهری
۹۴	بررسی تغییرات زمانی - مکانی مقادیر حدی دما بر اساس شاخص های ETCCDI (ناحیه شمال و غرب کشور) نویسندگان: مجتبی نساچی زواره؛ باقر قرمزچشمه
۱۱۱	عنوان: مدل سازی عددی جریان ورودی به بستر مرطوب با برهمکنش های سطح آزاد پیچیده با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار با تراکم پذیری ضعیف نویسندگان: فرامرز جلوه گر؛ حسین مهدیزاده؛ مهدی ملازاده؛ احمد شکیبائی نیا
۱۲۴	عنوان: ارزیابی دقت نقشه تناسب اقلیمی پسته با استفاده از منحنی ROC نویسندگان: جمشید یاراحمدی؛ عطا امینی؛ قباد رستمی زاد
۱۴۱	عنوان: تأثیر اسید هیومیک و ورمی کمپوست بر برخی شاخص های رویشی و میزان پرولین گیاه پروانش (Catharanthus roseus) نویسندگان: صالح الهویردی زاده؛ الهام دانائی



Environment and Water Engineering

Homepage: www.jewe.ir

ISSN: 2476-3683

Research Paper

Evaluation of Bioadsorption Process of Lead Heavy Metal from Aqueous Media Using Two Species of Brown *Nizimuddinina zanardini* and *Ulva rigida* Green Algae

Samineh Gholami¹, Arash Shakuri^{2*} and Jasem Raisi³¹M.Sc. Student, Department of Marine Biology, Faculty of Marine Sciences, Chabahar Maritime and Marine Sciences University, Chabahar, Iran²Assoc. Professor, Department of Marine Biology, Faculty of Marine Sciences, Chabahar University of Maritime and Marine Sciences, Chabahar, Iran³Lecturar, Department of Marine Biology, Faculty of Marine Sciences, Chabahar University of Maritime and Marine Sciences, Chabahar, Iran

Article information

Received: January 22, 2023
Revised: April 04, 2023
Accepted: April 05, 2023

Keywords:

Bioadsorption

Heavy Metals

Lead

*Nizimuddinina zanardini**Ulva rigida*

*Corresponding author:

shakouri@cmu.ac.ir

Abstract

In this research, the biological adsorption process of lead heavy metal was investigated using brown algae *Nizimuddinina zanardini* and green algae *Ulva rigida*. Optimum adsorption conditions by measuring pH, the amount of adsorbent, time, and the concentration of lead ion were investigated. Langmuir, Freundlich, and Temkin isotherms were used to investigate surface adsorption. Adsorption kinetics were investigated according to pseudo-first and second-order kinetic equations. Examining the pH results, it was found that brown algae at pH = 5 and green algae at pH = 6 could reach the maximum adsorption of lead. It was found that the best adsorption time for both algae was 60 min. The results of the adsorbent dosage showed that the two bioadsorbents of brown and green algae have the highest amount of adsorption in the amounts of 0.5 and 0.7 g, respectively, and in the initial concentration of metal ions, the highest efficiency was obtained in the dosage of 2 mg/l. The results of the isotherm model showed that lead adsorption by brown algae corresponds to the Langmuir isotherm and green algae to the Freundlich isotherm. In addition, according to the kinetic results, both adsorptions follow second-order kinetics.

How to cite this paper: Gholami, S., Shakuri, A., & Raisi, J. (2024). Evaluation of the bioadsorption process of lead heavy metal from aqueous media using two species of *Nizimuddinina zanardini* brown algae and *Ulva rigida* green algae. *Environ. Water Eng.*, 10(1), 1-17. <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.381628.1838> (In Persian)



© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The main problem with heavy metals is that they are not metabolized in the body, and after entering the body, they are stored in the tissues and are not eliminated from the body. Metal ions such as lead and cadmium are mainly found in industrial wastewater and are considered dangerous environmental pollutants. Biosorption is the ability of biomass to collect heavy metals from wastewater through indirect metabolic activities or physical and chemical adsorption methods. The complex structure of microorganisms enables them to absorb metals in different ways. One of the most significant microorganisms in biosorption processes is algae. Therefore, in this study, the biological adsorption of lead metal from aqueous solutions was carried out using *Nizimuddinia zanardini* and *Ulva rigida* species.

Material and Methods

This research was conducted in the Faculty of Marine Sciences of Chabahar University of Maritime and Marine Sciences. The materials used in the present study are the brown algae *Nizimuddinia zanardini* collected from the coasts of the Oman Sea; the green algae *Ulva rigida* collected from the shores of the Oman Sea. To remove heavy metals, lead (II) nitrate and cadmium (II) nitrate salts were used. To determine the optimum pH for lead and cadmium adsorption by green and brown algae, the adsorption rate was investigated at pH values of 3, 4, 5, 6, 7, 8, and 9. In the same way, the optimal value of the adsorbent in values of 0.2, 0.5, 0.7, and 1 g of the two adsorbents and the amount of adsorption time in the amounts of 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 and 100 min was measured. Langmuir, Freundlich, and Temkin isotherms were used to investigate surface adsorption and describe the behavior of the adsorbent. The pseudo-first and second-order kinetic equations were used to determine the control mechanism of the surface adsorption processes.

Results

To check the surface property, structure, and size of the particles obtained from the used algae, a scanning electron microscope was used, and the results showed that all the particles in the produced bio-adsorbent have dimensions of about 50 nm and the size distribution of the particles on the surface. The nanostructures are uniform. In

measuring the pH, the obtained results showed that the minimum efficiency of lead adsorption for the brown algae *Nizimuddinia zanardini* was obtained at a pH = 3 with a value of 28.9%, while this value at the same pH for the green algae *Ulva rigida* was equal to 23.9% was obtained. With the increase in pH, the process of lead adsorption by two algae has taken on an upward trend. On the other hand, for brown algae *Nizimuddinia zanardini* at pH = 5, the highest adsorption rate was 88.6%, and for green algae *Ulva rigida* at pH equal to 6, the highest adsorption rate is It was obtained with a value of 81.4%. In the comparison between the amounts of adsorption, the results showed that brown algae have a high percentage of adsorption compared with green algae. Moreover, in measuring the adsorption time, the obtained results showed that the minimum efficiency of lead adsorption for the brown algae *Nizimuddinia zanardini* was obtained at a contact time of 10 min with a value of 35.6%, while this value was equal to the green algae *Ulva rigida* at the same time. It has been obtained with 30.3%. With the increase of contact time, the process of lead adsorption by two algae has taken an upward state, and for the brown algae *Nizimuddinia zanardini* and the green algae *Ulva rigida*, the highest adsorption rate was obtained at 60 min time equal to 94.5% and 85.3%, respectively. In the comparison between the amounts of adsorption, the results showed that brown algae have a high percentage of adsorption compared with green algae. In measuring the amount of adsorbent used, the minimum efficiency of lead adsorption for the brown algae *Nizimuddinia zanardini* using 0.2 g of the adsorbent, removal was 54.3%, while the dosage of the adsorbent used for the green alga *Ulva rigida* was 2.0 g and the removal efficiency was 43%. With the increasing amount of adsorbent, the process of lead adsorption by two algae has taken an upward trend; for the brown algae *Nizimuddinia zanardini*, at the amount of 0.5 g of adsorbent, the highest adsorption efficiency was 92.7%, while for the green algae *Ulva rigida*, the highest adsorption efficiency was 79.6% using 0.7 g of the adsorbent. In the comparison between the amounts of adsorption, the results showed that brown algae have a high percentage of adsorption compared with green algae. The results obtained regarding the initial concentration showed that the minimum efficiency of lead adsorption for the

brown algae *Nizimuddinia zanardini* at a concentration of 40 mg/l was 18%, while this value for the green algae *Ulva rigida* was 21.2%. With the increase of the initial metal ion concentration, the process of lead adsorption by two algae has taken a decreasing state. The highest adsorption rate for the brown algae *Nizimuddinia zanardini* at the initial concentration of 2 mg/l was 98.3%, while for the green algae *Ulva rigida* the

highest adsorption rate was 88.1%. In the comparison between the amounts of adsorbents, the results showed that brown algae have a high percentage of adsorption compared to green algae. Fig. 1 shows the results of the influence of solution optimization indicators on the amount of lead ion biosorption by brown algae *Nizimuddinia zanardini* and green algae *Ulva rigida*.

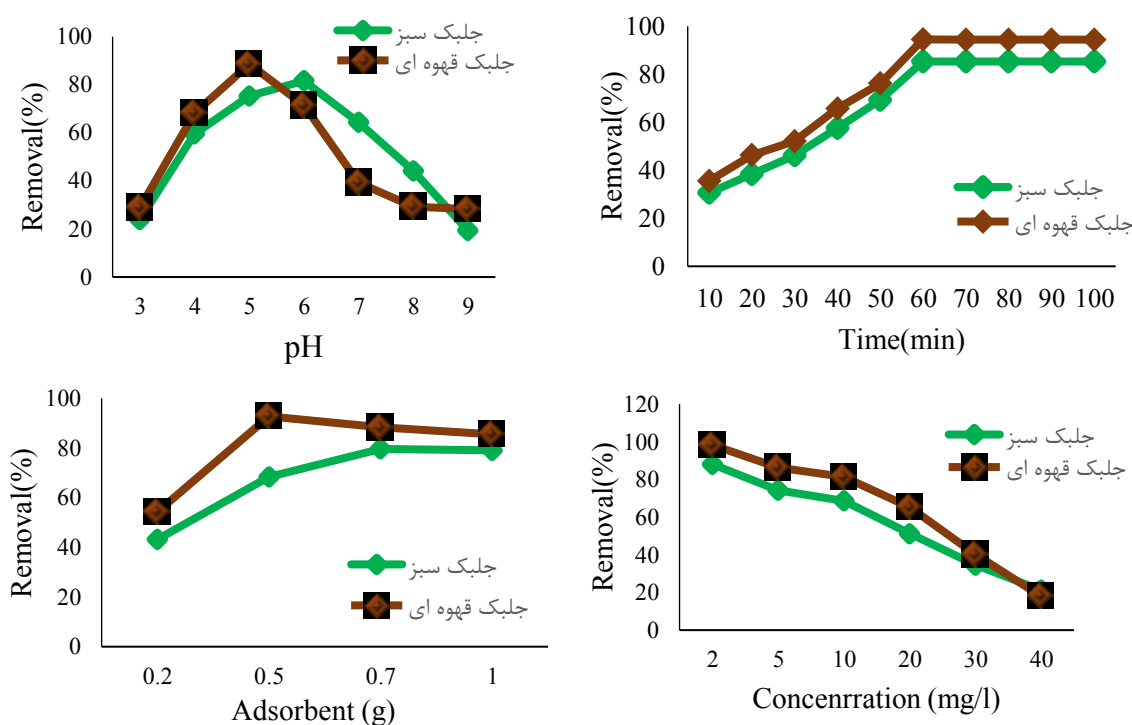


Fig. 1 Effect of operational parameters on the bioadsorption of lead ion

Conclusions

Examining the results of pH related to biological adsorption, it was found that brown algae at pH 5 and green algae at pH 6 were able to reach the maximum adsorption of lead. Furthermore, when examining the results related to time, it was found that the best adsorption time for both algae was 60 min. The results of the amount of adsorbent dose showed that the two bioadsorbents of brown algae *Nizimuddinia zanardini* and green algae *Ulva rigida* were able to have the highest amount of lead adsorption at 0.5 and 0.7 g, respectively. In the investigation of metal ion concentration, the highest value was obtained using 2 mg/l of the adsorbent. Moreover, the results of the adsorption isotherm model showed that the adsorption of this

heavy metal by the adsorbents used is a favorable. Adsorption of lead by the brown algae *Nizimuddinia zanardini* followed the Langmuir isotherm, whereas by the green algae *Ulva rigida* the Freundlich isotherm fits. According to the kinetic results, both adsorptions followed second-order kinetics.

Data Availability

The data used or generated in this research are presented in the text of the article.

Conflicts of interest

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



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir

مقاله پژوهشی

بررسی فرآیند جذب زیستی فلز سنگین سرب از محلول های آبی با استفاده از دو گونه جلبک قهوه ای *Nizimuddinina zanardini* و جلبک سبز *Ulva rigida*

ثمینه غلامی^۱، آرش شکوری^{۲*} و جاسم ریسی^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زیست شناسی دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران

^۲دانشیار گروه زیست شناسی دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران

^۳مربی، گروه زیست دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: [۱۴۰۱/۱۱/۰۲]

تاریخ بازنگری: [۱۴۰۲/۰۱/۱۵]

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۲/۰۱/۱۶]

واژه های کلیدی:

جذب زیستی

فلز سنگین

سرب

Nizimuddinina zanardini

Ulva rigida

*نویسنده مسئول:

shakouri@cmu.ac.ir



در این پژوهش اقدام به بررسی فرآیند جذب زیستی فلز سنگین سرب با استفاده از جلبک های قهوه ای *Nizimuddinina zanardini* و جلبک سبز *Ulva rigida* شد. شرایط بهینه جذب با سنجش میزان pH؛ مقدار بهینه جذب، زمان بهینه و غلظت بهینه یون فلزی سرب بررسی شد. برای بررسی جذب سطحی، از ایزوترم های لانگمویر، فروندلیچ و تمکین استفاده شد. سینتیک جذب هم مطابق معادله های سینتیک شبه درجه یک و دو بررسی شد. در بررسی نتایج pH مشخص شد که در جذب سرب، جلبک قهوه ای در pH برابر با ۵ و جلبک سبز در pH برابر با ۶ توانسته است به حداکثر جذب برسد. در بررسی نتایج مرتبط با زمان مشخص شد که برای هر دو جلبک بهترین زمان جذب در ۶۰ min بود. نتایج دوز جذب نشان داد که دو جاذب زیستی جلبک قهوه ای و سبز به ترتیب در مقدار ۰/۵ و ۰/۷ g بیشترین مقدار جذب را دارند. در غلظت اولیه یون فلزی، بیشترین مقدار در مقدار ۲ mg/l حاصل شد. نتایج مدل ایزوترم نشان داد که جذب سرب به وسیله جلبک قهوه ای با ایزوترم لانگمویر و جلبک سبز با ایزوترم فروندلیچ مطابقت دارد. همچنین مطابق نتایج، هر دو جذب از سینتیک درجه دوم تبعیت می کنند.

نحوه استناد به این مقاله:

غلامی، ثمینه، شکوری، آرش & ریسی، جاسم. (۱۴۰۳). بررسی فرآیند جذب زیستی فلز سنگین سرب از محلول های آبی با استفاده از دو گونه جلبک قهوه ای *Nizimuddinina zanardini* و جلبک سبز *Ulva rigida*. محیط زیست و مهندسی آب. 10 (1) 17-1

<https://doi.org/10.22034/ewe.2023.381628.1838>



۱- مقدمه

آلاینده‌های خطرناک زیست‌محیطی به شمار می‌روند (Maiti et al. 2021).

یکی از فلزات سنگین آلاینده، سرب است. سرب یکی از چهار فلزی است که بیشترین عوارض را بر سلامت انسان دارد. اختلالات بیوسنتز، هموگلوبین و کم‌خونی، فشار خون بالا، آسیب کلیوی، سقط جنین و نوزادی نارس، اختلالات سیستم عصبی، آسیب مغزی، ناباروری مردان، کاهش توانایی یادگیری و اختلالات رفتاری از عوارض منفی افزایش غلظت سرب در بدن انسان است (Ahmadpari et al. 2020).

بخش اصلی سرب در محیط‌زیست ناشی از سرب انتشار یافته از وسایل نقلیه می‌باشد. منشأ تمام تترا آلکیل‌های سرب در فضا، تقریباً از تبخیر بنزین می‌باشد. این ترکیب‌ها در آب حل نمی‌شوند، اما از راه پوست جذب می‌شوند. سرب اکسید معلق در هوا در نهایت روی زمین، آب، میوه‌ها، سبزی‌ها می‌نشیند و از آن طریق وارد زنجیره غذایی می‌شود (Awual et al. 2019). روش‌هایی که معمولاً برای حذف فلزات سنگین از منابع آبی استفاده می‌شوند، شامل فرآیندهای شیمیایی و بیولوژیکی، جذب سطحی، جداسازی غشایی، رسوب شیمیایی و تبادل یونی هستند (Liu et al. 2019).

اکثر این روش‌ها پرهزینه، ناکارآمد و متمایل به آلودگی‌های سطحی هستند. رسوب شیمیایی که آلاینده‌هایی مانند یون‌های فلزات سنگین را منعقد و لخته‌سازی کرده و به رسوب‌های درشت برای حذف تبدیل می‌کند، می‌تواند یک فرآیند نسبتاً ساده باشد، اما نیاز به استفاده از مواد اضافی دارد و زباله‌های جامد سمی تولید می‌کند (Li et al. 2020). در مقابل، روش‌های مبتنی بر جذب برای پیاده‌سازی کارآمد، مقرون به صرفه و بدون زحمت هستند. علاوه بر این، جاذب‌ها در برابر آلودگی‌های سمی حساس هستند و مواد مضر ثانویه تولید نمی‌کنند. روش‌های مبتنی بر جذب به‌طور گسترده در تصفیه آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. مکانیسم عمل با یون‌های فلزات سنگین شامل تبادل یونی، برهمکنش الکترواستاتیکی، کمپلکس فلزی و کوئزواکسیون $\pi-\pi$ است. جاذب‌ها بر اساس میل ترکیبی مکان‌های فعال آنها برای یون فلز سنگین طبقه‌بندی و انتخاب می‌شوند (Wu et al. 2020).

یکی از مهم‌ترین مسائل دنیای امروز آلودگی محیط‌زیست به فلزات سمی و خطرناک می‌باشد. استخراج فلزات از معادن و کاربرد گسترده فلزات سنگین در صنایع باعث شده است که غلظت این فلزات در آب، فاضلاب، هوا و خاک بیشتر از مقادیر زمینه‌ای افزایش پیدا کند. مکانیسم اثر سمیت فلزات سنگین ناشی از تمایل شدید کاتیون‌های این فلزات به گوگرد و بدین طریق مختل کردن فعالیت آنزیم‌های حیاتی در موجودات زنده می‌باشد. بنابراین حذف فلزات سنگین از محیط‌های آبی موضوع مهمی در بهداشت عمومی جامعه محسوب می‌شود که از دو جنبه اهمیت دارد که شامل جداسازی فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی، زهاب کشاورزی، معادن و خنثی کردن اثرات سمی آنها و احیا و بازیافت فلزات که با کاهش تدریجی منابع معدنی امری ضروری است (Roa et al. 2021). فلزات سنگین اصولاً به دسته‌ای از گروه عناصر فلزی اطلاق می‌شود که دارای وزن مخصوصی بزرگتر از 6 g/cm^3 و وزن اتمی بیشتر از 50 g باشند. حضور این عناصر در غلظت‌های بیش از حد مجاز عوارض سوء متعددی هم برای انسان و هم برای سایر موجودات ایجاد کرده و ضمن اینکه آلودگی و خطرات زیست‌محیطی را نیز به همراه دارد. از جمله منابع آلاینده محیط‌زیست در ارتباط با فلزات سنگین عبارتند از صنایع استخراج فلزات سنگین، صنایع فلزی، ریخته‌گری، آبکاری، رنگ‌سازی، باتری‌سازی، دباغی، نساجی، کاغذسازی و سایر صنایع مشابه که با دفع و انتشار عناصری همچون جیوه، کادمیوم، سرب، نیکل، مس، روی در محیط باعث آلودگی می‌شوند (Taşdelen et al. 2021). حضور فلزات سنگین در فاضلاب‌های شهری و پساب‌های صنعتی و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از دفع غیراصولی آنها، تصفیه این قبیل پساب‌ها و فاضلاب‌ها را قبل از تخلیه به محیط‌زیست و یا ورود به شبکه جمع‌آوری فاضلاب ضروری می‌سازد. منابع آب سطحی و زیرزمینی که به‌وسیله فلزات سنگین آلوده شده‌اند، نیاز به تصفیه دارند. مشکل اصلی فلزات سنگین این است که در بدن متابولیزه نمی‌شوند و پس از ورود به بدن در بافت‌ها ذخیره شده و از بدن دفع نمی‌شوند. یون‌های فلزاتی مثل سرب و کادمیوم عمدتاً در فاضلاب‌های صنعتی یافت می‌شوند و از

سرب، کبالت و کادمیوم را بررسی کردند. نتایج نشان داد که این جلبک نقش قابل توجهی در حذف این فلزات سنگین دارد و می‌تواند برای کنترل بیولوژیکی آلودگی فلزات سنگین در سواحل غربی خلیج عربستان استفاده شود. (Jin et al. (2020 جلبک زیستی فلزهای سرب و کادمیوم را از محلول‌های آبی به کمک جلبک *Simplicillium chinense* انجام دادند. نتایج نشان داد که جلبک مورد استفاده کارایی لازم در جذب کادمیوم از محلول آبی آلوده را دارد. تاکنون پژوهش‌های مختلفی برای حذف سرب از محلول‌های آبی با استفاده از گونه‌های جلبکی انجام شده است، اما تاکنون پژوهشی که از دو گونه جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinina zanardini* و جلبک سبز *Ulva rigida* برای حذف فلز سنگین سرب استفاده کرده باشد، انجام نشده است که همین موضوع جنبه نوآوری پژوهش حاضر استفاده می‌باشد. از همین رو، در این پژوهش جذب زیستی فلز سرب از محلول‌های آبی با استفاده از گونه‌های *Nizimuddinina zanardini* و *Ulva rigida* انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ مواد شیمیایی

این پژوهش در دانشکده علوم دریایی دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار انجام شده است. مواد مورد استفاده در پژوهش حاضر عبارت از جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinina zanardini* جمع‌آوری شده از سواحل دریای عمان؛ جلبک سبز *Ulva rigida* جمع‌آوری شده از سواحل دریای عمان؛ نمک سرب (II) نیترات $(\text{Pb}(\text{NO}_3)_2)$ تهیه شده از شرکت سیگما آلد ریچ؛ نمک کادمیوم (II) نیترات $(\text{Cd}(\text{NO}_3)_2)$ تهیه شده از شرکت سیگما آلد ریچ؛ محلول استیک اسید (CH_3COOH) ۰/۰۱ M تهیه شده از شرکت سیگما آلد ریچ؛ محلول سدیم دی هیدروژن فسفات $(\text{NaH}_2\text{PO}_4)$ ۰/۰۱ M تهیه شده از شرکت سیگما آلد ریچ؛ دی سدیم هیدروژن فسفات $(\text{Na}_2\text{HPO}_4)$ ۰/۰۱ M مolar تهیه شده از شرکت سیگما آلد ریچ؛ سدیم استات $(\text{CH}_3\text{COONa})$ ۳ به M ۰/۰۱ تهیه شده از شرکت سیگما آلد ریچ؛ سدیم دی هیدروژن

یکی از فرایندهای بسیار مؤثر در حذف فلزات سنگین از محلول‌های آبی، فرآیند جذب زیستی است. جذب زیستی، توانایی توده زیستی در جمع‌آوری فلزات سنگین از پساب‌ها از طریق فعالیت‌های متابولیکی غیرمستقیم یا راه‌های فیزیکی و شیمیایی جذب است. جلبک‌ها، کپک‌ها، مخمرها، باکتری‌ها و قارچ‌ها از جمله این جاذب‌ها هستند. فواید عمده این روش شامل هزینه پائین، کارایی بالا، عدم نیاز به مواد مغذی فراوان، امکان احیای جاذب، امکان بازیافت فلز می‌باشد. برخی از این جذب‌کننده‌های زیستی قادرند طیف وسیعی از فلزات سنگین را حذف کنند، در حالی که برخی نیز تنها انواع خاصی از فلزات را جذب می‌کنند. ساختار پیچیده میکروارگانیسم‌ها، آنها را توانمند می‌کند تا به طرق مختلف فلزات را جذب کنند. یکی از مهم‌ترین میکروارگانیسم‌ها در فرایندهای جذب زیستی، جلبک‌ها هستند (Xuejiang et al. 2016).

پژوهش‌های مختلفی با هدف استفاده از روش‌های جذب زیستی برای حذف فلزات سنگین انجام شده است. Al-Dhabi et al. (2022) در پژوهشی جذب زیستی پسماندهای خطرناک فاضلاب شهری به وسیله زیست توده جلبکی دریایی را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، *Turbinaria ornate* از دریا جمع‌آوری و از زیست‌توده خشک شده برای جذب بیولوژیکی فلزات سنگین استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد که زیست‌توده جلبکی مورد استفاده، کارایی لازم را در حذف سرب از محلول آبی داشت. Pham et al. (2021) در پژوهشی به حذف فلزات سنگین از محلول آبی با استفاده از *Hizikia fusiformis* به عنوان جاذب زیستی مبتنی بر جلبک اقدام کردند. نتایج نشان داد که ظرفیت جذب زیستی *H. fusiformis* پس از تیمار با NaOH به طور قابل توجهی بهبود یافته است. Almomani and Bhosale (2022) در پژوهشی جذب بیولوژیکی فلزات سمی از پساب‌های صنعتی توسط گونه‌های جلبک *Spirulina platensis* و *Chlorella vulgaris* کاربرد مدل‌های ایزوترم، جنبشی و بهینه‌سازی فرآیند اقدام کردند. نتایج نشان داد که جذب روی جلبک‌ها گرماگیر و از سینتیک لانگمویر و مرتبه دوم پیروی می‌کند. (Al-Homaidan (2020 در پژوهشی تأثیر جلبک قهوه‌ای *Phaeophyta* در حذف فلزات سنگین

رسانده شد. محلول به دست آمده به مدت ۱۲۰ min با همزن مکانیکی هم زده شد و پس از اتمام فرآیند هم زدن، محلول حاصل شده با استفاده از صافی تهیه شده، جداسازی و ماده به دست آمده در روی سینی پخش شد تا در دمای اتاق خشک شود. پس از خشک شدن محلول، پودر حاصل از جلبک‌های جمع‌آوری و در یک محیط خشک نگهداری شد. درجه خلوص پودر به دست آمده برای جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinia zanardini* ۲۵٪ و جلبک سبز *Ulva rigida* ۲۴٪ محاسبه شد.

۲-۴- تعیین pH بهینه

برای تعیین pH بهینه‌ی جذب سرب و کادمیوم در ۷ بالون ۲۵۰ ml، ۲۵ ml از بافرهای ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ ریخته شد. سپس مقدار ۰/۲۱۱ g از نمک سرب (II) نیترات را در بالون ژوژه ۱۰۰۰ cc ریخته و به حجم رسانده و در ادامه ۵۰ ml از محلول نمک سرب (II) نیترات ۱۰۰ ppm را به هر کدام از بالون‌ها اضافه و با آب مقطر به حجم رسانده شد. سپس محتویات ۷ بالون ژوژه ۲۵۰ ml را در ارلن‌های ۵۰۰ ml ریخته و به هر کدام مقادیر بهینه از دو جاذب زیستی جلبکی اضافه کرده و به مدت ۲۴۰ min بر روی شیکر قرار داده شد. بعد از پایان ۴ h محلول‌ها را با کاغذ صافی صاف کرده و برای اندازه‌گیری میزان جذب کاتیون فلزی سرب از محلول زیر صافی با استفاده از دستگاه جذب اتمی (ICP) جذب گرفته شد (Inthorn et al. 2017).

۲-۵- تعیین مقدار بهینه جاذب

در ابتدا ۴ بالون ژوژه آماده کرده و در هر کدام از بالون‌ها ۵۰ cc از محلول نمک سرب (II) نیترات ۱۰۰ ppm و ۲۵ cc از بافر با pHهای بهینه به هر کدام از بالون‌ها اضافه شد. مقادیر مختلف از ۰/۲، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ از دو جاذب زیستی را به هر کدام از بالون‌ها اضافه گردید. سپس محلول‌ها با آب مقطر به حجم رسانده و به مدت ۲۴۰ min روی شیکر قرار داده شد. بعد از گذشت ۴ h محلول‌های مورد نظر را با کاغذ صافی صاف کرده و از محلول زیر صافی جذب اتمی گرفته شد. درصد حذف در هر مورد با استفاده از رابطه (۱) به دست می‌آید (Inthorn et al. 2017).

فسفات (Na_2HPO_4) ۱ آبه ۰/۱ M تهیه شده از شرکت سیگما آلد ریچ می‌باشد.

۲-۲- دستگاه‌های مورد استفاده

در این پژوهش از دستگاه جذب اتمی پلاسما جفت شده القائی^۱ (ICP) مدل YJ UTRACE138 برای اندازه‌گیری میزان جذب فلزات سنگین توسط جاذب؛ دستگاه pH متر مدل PRO Milwaukee MC110 برای سنجش میزان pH بهینه در فرایند جذب سطحی؛ دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ (SEM) مدل Leo440i برای بررسی خاصیت سطحی، ساختار و اندازه ذرات جاذب‌های به دست آمده از جلبک‌ها و آسیاب گلوله‌ای (بال-میل) مدل NARYA-MPH 2*250H برای آسیاب کردن جلبک‌ها سبز و قهوه‌ای استفاده شد.

۲-۳- تهیه جاذب زیستی

مقدار ۱ kg وزن تر از جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinia zanardini* در فصل زمستان و ۱ kg وزن تر از جلبک سبز *Ulva rigida* در فصل بهار از سواحل دریای عمان جمع‌آوری شدند. بعد از جمع‌آوری جلبک‌های سبز و قهوه‌ای مورد نظر، به‌منظور پاک‌سازی و از بین بردن مواد مضر در سطح آن چندین مرتبه با آب مقطر شست و شو داده شد. سپس جلبک‌های سبز و قهوه‌ای جهت خشک شدن به مدت ۲ day در یک محیط تاریک و با دمای اتاق قرار گرفتند. بعد از خشک شدن جلبک‌های سبز و قهوه‌ای مورد بررسی در دوره زمانی ذکر شده، با استفاده از دستگاه آسیاب گلوله‌ای (بال-میل) جلبک‌های سبز و قهوه‌ای با آسیاب خرد شد. جلبک‌های سبز و قهوه‌ای پس از توزین شدن به‌وسیله ترازوی دیجیتالی به مقدار ۵۰۰ g در درون محفظه دستگاه بال-میل قرار گرفت. ماده مورد نظر در اثر حرکت مداوم گلوله‌های داخل محفظه دچار سایش و شکست می‌شوند. ذرات شکسته شده به دلیل وجود اصطکاک و انرژی بالا در درون محفظه با یکدیگر پیوند برقرار می‌کنند. اعمال انرژی و ضربه‌های مداوم گلوله‌ها سبب خرد شدن و شکست تدریجی ذرات تا اندازه نانومتری می‌شود. این فرآیند به مدت ۲۰ min با ۹۰ rpm انجام شد. پس از اتمام فرآیند بال-میل، ۳۰۰ g از پودر جلبک‌های سبز و قهوه‌ای وزن شده و به‌وسیله ۱۰۰۰ ml اتانول با خلوص ۹۶٪ به حجم

² Scanning Electron Microscope
Environment and Water Engineering
Vol. 10, No. 1, 2024

¹Inductively Coupled Plasma

محلول بر حسب l و M مقدار جاذب مورد استفاده بر حسب g می‌باشد.

۲-۸- ایزوترم‌های جذب

امروزه برای بررسی جذب سطحی و توصیف رفتار جاذب، معادله‌ها و ایزوترم‌های مختلفی توسعه پیدا کرده است. در این پژوهش ایزوترم‌های لانگمیر، فروندلیچ و تمکین استفاده شدند. معادله خطی لانگمیر به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود (Enkari and Ebrahimi Aghmasjed 2019):

$$C_e/q_e = 1/K_L \cdot q_m + C_e/q_m \quad (3)$$

که C_e غلظت تعادلی فلز در محلول بر حسب mg/l ، q_e مقدار فلز جذب شده به ازای واحد وزن جاذب بر حسب mg/g ، K_L و q_m ثابت‌های ایزوترم لانگمیر هستند. معادله خطی ایزوترم جذب فروندلیچ به صورت رابطه (۴) است (Enkari and Ebrahimi Aghmasjed 2019):

$$\text{Log} q_e = \text{Log} K_f + 1/n \text{Log} C_e \quad (4)$$

۲-۹- سینتیک جذب

سینتیک جذب به منظور تعیین مکانیسم کنترل فرآیندهای جذب سطحی استفاده می‌شود. معادله‌های سینتیک شبه درجه یک و دو به ترتیب بر اساس روابط (۵) و (۶) بیان می‌شوند (Enkari and Ebrahimi Aghmasjed 2019):

$$\text{Log}(q_e - q_t) = \text{Log}(q_e) - K_1/2.303(t) \quad (5)$$

$$t/q_t = 1/K_2 q_e^2 + 1/q_e \quad (6)$$

که q_e برابر مقدار املاح جذب شده در حالت تعادل (mg/g) ، q_t مقدار املاح جذب شده در زمان (mg/g) و K_1 و K_2 ثابت های سرعت تعادلی سینتیک درجه اول و دوم هستند.

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- ویژگی‌های سطحی نانوذرات سنتز شده

برای بررسی خاصیت سطحی، ساختار و اندازه ذرات به دست آمده از جلبک‌های مورد استفاده، از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد (Al-Dhabi et al. 2022). در شکل (۱) تصویر SEM از جاذب‌های زیستی جلبک‌های قهوه-ای و سبز تهیه شده برای انجام فرآیند حذف فلز سنگین سرب نشان داده شده است.

$$\% \text{Removal} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

که، C_0 : غلظت اولیه جذب شونده و C_e : غلظت باقیمانده در محلول جذب گرفته شده (ppm) می‌باشد.

۲-۶- تعیین سینتیک جذب سرب

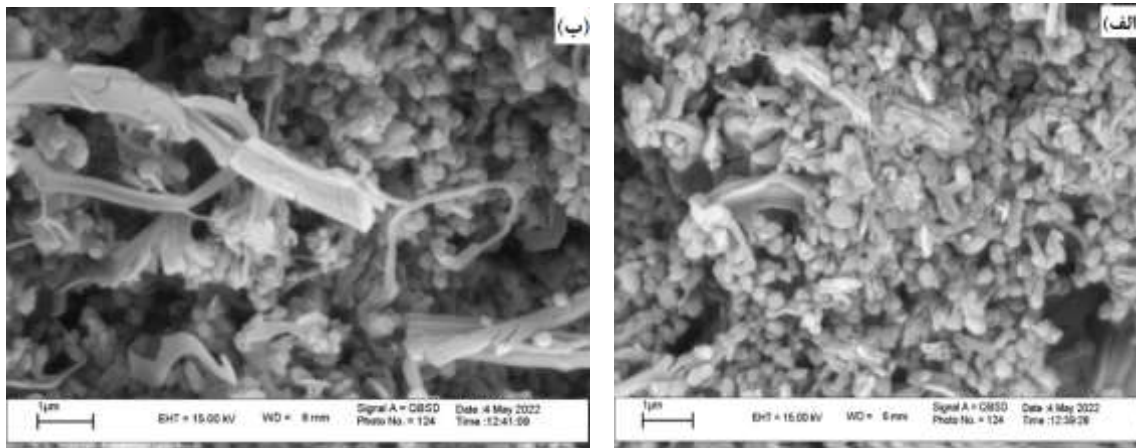
در ابتدا در ۶ بالون ژوژه ۲۵ ml، ۵ ml از یون فلزی سرب (II) نیترات که معادل محلول ۱۰۰ ppm می‌باشد، ریخته شد. سپس ۲۵ ml از محلول pH بهینه دو محلول را اضافه کرده و در مجاورت مقادیر بهینه از دو جاذب زیستی قرار داده شد. سپس محلول را با آب مقطر به حجم رسانده شد. نمونه‌ها را در زمان‌های ۱۰ min، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ در دستگاه شیکر قرار داده شد. پس از پایان زمان‌های مورد نظر، محلول‌ها را صاف کرده و از محلول زیر صافی به منظور تعیین مقدار یون سرب جذب شده توسط دو جاذب در زمان‌های مختلف با دستگاه جذب اتمی جذب گرفته شد (Inthorn et al. 2017).

۲-۷- تعیین ایزوترم‌های جذب سرب

در ۶ بالون ژوژه ۲۵۰ ml محلول‌هایی با غلظت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ ppm تهیه شد. به این صورت که به ترتیب مقادیر ۰/۳۱۷۹، ۰/۲۱۱۹، ۰/۱۰۵۹، ۰/۰۵۲۹، ۰/۰۲۱۱۹ g از نمک سرب (II) نیترات را در بالون ۱۰۰۰ cc ریخته شد. سپس محلول‌ها با آب مقطر به حجم رسانده شد. سپس ۵۰ cc از هر غلظت را درون یک بالون ریخته و به آن ۲۵ cc از محلول بافر بهینه اضافه کرده و به حجم رسانده شد و محلول به دست آمده، به مدت ۲۴۰ min روی شیکر قرار داده شد. بعد محلول را صاف کرده و از محلول زیر صافی جذب اتمی گرفته شد. با استفاده از رابطه (۲) q_e (مقدار ماده جذب شده در واحد جرم جاذب) را محاسبه شد (Inthorn et al. 2017).

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{M} \quad (2)$$

که، C_0 غلظت اولیه جذب شونده، C_e غلظت باقیمانده در محلول که دستگاه جذب اتمی نشان می‌دهد و V حجم



شکل ۱- تصویر SEM از جاذب زیستی جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinina zanardini* و ب- جلبک سبز *Ulva rigida*

Fig. 1 SEM image of *Nizimuddinina zanardini* brown algae and b) *Ulva rigida* biosorbents

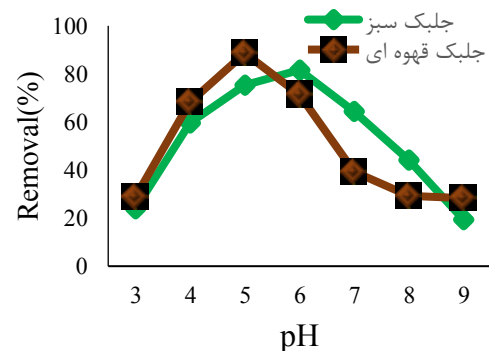
همان pH برای جلبک سبز *Ulva rigida* برابر با ۲۳/۹٪. حاصل گردیده است. با افزایش میزان pH روند جذب سرب توسط دو جلبک حالت صعودی به خود گرفته است و برای جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinina zanardini* در pH برابر با ۵ بالاترین میزان جذب با مقدار ۸۸/۶٪ و برای جلبک سبز *Ulva rigida* در pH برابر با ۶ بالاترین میزان جذب با مقدار ۸۱/۴٪ به دست آمد. در مقایسه میان میزان جذب نتایج نشان داد که جلبک قهوه‌ای درصد بالایی از جذب را در مقایسه با جلبک سبز دارد. نکته قابل توجه در مورد جذب فلز سنگین سرب به وسیله سرب، افزایش راندمان در pH های اسیدی و پایین می‌باشد که دلیل آن رقابت بین کاتیون و پروتون برای اشغال محل‌های اتصال است و کاهش میزان جذب در pH های بالا به دلیل تشکیل رسوب سرب هیدروکسید می‌باشد. به‌طور کلی تفاوت در رفتار جذبی فلز سرب توسط دو جلبک، به دلیل تفاوت در ظرفیت تعویض یون در سطح جاذب زیستی که مربوط به دانسیته بار کاتیون است، می‌باشد. به عبارتی دیگر در pH های پایین میزان فضای لازم برای جذب سرب توسط دو جلبک بیشتر از فضای موجود در pH های بالا است که به این دلیل هم میزان جذب در pH های پایین افزایش پیدا می‌کند.

نکته قابل توجه در مورد بررسی اثر pH در حذف فلز سنگین سرب توسط دو جلبک قهوه‌ای و سبز مورد بررسی، بالا رفتن میزان جذب زیستی این دو فلز در pH های پایین و اسیدی است. در توجیه این اثر باید گفت که در این pH میزان رقابت بین کاتیون و پروتون در اشغال کردن مکان‌های فعال جذب

از تصویر به دست آمده مشخص شد که تمامی ذرات موجود در جاذب زیستی تولید شده دارای ابعاد در حدود ۵۰ nm می‌باشند و توزیع اندازه ذرات در سطح نانوساختارها به صورت یکنواخت می‌باشد.

۳-۲- اثر pH محلول

نتایج مربوط به تأثیر pH محلول بر میزان جذب زیستی یون سرب توسط جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinina zanardini* و جلبک سبز *Ulva rigida* در شکل (۲) نشان داده شده است. برای بررسی تأثیر pH، آزمایش‌ها در بازه pH از ۳ تا ۹ انجام شده است.



شکل ۲- اثر pH محلول بر میزان جذب زیستی یون سرب توسط جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinina zanardini* و جلبک سبز *Ulva rigida*

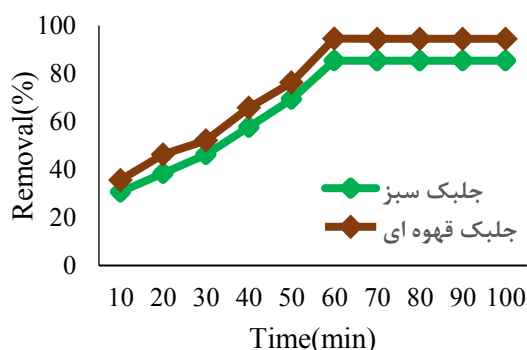
Fig. 2 The effect of solution pH on the bioadsorption of lead ion by brown algae *Nizimuddinina zanardini* and green algae *Ulva rigida*

نتایج به دست آمده نشان داد که حداقل راندمان جذب سرب برای جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinina zanardini* در pH برابر با ۳ با مقدار ۲۸/۹٪ به دست آمد در حالی که این مقدار در

می‌نماید. در pH های پایین، به خاطر وجود یون های H^+ که با یون های فلزات رقابت می‌کنند، میزان جذب بالا بوده و در pH های بالا نیز به خاطر تراکم یون های OH^- باعث رسوب یون های فلزات می‌شوند، از میزان جذب کاسته می‌شود (Al-Homaidan 2020).

۳-۳ اثر زمان تماس

نتایج مربوط به تأثیر زمان تماس بر میزان جذب زیستی یون سرب توسط جلبک قهوه‌ای *Nizimuddin zanardini* و جلبک سبز *Ulva rigida* در شکل (۳) نشان داده شده است. برای بررسی تأثیر زمان تماس، آزمایش‌ها در بازه زمانی ۱۰ تا ۱۰۰ min انجام شده است.



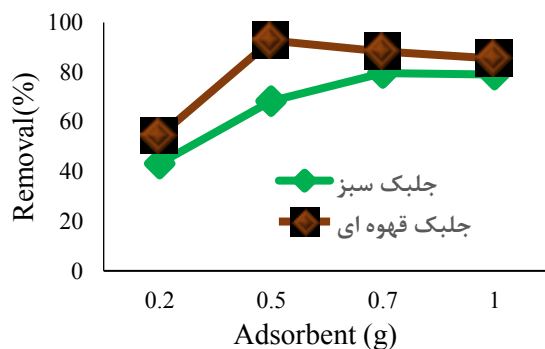
شکل ۳- تأثیر زمان تماس بر میزان جذب زیستی یون سرب به وسیله جلبک قهوه‌ای *Nizimuddin zanardini* و جلبک سبز *Ulva rigida*

Fig. 3 The effect of contact time on the amount of lead ion biosorption by brown algae *Nizimuddin zanardini* and green algae *Ulva rigida*

نتایج به دست آمده نشان داد که حداقل راندمان جذب سرب برای جلبک قهوه‌ای *Nizimuddin zanardini* در زمان تماس ۱۰ min با مقدار ۳۵/۶٪ به دست آمد در حالی که این مقدار در همان زمان برای جلبک سبز *Ulva rigida* برابر با ۳۰/۳٪ حاصل شده است. با افزایش زمان تماس روند جذب سرب توسط دو جلبک حالت صعودی به خود گرفته است. برای جلبک قهوه‌ای *Nizimuddin zanardini* و جلبک سبز *Ulva rigida* بالاترین میزان جذب در زمان ۶۰ min به ترتیب برابر با ۹۴/۵ و ۸۵/۳٪ به دست آمد. در مقایسه میان میزان جذب نتایج نشان داد که جلبک قهوه‌ای درصد بالایی از جذب را در مقایسه با جلبک سبز دارد. میزان جذب بالاتر در زمان‌های اولیه به دلیل وجود محل‌های فعال زیاد و خالی در سطح دو جذب زیستی است که با گذشت زمان این محل‌های

بالا است که این اتفاق در pH های پایین رخ می‌دهد و در نتیجه سبب افزایش میزان جذب می‌گردد. به‌طور کلی تفاوت در رفتار جذبی فلز سرب توسط دو جلبک، به دلیل تفاوت در ظرفیت تعویض یون در سطح جذب زیستی که مربوط به دانسیته بار کاتیون است، می‌باشد. در pH های پایین به طور کلی اتصال سطحی و جذب درون سلولی فلزات توسط جذب‌های زیستی افزایش پیدا می‌کند (Lee et al. 2019). این نتایج با یافته‌های پژوهشی Ahmadi-Asbchin and Jaffari (2014) که در پژوهش خود اقدام به بررسی عملکرد زیست‌توده مرده‌ی جلبک فوکوس سرتوس برای جذب زیستی هم‌زمان فلزات سنگین از محیط آبی کردند مطابقت داشت، زیترادر مقدار pH برابر با ۵/۵ بالاترین میزان جذب به دست آمد. همچنین یافته‌های پژوهشی Sayad Anari and Shokri (2017) که در پژوهش خود اقدام به جذب زیستی فلزات سنگین کادمیوم و سرب از محیط‌های آبی با استفاده از جلبک اسپروئیر کرده بودند نشان داد که بهترین میزان pH در جذب فلزات سرب و کادمیوم برابر با ۵ است که با نتایج این پژوهش هم مطابقت داشت. به‌طور کلی، pH محلول بیشترین اهمیت را در جذب زیستی داشته است، که بر روی ماهیت شیمیایی محلول، فعال‌شدن گروه‌های عاملی جذب و اتصال یون‌های فلزات به آنها تأثیر می‌گذارد. نتایج این پژوهش موید این است که با افزایش pH میزان جذب افزایش و سپس کاهش یافته است، تعادل جذب شدیداً به ماهیت شیمیایی یون‌های فلزات، جذب و آب بستگی دارد. جذب یون‌های کاتیونی فلزات در pH های اسیدی اتفاق می‌افتد. وابستگی جذب فلزات به pH ارتباط زیادی به گروه‌های عاملی سطح جذب به‌ویژه گروه کربوکسیل روی دیواره سلولی و فرم شیمیایی فلز در آب دارد. در اتصال بین فلز و جذب، نوع بار سایت‌های جذب مهم هستند که منجر به جاذبه الکترواستاتیک بین یون با بار مثبت فلز و بار منفی سایت‌ها می‌شوند (Dinari et al. 2020). با افزایش pH (در محدوده اسیدی)، میزان جذب نیز افزایش می‌یابد. در pH اسیدی نزدیک به خنثی، بارهای منفی خالص بر روی اجزای دیواره حضور دارند و حالت یونی لیگاندی‌هایی چون کربوکسیل، فسفات و گروه‌های آمینه، برای واکنش با یون‌های فلزی را افزایش می‌دهد. با کاهش pH بار سطحی کلی بر روی سلول‌ها مثبت می‌شود که از نزدیک شدن یون‌ها به سطح سلولی جلوگیری

در مقایسه میان میزان جذب نتایج نشان داد که جلبک قهوه‌ای درصد بالایی از جذب را در مقایسه با جلبک سبز دارد. به‌طورکلی، نتایج نشان دهنده افزایش میزان جذب در اثر افزایش مقدار جاذب می‌باشد. این روند افزایشی در میزان جذب ادامه می‌یابد، تا زمانی که با افزایش جاذب تغییر عمده‌ای در میزان جذب مشاهده نمی‌شود و در واقع فرایند جذب به تعادل رسیده است. در این مرحله تعداد کاتیون موجود در محلول کاهش یافته، در نتیجه افزایش مقدار جاذب اثر چندانی بر افزایش جذب ندارد. در مقادیر بهینه برای دو جلبک قهوه‌ای و سبز که بیشترین مقدار جذب حاصل شده است، تعداد مکان‌های فعال در دسترس بالا است که سبب افزایش راندمان جذب می‌گردد.



شکل ۴- نتایج تأثیر مقدار جاذب بر میزان جذب زیستی یون سرب توسط جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinina zanardini* و جلبک سبز *Ulva rigida*

Fig. 4 The results of the effect of adsorbent amount on the amount of lead ion biosorption by brown algae *Nizimuddinina zanardini* and green algae *Ulva rigida*

نتایج به دست آمده نشان داد که روند افزایشی در میزان جذب ادامه می‌یابد، تا زمانی که با افزایش جاذب تغییر عمده‌ای در میزان جذب مشاهده نشود. در واقع فرایند جذب به تعادل رسیده است. در این مرحله تعداد کاتیون موجود در محلول کاهش یافته، در نتیجه افزایش مقدار جاذب اثر چندانی بر افزایش جذب ندارد. (Sinaei et al. (2018) اعلام داشته‌اند که در فرایند جذب با افزایش دوز جاذب، درصد جذب نیز افزایش پیدا می‌کند اما با افزایش غلظت اولیه فلز از میزان جذب به علت پر شدن سایت‌های جاذب توسط کاتیون‌ها و عدم قدرت جاذب در جذب کاتیون‌های فلز کاسته می‌شود. طبق نتایج (Nguema et al. (2020) با افزایش مقدار جاذب، درصد جذب افزایش یافته است و علت آن را بالارفتن سطح

خالی به‌وسیله یون سرب اشغال شده و در نتیجه منجر به برقراری تعادل در ظرفیت جذب دو جاذب می‌گردد.

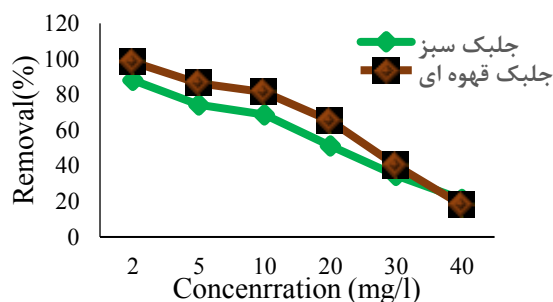
نتایج جذب زیستی این دو فلز سنگین توسط دو گونه جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinina zanardini* و جلبک سبز *Ulva rigida* نشان داد که برای جذب هر فلز سنگین سرب توسط هر دو جلبک، بالاترین میزان جذب در زمان تماس ۶۰ min حاصل شد. قدرت جذب دو گونه جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinina zanardini* و جلبک سبز *Ulva rigida* در جذب فلزات سنگین از قدرت جذب جلبک *Scenedesmus Sp* که توسط (Zelli Booriabadi et al. (2020) برای جذب فلزات سنگین استفاده شد بالاتر بود، زیرا این دو جلبک در زمان ۶۰ min توانستند به بالاترین میزان جذب برسند در حالی که این زمان برای جلبک *Scenedesmus Sp* برابر با ۱۲۰ min بود که قدرت این دو جاذب را نشان می‌دهد. در تشریح این میزان باید بیان داشت که افزایش بازده جذب در زمان‌های اولیه به علت سطح بستر بزرگتر و در دسترس بودن جاذب می‌باشد اما بعد از رسیدن به زمان تعادل محل‌های خالی سطح جاذب اشغال شده و بازده یک روند ثابت را دنبال می‌کند (Zhuang and Zhang (2015).

۳-۴- اثر مقدار جاذب

نتایج مربوط به تأثیر مقدار جاذب بر میزان جذب زیستی یون سرب توسط جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinina zanardini* و جلبک سبز *Ulva rigida* در شکل (۴) نشان داده شده است. برای بررسی تأثیر مقدار جاذب، آزمایش‌ها در بازه ۰/۲، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ g انجام شد.

شکل (۴) نشان می‌دهد که حداقل راندمان جذب سرب برای جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinina zanardini* در مقدار جاذب ۰/۲ g برابر با مقدار ۵۴/۳٪ به دست آمد در حالی که این مقدار در همان مقدار جاذب برای جلبک سبز *Ulva rigida* برابر با ۴۳/۲٪ حاصل شد. با افزایش مقدار جاذب روند جذب سرب توسط دو جلبک حالت صعودی به خود گرفته است. برای جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinina zanardini* در مقدار جاذب ۰/۵ g بالاترین مقدار جذب برابر با ۹۲/۷٪ به دست آمد. در حالی که برای جلبک سبز *Ulva rigida* بالاترین میزان جذب در مقدار جاذب ۰/۷ g برابر با ۷۹/۶٪ حاصل شد.

۸۸٪/۱ حاصل شد. در مقایسه میان میزان جذب نتایج نشان داد که جلبک قهوه‌ای درصد بالایی از جذب را در مقایسه با جلبک سبز دارد. به طور کلی نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اولیه سرب، راندمان حذف این فلز سنگین کاهش یافته است که حاکی از وجود یک رابطه معکوس میان کارایی جاذب‌های زیستی با غلظت اولیه دارد که دلیل آن این است که جاذب‌ها دارای تعداد محل‌های فعال محدودی هستند که در غلظت‌های بالا اشباع می‌شود، لذا با کاهش غلظت اولیه سرب مقدار یون‌های فلزی موجود در محلول کاهش می‌یابد و در نتیجه جاذب درصد بالایی از یون‌ها را جذب می‌کند. نتایج نشان داد که در غلظت‌های پایین مواد آلاینده در محل‌های ویژه جذب می‌شوند، در حالی که با افزایش غلظت محل‌های ویژه پر شده و آن‌ها در محل‌های تبادلی جذب می‌شوند که به دلیل کم بودن تعداد این محل‌ها بازده حذف نیز کاهش می‌یابد (Petrovič and Simonič 2016). نتایج پژوهش‌های دیگر نشان می‌دهد که کارایی حذف یون‌های فلزی در لحظات اولیه بیشتر است. این پدیده به دلیل وجود محل‌های خالی زیاد در لحظات اولیه بر روی جاذب است و با گذشت زمان این محل‌ها توسط مولکول‌های فلز سنگین اشغال می‌گردد که با نتایج به-دست آمده از این پژوهش مطابقت دارد (Jamoussi et al. 2020).



شکل ۵- نتایج تأثیر غلظت بهینه یون فلزی بر میزان جذب زیستی یون سرب توسط جلبک قهوه‌ای *Nizimuddin* و جلبک سبز *Ulva rigida*

Fig. 5 The results of the effect of the optimum metal ion concentration on the biological adsorption of lead ion by brown algae *Nizimuddin zanardini* and green algae *Ulva rigida*

۳-۶- ایزوترم‌های جذب برای جذب زیستی یون سرب در شکل (۶- الف) نمودار ایزوترم لانگمویر برای جذب زیستی یون سرب توسط جلبک قهوه‌ای *Nizimuddin zanardini* نشان داده شده است. با رسم نمودار لانگمویر برای فرآیند

دسترسی سایت‌های جذب با یکدیگر دانسته که موجب بر هم کنش‌های الکتروستاتیکی بین سلول‌ها شده و در نتیجه باعث افزایش سطح کل می‌شود. به‌طور کلی در این پژوهش با افزایش دوز جاذب، درصد جذب به علت افزایش سایت‌های دخیل در فرآیند جذب افزایش یافته است که این نتیجه با یافته‌های پژوهش Pham et al. (2021) که اقدام به حذف فلزات سنگین از محلول آبی با استفاده از *Hizikia fusiformis* به‌عنوان جاذب زیستی مبتنی بر جلبک اقدام کرده بودند، مطابقت داشت زیرا این محققین هم اعلام کرده بودند که در جذب زیستی فلزات سنگین با افزایش میزان دوز جاذب از مقدار 0.2 g به 1.5 g ظرفیت جذب هم افزایش یافته که این افزایش ناشی از بالا رفتن نیروهای پیش‌رونده در مقدارهای بالا از دوزهای اولیه جاذب زیستی می‌باشد که این امر سبب می‌شود تمام سایت‌های جذب به سرعت توسط یون‌های فلز سنگین جذب شوند. در فرآیندهای جذب، آزمایش‌های متعددی توسط محققان مختلف با استفاده از مواد جاذب گوناگون نشان داده است که افزایش مقدار جاذب یکی از پارامترهای مؤثر در افزایش بازده جذب است چرا که با افزایش مقدار جاذب سطح تبادلی موجود برای جذب تعادلی که در اختیار ماده جذب شونده است افزایش می‌یابد.

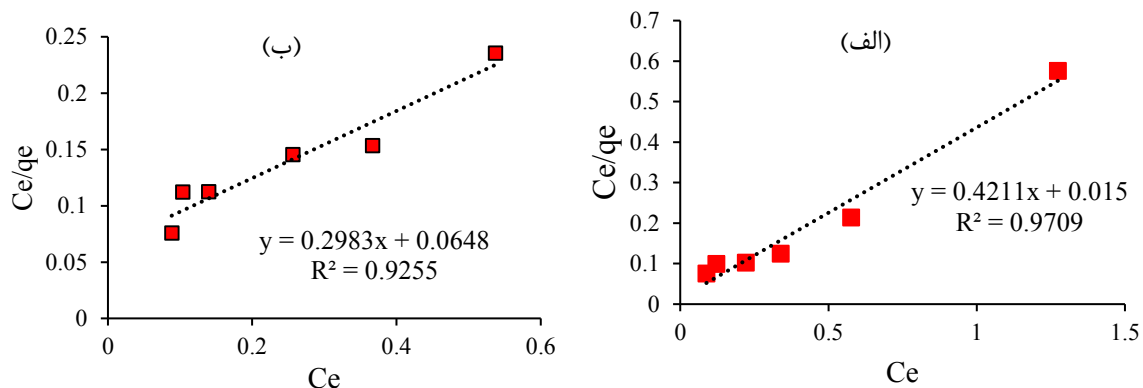
۳-۵- اثر غلظت بهینه یون فلزی

نتایج مربوط به تأثیر غلظت بهینه یون فلزی بر میزان جذب زیستی یون سرب توسط جلبک قهوه‌ای *Nizimuddin* و جلبک سبز *Ulva rigida* در شکل (۵) نشان داده شده است. برای بررسی تأثیر غلظت بهینه یون فلزی، آزمایش‌ها در مقادیر ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و 40 mg/l انجام شد.

شکل (۵) نشان می‌دهد که حداقل راندمان جذب سرب برای جلبک قهوه‌ای *Nizimuddin zanardini* در غلظت 40 mg/l برابر با مقدار ۱۸٪ به دست آمد در حالی که این مقدار در همان غلظت اولیه 40 mg/l برای جلبک سبز *Ulva rigida* برابر با ۲۱٪/۲ حاصل شد. با افزایش میزان غلظت اولیه یون فلزی، روند جذب سرب توسط دو جلبک حالت کاهشی به خود گرفته است. بالاترین میزان جذب برای جلبک قهوه‌ای *Nizimuddin zanardini* در غلظت اولیه 2 mg/l برابر با ۹۸٪/۳ به دست آمد در حالی که برای جلبک سبز *Ulva rigida* بالاترین میزان جذب در غلظت اولیه 2 mg/l برابر با

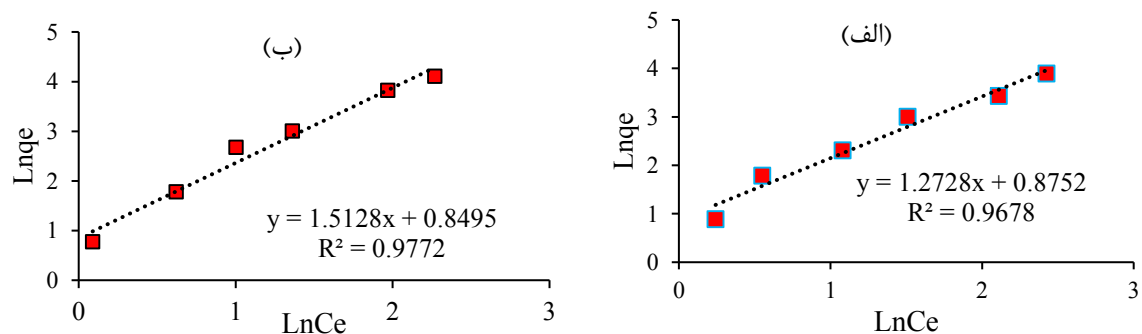
Ulva rigida نشان داده شده است. با رسم نمودار لانگمویر برای فرآیند جذب کاتیون فلز سرب با استفاده از جلبک سبز *Ulva rigida* به کمک مقادیر شیب و عرض از مبدا مقادیر K_L (ثابت جذب لانگمویر) 0.1563 mg/l ، $q_{\max}$ (ظرفیت جذب تک لایه) $24/202 \text{ mg/g}$ و R_L (پارامتر تعادلی) 0.563 بدست آمدند. اگر $R_L < 1$ باشد، فرآیند جذب یک جذب مطلوب است. در مورد فرآیند جذب کاتیون فلز سنگین سرب بر روی جلبک سبز *Ulva rigida* مقدار R_L بدست آمده بین ۰ و ۱ است که نشان دهنده یک جذب مطلوب است.

جذب کاتیون فلز سرب با استفاده از جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinia zanardini* به کمک مقادیر شیب و عرض از مبدا مقادیر K_L (ثابت جذب لانگمویر) 0.1074 l/mg ، $q_{\max}$ (ظرفیت جذب تک لایه) $22/111 \text{ mg/g}$ و R_L (پارامتر تعادلی) 0.317 بدست آمدند. اگر $R_L < 1$ باشد، فرآیند جذب یک جذب مطلوب است. در مورد فرآیند جذب کاتیون فلز سنگین سرب بر روی جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinia zanardini* مقدار R_L بدست آمده بین ۰ و ۱ است که نشان دهنده یک جذب مطلوب است. در شکل (۶-ب) نمودار ایزوترم لانگمویر برای جذب زیستی یون سرب توسط جلبک سبز



شکل ۶- نمودار ایزوترم لانگمویر برای جذب زیستی یون سرب توسط (الف) جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinia zanardini* و (ب) جلبک سبز *Ulva rigida*

Fig. 6 Langmuir isotherm diagram for lead ion biosorption by a) brown algae *Nizimuddinia zanardini* and b) green algae *Ulva rigida*



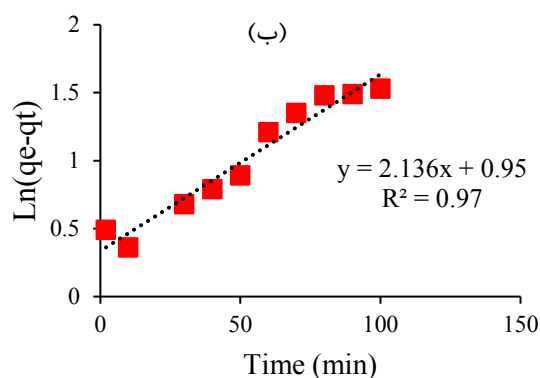
شکل ۷- نمودار ایزوترم فروندلیچ برای جذب زیستی یون سرب توسط (الف) جلبک قهوه‌ای و (ب) جلبک سبز

Fig. 7 Freundlich isotherm diagram for lead ion biosorption by a) brown algae and b) green algae

آمده‌اند. مقدار ضریب تعیین (R^2) نیز برابر با 0.9678 می‌باشد. در شکل (۷-ب) نمودار ایزوترم فروندلیچ برای جذب زیستی یون سرب توسط جلبک سبز *Ulva rigida* نشان داده شده است. از رسم نمودار $\ln Ce$ بر حسب $\ln q_e$ برای ایزوترم فروندلیچ از روی مقادیر شیب و عرض از مبدا به ترتیب ثابت‌های n_f و K_f بدست آمدند. این مقادیر برای فرآیند جذب

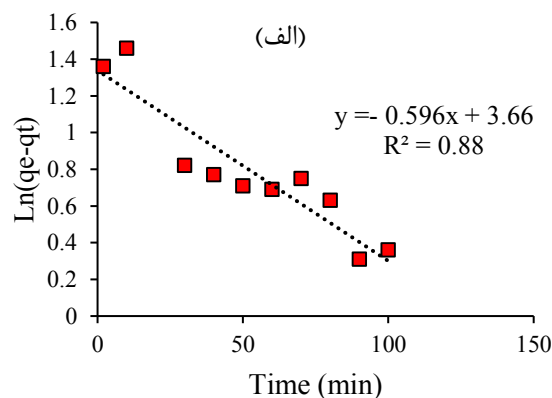
در شکل (۷-الف) نمودار ایزوترم فروندلیچ برای جذب زیستی یون سرب توسط جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinia zanardini* نشان داده شده است. از رسم نمودار $\ln Ce$ بر حسب $\ln q_e$ برای ایزوترم فروندلیچ از روی مقادیر شیب و عرض از مبدا به ترتیب ثابت‌های n_f و K_f بدست آمدند. این مقادیر برای فرآیند جذب کاتیون فلز سرب به ترتیب $1/658$ و $2/399$ به دست

توسط جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinia* برابر با مقدار $q_e = 39/37 \text{ mg/g}$ و $K_2 = 0/000487 \text{ min}^{-1}$ است. در شکل (۸-ب) نمودار سینتیک مرتبه دوم برای جذب زیستی یون سرب توسط جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinia* گزارش شده است. بررسی سینتیک درجه دوم نشان می‌دهد که این مدل در جذب سرب بر روی جاذب بهتر عمل کرده است و داده‌های تجربی بر روی یک خط منطبق شده‌اند و ضریب تعیین بیشتری از خود نشان می‌دهند. مقدار q_e (مقدار جذب شونده در واحد جرم جاذب در حالت تعادل) و K_2 (ثابت سرعت سینتیک) برای معادله سینتیکی مرتبه دوم در جذب زیستی یون سرب توسط جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinia* برابر با مقدار $q_e = 21/15 \text{ mg/g}$ و $K_2 = 0/0152 \text{ min}^{-1}$ است.



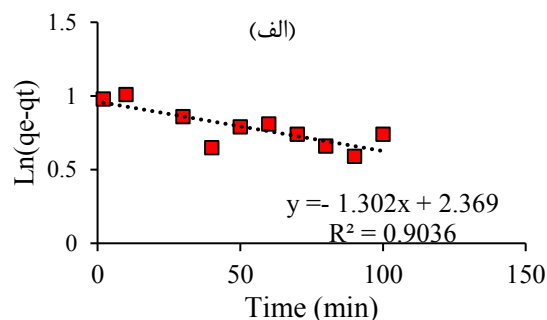
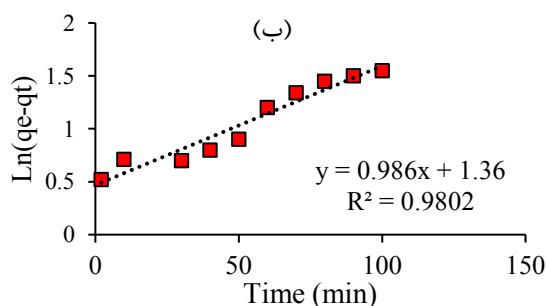
کاتیون فلز سرب به ترتیب ۱/۹۱۳ و ۳/۴۵۵ به دست آمده‌اند. مقدار ضریب تعیین (R^2) نیز برابر با ۰/۹۷۷۲ می‌باشد.

در شکل (۸-الف) نمودار سینتیک مرتبه اول برای جذب زیستی یون سرب توسط جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinia* گزارش شده است. بررسی سینتیک درجه اول بر طبق معادله لاگ‌گرن نشان می‌دهد که داده‌های تجربی با سینتیک مرتبه اول بر روی یک خط منطبق نشده‌اند و ضریب تعیین مناسبی ندارند. در سینتیک مرتبه اول و دوم، مقدار q_e (مقدار جذب شونده در واحد جرم جاذب در حالت تعادل) و K_2 (ثابت سرعت سینتیک) به ترتیب از روی شیب و عرض از مبدا نمودار و معادلات سینتیک بدست می‌آیند. این مقادیر برای معادله سینتیکی مرتبه اول در جذب زیستی یون سرب



شکل ۸- نمودار (الف) سینتیک مرتبه اول و (ب) سینتیک مرتبه دوم برای جذب زیستی یون سرب توسط جلبک قهوه‌ای
Fig. 8: a) First-order kinetic and b) Second-order kinetic diagram for lead ion biosorption by brown algae

در این پژوهش، داده‌های تعادلی جذب سرب بر روی جلبک سبز *Ulva rigida* توسط مدل‌های سینتیکی درجه اول و درجه دوم تحلیل شدند.



شکل ۹- نمودار (الف) سینتیک مرتبه اول و (ب) سینتیک مرتبه دوم برای جذب زیستی یون سرب توسط جلبک سبز
Fig. 9: a) First-order kinetic and b) Second-order kinetic diagram for lead ion biosorption by green algae

مقدار ۰/۵ و ۰/۷ g توانسته‌اند بیشترین مقدار جذب سرب را داشته باشند. در بررسی غلظت یون فلزی، بیشترین مقدار معادل ۲ mg/l حاصل شد. برای هر دو جلبک بهترین زمان جذب در ۶۰ min بود.

۳- جذب سرب به‌وسیله جاذب‌های مورد استفاده یک جذب مطلوب است و جذب یون فلز سنگین سرب به‌وسیله جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinina zanardini* با ایزوترم لانگمویر، جذب یون فلز سنگین سرب به‌وسیله جلبک سبز *Ulva rigida* با ایزوترم فروندلیچ مطابقت دارد.

۴- جلبک قهوه‌ای مورد استفاده توانایی بیشتری در جذب فلزات سنگین از جلبک سبز داشت.

مطابق با نتایج به دست آمده در این پژوهش پیشنهاد می‌شود که ارزیابی ویژگی‌های جذبی سایر میکروارگانیسم‌های جلبکی در جذب زیستی فلزات سنگین از محلول‌های آبی مورد بررسی قرار گیرد.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده شده یا تولید شده در این پژوهش در متن مقاله ارائه شده است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که، هیچ‌گونه تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

References

- Ahmadi-Asbchin, S., & Jaffari, N. (2014). Performance of dead *Fucus serratus* biomass in binary biosorption of Cd(II) and Ni(II) from aquatic habitat. *Nova Bio. Reperta*, 1(1), 45-55 [in Persian] DOI: [10.29252/nbr.1.1.45](https://doi.org/10.29252/nbr.1.1.45)
- Ahmadpari, H., Nasehi Peykani, T., Afarinandeh, A., Noroozian, A., & Kabiri, F. (2020). Removal of Pb(II) ions from aqueous solution using leaves of Palm trees. *J. Adv. Pharm. Edu. Res.*, 10(4), 135-139.
- Al-Dhabi, N.A., & ValanArasu, M. (2022). Biosorption of hazardous waste from the municipal wastewater by marine algal biomass. *Environ. Res.*, 204(3), 1112-1126. DOI: [10.1016/j.envres.2021.112115](https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112115)
- Al-Homaidan, A. A., Al-Ghanayem, A. A., Al-Qahtani, H. S., Al-Abbad, A. F., Alabdullatif, J. A., Alwakeel, S. S., & Ameen, F. (2020). Effect of sampling time on the heavy metal concentrations of brown algae: A bioindicator study on the Arabian Gulf coast. *Chemosphere.*, 263(5), 15-30. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2020.127998](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127998)
- Almomani, F., & Bhosale, R. R. (2021). Bio-sorption of toxic metals from industrial wastewater by algae strains *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris*: Application of

در شکل (۹-الف) نمودار سینتیک مرتبه اول برای جذب زیستی یون سرب توسط جلبک سبز *Ulva rigida* گزارش شده است. بررسی سینتیک درجه اول نشان می‌دهد که داده‌های تجربی با سینتیک مرتبه‌ی اول بر روی یک خط منطبق نشده‌اند و ضریب تعیین برابر با ۰/۹۰۳۶ دارند. مقدار q_e (مقدار جذب شونده در واحد جرم جاذب در حالت تعادل) و K (ثابت سرعت سینتیک) برای معادله سینتیکی مرتبه اول در جذب زیستی یون سرب توسط جلبک سبز *Ulva rigida* برابر با مقدار $q_e = 26/96 \text{ mg/g}$ و $K_2 = 0/00214 \text{ min}^{-1}$ است. در شکل (۹-ب) نمودار سینتیک مرتبه دوم برای جذب زیستی یون سرب توسط جلبک سبز *Ulva rigida* گزارش شده است. بررسی سینتیک درجه دوم نشان می‌دهد که این مدل در جذب سرب بر روی جاذب بهتر عمل کرده است و داده‌های تجربی بر روی یک خط منطبق شده‌اند و ضریب تعیین برابر با ۰/۹۸۰۲ از خود نشان می‌دهند. مقدار q_e (مقدار جذب شونده در واحد جرم جاذب در حالت تعادل) و K_2 (ثابت سرعت سینتیک) برای معادله سینتیکی مرتبه دوم در جذب زیستی یون سرب توسط جلبک سبز *Ulva rigida* برابر با مقدار $q_e = 32/17 \text{ mg/g}$ و $K_2 = 0/0445 \text{ min}^{-1}$ است.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده عبارت است از:

۱- در جذب سرب، جلبک قهوه‌ای در pH برابر با ۵ و جلبک سبز در pH برابر با ۶ توانسته است به حداکثر جذب برسد.

۲- دو جاذب زیستی جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinina zanardini* و جلبک سبز *Ulva rigida* به ترتیب در

- isotherm, kinetic models and process optimization. *Sci. Total Environ.*, 755, 2, 142654. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.142654](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142654)
- Awual, M. R. (2019). Mesoporous composite material for efficient lead(II) detection and removal from aqueous media. *J. Environ. Chem. Eng.*, 7(5), 103-124. DOI: [10.1016/j.jece.2019.103124](https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103124)
- Dinari, M., Atabaki, F., Pahnavar, Z., Soltani, & R. (2020). Adsorptive removal properties of bivalent cadmium from aqueous solution using porous poly(N-2-methyl-4-nitrophenyl maleimide-maleic anhydride-methyl methacrylate) terpolymers. *J. Environ. Chem. Eng.*, 8(6), 263-275. DOI: [10.1016/j.jece.2020.104560](https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104560)
- Enkari, M., & Ebrahimi Aghmasjed, E. (2019). Removal of nitrate ion from aqueous solution using octa decyl amine modified montmorillonite nano clay. *j. environ. water eng.*, 4(4), 274– 285 [In Persian]. DOI: [10.22034/jewe.2018.129150.1258](https://doi.org/10.22034/jewe.2018.129150.1258)
- Inthorn, D., Siditooon, N., Silapanuntakula, S. and Incharoensakd, A. (2017). Sorption of mercury, cadmium and lead by microalgae. *J. Sci. Asia*, 28(6), 253-261. DOI: [10.2306/scienceasia1513-1874.2002.28.253](https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2002.28.253)
- Jamoussi, B., Jamoussi, R., Jablaoui, C., & Rhazi, L. (2020). Efficiency of Acacia Gummiifera powder as biosorbent for simultaneous decontamination of water polluted with metals. *Arab. J. Chem.*, 13(10), 7459-7481. DOI: [10.1016/j.arabjc.2020.08.022](https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.08.022)
- Jin, Z., Xie, L., & Zhang, T. (2020). Interrogating cadmium and lead biosorption mechanisms by *Simplicillium chinense* via infrared spectroscopy. *Environ. Pollut.*, 263(4), 555-569. DOI: [10.1016/j.envpol.2020.114419](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114419)
- Lee, K.Y., Lee, S.H., Lee, J.E., & Lee, S.Y. (2019). Biosorption of radioactive cesium from contaminated water by microalgae *Haematococcus pluvialis* and *Chlorella vulgaris*. *J. Environ. Manag.*, 233(4), 83–88. DOI: [10.1016/j.jenvman.2018.12.022](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.022)
- Li, M., Huang, W., Tang, B., Fang, Q., Ling, X., & Lv, A. (2020). Characterizations and n-Hexane Vapor Adsorption of a Series of MOF/Alginates. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 59(6), 18835-18843. DOI: [10.1021/acs.iecr.9b06744](https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b06744)
- Liu, Y., Hu, L., Tan, B., Li, J., Gao, X., He, Y., Du, X., Zhang, W., & Wang, W. (2019). Adsorption behavior of heavy metal ions from aqueous solution onto composite dextran-chitosan macromolecule resin adsorbent. *Int. J. Biol. Macromol.*, 141(5), 738-746. DOI: [10.1016/j.ijbiomac.2019.09.044](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.09.044)
- Maiti, S., Khillar, P. S., Mishra, D., Nambiraj, N. A., & Jaiswal, A. K. (2021). Physical and self-crosslinking mechanism and characterization of chitosan-gelatin-oxidized guar gum hydrogel. *Polym. Test*, 97(7), 107-125. DOI: [10.1016/j.polymertesting.2021.107155](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107155)
- Nguema, P. F., Luo, Z., & Lian, J. (2014). The biosorption of Cr(VI) ions by dried biomass obtained from a chromium-resistant bacterium. *Front. Chem. Sci. Eng.*, 8(3), 454–464. DOI: [10.1007/s11705-014-1456-4](https://doi.org/10.1007/s11705-014-1456-4)
- Petrovič A., & Simonič M (2016). Removal of heavy metal ions from drinking water by alginate-immobilised *Chlorella sorokiniana*. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 13(5), 1761–1780. DOI: [10.1007/s13762-016-1015-2](https://doi.org/10.1007/s13762-016-1015-2)
- Pham, B. N., Kang, J. K., Lee, C. G., & Park, S. J. (2021). Removal of heavy metals (Cd^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+}) from aqueous solution using *hizikia fusiformis* as an algae-based bioadsorbent. *Appl. Sci.*, 11(18), 8640-8659. DOI: [10.3390/app11188604](https://doi.org/10.3390/app11188604)
- Roa, K., Oyarce, E., Boulett, A., ALSamman, M., Oyarzún, D., & Pizarro, G. D. C. (2021). Lignocellulose-based materials and their application in the removal of dyes from water: A review. *Sustain. Mater. Technol.*, 29(2), 320-341. DOI: [10.1016/j.susmat.2021.e00320](https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00320)
- Sayad Anari, M. H., & Shokri, H. (2017). Biosorption of heavy metals cadmium and lead from aquatic environments using *spirochete* algae. *Environ. J.*, 43(3), 379-390 [In Persian].
- Sinaei, M., Loghmani, M., & Bolouki, M. (2018). Application of biomarkers in brown algae (*Cystoseria indica*) to assess heavy metals (Cd, Cu, Zn, Pb, Hg, Ni, Cr) pollution in the northern coasts of the Gulf of Oman. *Ecotoxic. Environ. Safe.*, 164(1), 675-680. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2018.08.074](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.074)

- Taşdelen, B., Çifçi, D. İ., & Meriç, S. (2021). Preparation and characterization of chitosan/hyaluronic acid/itaconic acid hydrogel composite to remove heavy metals in aqueous solution. *Desal. Water Treat.*, 209(9), 204-211. DOI: [10.5004/dwt.2021.26640](https://doi.org/10.5004/dwt.2021.26640)
- Wu, Q., He, H., Zhou, H., Xue, F., Zhu, H., & Zhou, S. (2020). Multiple active sites cellulose-based adsorbent for the removal of low-level Cu(II), Pb(II) and Cr(VI) via multiple cooperative mechanisms. *Carbohydr. Polym.*, 233(6), 115-125. DOI: [10.1016/j.carbpol.2020.115860](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.115860)
- Xuejiang, W., Ling, C., Siqing, X., Jianfu, Z., & Chovelon, J. M., & Renault, N. J. (2016). Biosorption of Cu(II) and Pb(II) from aqueous solutions by dried activated sludge. *Miner. Eng.*, 19(9), 968-71. DOI: [10.1016/j.mineng.2005.09.042](https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.09.042)
- Zelli Booriabadi, M., Hoseini, S. A., Hedayati, S. A., Adeli, A., & Rezaei, H. (2020). Study on isotherm and kinetic for the adsorption of heavy metal Zinc from aqueous solution by *Scenedesmus micro-algae*. *J. Environ. Sci. Technol.*, 22(9), 59-71 [In Persian]. DOI: [10.22034/jest.2021.27538.3660](https://doi.org/10.22034/jest.2021.27538.3660)
- Zhuang, Y. H., & Zhang, T. C. (2015). Effects of dissolved oxygen on formation of corrosion products and contaminant oxygen and nitrate reduction in zero valent iron systems without aqueous Fe^{2+} . *J. Water Res.*, 39(3), 1751-1760. DOI: [10.1016/j.watres.2005.03.002](https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.03.002)



Environment and Water Engineering

Homepage: www.jewe.ir



ISSN: 2476-3683

Research Paper

Effect of pH and Ionic Strength on Removal of Phosphorus Efficiency from Aqueous Solution Using Modified Mineral Adsorbents

Somayeh Moharami^{1*}

¹Assist. Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, Semnan University, Semnan, Iran

Article information

Received: December 18, 2022

Revised: January 15, 2023

Accepted: January 21, 2023

Keywords:

Adsorption Isotherms
Double Layer Model
Maximum Sorption Capacity
Thermodynamic Parameters

*Corresponding author:
s.moharami@semnan.ac.ir



Abstract

Phosphorus (P) is considered the leading cause of eutrophication in natural water and has received considerable attention recently from the scientific community. In this study, P removal from aqueous solutions was investigated using bentonite, kaolinite, calcite, and zeolite mineral adsorbents modified with extract of walnut shell and wheat straw, chitosan, sodium carboxymethyl cellulose (CMC), and malic acid. Phosphorus sorption was evaluated using adsorption isotherms equations. Modified adsorbents with chitosan obtained the maximum sorption capacity of P. The results showed that P sorption capacity by Chitosan-adsorbents including bentonite (0.35 mg/g), calcite (2.09 mg/g), kaolinite (0.41 mg/g) and zeolite (0.43 mg/g) was improved by ~ 129, 102, 128 and 119%, respectively compared with unmodified adsorbents (bentonite (0.27mg/g), calcite (2.04 mg/g), kaolinite (0.32 mg/g) and zeolite (0.36 mg/g). Langmuir and Freundlich models were used to simulate the sorption of P on modified adsorbents. The double layer model (DLM) could predict P adsorption by modified adsorbents over a wide pH range and varying ionic strength. Thermodynamic parameters showed that the nature of P adsorption by these adsorbents was non-spontaneity nature.

How to cite this paper: Moharami, S. (2024). Effect of pH and ionic strength on the removal phosphorus efficiency from aqueous solution using modified mineral adsorbents. *Environ. Water Eng.*, 10(1), 18-36. DOI: <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.377337.1834>. [In Persian].



© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Phosphorus (P) is a naturally occurring element found in the earth's crust, water, and all living organisms. The benefits of adsorption technology are its high efficiency, easy handling, availability of different adsorbents, and cost-effectiveness. Various types of adsorbent, such as zeolite, fly ash, blast furnace slag, steel furnace slag, aluminum, and iron oxides have been widely investigated in recent years. Numerous researchers have modified the surface of adsorbents to achieve better P removal from wastewater. Previous studies have indicated that P adsorption is dependent on ionic strength and pH. Surface complexation models (SCMs) have been highly successful in describing the sorption of P onto adsorbents under varying pH and ionic strength. Of the most commonly used SCMs, the double-layer model (DLM) is the best option for modeling metal adsorption due to the small number of required parameters compared to other SCMs. To our knowledge, there are limited reports of the application of SCMs to describe P sorption as a function of pH and ionic strength on modified adsorbents. The objective of this study was to examine the feasibility of using modified adsorbents for P removal from aqueous solution. Effects of pH and ionic strength on P adsorption capability were also investigated using DLM.

Material and Methods

The tested adsorbents in the present investigation were minerals (i.e., bentonite, calcite, kaolinite, and zeolite). Extract of walnut shell and wheat straw, chitosan, sodium carboxymethyl cellulose (CMC), and malic acid were used to modify mineral adsorbents. The P solutions were prepared by diluting the stock solution of 1000 mg/l (calculated as P, prepared by dissolving KH_2PO_4 in de-ionized water) to desired concentrations. The adsorption isotherms of the P with modified minerals were determined based on batch analysis. Modified adsorbents were allowed to equilibrate with solutions at different initial P

concentrations as 0, 5, 50, 100, 150, 200, and 250 mg/l. Langmuir and Freundlich isotherm models were used to fit the experimental data using the nonlinear procedure with SigmaPlot statistical software package version 11.0.

Desorption experiments were performed immediately following the completion of sorption experiments. Desorbed P was calculated at the desorption stage, and the amount of P still sorbed on the clays at the desorption stage was calculated as the difference between the initial sorbed amount and the desorbed amount and called retention. To investigate the influence of pH and ionic strength on the P adsorption, experiments were carried out by adding 1 g of the modified mineral adsorbents into 50 ml centrifuge tubes containing 10 ml of 50 mg P/l solution. The ionic strength of the solutions varied from 0.001 to 0.1 M by adding NaCl. The pH of the solutions was adjusted with dilute HCl or/and NaOH solution in the range of 2–10 for modified minerals. Then, the P concentration in the supernatant solutions was determined. For the sake of simplicity, the DLM was applied to predict P adsorption over a wide range of pH and varying ionic strength. Adsorption edges for P on 100 g/l of modified adsorbents were analyzed for a concentration of 50 mg/l of P. The change in free energy (ΔG^0), enthalpy (ΔH^0), and entropy (ΔS^0) associated with the adsorption process were calculated.

Results

Results of simulations of experimental data for P sorption onto modified adsorbents using DLM are shown in Fig. 1. The results indicated that the pH was a significant parameter controlling the process of adsorption, while the ionic strength had little influence. All parameters needed for the modeling (surface area, sorption site density and surface complexation constants) were obtained by fitting to the experimental data (Table 1). In the case of modified minerals, results show that the free energy of the process at all temperatures is positive thus the sorption process is not spontaneous.

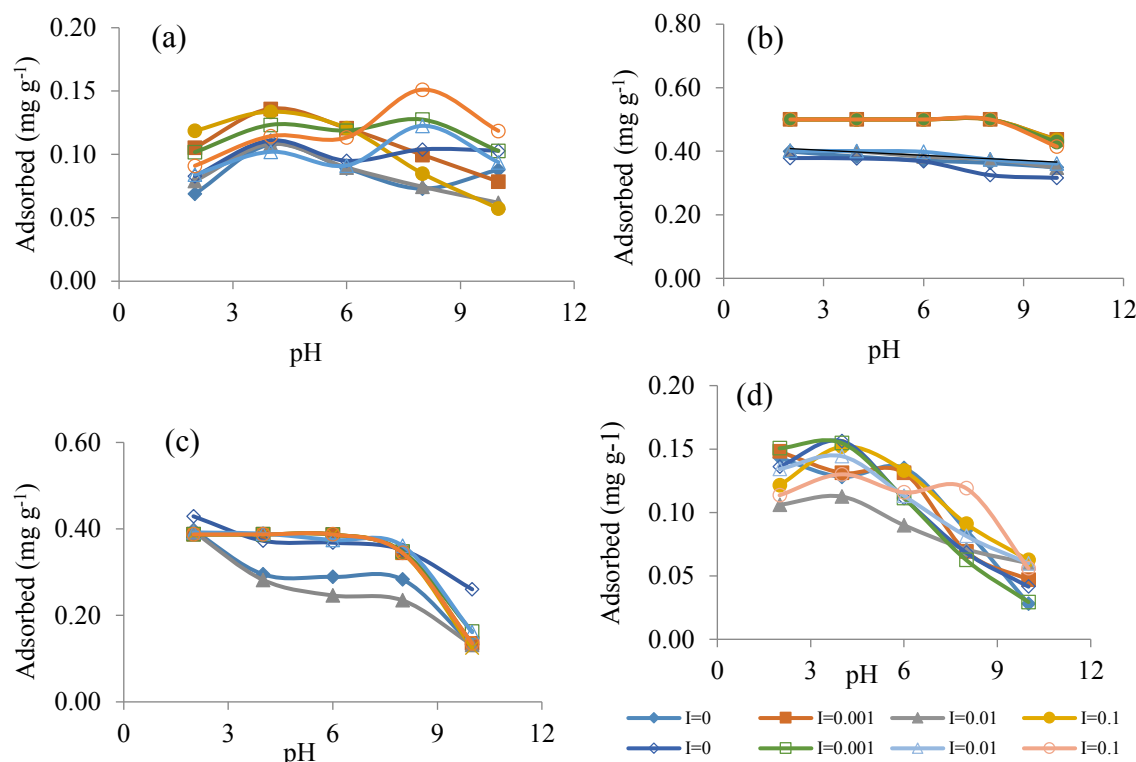


Fig. 1 Effect of pH and ion strength on P sorption onto (a) Chitosan-bentonite, (b) Chitosan-calcite, (c) Chitosan-kaolinite and (d) Chitosan-zeolite. Filled and unfilled symbols represent experimental data and modeling results, respectively

Table 1 Summary of the main parameters needed for modeling: (a) Properties of modified adsorbents and (b) model parameters used to simulate P adsorption

Main parameters needed for modeling		C-B	C-C	C-K	C-Z
(a)	Specific surface area (m ² /g)	85.3*	1.0	3.6	13.8
	Site density (mmol/l)	0.53	8.65	1.13	0.53
(b)	<i>Thermodynamic equilibrium constant (log k)</i>				
	1>SOH ^{-0.5} + H ⁺ + PO ₄ ⁻³ ↔ SOPO ₃ ^{-2.5} + H ₂ O	17.5	-0.8	20.8	20.5
	2>SOH ^{-0.5} + 2H ⁺ + PO ₄ ⁻³ ↔ SO ₂ PO ₂ ⁻² + 2H ₂ O	22.7	-5.1	25.5	30.0
	2>SOH ^{-0.5} + 3H ⁺ + PO ₄ ⁻³ ↔ SO ₂ POOH ⁻¹ + 2H ₂ O	30.2	-6.2	32.6	35.5

* All of the data were obtained from fitting. C-B: Chitosan-bentonite; C-C Chitosan-calcite; C-K: Chitosan-kaolinite; C-Z: Chitosan-zeolite

Conclusions

In this study, batch studies showed that Langmuir and Freundlich models were well-described sorption models of P onto modified mineral adsorbents. Our results showed that Chitosan-adsorbents had higher P sorption capacity among investigated modified adsorbents. Mean adsorbed P by Chitosan-adsorbents and unmodified adsorbents had not significantly different. In addition, the results of this study demonstrated that at different pH, ionic strength had little effect on the adsorption. We used the DLM model to simulate the sorption of P onto Chitosan

adsorbents. Overall, our simulations adequately match the measured data over a wide range of pH and varying ionic strength. Thermodynamic parameters confirmed the endothermic and not spontaneity nature of the P adsorption.

Data Availability

The data can be sent by the corresponding author via email.

Conflicts of interest

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



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir

مقاله پژوهشی

اثر pH و قدرت یونی بر کارآیی حذف فسفر از محلول های آبی به وسیله جاذب های معدنی اصلاح شده

سمیه محرمی^{*}

استادیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت: [۱۴۰۱/۰۹/۲۷] تاریخ بازنگری: [۱۴۰۱/۱۰/۲۵] تاریخ پذیرش: [۱۴۰۱/۱۱/۰۱] واژه های کلیدی: بیشینه ظرفیت جذب پارامترهای ترمودینامیکی مدل دولایه همدمای جذبی *نویسنده مسئول: s.moharami@semnan.ac.ir 	فسفر (P) عامل اصلی پدیده یوتروفیکاسیون در آب های طبیعی در نظر گرفته می شود و اخیراً مورد توجه جوامع علمی قرار گرفته است. در این پژوهش، حذف فسفر از محلول های آبی با استفاده از جاذب های معدنی بنتونیت، کائولینیت، کلسیت و زئولیت اصلاح شده با عصاره پوست گردو، عصاره بقایای گندم، کیتوزان، کربوکسی متیل سلولز (CMC) و اسید مالیک بررسی شد. جذب فسفر با استفاده از معادلات همدمای جذب ارزیابی شد. معادلات لانگمویر و فروندلیچ برای ارزیابی جذب فسفر روی جاذب های اصلاح شده به کار رفتند. نتایج نشان داد که بیشینه ظرفیت جذب فسفر به وسیله جاذب های معدنی اصلاح شده با کیتوزان بوده است. ظرفیت جذب جاذب های اصلاح شده بنتونیت-کیتوزان (۰/۳۵ mg/g)، کلسیت-کیتوزان (۲/۰۹ mg/g)، کائولینیت-کیتوزان (۰/۴۱ mg/g) و زئولیت-کیتوزان (۰/۴۳ mg/g) در مقایسه با جاذب های اصلاح نشده بنتونیت (۰/۲۷ mg/g)، کلسیت (۲/۰۴ mg/g)، کائولینیت (۰/۳۲ mg/g) و زئولیت (۰/۳۶ mg/g) به ترتیب ۱۲۹، ۱۰۲، ۱۲۸ و ۱۱۹٪ افزایش داشت. مدل دوگانه (DLM) توانست جذب P توسط جاذب های اصلاح شده را در دامنه وسیعی از pH در قدرت های یونی مختلف پیشگویی کند. پارامترهای ترمودینامیکی نشان دادند که ماهیت جذب فسفر توسط این جاذب ها غیر خود به خودی بود.

نحوه استناد به این مقاله:

محرمی، س. (۱۴۰۳). اثر pH و قدرت یونی بر کارآیی حذف فسفر از محلول های آبی به وسیله جاذب های معدنی اصلاح شده. محیط-زیست و مهندسی آب، 10 (1) 36-18. <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.377337.1834>



۱- مقدمه

یکی از نگرانی‌های زیست‌محیطی، هدرروی فسفر از خاک‌های کشاورزی و وارد شدن آن به آب‌های سطحی است. افزایش غلظت فسفر در آب‌های سطحی منجر به پدیده غنی‌شدگی می‌شود. بر اساس توصیه سازمان جهانی بهداشت^۱ (WHO) حداکثر غلظت فسفر در آب‌های سطحی باید زیر حد قابل قبول (۵-۰/۱ mg/l) باشد (Gu et al. 2017). حذف فسفر از فاضلاب‌ها از اواخر دهه ۶۰ قرن بیستم مورد توجه قرار گرفت. روش‌های اسمز معکوس، حذف بیولوژیکی، الکترودیالیز و جذب سطحی از جمله روش‌هایی هستند که برای حذف فسفر به کار رفته‌اند (Du et al. 2019). اغلب این روش‌ها برای حذف فسفر در غلظت‌های بالا مناسب هستند (Peng et al. 2018). از میان این روش‌ها، جذب سطحی، به عنوان یکی از مؤثرترین روش‌ها برای حذف فسفر در غلظت‌های پایین توصیه شده است. مهم‌ترین ویژگی روش جذب سطحی راندمان بالای جذب، بررسی آسان، عدم تولید ضایعات، طراحی انعطاف‌پذیر و ارزان بودن مواد است (Wang et al. 2021). مکانیسم‌های جذب فسفر شامل تبادل لیگاندی، رسوب، پخشیدگی و تبادل آنیونی می‌باشند که دو مکانیسم اول از مهم‌ترین مکانیسم‌های جذب فسفر به شمار می‌آیند. کاربرد مواد مختلف مانند کانی‌های رسی (Gan et al. 2009)، اکسیدهای فلزی (Kong et al. 2019) و هیدروکسیدهای دولا‌یه‌ای (Kumar et al. 2019) به عنوان جاذب برای حذف فسفر از محلول‌های آبی در سال‌های اخیر به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. با این وجود، موادی مثل کیتوزان، زئولیت، رس‌ها و ضایعات صنعتی به علت ارزان و قابل دسترس بودن به عنوان جاذب ترجیح داده می‌شوند (Ahmaruzzaman 2008). در دهه‌های اخیر توجه خاصی به کاربرد جاذب‌های طبیعی مثل بنتونیت، کائولینیت و زئولیت برای حذف فسفر از محلول‌های آبی شده است. از سوی دیگر، تعدادی از محققین سطح جاذب‌ها را برای جذب بهتر فسفر و سایر مواد از پساب اصلاح نموده‌اند. (Li et al. 2021) بیان نمودند که کاربرد زئولیت اصلاح شده با لاتانیم غلظت فسفر در آب را کاهش داده است. راندمان حذف فسفر توسط کائولینیت اصلاح شده با

اسیدسولفوریک در مقایسه با سولفات آمونیوم به ۹۱/۲٪ رسید (Zhao et al. 2019). در حال حاضر ایران به عنوان یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان و صادرکنندگان بنتونیت و زئولیت در خاورمیانه شناخته شده است. در بررسی‌های متعددی مدل‌سازی ژئوشیمیایی به عنوان یک ابزار پژوهش برای درک بهتر مکانیسم جذب فسفر بر روی جاذب‌ها تحت تأثیر pH های مختلف بکار رفته است (SØ et al. 2012). کاربرد این مدل‌ها می‌تواند یک ابزار مفید برای پیش‌گویی رفتار فسفر در محیط زیست باشد. مدل‌های کمپلکس سطحی می‌توانند تحت شرایط مختلفی مثل واکنش‌های پروتونه و تفکیک شدن، واکنش‌های جذب سطحی یون‌ها و آنیون‌های معدنی روی اکسیدها، کانی‌های رسی و خاک‌ها، لیگاندهای آلی و واکنش‌های رقابتی جذب روی اکسیدها به کار روند (Goldberg 1992). از میان انواع مختلف مدل‌های کمپلکس سطحی، مدل‌های ظرفیت ثابت، مدل دوگانه^۲ (DLM) و مدل سه‌گانه^۳ (TLM) برای توصیف اثر نسبت جذب‌شونده به جذب، pH و قدرت یونی در جذب یون‌ها توسط جاذب‌ها با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند (SØ et al. 2012).

در این میان، مدل DLM به دلیل نیاز به تعداد متغیرهای کمتر نسبت به سایر مدل‌های ترکیبی سطحی برای بررسی جذب فسفر انتخاب شد. در این پژوهش از جاذب‌های معدنی بنتونیت، کلسیت، کائولینیت و زئولیت برای حذف فسفر از محلول‌های آبی استفاده شد. به منظور جذب بهتر فسفر، سطح جاذب‌ها به وسیله عصاره پوست گردو، عصاره بقایای گندم، کیتوزان، کر بوکسی متیل سلولز^۴ (CMC) و اسید مالیک اصلاح شد. نتایج آزمایش‌ها جذب فسفر به عنوان تابعی از pH و قدرت یونی با نتایج حاصل از پیش‌گویی مدل DLM مقایسه شدند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- جاذب‌های مورد مطالعه

در این پژوهش به منظور بررسی جذب فسفر از چهار جاذب معدنی شامل بنتونیت و کائولینیت، زئولیت و نمک مرک

³Triple Layer Model⁴Sodium Carboxymethyl Cellulose

Environment and Water Engineering

Vol. 8, No. 4, 2022

¹World Health Organization²Double Layer Model

محیط زیست و مهندسی آب

دوره ۸، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱



۳-۲-۲- CMC و اسید مالیک

در حدود 0.6 g از جاذب‌ها داخل لوله سانتریفیوژ ریخته شد و به آن‌ها 30 ml محلول $0.5\% \text{ CMC}$ و محلول $0.1\% \text{ اسید مالیک}$ (جرمی به حجمی) اضافه شد. نمونه‌ها به مدت 4 h تکان داده شدند. بعد از طی یک شبانه‌روز، جاذب‌ها ۳ بار با آب دو بار تقطیر شسته شدند. سپس جاذب‌های اصلاح‌شده در دمای اتاق خشک شدند.

۳-۲-۳- هم‌دماهای جذب

هم‌دماهای جذب فسفر به وسیله جاذب‌های اصلاح‌شده بر اساس سامانه بسته انجام شد. جاذب‌های اصلاح‌شده در تماس با محلول‌های حاوی فسفر با غلظت‌های مختلف شامل صفر، $5, 10, 20, 40, 60, 100, 150, 200$ و 250 mg/l قرار گرفتند. مقدار pH محلول‌ها روی 5.45 (pH اولیه محلول استوک) تنظیم شد. بعد از 24 h زمان تماس، محلول‌ها با سرعت 4000 rpm به مدت 10 min سانتریفیوژ شدند. سپس غلظت فسفر باقیمانده در محلول به وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر مدل واریان (VarianCary100) تعیین شد. مقدار فسفر جذب‌شده بر روی جاذب‌های اصلاح‌شده با استفاده از رابطه (۱) به دست آمد.

$$q_e = \frac{V(C_i - C_e)}{M} \quad (1)$$

که q_e مقدار فسفر جذب‌شده برحسب mg/kg حجم محلول برحسب l ، C_i و C_e به ترتیب غلظت اولیه و باقیمانده (تعادلی) فسفر در محلول برحسب mg/l و M جرم جاذب برحسب g است (Cooney 1999). هم‌دماهای جذب فسفر از طریق برازش معادلات فروندلیچ و لنگمویر به داده‌های آزمایشی به وسیله نرم‌افزار SigmaPlot نسخه ۱۱ توصیف شدند. رابطه‌های (۲) و (۳) به ترتیب معادله‌ای هم‌دمای جذبی فروندلیچ و لنگمویر را نشان می‌دهند (Luna et al. 2010).

$$q_e = K_f C_i^{1/n} \quad (2)$$

که K_f ضریب توزیع فروندلیچ برحسب l/kg و n ثابت تجربی بدون بعد و بیانگر انرژی جذب است.

$$q_e = \frac{Q_{\max} K_L C_e}{(1 + K_L C_e)} \quad (3)$$

کلسیت استفاده شد. کاتیون‌ها و آنیون‌های جاذب‌های معدنی شامل سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، کلر، فسفات، سولفات، کربنات، بی‌کربنات و نیترات با روش‌های معمول آزمایشگاهی اندازه‌گیری شدند. مقادیر pH و هدایت الکتریکی (EC) در عصاره $1:5$ (نسبت آب به خاک) توسط دستگاه‌های مربوطه قرائت شدند (Rowell 1994). سطح ویژه جاذب‌ها با استفاده از گاز N_2 توسط روش BET (با استفاده از دستگاه Micromeritics chemisorptions ASAP 2020)، تهیه شد. عصاره پوست گردو، عصاره بقایای گندم، کیتوزان، کربوکسی متیل سلولز (CMC) و اسید مالیک برای اصلاح جاذب‌های معدنی بکار رفتند. محلول استوک 1000 mg/l فسفر از نمک KH_2PO_4 تهیه گردید.

۲-۲-۲- اصلاح جاذب‌های معدنی

۲-۲-۲-۱- عصاره پوست گردو و بقایای گندم

از روش اصلاح‌شده Kim et al. (2001)، جهت عصاره‌گیری و جداسازی گروه‌های عاملی پوست گردو و بقایای گندم استفاده شد. به نسبت ۱ به ۱۰ به پوست گردو و بقایای گندم، نیتریک اسید $1N$ اضافه و نمونه‌ها به مدت 24 h در دمای 25°C نگهداری شدند. پس از صاف کردن نمونه‌ها، pH آن‌ها روی 5 تنظیم شد. به میزان 0.5 g از جاذب‌ها را داخل لوله سانتریفیوژ ریخته و به آن‌ها 30 ml عصاره پوست گردو و بقایای گندم اضافه شد. نمونه‌ها در دمای 50°C به مدت 2 h سونی کیت و سپس در دمای 25°C به مدت 20 h نگهداری شدند. پس از طی زمان یادشده به مدت 2 h دیگر نمونه‌ها سونی کیت شدند. نمونه‌ها سانتریفیوژ شده، محلول رویی دور ریخته و سپس باقیمانده انتهای لوله ۱ با مخلوط آب مقطر و متانول ۳ مرتبه شستشو داده شد. درنهایت جاذب‌های اصلاح‌شده در دمای 70°C خشک شدند.

۲-۲-۲-۲- کیتوزان

برای ساختن محلول $0.5\% \text{ کیتوزان}$ ، این ماده در نیتریک اسید $0.5M$ حل گردید. محلول حاصل به مدت یک شبانه‌روز در یخچال نگهداری شد. سپس 10 ml از محلول حاوی $0.5\% \text{ کیتوزان}$ به 2978 g از جاذب‌ها اضافه شد. بعد از طی یک شبانه‌روز، جاذب‌ها ۳ بار با آب دو بار تقطیر شسته شدند. سپس نمونه‌های اصلاح‌شده در دمای اتاق خشک شدند (Geng et al. 2009).

که n تعداد نمونه‌ها، $X_{o,i}$ غلظت فسفر اندازه‌گیری شده و $X_{c,i}$ غلظت فسفر محاسبه‌شده به‌وسیله مدل است. مقدار MRE نیز از طریق رابطه (۵) محاسبه شد.

$$MRE = \sum_{i=1}^n \frac{(X_{c,i} - X_{o,i})}{n} \quad (5)$$

هرچه مقدار MRE نزدیک به صفر باشد نشان‌دهنده این است که اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر محاسبه‌شده به وسیله مدل کم است (Devau et al. 2011).

۲-۶- ثابت‌های ترمودینامیکی جذب

پارامترهای ترمودینامیکی شامل انرژی آزاد (ΔG^0)، آنتالپی (ΔH^0) و آنتروپی (ΔS^0) می‌باشند که با استفاده از روابط (۶، ۷ و ۸) محاسبه می‌شوند (Bhatnagar et al. 2010).

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_d \quad (6)$$

$$\ln \frac{k_2}{k_1} = \frac{\Delta H^0}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (7)$$

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad (8)$$

که؛ R ثابت جهانی گازها (۸/۳۱۴ برحسب J/mol.k)، T دمای مطلق برحسب درجه کلوین و K ثابت تعادل است. ثابت تعادل با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می‌شود. اثر دما بر روی جذب فسفر به‌وسیله جاذب‌ها با غلظت اولیه ۵۰ mg/l فسفر در دماهای ۲۹۸، ۳۰۸ و ۳۱۸ K موردبررسی قرار گرفت.

$$K_d = \frac{\text{مقدار فسفر جذب شده روی ماده جاذب}}{\text{مقدار فسفر باقیمانده در محلول}} \times \frac{V}{M} \quad (9)$$

که V حجم محلول برحسب ml و M جرم ماده جاذب برحسب g است.

۲-۷- تحلیل آماری

برای ارزیابی ظرفیت جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده و نشده در حذف فسفر، آزمایشی در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹.۰ صورت گرفت. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح آماری ۰.۵٪ انجام شد.

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- ویژگی جاذب‌ها

ترکیب شیمیایی فاز محلول جاذب‌های معدنی در جدول (۱) ارائه شده است. شکل (۱) هم‌دمای جذب N_2 اندازه‌گیری شده

که K_L ضریب توزیع لنگمویر برحسب l/mg و Q_{max} ماکزیمم جذب برحسب mg/kg است (Luna et al. 2010).

۲-۴- آزمایش‌های واذب

آزمایش‌های واذب بلافاصله پس از آزمایش‌های جذب انجام شدند. محلول ۰/۰۱ M $CaCl_2$ برای آزمایش‌های واذب بکار رفت. محلول ۰/۰۱ M $CaCl_2$ به لوله‌ها اضافه شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۱ h تکان داده شدند و ۲۲ h به نمونه‌ها فرصت داده شد تا به حالت تعادل برسند. پس از گذشت این زمان، نمونه‌ها به مدت ۱ h تکان داده شدند، سپس سانتریفیوژ و از کاغذ صافی عبور داده شدند. اختلاف میان فسفر جذب و واذب‌شده تحت عنوان فسفر اختصاصی جذب‌شده به‌وسیله جاذب‌ها تعیین گردید.

۲-۵- اثر pH و قدرت یونی بر جذب فسفر

برای ارزیابی اثر pH و قدرت یونی بر جذب فسفر، آزمایش‌ها با افزودن ۱ g از جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده به لوله‌های حاوی ۵۰ mg/l فسفر انجام شدند. قدرت یونی محلول‌ها از ۰/۰۰۱ تا ۰/۱ M NaCl متغیر بود. از سوی دیگر pH محلول‌ها به‌وسیله ۰/۱ M HCl یا ۰/۱ M NaOH تنظیم گردید. بعد از طی ۲۴ h (زمان تعادل)، pH تعادلی محلول‌ها اندازه‌گیری و محلول رویی از صافی‌های ۲/۵ μm عبور داده شد. سپس، غلظت فسفر در محلول رویی تعیین شد. نقطه صفر بار الکتریکی (pH_{ZPC}) نمونه‌ها با استفاده از روش (Rivera-Utrilla et al. 2001) اندازه‌گیری شد. یکی از اهداف این مطالعه، برآزش داده‌های اندازه‌گیری شده با یک مدل مکانیسمی بود که بتواند به‌راحتی داده‌ها را شبیه‌سازی نماید. به دلیل سادگی، مدل DLM به وسیله نرم‌افزار MINTEQ نسخه ۲،۳ برای پیش‌بینی جذب فسفر در دامنه وسیعی از pH و قدرت یونی‌های مختلف استفاده گردید. لبه‌های جذبی برای جاذب‌های اصلاح‌شده معدنی، ۱۰۰ g/l بکار رفت. مناسب بودن مدل برآزش داده‌شده به داده‌ها به وسیله ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) (رابطه ۴) و میانگین خطای باقیمانده (MRE) ارزیابی شد. پارامتر RMSE برای تخمین پراکندگی داده‌ها اطراف میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌گویی شده به کار می‌رود (Devau et al. 2011).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X_{c,i} - X_{o,i})^2}{n}} \quad (4)$$

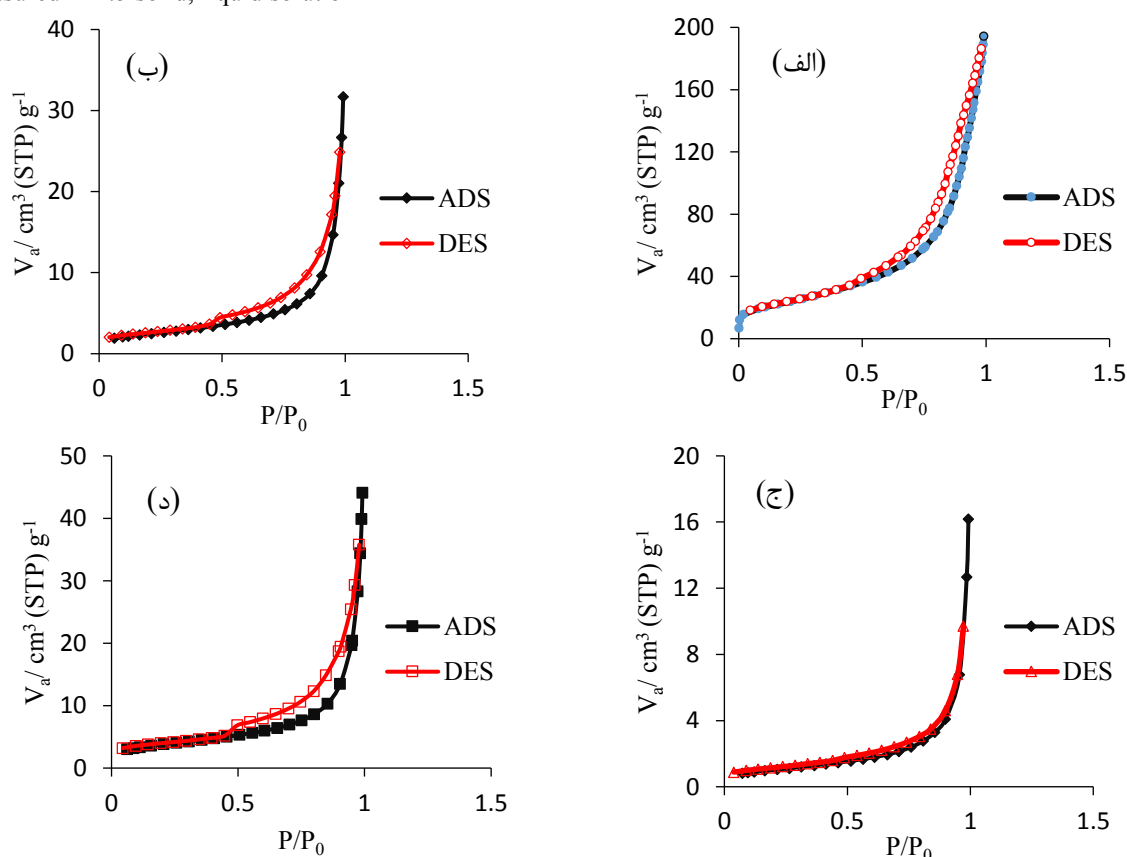
در دمای ۷۷ K جاذب‌های معدنی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از آزمایش‌های جذبی N_2 و میانگین قطر ذرات، بر اساس داده‌های BET در جدول (۲) نشان داده شده است. میانگین قطر منافذ بنتونیت، کلسیت، کائولینیت و زئولیت به ترتیب ۱۳/۹۱، ۲۱/۳۴، ۲۵/۱۴ و ۱۸/۸۴ nm و سطح ویژه آن‌ها به ترتیب ۸۴/۹۸، ۰/۸۶، ۳/۶۶ و ۱۳/۸۳ m^2/g بودند.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فاز محلول جاذب‌های معدنی

Table 1 Chemical composition of solution phase of adsorbents

Absorbent	pH	EC	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
		(dS/m)	Solution ions* (mg/l)									
Bentonite	9.27	1.58	361.7	3.24	2.91	0.01	318	21	43.0	0.62	18.3	81.7
Calcite	7.90	2.66	0.04	0.16	523	1.60	0.04	-	796	0.01	0.01	0.24
Kaolinit	8.97	0.15	31.1	4.88	1.34	0.07	38.5	0.00	0.00	0.42	21.2	11.2
Zeolite	7.96	1.82	312	12.3	73.5	14.4	452	121	0.00	0.63	9.81	182

* measured in 1:5 solid, liquid solution



شکل ۱- هم‌دماهای جذب-واحد N_2 جاذب‌های معدنی اصلاح نشده: الف- بنتونیت، ب- کلسیت، ج- کائولینیت و د- زئولیت

Fig. 1 N_2 adsorption-desorption isotherms of unmodified adsorbents: a) Bentonite, b) Calcite, c) Kaolinite, and d) Zeolite

جدول ۲- آنالیز مساحت سطح BET جاذب‌ها

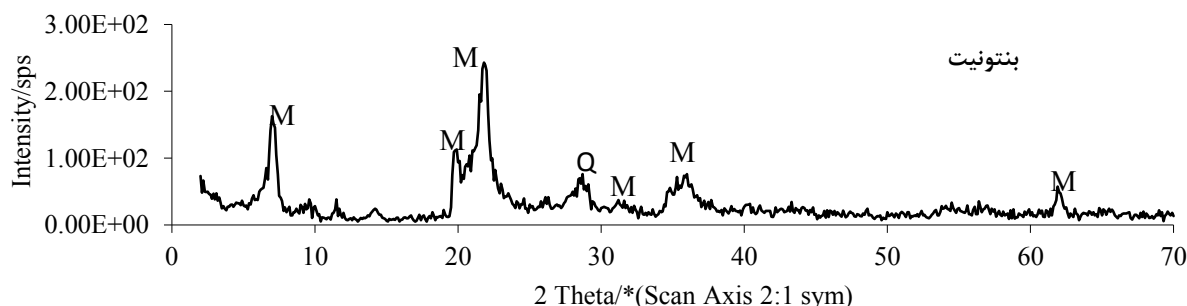
Table 2 BET surface area analysis of adsorbents

Adsorbent	Surface Area (m^2/g)	Mean Pore Diameter (nm)	Pore Volume (m^3/g)
Bentonite	84.98	13.91	0.29
Calcite	0.98	19.17	0.04
Kaolinite	3.66	25.14	0.02
Zeolite	13.83	18.84	0.06

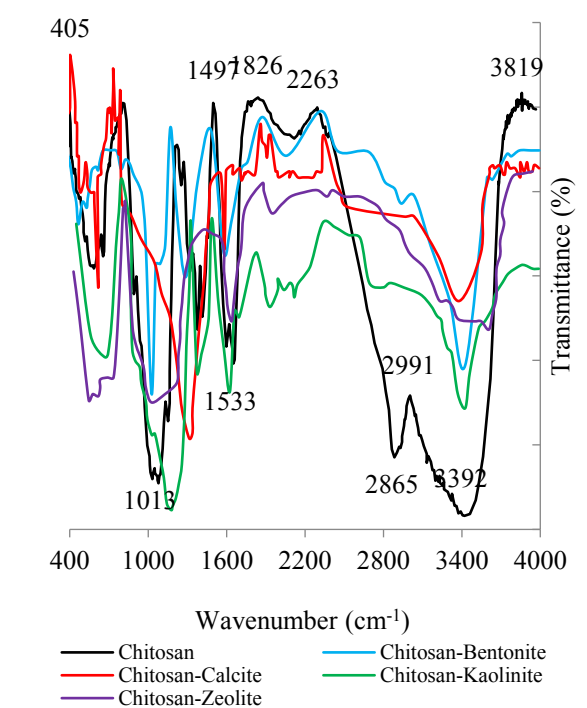
شکل (۲) پیک‌های FT-IR مربوط به کیتوزان و جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده با کیتوزان را نشان می‌دهد. پیک‌های شاخص کیتوزان در دامنه موجی $3750-3000\text{ cm}^{-1}$ مربوط به گروه عاملی OH است که با NH_2 همپوشانی ایجاد کرده است. پیک 2877 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های (C-H)، عدد موجی 1655 cm^{-1} مربوط به گروه‌های آمیدی ثانویه (C=O)، پیک‌های 1421 و 1379 cm^{-1} مربوط به گروه (C-H)، پیک‌های 1030 و 1153 cm^{-1} به ترتیب مربوط به ارتعاش کششی متقارن و نامتقارن گروه‌های عاملی (C-O-C) و همچنین 895 cm^{-1} می‌تواند مربوط به ارتعاش جنبشی گروه (C-H) باشد.

شکل (۳)، تصاویر XRD جاذب‌ها را نشان می‌دهد. نمودار XRD بنتونیت نشان می‌دهد که این رس اساساً از مونت موریلونیت (۶۹٪/۳) تشکیل‌شده است ولی حال‌آنکه دارای ناخالصی کوآرتز (۳۰٪/۷) نیز است. نمودار XRD کلسیت پیک‌های مشخصه کلسیت را بدون حضور سایر ترکیبات نشان می‌دهد که نشان‌دهنده درجه خلوص بالای این ترکیب (نمک مرک) است. پیک‌های واضح و مشخص کلریت در نمودار XRD کائولینیت بیانگر ناخالصی زیاد این کانی است؛ اما با وجود ناخالصی زیاد، حضور پیک‌های مشخصه رس کائولینیت با شدت بالا بیانگر این است که ترکیب کانی موردنظر حاوی درصد قابل توجهی کائولینیت است.

مقدار کائولینیت و کلریت موجود در ترکیب مورد مطالعه به ترتیب ۴۱/۳ و ۳۷/۱ به دست آمد. همچنین، مقدار ۸٪ ایلیت و ۹٪ فلدسپار نیز در ترکیب دیده شد. همان‌طور که در نمودار XRD ژئولیت مشاهده می‌شود، این کانی ۲۲/۷٪ کوآرتز همراه خود دارد. با توجه به پیک‌های به دست آمده، ژئولیت مورد آزمایش از نوع کلینوپتیلولیت با درجه خلوص ۵۳/۵٪ است.

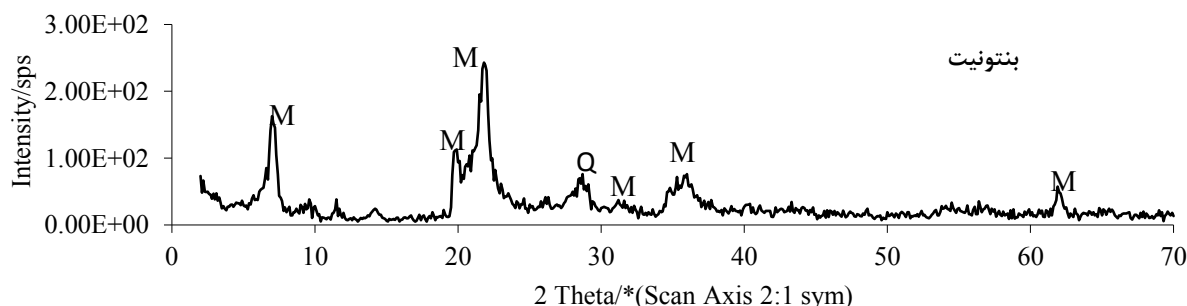


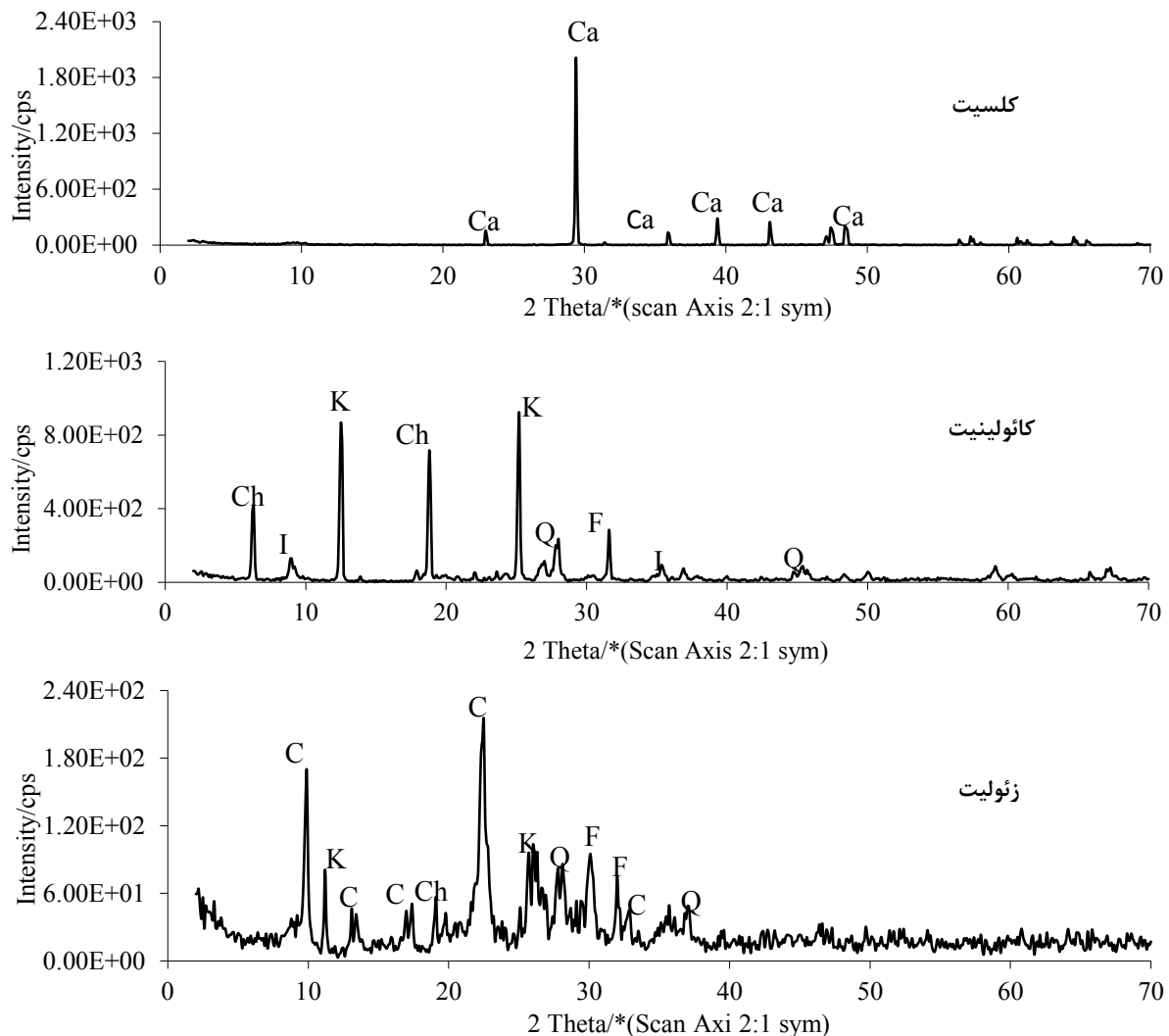
به منظور بررسی گروه‌های عاملی و تأیید جانشینی گروه‌های عاملی ترکیب اصلاح‌کننده بر روی سطوح ذرات جامد، تکنیک FT-IR استفاده شد. با توجه به نتایج حاصله جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده با کیتوزان نسبت به سایر جاذب‌های اصلاح‌شده بیشترین ظرفیت جذب را داشتند. لذا تصاویر FT-IR این جاذب‌های اصلاح‌شده در شکل (۲) ارائه شده و از تهیه تصاویر مربوط به جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده با سایر ترکیبات صرف‌نظر شده است.



شکل ۲- طیف FT-IR کیتوزان و جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده با کیتوزان

Fig. 2 FT-IR spectra of chitosan and modified adsorbents with chitosan



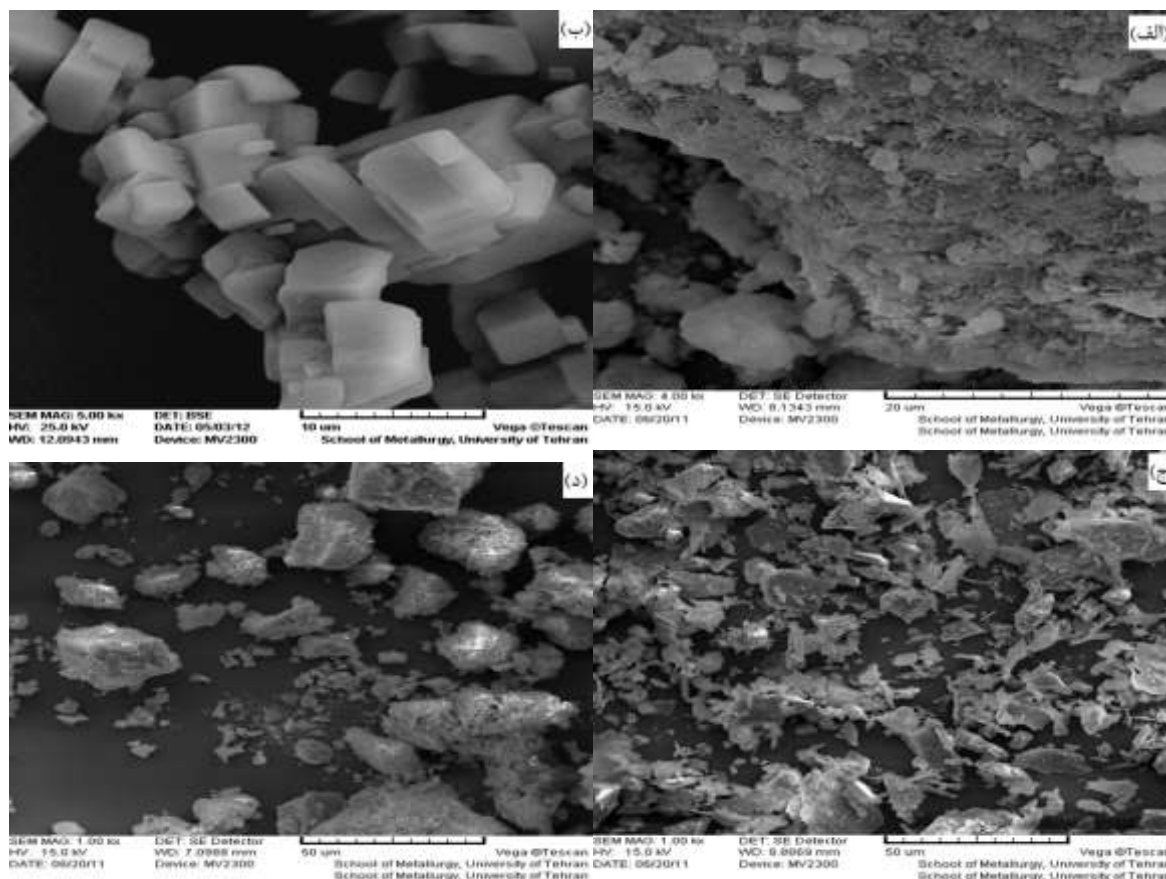


شکل ۳- پراش پرتوی ایکس (XRD) جاذب‌های معدنی اصلاح‌نشده: (C) کلینوپتیلولیت، (Ca) کلسیت، (Ch) کلریت، (F) فلدسپار، (I) ایلیت، (K) کائولینیت، (M) مونت موریلونیت، (Q) کوارتز

Fig. 3 (a): X-ray diffraction (XRD) of unmodified adsorbents. (C) clinoptilolite; (Ca) calcite; (Ch) chlorite; (F) feldspar; (I) illite; (K) kaolinite; (M) montmorillonite; (Q) quartz

درحالی‌که این آرایش منظم در بنتونیت دیده نمی‌شود. کائولینیت دارای یک سطح نسبتاً صاف و نرم است و فشردگی و تراکم بیشتری دارد و این احتمالاً به این دلیل است که کائولینیت در دسته رس‌های ۱:۱ و غیرقابل انبساط قرار دارد. کائولینیت از یک ساختمان ورقه‌ای تشکیل شده است که این ورقه‌ها بسیار نزدیک به یکدیگر و به هم چسبیده‌اند. زئولیت‌ها را بر اساس شکل بلور به سه دسته رشته‌ای، ستونی و مختلط تقسیم می‌کنند. مطابق با تصاویر SEM، زئولیت دارای ساختمان ستونی است.

تصاویر SEM جاذب‌ها در شکل (۴) نمایش داده شده است. مطابق با شکل (۴-الف)، بنتونیت دارای ساختمان اسفنجی و متخلخل است. بنتونیت‌ها را بر اساس قطر منافذ به سه گروه درشت‌حفره (قطر منافذ بزرگ‌تر از ۵۰ nm)، میان‌حفره (قطر منافذ بین ۲ تا ۵۰ nm) و ریزحفره (قطر منافذ کوچک‌تر از ۲ nm) تقسیم می‌کنند. بر اساس این تقسیم‌بندی، بنتونیت مورد مطالعه با متوسط قطر منافذ ۱۳/۹۱ نانومتر در گروه میان‌حفره قرار می‌گیرد. تصاویر SEM کلسیت نشان‌دهنده ساختمان منظم بلورین است که حالت سه وجهی دارند. کائولینیت و زئولیت ساختمانی مطابق و منظم دارند.



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ روبشی (SEM) جاذب‌های معدنی اصلاح‌نشده: الف- بنتونیت، ب- کلسیت، ج- کائولینیت، د- زئولیت

Fig. 4 SEM images of unmodified adsorbents: a) Bentonite, b) Calcite, c) Kaolinite and d) Zeolite

کیتوزان به دلیل دارا بودن گروه‌های عاملی آمینه (-NH_2) و هیدروکسیل (-OH) در ساختار پلیمری، دارای ویژگی بسیار عالی برای جذب یون‌های فلزی و مولکول‌های آنیونی از طریق واکنش‌های تبادل یونی و یا کمپلکس است (Chen et al. 2018). واکنش‌های جذب الکتروستاتیک و جذب شیمیایی، دو مکانیسم پیشنهاد شده برای کیتوزان است (Wang and Wang 2007). واکنش الکتروستاتیک جذب آنیون به واسطه پروتونه شدن گروه‌های آمین کیتوزان در pH پایین اتفاق می‌افتد. وجود مقادیر بالای گروه‌های آمینی امکان اصلاح شیمیایی بیش‌تر پلیمرها را باهدف بهبود انتخاب پذیری و ظرفیت جذب فراهم می‌سازد. مقایسه آماری میانگین فسفر جذب‌شده به‌وسیله جاذب‌های معدنی در جدول (۳) نشان داده‌شده است میانگین فسفر جذب‌شده به‌وسیله جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده با یکدیگر اختلاف معنی‌داری نداشتند (جدول ۳).

۳-۲- هم‌دماهای جذب و واجذب فسفر

جذب فسفر به‌وسیله جاذب‌های اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده به‌عنوان تابعی از غلظت آن‌ها از ۰ تا 250 mg/l در دمای ثابت (25°C) بررسی شد. بر اساس میانگین جذب فسفر به‌وسیله جاذب‌های معدنی اصلاح‌نشده، بیش‌ترین میزان جذب به ترتیب به‌وسیله کلسیت، زئولیت، کائولینیت و بنتونیت با مقادیر $843/9$ ، $173/7$ ، $165/0$ و $143/5 \text{ mg/kg}$ به دست آمد. همچنین برای جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده، بیش‌ترین میزان جذب به ترتیب به‌وسیله جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده با کیتوزان، سپس جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده با CMC، جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده با عصاره بقایای گندم، جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده با اسید مالیک و درنهایت جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده با عصاره پوست گردو به دست آمد.

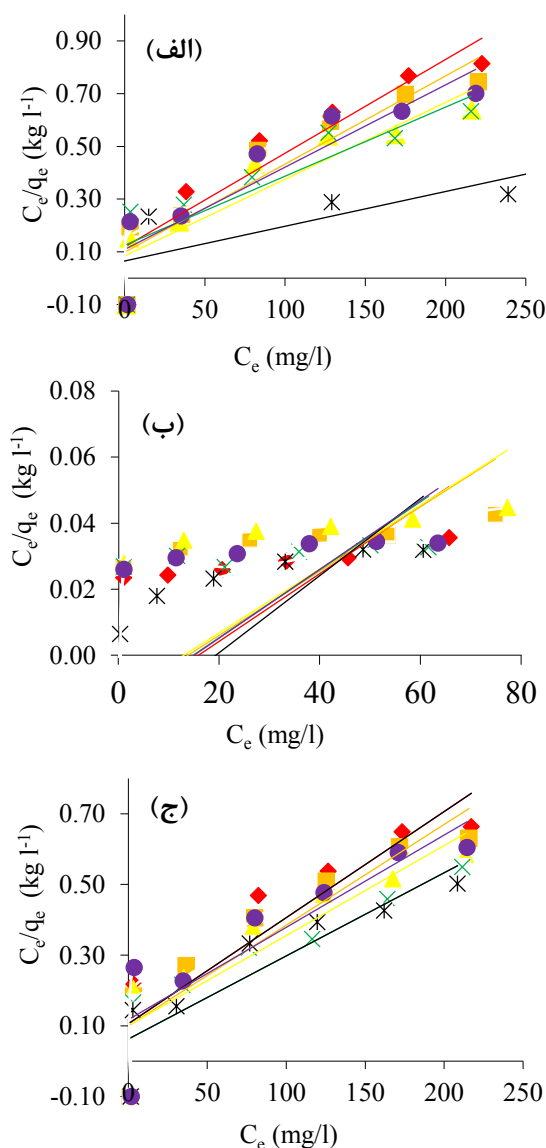
جدول ۳- مقایسه میانگین فسفر جذب شده (mg/kg) به وسیله جاذب‌های اصلاح شده و نشده

Table 3 Comparison of mean P adsorption (mg/kg) by unmodified and modified adsorbents

Adsorbents	Unmodified	Modified with walnut shell	Modified with wheat straw	Modified with CMC	Modified with chitosan	Modified with malic acid
Bentonite	143.56*	153.61	175.44	179.79	188.39	159.73
Calcite	843.90	849.50	856.80	877.83	888.90	855.10
Kaolinite	165.03	175.16	189.36	213.63	221.60	181.64
Zeolite	173.74	192.57	196.38	211.60	216.35	196.91

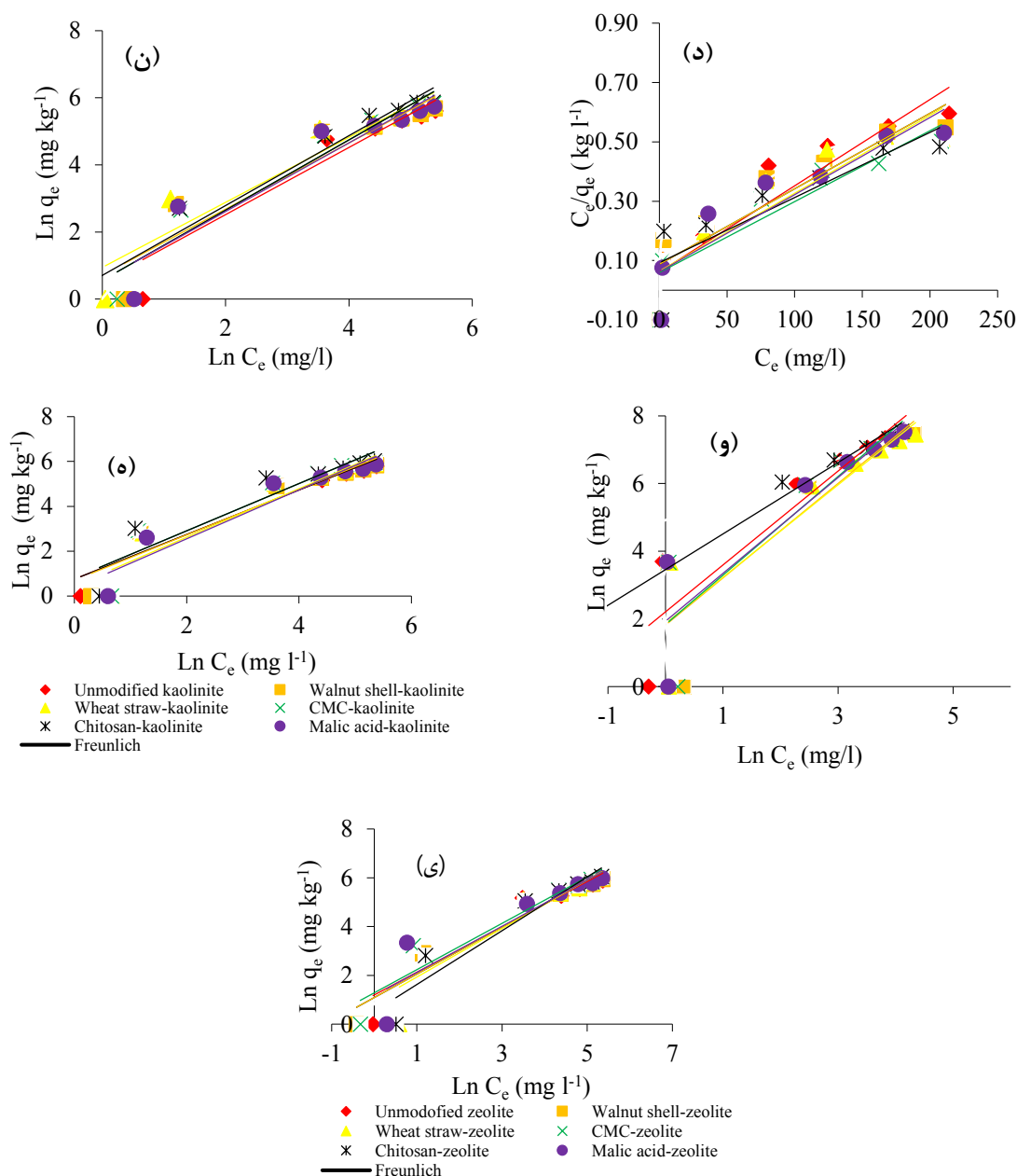
* Mean adsorbed P (mg/kg) calculated from all isotherm data points

(et al. 2020). دو مدل لنگمویر و فروندلیچ برای بیان جذب فسفر به وسیله جاذب‌های معدنی اصلاح شده به کار رفتند (شکل ۵).



جذب فسفر در غلظت بالای فسفر بکار رفته به عنوان معیاری از ماکزیم ظرفیت جذب در نظر گرفته می‌شود. ماکزیم جذب به طور نرمال در بالاترین غلظت فسفر بکار رفته رخ می‌دهد؛ بنابراین برخی از محققین مقدار آن را به عنوان ظرفیت جذب مواد معرفی کرده‌اند (Cucarella and Renman 2009). از آنجاکه ماکزیم ظرفیت جذب فسفر به وسیله جاذب‌های معدنی اصلاح شده با کیتوزان نسبت به دیگر جاذب‌های معدنی اصلاح شده بیشتر بود، این جاذب اصلاح شده برای بررسی اثر pH و قدرت یونی مورد استفاده قرار گرفت. قسمت‌های بعدی آزمایش‌ها بکار بردیم. در مقادیر پایین فسفر بکار رفته (۵ mg/l) مقدار فسفر جذب شده به وسیله جاذب‌های معدنی بنتونیت، کلسیت، کائولینیت و زئولیت اصلاح شده با کیتوزان به ترتیب ۱۳/۶ mg/kg (۲۷/۲٪)، ۴۷/۰ mg/kg (۹۴/۰٪)، ۱۶/۷ mg/kg (۸۱/۰٪) و ۱۶/۷ mg/kg (۳۳/۴٪) به دست آمد.

از سوی دیگر در مقادیر بالای فسفر بکار رفته (۲۵۰ mg/l) مقدار فسفر جذب شده به وسیله بنتونیت، کلسیت، کائولینیت و زئولیت اصلاح شده با کیتوزان به ترتیب ۳۵۵/۰ mg/kg (۱۴/۲٪)، ۲۰۹۵/۰ mg/kg (۸۳/۸٪)، ۴۲۸/۶ mg/kg (۱۷/۱٪) و ۴۱۵/۰ mg/kg (۱۶/۶٪) بود. این نتایج نشان‌دهنده این است که درصد حذف فسفر به وسیله این جاذب‌ها در غلظت‌های پایین فسفر اولیه بیشتر است. بعضی از جاذب‌ها می‌توانند فسفر را از محلول‌های آبی حاوی غلظت بالای فسفر حذف نمایند؛ بنابراین معرفی جاذب‌هایی با تمایل بالا برای جذب فسفر در غلظت‌های پایین ضروری به نظر می‌رسد. راندمان حذف فسفر در غلظت پایین فسفر به کار رفته به وسیله جاذب بنتونیت-لانتانیم (III) (۲ mg/l) اصلاح شده با کیتوزان حدود ۹۹/۷٪ گزارش شده است (Xu

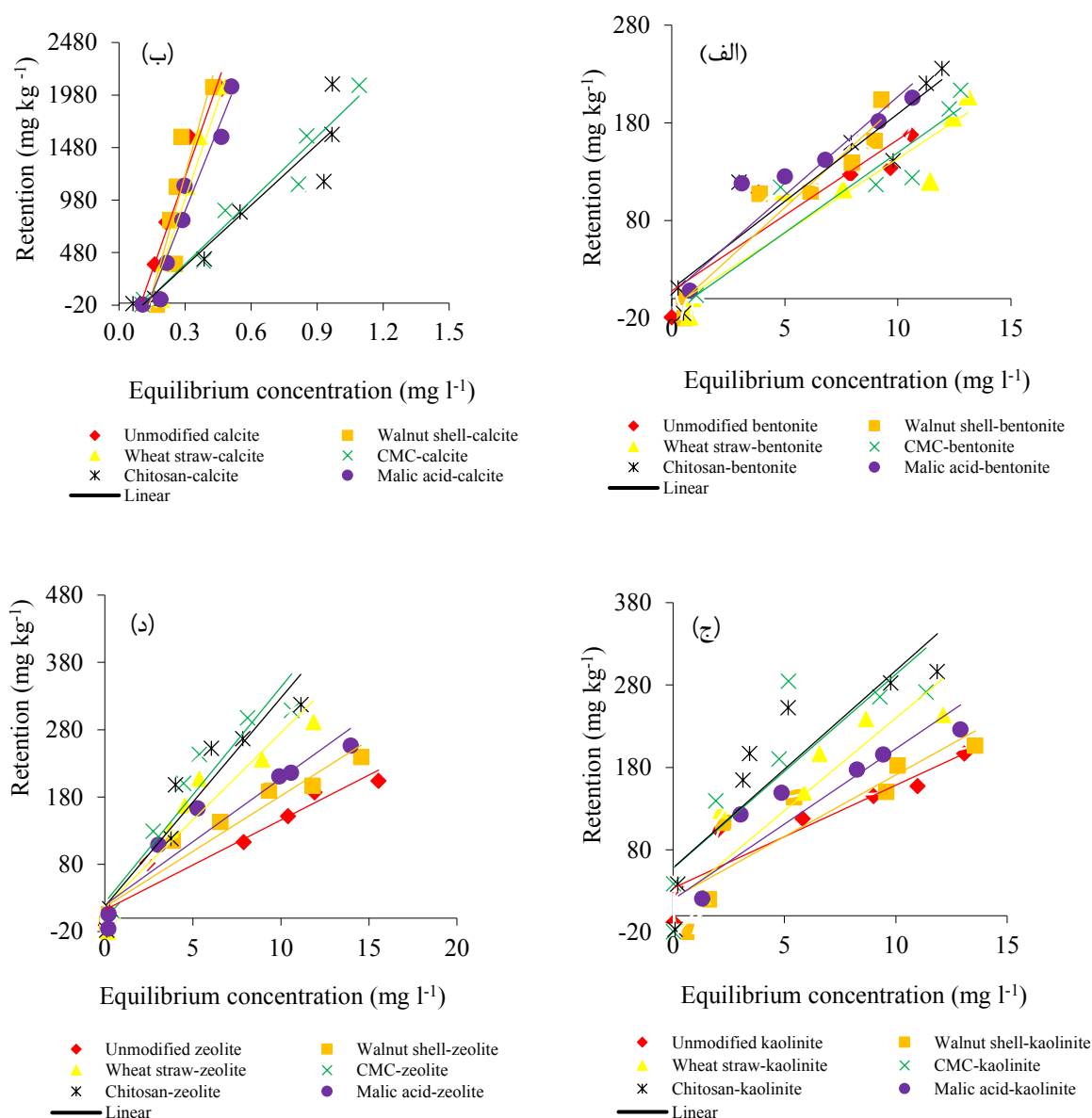


شکل ۵- مدل های جذب فسفر بر روی جاذب های معدنی اصلاح شده و نشده: مدل لنگمویر: الف- بنتونیت، ب- کلسیت، ج- کائولینیت، د- زئولیت؛ مدل فروندلیچ، ن- بنتونیت، و- کلسیت، ه- کائولینیت و ی- زئولیت

Fig. 5 Phosphorus adsorption models onto modified and unmodified adsorbents: Langmuir model: a) Bentonite, b) Calcite, c) Kaolinite and d) Zeolite; Ferunlich model, e) Bentonite, f) Calcite, g) Kaolinite and h) Zeolite

اصلاح شده با تیمارهای مختلف مشاهده شد. از آنجاکه یون های کلسیم می توانند کمپلکس پایداری با فسفر تشکیل دهند، بنابراین کلسیت اصلاح شده بیشترین ظرفیت نگهداری فسفر را نشان داد.

در رابطه با نگهداشت فسفر (فسفر اختصاصی جذب شده) به وسیله جاذب های اصلاح شده روندهای متفاوتی به دست آمد (شکل ۶). بیشترین فسفر واجذب شده از بنتونیت اصلاح شده به دست آمد در حالی که کمترین فسفر واجذب شده به وسیله کلسیت

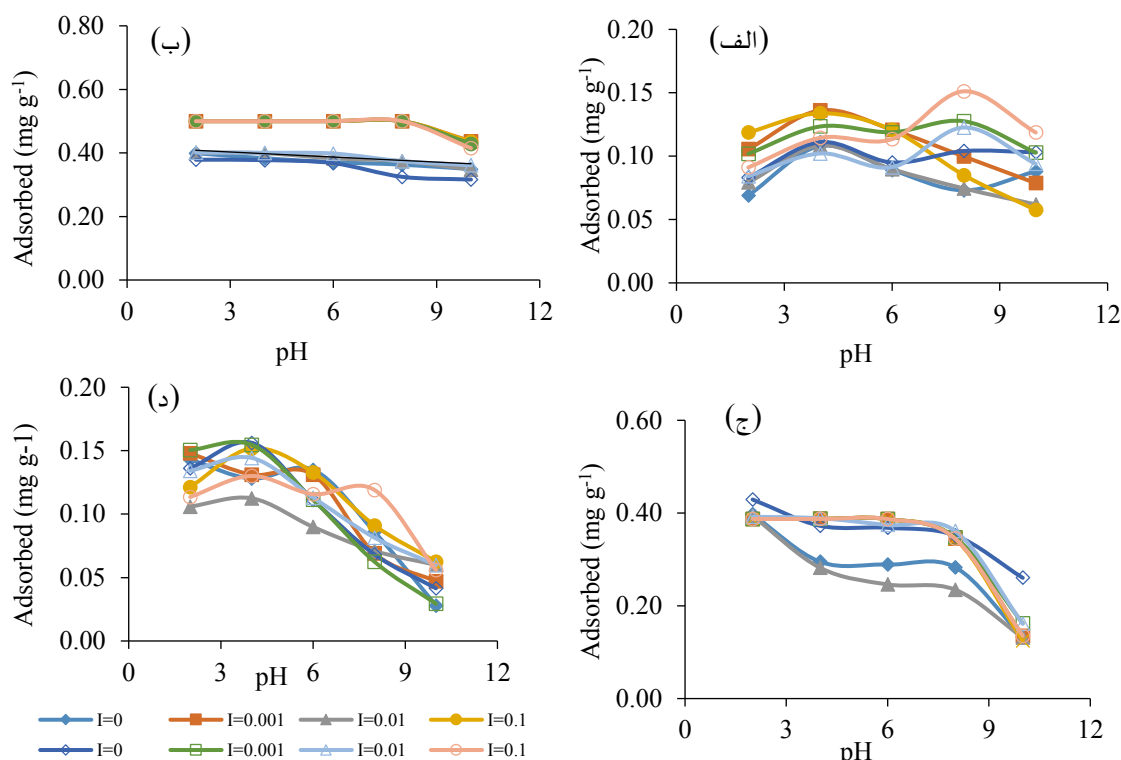


شکل ۶- نگهداشت فسفر بر روی جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده و نشده: الف- بنتونیت، ب- کلسیت، ج- کائولینیت و د- زئولیت
Fig. 6 Retention of P onto modified and unmodified adsorbents: a) Bentonite, b) Calcite, c) Kaolinite and d) Zeolite

جذب است، درحالی‌که قدرت یونی اثر کمی بر روی جذب دارد. مقدار pH_{ZPC} بنتونیت - کیتوزان ۸/۷ بود. زمانی که pH محلول نسبت به pH_{ZPC} بالاتر باشد، سطح جاذب دارای بار منفی خواهد شد و اگر میزان pH محلول کمتر از pH_{ZPC} باشد، سطح جاذب بار مثبت خواهد داشت.

۳-۳- اثر pH و قدرت یونی بر جذب فسفر

اثر pH و قدرت یونی بر روی جذب فسفر به‌وسیله جاذب‌های اصلاح‌شده با کیتوزان در شکل (۷) نشان داده‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که pH یکی از پارامترهای کنترل‌کننده فرآیند



شکل ۷- اثر pH و قدرت یونی بر روی جذب فسفر به وسیله: الف) بنتونیت-کیتوزان، ب) کلسیت-کیتوزان، ج) کائولینیت-کیتوزان و د) زئولیت-کیتوزان. (نقاط توپر نشان دهنده داده‌های اندازه‌گیری شده و نقاط توخالی مربوط به داده‌های مدل‌سازی شده است)

Fig 7. Effect of pH and ion strength on P sorption onto: a) Chitosan-bentonite, b) Chitosan-calcite, c) Chitosan-kaolinite, and d) Chitosan-zeolite (Filled and unfilled symbols represent experimental data and modeling results, respectively)

حذف فسفر به وسیله مونت موریلونایت اصلاح شده با کیتوزان نشان داد که با افزایش pH، ظرفیت جذب فسفر کاهش یافت (Jang and Lee 2019). دلیل این امر مربوط به کاهش گروه‌های عاملی NH_2^- و افزایش یون OH^- است که می‌تواند با فسفر برای جذب روی سایت‌های جذبی رقابت نماید (Mahaninia and Wilson 2017). مقدار pH_{ZPC} اندازه‌گیری شده برای کائولینیت و زئولیت اصلاح شده با کیتوزان به ترتیب ۸/۱ و ۸/۴ بود. اثر قدرت یونی را می‌توان بر اساس نوع کمپلکس تشکیل شده روی سطح جاذب‌ها بیان نمود. یون‌هایی که از طریق واکنش‌های الکترواستاتیک تشکیل کمپلکس‌های برون کروی می‌دهند با دیگر یون‌های موجود در محلول برای جذب روی سایت‌های جذبی به رقابت می‌پردازند. در این حالت، مقدار جذب با افزایش غلظت الکترولیت کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، یون‌هایی که از طریق تبادل لیگاندی تشکیل کمپلکس درون کروی می‌دهند، به‌طور مستقیم به گروه‌های سطحی متصل می‌شوند و با یون‌های الکترولیت رقابت نمی‌کنند و یا کمتر رقابت می‌کنند. با

شکل (۷) نشان می‌دهد که در pH های پایین، اثر قدرت یونی روی جذب فسفر به وسیله کلسیت - کیتوزان بسیار کم است، اما در مقادیر pH بالا، اثر قدرت یونی محلول، عامل مهمی برای فرآیند جذب به شمار می‌آید. مقدار pH_{ZPC} اندازه‌گیری شده برای کلسیت - کیتوزان برابر با ۸/۸ بود. همان‌طور که در شکل (۷) می‌توان مشاهده کرد، جذب فسفر به وسیله کائولینیت و زئولیت اصلاح شده با کیتوزان کاملاً وابسته به pH بود و بیشترین جذب فسفر تحت شرایط اسیدی رخ داد و با افزایش pH میزان جذب فسفر کاهش یافت. این امر نشان می‌دهد که کائولینیت و زئولیت تحت شرایط بسیار اسیدی دارای بار سطحی منفی هستند (Ersoy and Elik 2002). Xu et al. (2020) بیان نمودند که حداکثر جذب فسفر به وسیله جاذب بنتونیت-لانتانیم (III) اصلاح شده با کیتوزان (۹۳٪/۲) در مقدار pH برابر با ۳ رخ داده است. تحت شرایط اسیدی، سطح جاذب بکار رفته دارای بار مثبت می‌گردد که می‌تواند از طریق واکنش ای الکترواستاتیکی فسفر را از محیط جذب نماید (Xu et al. 2020). بررسی

جذب شده است. نتایج شبیه سازی داده های اندازه گیری شده برای جذب فسفر به وسیله جاذب های اصلاح شده با استفاده از مدل DLM در شکل (۷) نشان داده شده است. پارامترهای ارائه شده در جدول (۵) به وسیله برازش مدل به داده های اندازه گیری شده به دست آمدند.

این وجود در بسیاری از حالت های کمپلکس درون کروی، با افزایش غلظت الکترولیت، جذب افزایش می یابد (Antelo et al. 2005). از آنجاکه جذب فسفر به وسیله جاذب های معدنی اصلاح شده با افزایش قدرت یونی تفاوت کمی را نشان داد، بنابراین نتایج این مطالعه نشان داد که فسفر با تشکیل کمپلکس سطحی درون کروی بر روی سطح این جاذب ها

جدول ۵- پارامترهای مورد نیاز برای مدل سازی ویژگی های جاذب های معدنی اصلاح شده

Table 5 Parameters needed for modeling the characteristics of modified mineral adsorbents

Main parameters needed for modeling	Chitosan-bentonite	Chitosan-calcite	Chitosan-kaolinite	Chitosan-zeolite
Characteristics of modified adsorbents				
Specific surface area ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	85.3*	1.0	3.6	13.8
Site density (mmol l^{-1})	0.53	8.65	1.13	0.53
model parameters used to simulate P adsorption				
<i>Thermodynamic equilibrium constant (log k)</i>				
$1 > \text{SOH}^{-0.5} + \text{H}^+ + \text{PO}_4^{3-} \leftrightarrow > \text{SOPO}_3^{-2.5} + \text{H}_2\text{O}$	17.5	-0.8	20.8	20.5
$2 > \text{SOH}^{-0.5} + 2\text{H}^+ + \text{PO}_4^{3-} \leftrightarrow > \text{SO}_2\text{PO}_2^{-2} + 2\text{H}_2\text{O}$	22.7	-5.1	25.5	30.0
$2 > \text{SOH}^{-0.5} + 3\text{H}^+ + \text{PO}_4^{3-} \leftrightarrow > \text{SO}_2\text{POOH}^{-1} + 2\text{H}_2\text{O}$	30.2	-6.2	32.6	35.5

* All of the data were obtained from fitting

مقادیر محاسبه شده برای RMSE و MRE نیز در جدول (۶) همه pH ها و قدرت های یونی مختلف مطابقت داشت (شکل ارائه شده است. مقادیر شبیه سازی شده برای جاذب های معدنی (۷). اصلاح شده با کیتوزان کاملاً با داده های اندازه گیری شده در

جدول ۶- پارامترهای حاصل از بهترین برازش برای جذب فسفر به وسیله جاذب های معدنی اصلاح شده با کیتوزان

Table 6 The goodness-of-fit parameters for P adsorption onto modified adsorbents

Adsorbents		I=0	I=0.001	I=0.01	I=0.1
Chitosan- bentonite	RMSE	0.028	0.025	0.0018	0.020
	MRE	0.022	0.020	0.015	0.019
Chitosan- calcite	RMSE	0.115	0.107	0.134	0.098
	MRE	0.114	0.106	0.132	0.095
Chitosan- kaolinite	RMSE	0.066	0.093	0.048	0.015
	MRE	0.049	0.068	-0.022	-0.007
Chitosan-zeolite	RMSE	0.019	0.016	0.022	0.018
	MRE	-0.001	-0.003	0.018	-0.005

۳-۳-۵- ترمودینامیکی جذب

پارامترهای ترمودینامیکی ΔG^0 ، ΔH^0 و ΔS^0 محاسبه شده برای جاذب های معدنی اصلاح شده با کیتوزان در جدول (۷) ارائه شده است. مقادیر مثبت ΔG^0 در دماهای مختلف نشان می دهد که ماهیت جذب فسفر خود به خودی نیست. Xu et al. (2020) جذب فسفر توسط بنتونیت-لانتانیوم (III) اصلاح شده با کیتوزان را بررسی نموده و گزارش کردند که با

نتایج به دست آمده نشان داد که مدل DLM مشابه سایر مدل های به کاررفته توسط SØ et al. (2012) (مدل های CCM و CD-MUSIC) و Devau et al. (2011) (مدل 1- PK TPM) برای جذب فسفر روی جاذب های اصلاح نشده می تواند جذب فسفر به وسیله جاذب های اصلاح شده را در دامنه وسیعی از pH و قدرت های یونی مختلف شبیه سازی نماید.

مثبت ΔH^0 برای جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده با کیتوزان نشان‌دهنده این است که فرآیند جذب فسفر گرماگیر بوده است. از سوی دیگر مقدار مثبت ΔS^0 نشان‌دهنده برخی تغییرات ساختاری در ماده جذب‌شونده و جاذب در طی فرآیند جذب است.

افزایش دما از ۲۷۸ K تا ۳۰۸ K، جذب فسفر افزایش یافت، درحالی‌که با افزایش دما تا ۳۱۸ K، ظرفیت جذب اندکی کاهش داشت که احتمالاً به دلیل دفع از سطح جاذب در دماهای بالاتر است. کاهش مقدار ΔG^0 با افزایش دما نشان می‌دهد که واکنش جذب فسفر به‌وسیله جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده با کیتوزان در دماهای بالاتر مطلوب‌تر است. مقادیر

جدول ۷- پارامترهای ترمودینامیکی جذب فسفر به‌وسیله جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده با کیتوزان

Table 7 Thermodynamic parameters for the sorption of P onto modified adsorbents with chitosan

Adsorbent	Temp (K)	Thermodynamic parameters		
		ΔG^0 (kJ/mol)	ΔH^0 (kJ/mol)	ΔS^0 (J/mol k)
Chitosan-bentonite	298	13.53	13.81	1.04
	308	13.11		
	318	12.76		
Chitosan-calcite	298	7.15	28.64	72.11
	308	6.27		
	318	4.82		
Chitosan-Kaolinite	298	11.88	62.59	170.16
	308	11.29		
	318	10.69		
Chitosan-zeolite	298	13.07	89.88	257.75
	308	10.34		
	318	10.00		

۴- همبستگی بالایی میان داده‌های اندازه‌گیری شده با داده‌های حاصل از مدل DLM در همه مقادیر pH و قدرت‌های یونی مختلف به دست آمد.

۵- مطالعات ترمودینامیکی نشان داد که ماهیت جذب فسفر به‌وسیله جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده با کیتوزان غیر خود به خودی بوده و گرماگیر بوده است.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها حسب درخواست، از طرف نویسنده مسئول از طریق ایمیل قابل‌ارسال است.

تضاد منافع نویسندگان

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

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده با پوست گردو، بقایای گندم، کیتوزان، CMC و اسید مالیک به‌عنوان جاذب برای حذف فسفر از محلول‌های آبی به کار رفتند.

۱- نتایج حاصل از هم‌دمای جذب فسفر به‌وسیله جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده به‌خوبی با معادله فروندلیچ برازش شدند.

۲- جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده با کیتوزان بیشترین ظرفیت جذب فسفر را در میان دیگر جاذب‌های اصلاح‌شده داشتند. میانگین فسفر جذب‌شده به‌وسیله جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده با کیتوزان و اصلاح‌نشده، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند.

۳- در pH های مختلف، قدرت یونی اثر کمی بر روی جذب فسفر داشت.

References

Ahmaruzzaman, M. (2008). Adsorption of phenolic compounds on low-cost adsorbents: a

- review. *Adv. Colloid Interf. Sci.*, 143, 48–67. DOI: [10.1016/j.cis.2008.07.002](https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.07.002)
- Antelo, J., Avena, M., Fiol, S., López, R. and Arce, F. (2005). Effects of pH and ionic strength on the adsorption of phosphate and arsenate at the goethite–water interface. *J. Colloid Interf. Sci.* 285, 476–486. DOI: [10.1016/j.jcis.2004.12.032](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.12.032)
- Bhatnagar, A., Kumar, E., & Sillanp, M. (2010). Nitrate removal from water by nano-alumina: Characterization and sorption studies. *Chem. Eng. J.*, 163, 317–323.
- Chen, J., Yan, L-g., Yu, H-q., Li, S., Qin, L-l., Liu, G-q., Li, Y-f., & Du, B. (2016). Efficient removal of phosphate by facile prepared magnetic diatomite and illite clay from aqueous solution. *Chem. Eng. J.*, 287, 162–172. DOI: [10.1016/j.cej.2015.11.028](https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.11.028)
- Chen, L. Y., Wu, P. X., Chen, M., Lai, X., Ahmed, Z., Zhu, N.W., Dang, Z., Bi, Y., & Liu, T. (2018). Preparation and characterization of the eco-friendly chitosan/vermiculite biocomposite with excellent removal capacity for cadmium and lead. *Appl. Clay Sci.*, 159, 74–82. DOI: [10.1016/j.clay.12.050](https://doi.org/10.1016/j.clay.12.050)
- Cooney, D. O. (1999). Adsorption designs for wastewater treatment. Lewis, Boca Raton.
- Cucarella, V., & Renman, G. (2009). Phosphorus sorption capacity of filter materials used for on-site wastewater treatment determined in batch experiments – a comparative study. *J. Environ. Qual.*, 38, 381–392.
- Debnath, M., Rahman, M., Minami, H., Rahman, M., Alam, M., Sharafat, M., Hossain, M., & Ahmad, H. (2019). Single step modification of micrometer-sized polystyrene particles by electromagnetic polyaniline and sorption of chromium(VI) metal ions from water. *J. Appl. Polym. Sci.*, 136(19), 47529. DOI: [10.1002/APP.47524](https://doi.org/10.1002/APP.47524)
- Devau, N., Hinsinger, P., Le Cadre, E., Colomb, B., & Ge' Rard, F. (2011). Fertilization and pH effects on processes and mechanisms controlling dissolved inorganic phosphorus in soils. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 75, 2980–2996. DOI: [10.1016/j.gca.2011.02.034](https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.02.034)
- Du, Y., Zhang, Q., Liu, Z., He, H., Lurling, M., Chen, M., & Zhang, Y. (2019). Composition of dissolved organic matter controls interactions Environment and Water Engineering
- with La and Al ions: Implications for phosphorus immobilization in eutrophic lakes. *Environ. Poll.*, 248, 36–47. DOI: [10.1016/j.envpol.2019.02.002](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.002)
- Ersoy, B. and Elik, M.S.C. (2002). Electrokinetic properties of clinoptilolite with mono- and multivalent electrolytes. *Micropor. Mesopor. Mater.*, 55, 305–312.
- Gan, F., Zhou, J., Wang, H., Du, C., and Chen, X. (2009). Removal of phosphate from aqueous solution by thermally treated natural palygorskite. *Water Res.*, 43(11), 2907–2915. DOI: [10.1016/j.watres.2009.03.051](https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.051)
- Geng, B., Jin, Z., Li, T., & Qi, X. (2009). Kinetics of hexavalent chromium removal from water by chitosan-Fe₀ nanoparticles. *Chemosphere.*, 75, 825–830. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2009.01.009](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.01.009)
- Goldberg, S. (1992). Use of surface complexation models in soil chemical systems. *Adv. Agron.*, 47, 233–329. DOI: [10.1016/S0065-2113\(08\)60492-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60492-7)
- Gu, Y., Xie, D., Ma, Y., Qin, W., Zhang, H., Wang, G., Zhang, Y., & Zhao, H. (2017). Size modulation of zirconium-based metal organic frameworks for highly efficient phosphate remediation. *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 9(37), 32151e32160. DOI: [10.1021/acsami.7b10024](https://doi.org/10.1021/acsami.7b10024)
- Jang, J., & Lee, D. S. (2019). Effective phosphorus removal using chitosan/Ca-organically modified montmorillonite beads in batch and fixed-bed column studies. *J. Hazard. Mater.*, 375, 9–18. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2019.04.070](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.070)
- Kim, J. W., Sohn, M. H., Kim, D. S., Sohn, S. M., & Kwon, Y. S. (2001). Production of granular activated carbon from waste walnut shell and its adsorption characteristics of Cu²⁺ ion. *J. Hazard. Mater.*, 85, 301–315. DOI: [10.1016/S0304-3894\(01\)00239-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00239-4)
- Kong, L., Tian, Y., Pang, Z., Huang, X., Li, M., Yang, R., Li, N., Zhang, J. and Zuo, W. (2019). Synchronous phosphate and fluoride removal from water by 3D rice-like lanthanum-doped La@MgAl nanocomposites. *Chem. Eng. J.*, 371, 893–902. DOI: [10.1016/j.cej.2019.04.116](https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.116)
- Kumar, I. A., Jeyaprabha, C., Meenakshi, S., & Viswanathan, N. (2019). Hydrothermal

- encapsulation of lanthanum oxide derived Aegle marmelos admixed chitosan bead system for nitrate and phosphate retention. *Int. J. Biol. Macromol.*, 130, 527-535. DOI: [10.1016/j.ijbiomac.2019.02.106](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.02.106)
- Li, X., Xie, Q., Kuang, Y., & Wu, D. (2021). Coupled influence of pH and dissolved organic carbon on the immobilization of phosphorus by lanthanum-modified zeolite. *Chemosphere.*, 274, 129958. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2021.129958](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129958)
- Luna, A. S., Costa, A. L. H., da Costa, A. C. A., & Henriques, C. A. (2010). Competitive biosorption of cadmium (II) and zinc (II) ions from binary systems by *Sargassum filipendula*. *Bioresour. Technol.*, 101, 5104–5111. DOI: [10.1016/j.biortech.2010.01.138](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.138)
- Mahaninia, M. H., & Wilson, L. D. (2017). Phosphate uptake studies of cross-linked chitosan bead materials. *J. Colloid Interf. Sci.*, 485, 201-212. DOI: [10.1016/j.jcis.2016.09.031](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.09.031)
- Peng, L., Dai, H., Wu, Y., Peng, Y., & Lu, X. (2018). A comprehensive review of phosphorus recovery from wastewater by crystallization processes. *Chemosphere.*, 197, 768-781. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2018.01.098](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.098)
- Rivera-Utrilla, J., Bautista-Toledo, I., Ferro-Garcy, M. A., & Moreno-Castill, C. (2001). Activated carbon surface modifications by adsorption of bacteria and their effect on aqueous lead adsorption. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 76, 1209–1215. DOI: [10.1002/jctb.506](https://doi.org/10.1002/jctb.506)
- Rowell, D. L. (1994). *Soil Science: Methods and Applications*. Lingman Group, Harlow. 350 pp.
- SØ, H. U., Postma, D., Jakobsen, R., & Larsen, F. (2012). Competitive adsorption of arsenate and phosphate onto calcite; experimental results and modeling with CCM and CD-MUSIC. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 93, 1–13. DOI: [10.1016/j.gca.2012.06.021](https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.06.021)
- Wang, B., Hu, X., Zhou, D., Zhang, H., Chen, R., Guo, W., Wang, H., Zhang, W., Hong, Z., & Lyu, D. (2021). Highly selective and sustainable clean-up of phosphate from aqueous phase by eco-friendly lanthanum cross-linked polyvinyl alcohol/alginate/palygorskite composite hydrogel beads. *J. Clean. Prod.*, 298, 126878. DOI: [10.1016/j.jclepro.2021.126878](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126878)
- Wang, L., & Wang, A. (2007). Adsorption characteristics of Congo Red onto the chitosan/montmorillonite nanocomposite. *J. Hazard. Mater.*, 147, 979-985. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2007.01.145](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.145)
- Xu, X., Chen, Y., Wu, X., Fan, P. and Song, R. (2020). La(III)-bentonite/chitosan composite: A new type adsorbent for rapid removal of phosphate from water bodies. *Appl. Clay Sci.*, 190, 105547. DOI: [10.1016/j.clay.2020.105547](https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105547)
- Zhao, Y., Zhang, Q., Yuan, W., Hu, H., Li, Z., Ai, Z., & Li, Y. (2019). High efficient coagulant simply by mechanochemically activating kaolinite with sulfuric acid to enhance removal efficiency of various pollutants for wastewater treatment. *Appl. Clay Sci.*, 180, 105187. DOI: [10.1016/j.clay.2019.105187](https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105187)



Environment and Water Engineering

Homepage: www.jewe.ir



ISSN: 2476-3683

Research Paper

Molecular Dynamics Simulation of Water Treatment Using Thermal Driving Force and Carbon Nanotube Membrane

Arash Rajabi-Vahid¹ and Mahdi Sahebi^{2*}

¹M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

²Assist. Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

Article information

Received: January 13, 2023

Revised: March 25, 2023

Accepted: March 25, 2023

Keywords:

Carbon Nanotube

Molecular Dynamic

Simulation

Temperature Difference

Water Purification

*Corresponding author:

sahebi@qut.ac.ir



Abstract

The temperature difference between the pure and impure water on the two sides of a membrane can lead to water purification. The asymmetry of molecular kinetic energy on both sides of the membrane causes pure water to move from the hot side to the cold one. In this research, a carbon nanotube-membrane filtration system based on the temperature difference between water sources was investigated by the molecular dynamics simulation method. The effect of various factors was investigated. The simulation results confirm the possibility of using a thermal driving force for water purification with carbon nanotubes. The results show that by increasing the hot source temperature, the water passage and the purification speed increase. Such that increasing the temperature difference between sources from 15 to 60 K increases the water purification rate by 30%. Simultaneously, the possibility of impurities passing through the nanotube also increases. Increasing the impurity concentration slows down the purification process. Increasing the diameter of the nanotube up to 15 Å increases the water purification rate. In nanotubes with a diameter of less than 15 Å, 100% of impurities are removed. Among the examined nanotubes, the best performance was obtained for the armchair carbon nanotube.

How to cite this paper: Rajabi-Vahid, A. and Sahebi, M. (2024). Molecular dynamics simulation of water purification using carbon nanotube membrane and thermal driving forc. *Environ. Water Eng.*, 10(1), 37-48. <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.381252.1836> [In Persian]



© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Seawater desalination has been proposed as one of the main ways of supplying water in the future. In recent years, researchers have introduced membranes composed of carbon nanotubes as high potential systems for improving the efficiency of desalination. On the other hand, it has been found that creating a temperature difference (thermal driving force) between the two sides of a membrane that contains impure water on one side and pure water on the other side can lead to water purification.

The review of research about water purification by carbon nanotubes using thermal driving force shows that the investigation of the factors and conditions affecting the amount of purified water has been given less attention. Therefore, in this research, the water flow passing through the nanotubes in different conditions has been investigated by using the thermal driving force caused by the application of the temperature gradient on an array of carbon nanotubes. The results can be used in the design of efficient membranes for water purification.

Material and Methods

In this research, using molecular dynamics simulation, a purification system consisting of a membrane with a row of six carbon nanotubes has been studied (Fig. 1).

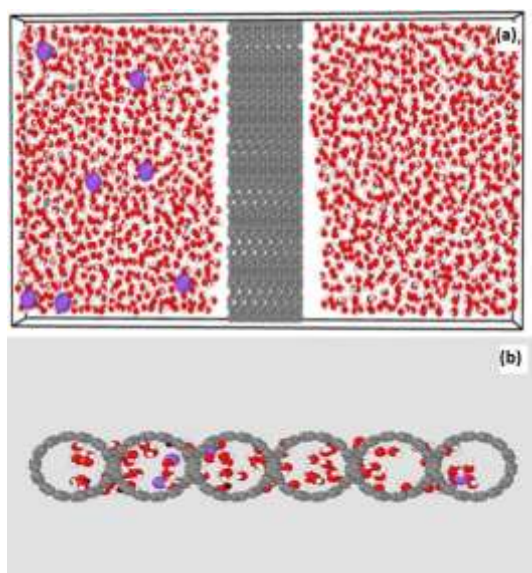


Fig. 1 a) Overview of the simulation geometry. Nanotubes (gray in the middle) separate the solution of water (oxygen in red and hydrogen in white) and salt (in purple) from pure water. b) Nanotubes row

On both sides of this membrane, water and salt solution and pure water are placed. The simulation boundaries are periodic. The length of the nanotubes is 1.6 nm. The dimensions of the simulation box vary from $12 \times 58 \times 117$ to $26 \times 157 \times 117 \text{ \AA}^3$ in different simulations in x, y and z directions. Nose-Hoover thermostat has been used to create areas with constant temperature. The hot and the cold region extend from -15 to -5 $\text{\AA}$ and from 21 to 31 $\text{\AA}$ in the z-direction respectively. The concentration of ions in water is 10000 ppm. Ions are placed only in the left tank. Carbon-carbon interactions are modeled using the Tersouf potential and interactions between carbon, oxygen, hydrogen, sodium, and chlorine atoms are modeled using Lennard-Jones potential function. The effect of the electric charge of the ions is also taken into account using the Coulomb force. TIP4P/2005 model was used for water. The direction of the flow is always from the impure side toward the pure water. The simulation time step is 0.0001 fs. The simulation process has progressed to reach an equilibrium and stability of 1 ns. After that, the simulation runs for 10 ns. In this step, time averaging of the output quantities has been performed. The simulations were done using Lammmps software.

Results

Fig. 2 shows the number of water molecules passing through nanotubes with different diameters over time. The temperature difference between the cold and hot sources causes asymmetry in the kinetic energy of the water molecules. This asymmetry causes the high-energy water molecules move toward low-energy molecules. It can also be seen from Fig. 2 that as the diameter of the nanotube increases, the number of water molecules passing through the nanotubes increases too.

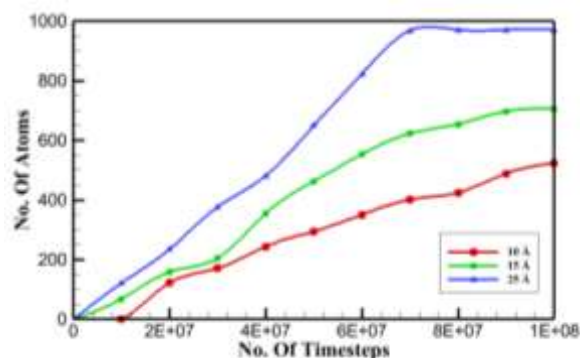


Fig. 2 The number of passing water atoms during the simulation time in different nanotube diameters

Fig. 3 shows water atom passage through different nanotube types overtime. The armchair nanotube has the maximum flow rate and the zigzag and chiral nanotubes are in the next rank respectively. The change in friction in different types of nanotubes is attributed to the change in potential energy experienced by water molecules passing through each of the nanotubes.

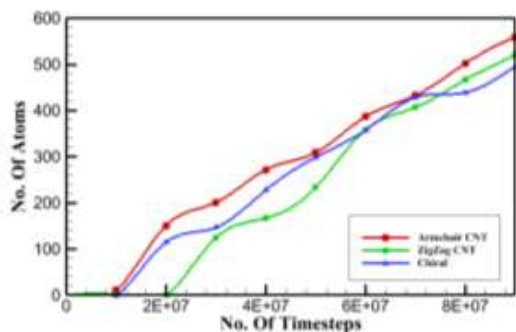


Fig. 3 The number of water atoms passing through different nanotubes according to the time step

Fig.4 shows the effect of salt concentration of the hot tank on the amount of purified water for Armchair nanotubes. It is observed that the number of water molecules passing through the nanotube decreases with increasing molarity. By increasing the concentration difference between the cold and hot sources, the potential difference caused by the concentration difference between the two reservoirs increases, therefore, the flow rate decreases.

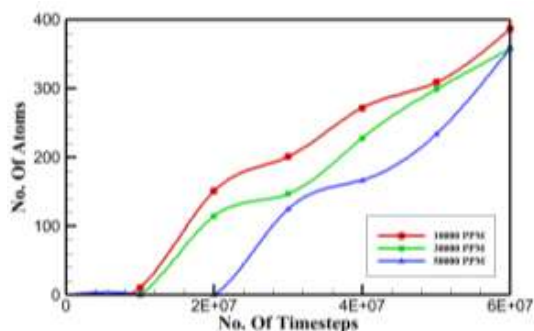


Fig. 4 The number of water atoms passing through the armchair nanotube over time at different salt concentrations in the hot source

The effect of the temperature difference between the reservoirs on water purifying was done by increasing the hot source temperature while keeping the cold source temperature constant at 293 K. When the temperature of the hot source increases, the average molecular movement of

water molecules increases and as a result, more molecules are capable to overcome the potential difference between the two reservoirs. Therefore, more molecules have a chance to pass through the nanotubes and as Fig. 5 shows, the purified water flow rate increases. If we consider the number of salt ions passing through the nanotube, it can be seen that the probability of ions passing through the nanotube increases with the increase in the hot source temperature. The reason is the increase in the movement of particles due to the increase in temperature and, as a result, the increase in the chance of ions passing through the cavity of the nanotube. This issue is undesirable in the purification process.

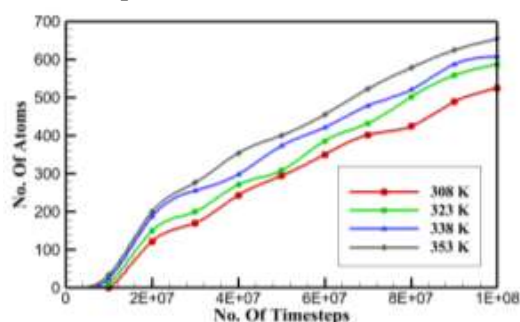


Fig. 5 The number of water atoms passing through the armchair nanotube over time

Conclusions

The molecular dynamics simulation showed that the temperature difference between the tank of pure water (cold side) and the impure solution (hot side) in a system consisting of a membrane containing nanotubes causes the water molecules transfer from the impure solution to the pure water. The results showed that the use of armchair carbon nanotubes leads to higher water purification rates compared to chiral and zigzag nanotubes. Increasing the temperature of the hot source and increasing the diameter of the nanotubes improves the performance of the water purification process until it leads to the passage of impurities.

Data Availability

The data obtained in this study are presented in the paper.

Conflicts of interest

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



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir

مقاله پژوهشی

شبیه سازی دینامیک مولکولی تصفیه آب با نیروی رانش گرمایی و غشای متشکل از نانولوله های کربنی

آرش رجبی وحید^۱ و مهدی صاحبی^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران
^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت: [۱۴۰۱/۱۰/۲۳]	اختلاف دما دو طرف یک غشا که در یک طرف آب ناخالص و در طرف دیگر آب خالص وجود دارد، می تواند به تصفیه آب منجر شود. عدم تقارن انرژی جنبشی مولکولی در دو سمت غشا باعث رانش آب خالص از سمت گرم به سرد می شود. در پژوهش حاضر یک سیستم تصفیه غشائی مبتنی بر اختلاف دما میان منابع آب که دارای نانولوله های کربنی بود با روش شبیه سازی دینامیک مولکولی مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر عوامل مختلف بر میزان عبور آب و دفع نمک بررسی شد. نتایج شبیه سازی ها امکان پذیری استفاده از نیروی رانش گرمایی جهت تصفیه آب با غشاهای دارای نانولوله های کربنی را تأیید کرد. نتایج نشان داد که با افزایش دمای منبع گرم مقدار عبور آب و سرعت تصفیه افزایش می یابد. طوری که افزایش اختلاف دمای میان منابع از ۱۵ به ۶۰ K باعث افزایش ۳۰٪ تصفیه آب شد. در عین حال احتمال عبور ناخالصی ها از نانولوله نیز زیاد شد. همچنین افزایش غلظت ناخالصی باعث کاهش سرعت فرایند تصفیه می شود. افزایش قطر نانولوله تا ۱۵ nm موجب افزایش سرعت تصفیه آب شد. در نانولوله هایی با قطر کمتر از ۱۵ nm، ۱۰۰٪ ناخالصی ها دفع می شوند. از میان نانولوله های بررسی شده، بهترین عملکرد برای نانولوله کربنی از نوع آرمچیر به دست آمد.
واژه های کلیدی: اختلاف دما تصفیه آب شبیه سازی دینامیک مولکولی نانولوله کربنی	
* نویسنده مسئول: sahebi@qut.ac.ir	
	

نحوه استناد به این مقاله:

رجبی وحید، آرش & صاحبی، مهدی. (۱۴۰۳). شبیه سازی دینامیک مولکولی تصفیه آب با نیروی رانش گرمایی و غشای متشکل از نانولوله های کربنی. محیط زیست و مهندسی آب. ۱۰(۱) 37-48. <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.381252.1836>



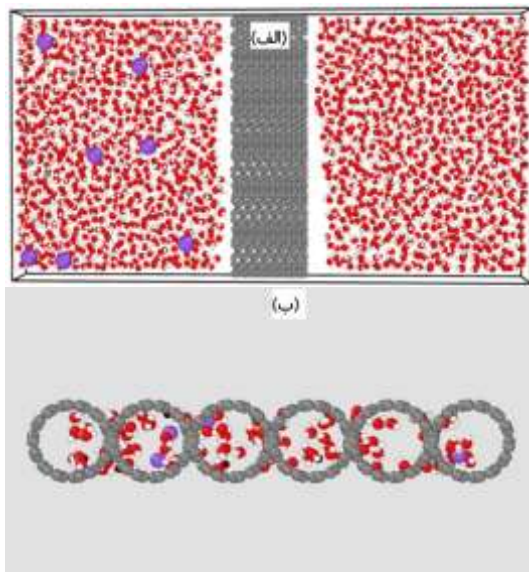
۱- مقدمه

بحران آب یکی از جدی‌ترین چالش‌های جهانی است. پیش‌بینی می‌شود که نمک‌زدایی آب دریا در آینده به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین راه‌های تأمین آب مطرح‌شده و آب قابل شرب نامحدودی را در اختیار بگذارد (Aende et al. 2020). اکثر روش‌های نمک‌زدایی کنونی یا آب دریا را تبخیر می‌کنند و سپس بخارات را متراکم می‌کنند (به‌عنوان مثال تقطیر حرارتی) و یا برای غلبه بر فشار اسمزی طبیعی آب دریا را با پمپ فشار بالا، تحت فشار قرار می‌دهند (Lim et al. 2021). تعمیر و نگهداری در هردو روش اشاره‌شده انرژی بر و گران بوده و به زیرساخت‌های بزرگ نیاز دارند (Shannon et al. 2011; Elimelech and Phillip 2010). درعین حال، بحران کمبود آب شیرین معمولاً با کمبود نیرو و زیرساخت‌های لازم در مناطق توسعه‌نیافته همراه است (Aende et al. 2020). بنابراین، طراحی سامانه‌های نمک‌زدایی آب دریا در مقیاس کوچک که دارای راندمان انرژی بالا بوده و توسط یک فرد یا یک خانواده قابل استفاده باشد، ضرورت می‌یابد (Kim et al. 2017). نانو فناوری به‌عنوان رشته‌ای از دانش که زمینه‌های گسترده‌ای را در صنعت امروز پوشش می‌دهد و موضوع آن کنترل ماده یا دستگاه‌های در ابعاد نانومتری است به کمک فرایند تصفیه آب آمده است (Elishakoff et al. 2013; Lyon and Hubler 2013; Bantan et al. 2021). در این میان، در سال‌های اخیر، غشاهای متشکل از نانولوله‌های کربنی پتانسیل بالایی را برای بهبود بازدهی انرژی (Barrejón and Prato 2022) و کاهش اندازه سامانه‌های نمک‌زدایی به دلیل نفوذپذیری فوق‌العاده آب در نانولوله‌ها (Mann and Halls 2003) و حذف عالی املاح (Corry 2008; De Volder et al. 2013) نشان داده‌اند. (Das et al. 2014). در یک پژوهش مروری انواع روش‌های تجربی و محاسباتی برای مدل‌سازی عبور آب از نانولوله‌های کربنی را دسته‌بندی و بررسی کردند. (Thomas and Corry 2015) تأثیر انتخاب ترموستات حرارتی در شبیه‌سازی دینامیک مولکولی عبور آب از نانولوله‌های کربنی را مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که در این زمینه دقت‌های لازم می‌بایست صورت پذیرد. Yang et al. (2013) در پژوهش خود با تغییر در طول نانولوله‌های کربنی به تأثیر این عامل در تصفیه آب پرداختند. نتایج حاصل

از این پژوهش نشانگر توانایی نانولوله‌های کربنی طویل در تصفیه بهینه مولکول‌های آب و جداسازی ناخالصی‌ها از آب بود. (Liu et al. 2013). برای نانولوله کربنی پتانسیل بالایی را در تصفیه مولکول‌های آب گزارش کردند. Hou et al. (2021) با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی نشان دادند که پیوندهای هیدروژنی پیوسته‌ای که در لبه‌ی ورودی نانولوله کربنی تشکیل می‌شود، عامل کلیدی در تسهیل انتقال آب در نانولوله‌ها است.

نیاز به پمپ فشار بالا یکی از موانع کاهش اندازه سامانه‌های تصفیه آب فعلی به‌منظور کاربردهای کوچک است. بنابراین روش‌های کارآمدتر رانش جریان به‌عنوان جایگزین‌هایی برای پمپ فشار بالا مورد نیاز است. ازجمله این روش‌های جایگزین استفاده از نیروی رانش آب با ایجاد گرادیان دما است (Zhao and Wu 2015). (Sahebi and Azimian 2022). با استفاده از روش دینامیک مولکولی نشان دادند که با استفاده از ایجاد گرادیان دما در دو طرف یک نانولوله کربنی به نرخ بالایی از عبور آب از میان نانولوله‌ها می‌توان دست‌یافت. (Chen et al. 2019) با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی نشان دادند که عبور آب با استفاده از گرادیان دما از میان کانال‌های گرافنی نیز میسر است. ایشان نشان دادند که از ایده‌ی کانال‌های گرافنی برای توسعه فناوری تصفیه آب با راندمان بالا می‌توان بهره برد. (Leng et al. 2022) با پیشنهاد یک سیستم آبشاری طرحی برای رانش مداوم آب با نیروی رانش گرمایی (گرادیان دما) در نانولوله‌های طویل ارائه دادند. (Oyarzua et al. 2023) اثر فونون‌ها در رانش آب با استفاده از نیروی گرمایی از میان نانو کانال‌های گرافنی را با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی مورد بررسی قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از افزایش ۵۰ درصدی شارش آب در صورت دست‌کاری در میزان آب‌گریزی نانو کانال‌های گرافنی بود.

مرور پژوهش‌ها در زمینه تصفیه یا عبور آب از میان نانولوله‌های کربنی با استفاده از نیروی رانش گرمایی نشان می‌دهد که بررسی عوامل و شرایط متعدد اثرگذار در میزان آب تصفیه‌شده، خصوصاً بررسی نوع نانولوله کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو در پژوهش حاضر با استفاده از نیروی رانش گرمایی ناشی از اعمال گرادیان دما بر آرایه‌ای از



شکل ۱- الف) نمای کلی هندسه شبیه‌سازی. نانولوله‌ها (به رنگ خاکستری در وسط) محلول آب (اکسیژن به رنگ قرمز و هیدروژن به رنگ سفید) و نمک (به رنگ بنفش) را از آب خالص جدا می‌کند. ب) قرار گرفتن ردیفی نانولوله‌ها در کنار یکدیگر

Fig. 1 a) Overview of the simulation geometry. Nanotubes (gray in the middle) separate the solution of water (oxygen in red and hydrogen in white) and salt (in purple) from pure water and b) nanotubes row

۲-۲- پارامترهای شبیه‌سازی

نیروی بین اتم‌ها از مشتق پتانسیل بین‌اتمی حاصل می‌شود (Bartolomeu and Franco 2020). برای توصیف پتانسیل بین‌اتمی از توابع پتانسیل ترسوف، لنارد-جونز و کولومب استفاده شده است. برهمکنش‌های کربن-کربن با استفاده از پتانسیل ترسوف و برهمکنش‌های میان اتم‌های کربن، اکسیژن، هیدروژن، سدیم و کلر با استفاده از تابع پتانسیل لنارد-جونز مدل شده است (Luo and Roux 2010). اثر بار الکتریکی یون‌ها نیز با استفاده از نیروی کولومب لحاظ شده است. پارامترهای استفاده‌شده در توابع مذکور مطابق جدول (۱) استفاده است (Mayo et al. 1990; Huray 2011). تابع پتانسیل لنارد-جونز^۱ به صورت رابطه (۱) است (Wang et al. 2020).

$$E_{LJ} = 4\epsilon_{ij} \left[\left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}} \right)^6 \right] \quad (1)$$

جدول ۱- پارامترهای موجود در پتانسیل لنارد-جونز

Table 1 Parameters in Lennard-Jones potential

نانولوله‌های کربنی، به بررسی رفتار جریان آب عبوری از نانولوله‌ها در شرایط مختلف پرداخته شد. در این پژوهش عوامل مؤثر در میزان نفوذپذیری آب و قدرت جداسازی ناخالصی‌هایی شامل یون‌های سدیم و کلر با استفاده از روش شبیه‌سازی دینامیک مولکولی مورد مطالعه قرار گرفتند. پارامترهایی که تأثیر آن‌ها بررسی شدند شامل قطر و نوع نانولوله‌های کربنی، میزان اختلاف دما در منابع حرارتی و غلظت ناخالصی‌های موجود در آب تغذیه (آبی که می‌بایست تصفیه شود) بود. نتایج این پژوهش می‌تواند در طراحی غشاهای کارآمد برای تصفیه آب با استفاده از نانولوله‌های کربنی به کار آید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مشخصات هندسی

در این پژوهش، با استفاده از شبیه‌سازی به روش دینامیک مولکولی به مطالعه سیستم تصفیه‌ای متشکل از یک غشا نیمه‌تراوی دارای یک ردیف نانولوله کربنی، پرداخته‌شده است (شکل ۱). غشا شبیه‌سازی‌شده از شش نانولوله که به صورت یک ردیف و مماس بر یکدیگر قرار گرفته‌اند، ساخته‌شده است. در دو طرف این غشا محلول آب و نمک و آب خالص قرار گرفته‌اند. مرزهای شبیه‌سازی به صورت پریودیک در نظر گرفته‌شده‌اند. طول نانولوله‌ها ۱/۶ نانومتر است. ابعاد جعبه شبیه‌سازی با توجه به ثابت نبودن قطر لوله‌ها در شبیه‌سازی‌های مختلف در جهات x، y و z به ترتیب از ۰/۱۲×۰/۰۵۸×۰/۱۱۷ nm تا ۰/۲۶×۰/۱۵۷×۰/۱۱۷ nm متغیر بود. از ترموستات نوز-هوور برای ایجاد نواحی با دمای ثابت جهت ایجاد گرادیان دمایی در سیال استفاده‌شده است. محدوده ناحیه گرم از ۰/۱۵- تا ۰/۰۰۵ nm و ناحیه سرد از ۰/۲۱- تا ۰/۳۱ nm در راستای z در نظر گرفته شده است. تعداد مولکول‌های آب به طور متوسط حدود ۱۶۰۰ عدد بود. ضمن اینکه تعداد مولکول‌های آب با توجه تفاوت ابعاد جعبه شبیه‌سازی در حالت‌های مختلف تغییر می‌کند. غلظت یون‌ها در آب ۱۰۰۰۰ ppm در نظر گرفته شد. یون‌ها فقط در مخزن سمت چپ قرار گرفتند. تعداد کل یون‌ها با توجه به غلظت لحاظ شده ۸ عدد خواهد بود.

^۱Lennard-Jones

انرژی با موقعیت مجموعه‌ای از بارهای نقطه‌ای در یک سیستم مرتبط بوده و مقدار نیروی بارهای الکتریکی ساکن ذرات یک سیستم که همدیگر را دفع یا جذب می‌کنند را تعیین می‌کند. انرژی پتانسیل الکتریکی با کمک رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Mehta et al. 2019).

$$E_{ij}(r) = \frac{-1}{4\pi\epsilon_0 r_{ij}} q_i q_j \quad (2)$$

که، q_i و q_j بارهای الکتریکی ذرات i و j ، r_{ij} فاصله بین بارها و ϵ_0 نشان‌دهنده نفوذپذیری الکتریکی خلأ بوده و از نظر عددی برابر با $8.85 \times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$ است. برای ساختارهای کربنی، نحوه اندرکنش بین اتم‌ها با استفاده از پتانسیل ترسوف و با رابطه‌های (۳) و (۴) توصیف می‌شود (Tersoff 1988).

$$E = \frac{1}{2} \sum_i \sum_{j \neq i} V_{ij} \quad (3)$$

$$V_{ij} = f_c(r_{ij} + \delta)[f_R(r_{ij} + \delta) + b_{ij}f_A(r_{ij} + \delta)]$$

می‌شود. با پیشروی حل در طول زمان، کمیت‌ها به یک مقدار مشخص همگرا شده و مقدار نوسانات آن‌ها کاهش می‌یابد. در این زمان شبیه‌سازی به تعادل رسیده است. در شبیه‌سازی‌های این مطالعه، مسئله پس از گذشت یک‌میلیون گام زمانی، به تعادل رسیده است.

۳-۲- اعتبار سنجی

جهت اطمینان از درستی نتایج شبیه‌سازی، اعتبار سنجی حل انجام شده است. برای انجام اعتبار سنجی، مسئله‌ای که توسط Zhao and Wu (2015) حل شده و شباهت زیادی با مسئله مورد شبیه‌سازی در این پژوهش دارد انتخاب و مجدداً حل شده است. در این مسئله ۳۰ نانولوله کربنی برای جداسازی آب از آب‌نمک با غلظت ۰/۵۵ مول به کار گرفته شده است. سایر شرایط شبیه‌سازی نیز دقیقاً مشابه با مرجع مورد اشاره در نظر گرفته شده است. شکل (۲) نتایج شبیه‌سازی در مورد تعداد مولکول‌های عبور کرده از نانولوله‌ها در طول زمان را با مقاله مرجع مورد اشاره مقایسه می‌کند. همان‌گونه که در شکل (۲) دیده می‌شود تطابق بسیار خوبی بین داده‌های حاصل از شبیه‌سازی حاضر و کار انجام شده توسط Zhao and Wu (2015) وجود دارد.

Materia l	(gram/molm)	(electronq)	$\sigma(\text{\AA})$	$\epsilon(\text{kcal}/\text{mol})$
C	12.01	0	4.18	0.030 5
O	16	-1.0484	3.164 4	0.007
H	1	0.5242	0	0
Na	22.99	1	2.258 9	0.007 3
Cl	35.45	-1	5.164 5	0.005

که، ϵ_{ij} عمق چاه پتانسیل و σ_{ij} فاصله‌ای است که در آن تابع پتانسیل صفر می‌شود. همچنین r_{ij} فاصله ذرات از یکدیگر است. از سوی دیگر، انرژی پتانسیل الکتریکی یا انرژی پتانسیل الکترواستاتیک از نیروهای پایستار کولمب به دست می‌آید. این (۴)

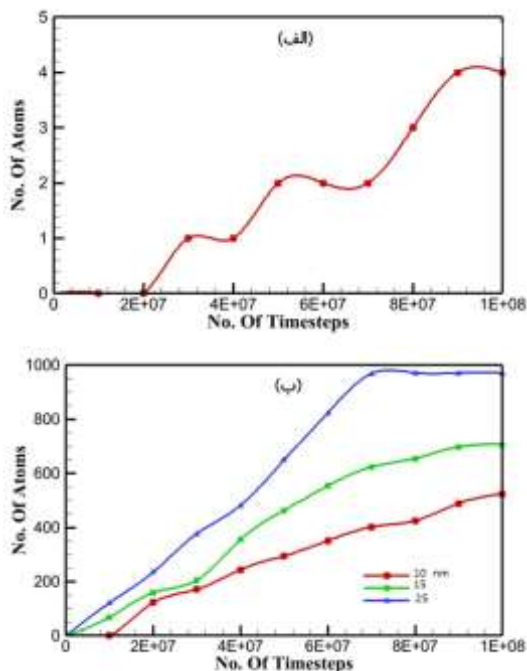
که، E انرژی سیستم، f_R و f_E به ترتیب به هم‌کنش‌های دو و سه‌تایی، δ یک شیفت منفی دلخواه از وضعیت تعادل طول پیوند و f_c یک تابع چند ضابطه‌ای برحسب شعاع قطع است (Tersoff 1988). مدلی که برای آب در این شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است مدل TIP4P/2005 است. جهت جریان در طول زمان شبیه‌سازی همواره از سمت محلول دارای ناخالصی به سمت آب خالص بوده است. گام زمانی شبیه‌سازی ۱ fs در ۰/۰۰۰۱ در نظر گرفته شده است. فرایند شبیه‌سازی، برای رسیدن به تعادل و پایداری ۱ ns پیش رفته است. پس از آن، اجرای شبیه‌سازی به مدت ۱۰ ns ادامه پیدا کرده است. در این مرحله متوسط‌گیری‌های زمانی از کمیت‌های خروجی مطلوب به منظور استخراج نتایج نهایی اجرا شده است. شعاع قطع برابر با ۰/۱۲ nm در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز LAMMPS^۱ انجام شده است (Plimpton 1995).

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- بررسی به تعادل رسیدن حل

یکی از مراحل شبیه‌سازی دینامیک مولکولی- قبل از تولید نتایج- به تعادل رسانی سیستم مورد شبیه‌سازی است. بدین منظور تغییرات کمیت‌های فیزیکی شامل دما، انرژی جنبشی، انرژی پتانسیل و انرژی کل، نسبت به زمان شبیه‌سازی رصد

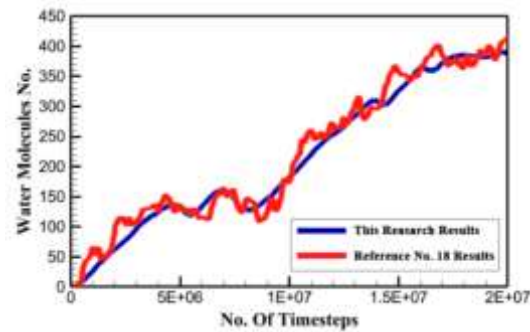
لوله نسبت عکس دارد (Fox et al. 2020). بنابراین با افزایش قطر، مقاومت اصطکاکی کمتری برای عبور جریان آب در نانولوله وجود خواهد داشت. افزایش قطر در مقیاس نانو تأثیر مضاعفی بر کاهش اصطکاک خواهد گذاشت. زیرا با افزایش قطر نسبت سطح به حجم کمتر شده و اهمیت نیروهای اصطکاکی کاهش می‌یابد (Karniadakis et al. 2006). به همین دلیل است که مقدار آب عبوری از نانولوله‌ها و در نتیجه سرعت تصفیه افزایش پیدا می‌کند. البته به موازات افزایش قطر نانولوله‌ها امکان عبور ناخالصی‌ها نیز بیشتر می‌شود. به طوری که وقتی قطر نانولوله به 0.15 nm برسد، مقداری از یون‌های نمک از نانولوله عبور می‌کنند (شکل ۳ ب)؛ بنابراین کارایی فرایند تصفیه کاهش می‌یابد.



شکل ۳- الف) تعداد اتم‌های آب عبوری در طول زمان شبیه‌سازی در قطرهای مختلف نانولوله. ب) تعداد یون‌ها (ناخالصی‌ها) عبوری از نانولوله‌ها در قطر 0.015 nm در طول زمان
Fig. 3 a) The number of passing water atoms during the simulation time in different nanotube diameters b) The number of ions (impurities) passing through nanotubes with a diameter of 0.015 nm over time

۴-۴- تأثیر نوع نانولوله

شکل (۴) میزان آب خالص عبوری از غشا برحسب زمان در انواع مختلف نانولوله را نشان می‌دهد. در این شکل، قطر نانولوله 0.118 nm و اختلاف دما در طرفین نانولوله 30 K است. مشاهده می‌شود که ساختار نانولوله در میزان آب عبوری



شکل ۲- مقایسه تعداد مولکول‌های عبوری آب در ساختار اتمی شبیه‌سازی شده با (Zhao and Wu 2015).

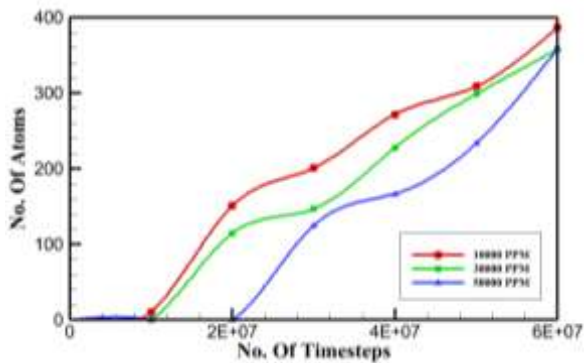
Fig. 2 Comparison of the number of passing water molecules in the atomic structure simulated by (Zhao and Wu 2015)

۳-۳- تأثیر قطر نانولوله

شکل (۳) تعداد مولکول‌های آب عبوری از نانولوله‌ها در طول زمان را نشان می‌دهد. اختلاف دمای اعمالی میان دو مخزن 30 K است. همان‌طور که دیده می‌شود، با گذشت زمان تعدادی از مولکول‌های آب در جهت منبع گرم (محلول آب و نمک) به منبع سرد (آب خالص) از میان نانولوله‌ها عبور کرده و در نتیجه عمل تصفیه آب انجام شده است. برای توجیه این پدیده می‌توان دلایل زیر را عنوان کرد. اختلاف دمای میان منبع سرد و گرم موجب عدم تقارن در انرژی جنبشی مولکول‌های آب دو سر نانولوله کربنی می‌شود. همین عدم تقارن موجب حرکت مولکول‌های پرانرژی آب به سمت مولکول‌های کم انرژی می‌شود. بنابراین جریانی از آب از منبع گرم (محلول آب و نمک) به سمت منبع سرد (آب خالص) برقرار می‌شود. عدم تقارن در انرژی جنبشی آب در دو سر نانولوله انرژی لازم برای غلبه بر اختلاف پتانسیل ناشی از اختلاف غلظت نمک در آب به علاوه انرژی لازم برای غلبه بر اصطکاک آب با دیواره را فراهم می‌آورد. از طرف دیگر، قطر مولکول‌های آب کوچک‌تر از قطر یون‌های نمک است. بنابراین احتمال عبور مولکول‌های آب از میان حفره‌های نانولوله کربنی بیشتر از یون‌های نمک است. لذا در مجموع از نانولوله‌های کربنی، آب خالص یا نسبتاً خالص عبور کرده و فرایند تصفیه اتفاق می‌افتد. از شکل (۳-الف) همچنین دیده می‌شود که با افزایش قطر نانولوله، تعداد مولکول‌های آب عبوری از نانولوله‌ها افزایش پیدا می‌کند. در نتیجه سرعت تصفیه آب بیشتر می‌شود. همان‌گونه که از روابط موجود برای افت فشار در مکانیک سیالات می‌دانیم، مقاومت اصطکاکی جریان با قطر

۳-۵- تأثیر میزان غلظت ناخالصی

شکل (۵) تأثیر غلظت نمک در مخزن گرم را بر میزان آب تصفیه‌شده عبوری از غشا نشان می‌دهد. در این شکل نیز نانولوله از نوع آرمچیر به قطر 0.0081 nm است. اختلاف دمای طرفین نانولوله 30 K است.



شکل ۵- تعداد اتم‌های آب عبوری از نانولوله آرمچیر در طول زمان در غلظت‌های مختلف نمک در منبع گرم

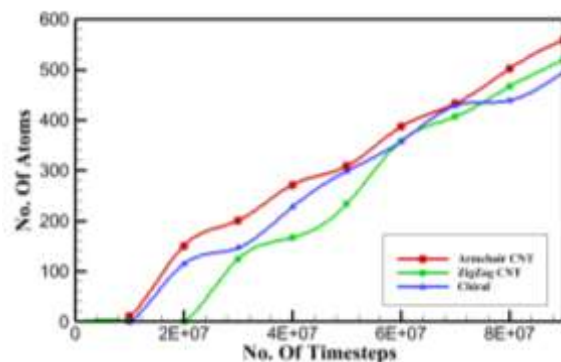
Fig. 5 The number of water atoms passing through the armchair nanotube over time at different salt concentrations in the hot source

همان‌طور که مشاهده می‌شود تعداد مولکول‌های آب عبوری از نانولوله با افزایش مولاریته کاهش می‌یابد. در حقیقت وقتی اختلاف غلظت بین منبع سرد و گرم زیاد می‌شود، اختلاف پتانسیل ناشی از اختلاف غلظت بین دو مخزن افزایش می‌یابد (Zhao and Wu 2015). در این حالت مولکول‌های آب به نیروی بیشتری برای غلبه بر این اختلاف پتانسیل و حرکت به سمت مخزن آب خالص نیاز دارند. بنابراین در حضور یک نیروی رانش ثابت و مشخص دبی آب تصفیه‌شده عبوری کاهش می‌یابد. در نتیجه هرچه میزان ناخالصی در آب بیشتر باشد، فرایند تصفیه کندتر می‌شود.

۳-۶- تأثیر اختلاف دما

در اینجا تأثیر اختلاف دمای میان مخازن گرم و سرد بر میزان عبور آب بررسی می‌شود. این کار با افزایش دمای منبع گرم و ثابت نگه‌داشتن دمای منبع سرد در دمای 293 K انجام شده است. در این بررسی نوع نانولوله آرمچیر با قطر 0.0081 nm و غلظت محلول 10000 ppm است. نمودارهای مربوطه در شکل (۶) نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش دمای منبع گرم، دبی آب عبوری از نانولوله کربنی زیاد می‌شود. به‌طوری‌که با افزایش دمای منبع گرم به میزان K

از نانولوله تأثیرگذار است. به‌طوری‌که بیشینه دبی عبوری از نانولوله‌ها مربوط به نانولوله آرمچیر و بعد از آن به ترتیب مربوط به نانولوله زیگزاگ و کایرال است. این نتیجه نشان می‌دهد آب در عبور از نانولوله آرمچیر کمترین مقاومت اصطکاکی را تجربه کرده و بعد از آن نانولوله‌های زیگزاگ و کایرال قرار می‌گیرند. نتیجه حاصله دقیقاً با نتیجه به دست آمده توسط Sam et al. (2019) در بررسی جریان خالص آب عبوری از نانولوله‌ها همخوانی دارد. طبق بررسی‌های Sam et al. (2019) تغییر اصطکاک در نانولوله‌های یادشده به تغییر در انرژی پتانسیل تجربه شده توسط مولکول‌های آب عبوری از هریک از نانولوله‌ها نسبت داده می‌شود. این موضوع باعث تغییر سرعت لغزشی سیال کناره دیواره با تغییر نوع نانولوله می‌شود. این امر به‌نوبه خود موجب تغییر ضریب اصطکاک سیال-جامد شده و نهایتاً سبب تغییر نیروی اصطکاک و تغییر دبی می‌شود. مقاومت اصطکاکی در برابر عبور آب از نانولوله‌ها برای ساختار آرمچیر کمترین و برای ساختار زیگزاگ بیشترین است. به همین سبب ساختار آرمچیر بیشترین دبی عبوری را به خود اختصاص داده و بعد از آن به ترتیب ساختارهای کایرال و زیگزاگ قرار دارند. شبیه‌سازی‌ها نشان داد میزان عبور ناخالصی‌ها در هر سه ساختار مذکور (با قطر و شرایط نمودار ۴) برابر با صفر است. بنابراین نوع نانولوله تأثیر خاصی در میزان عبور ناخالصی‌ها از نانولوله ندارد. این مسئله به این دلیل است که انرژی برهمکنش یون‌های ناخالصی با آب درون نانولوله بسیار شدیدتر از برهمکنش یون‌ها با سطح نانولوله کربنی است. این موضوع نشان‌دهنده وابستگی حداقلی عبور یون‌ها به ساختار نانولوله است (Sam et al. 2019).



شکل ۴- تعداد اتم‌های آب عبوری از نانولوله‌های مختلف برحسب گام زمانی

Fig. 4 The number of water atoms passing through different nanotubes according to the time step

می‌شود. نمودار مربوط به عبور ناخالصی‌ها برای منبع با دمای ۳۵۳ K در شکل (۷) نشان داده شده است. علت این موضوع، افزایش دوچندان جنبش ذرات بر اثر ازدیاد دما و در نتیجه افزایش شانس عبور یون‌ها از حفره‌ی نانولوله است. از آنجاکه این موضوع در فرآیند تصفیه امری نامطلوب به شمار می‌رود، می‌توان برای منبع گرم یک حد بالای دمایی را در نظر گرفت.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده عبارت است از:

۱- در جذب سرب، جلبک قهوه‌ای در pH برابر با ۵ و جلبک سبز در pH برابر با ۶ توانسته است به حداکثر جذب برسد.

۲- دو جاذب زیستی جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinia zanardini* و جلبک سبز *Ulva rigida* به ترتیب در مقدار ۰/۵ g و ۰/۷ g توانسته‌اند بیشترین مقدار جذب سرب را داشته باشند. در بررسی غلظت یون فلزی، بیشترین مقدار معادل ۲ mg/l حاصل شد. برای هر دو جلبک بهترین زمان جذب در ۶۰ min بود.

۳- جذب سرب به‌وسیله جاذب‌های مورد استفاده یک جذب مطلوب است و جذب یون فلز سنگین سرب به‌وسیله جلبک قهوه‌ای *Nizimuddinia zanardini* با ایزوترم لانگمویر، جذب یون فلز سنگین سرب به‌وسیله جلبک سبز *Ulva rigida* با ایزوترم فروندلیچ مطابقت دارد.

۴- جلبک قهوه‌ای مورد استفاده توانایی بیشتری در جذب فلزات سنگین از جلبک سبز داشت.

مطابق با نتایج به دست آمده در این پژوهش پیشنهاد می‌شود که ارزیابی ویژگی‌های جذبی سایر میکروارگانیسم‌های جلبکی در جذب زیستی فلزات سنگین از محلول‌های آبی مورد بررسی قرار گیرد.

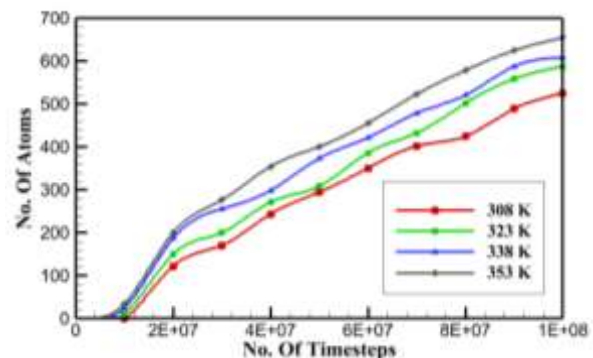
دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده شده یا تولید شده در این پژوهش در متن مقاله ارائه شده است.

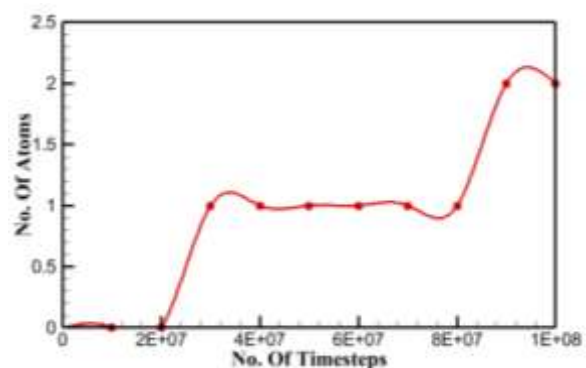
تضاد منافع نویسندگان

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

۴۵، میزان تصفیه ۳۰٪ بیش‌تر می‌شود. در این حالت و با افزایش دمای منبع گرم، جنبش مولکولی متوسط مولکول‌های آب زیاد شده و در نتیجه تعداد بیش‌تری از مولکول‌ها توانایی غلبه بر اختلاف پتانسیل ناشی از اختلاف غلظت طرفین نانولوله‌ها را پیدا می‌کنند؛ بنابراین تعداد مولکول‌های بیش‌تری شانس عبور از نانولوله‌ها را پیدا کرده و دبی آب تصفیه‌شده بیش‌تر می‌شود. در نتیجه هرچه اختلاف دمای منبع گرم و سرد بیش‌تر باشد سرعت تصفیه افزایش خواهد یافت.



شکل ۶- تعداد اتم‌های آب عبوری از نانولوله آرمچیر در طول زمان
Fig. 6 The number of water atoms passing through the armchair nanotube over time



شکل ۷- تعداد اتم‌های ناخالصی عبوری حاصل از افزایش دمای منبع گرم به ۳۵۳ K در طول زمان

Fig. 7 The number of transiting impurity atoms resulting from increasing the temperature of the hot source to 353 K over time

اگر میزان یون‌های نمک عبوری از نانولوله در دماهای مختلف منبع گرم در طول زمان را مدنظر قرار دهیم مشاهده می‌شود که با افزایش دمای منبع گرم احتمال عبور یون‌ها از نانولوله بیشتر می‌شود. در شبیه‌سازی‌های حاضر، با رسیدن دمای منبع گرم به ۳۵۳ K، عبور یون‌ها از نانولوله کربنی آغاز

References

- Aende, A., Gardy, J., & Hassanpour, A. (2020). Seawater desalination: A review of forward osmosis technique, its challenges, and future prospects. *Process.*, 8(8), 901. DOI: [10.3390/pr8080901](https://doi.org/10.3390/pr8080901)
- Amy, G., Ghaffour, N., Li, Z., Francis, L., Linares, R. V., Missimer, T., & Lattemann, S. (2017). Membrane-based seawater desalination: Present and future prospects. *Desal.*, 401, 16-21. DOI: [10.1016/j.desal.2016.10.002](https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.002)
- Bantan, R. A., Abu-Hamdeh, N. H., Nusier, O. K., & Karimipour, A. (2021). The molecular dynamics study of aluminum nanoparticles effect on the atomic behavior of argon atoms inside zigzag nanochannel. *J. Mole. Liquid.*, 331, 115714. DOI: [10.1016/j.molliq.2021.115714](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115714)
- Bartolomeu, R. A., & Franco, L. F. (2020). Thermophysical properties of supercritical H₂ from molecular dynamics simulations. *Int. J. Hydrogen Energy*, 45(33), 16372-16380. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2020.04.164](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.164)
- Barrejón, M., & Prato, M. (2022). Carbon nanotube membranes in water treatment applications. *Advanced Mater. Inter.*, 9(1), 2101260. DOI: [10.1002/admi.202101260](https://doi.org/10.1002/admi.202101260)
- Chen, B., Jiang, H., Liu, H., Liu, K., Liu, X., & Hu, X. (2019). Thermal-driven flow inside graphene channels for water desalination. *2D Mater.*, 6(3), 035018. DOI: [10.1088/2053-1583/ab15ac](https://doi.org/10.1088/2053-1583/ab15ac)
- Corry, B. (2008). Designing carbon nanotube membranes for efficient water desalination. *J. Phys. Chem. B*, 112(5), 1427-1434. DOI: [10.1021/jp709845u](https://doi.org/10.1021/jp709845u)
- Das, R., Ali, M.E., Abd Hamid, S.B., Ramakrishna, S. and Chowdhury, Z.Z. (2014). Carbon nanotube membranes for water purification: A bright future in water desalination. *Desal.*, 336, 97-109. DOI: [10.1016/j.desal.2013.12.026](https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.12.026)
- De Volder, M.F., Tawfick, S.H., Baughman, R.H. and Hart, A.J. (2013). Carbon nanotubes: present and future commercial applications. *science*, 339(6119), 535-539. DOI: [10.1126/science.1222453](https://doi.org/10.1126/science.1222453)
- Elimelech, M. and Phillip, W.A. (2011). The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment. *science*, 333(6043), 712-717. DOI: [10.1126/science.1200488](https://doi.org/10.1126/science.1200488)
- Elishakoff, I., Dujat, K., Muscolino, G., Bucas, S., Natsuki, T., Wang, C.M., Pentaras, D., Versaci, C., Storch, J., Challamel, N. and Zhang, Y. (2013). *Carbon nanotubes and nanosensors: vibration, buckling and ballistic impact*. John Wiley & Sons. 450 pp.
- Fox, R.W., McDonald, A.T. and Mitchell, J.W. (2020). *Introduction to fluid mechanics*. John Wiley & Sons. 612 pp.
- Hou, Y., Wang, M., Chen, X. and Hou, X. (2021). Continuous water-water hydrogen bonding network across the rim of carbon nanotubes facilitating water transport for desalination. *Nano Res.* 14, 2171-2178. DOI: [10.1007/s12274-020-3173-2](https://doi.org/10.1007/s12274-020-3173-2)
- Huray, P.G. (2011). *Maxwell's equations*. John Wiley & Sons. 310 pp.
- Karniadakis, G., Beskok, A. and Aluru, N. (2006). *Microflows and nanoflows: fundamentals and simulation*. Springer Science & Business Media. 824 pp.
- Kim, S.J., Ko, S.H., Kang, K.H. and Han, J. (2010). Direct seawater desalination by ion concentration polarization. *Nat. Nanotechnol.*, 5(4), 297-301. DOI: [10.1038/nnano.2010.34](https://doi.org/10.1038/nnano.2010.34)
- Leng, J., Ying, T., Guo, Z., Zhang, Y., Chang, T., Guo, W. and Gao, H. (2022). Thermally induced continuous water flow in long nanotube channels. *Carbon*, 191, 175-182. DOI: [10.1016/j.carbon.2022.01.049](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.01.049)
- Lim, Y.J., Goh, K., Kurihara, M. and Wang, R. (2021). Seawater desalination by reverse osmosis: Current development and future challenges in membrane fabrication—A review. *Journal of Membrane Science*. 629, 119292. DOI: [10.1016/j.memsci.2021.119292](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119292)
- Liu, X., Wang, M., Zhang, S. and Pan, B. (2013). Application potential of carbon nanotubes in water treatment: a review. *Journal of*

- Environmental Sciences. 25(7), 1263-1280. DOI: [10.1016/S1001-0742\(12\)60161-2](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60161-2)
- Luo, Y. and Roux, B. (2010). Simulation of osmotic pressure in concentrated aqueous salt solutions. *J. Phys. Chem. Lett.*, 1(1), 183-189. DOI: [10.1021/jz900079w](https://doi.org/10.1021/jz900079w)
- Lyon, D. and Hubler, A. (2013). Gap size dependence of the dielectric strength in nano vacuum gaps. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 20(4), 1467-1471. DOI: [10.1109/TDEI.2013.6571470](https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6571470)
- Mann, D.J. and Halls, M.D. (2003). Water alignment and proton conduction inside carbon nanotubes. *Phys. Rev. Lett.*, 90(19), 195503. DOI: [10.1103/PhysRevLett.90.195503](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.195503)
- Mayo, S.L., Olafson, B.D. and Goddard, W.A. (1990). DREIDING: a generic force field for molecular simulations. *J. Phys. Chem.*, 94(26), 8897-8909. DOI: [10.1021/j100389a010](https://doi.org/10.1021/j100389a010)
- Mehta, N.A. and Levin, D.A. (2019). Electrospray molecular dynamics simulations using an octree-based Coulomb interaction method. *Phys. Rev. E*, 99(3), 033302. DOI: [10.1103/PhysRevE.99.033302](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.99.033302)
- Oyarzua, E., Walther, J.H. and Zambrano, H.A. (2023). Water flow in graphene nanochannels driven by imposed thermal gradients: the role of flexural phonons. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 25(6), 5073-5081. DOI: [10.1039/D2CP04093J](https://doi.org/10.1039/D2CP04093J)
- Plimpton, S. (1995). Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics. *J. Comput. Phys.*, 117(1), 1-19. DOI: [10.1006/jcph.1995.1039](https://doi.org/10.1006/jcph.1995.1039)
- Sahebi, M. and Azimian, A.R. (2022). Nanoscale fluid pumping using a symmetric temperature gradient: a molecular dynamics study. *Nanoscale Microscale Thermophys. Eng.*, 26(2-3), 84-94. DOI: [10.1080/15567265.2022.2070561](https://doi.org/10.1080/15567265.2022.2070561)
- Sam, A., Prasad, V. and Sathian, S.P. (2019). Water flow in carbon nanotubes: the role of tube chirality. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 21(12), 6566-6573. DOI: [10.1039/C9CP00429G](https://doi.org/10.1039/C9CP00429G)
- Shannon, M.A., Bohn, P.W., Elimelech, M., Georgiadis, J.G., Marinas, B.J. and Mayes, A.M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. Nanoscience and technology: *Nature*, 452(7185), 301-310. DOI: [10.1038/nature06599](https://doi.org/10.1038/nature06599)
- Subramani, A. and Jacangelo, J.G. (2015). Emerging desalination technologies for water treatment: a critical review. *Water Res.*, 75, 164-187. DOI: [10.1016/j.watres.2015.02.032](https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.032)
- Tersoff, J. (1988). New empirical approach for the structure and energy of covalent systems. *Phys. Rev. B* 37(12), 6991. DOI: [10.1103/PhysRevB.37.6991](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.37.6991)
- Thomas, M. and Corry, B. (2015). Thermostat choice significantly influences water flow rates in molecular dynamics studies of carbon nanotubes. *Microfluid. Nanofluidics*, 18(1), 41-47. DOI: [10.1007/s10404-014-1406-y](https://doi.org/10.1007/s10404-014-1406-y)
- Wang, X., Ramirez-Hinestrosa, S., Dobnikar, J. and Frenkel, D. (2020). The Lennard-Jones potential: when (not) to use it. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 22(19), 10624-10633. DOI: [10.1039/C9CP05445F](https://doi.org/10.1039/C9CP05445F)
- Yang, H.Y., Han, Z.J., Yu, S.F., Pey, K.L., Ostrikov, K. and Karnik, R. (2013). Carbon nanotube membranes with ultrahigh specific adsorption capacity for water desalination and purification. *Nat. Commun.*, 4(1), 1-8. DOI: [10.1038/ncomms3220](https://doi.org/10.1038/ncomms3220)
- Zhao, K. and Wu, H. (2015). Fast water thermopumping flow across nanotube membranes for desalination, *Nano Lett.*, 15(6), 3664-3668. DOI: [10.1021/nl504236g](https://doi.org/10.1021/nl504236g)



Environment and Water Engineering

Homepage: www.jewe.ir



ISSN: 2476-3683

Research Paper

Effect of Different Levels of Irrigation Water and Vermicompost on Yield and Water Productivity of Quinoa Crop in Dehgolan Plain, Iran

Diba Sheykhi Sanandaji¹, Gholamreza Heydari², Parviz Fathi^{3*}, Habib Khodaverdiloo⁴ and Zahed Sharifi⁵

¹PhD Scholar, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

²Assoc. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

³Assoc. Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

⁴Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

⁵Assoc. Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

Article information

Received: February 06, 2023

Revised: March 06, 2023

Accepted: March 06, 2023

Keywords:

Drip Irrigation
Harvest Index
Organic Fertilizer
Water Use Efficiency

*Corresponding author:

p.fathi@uok.ac.ir



Abstract

In this study, at the University of Kurdistan's Dehgolan research field, we systematically examined the impact of varied vermicompost and irrigation levels on Quinoa yield and water efficiency in 2022. The experiment followed a split-plot design in a randomized complete block structure. Irrigation levels ranged from 50% to 125%, and vermicompost rates varied from 0 to 15 tons/ha. A drip-tape irrigation system was employed, with water quantities measured using a volumetric meter. The highest seed yield (2375 kg/ha) occurred at 125% water requirement with 15 tons/ha vermicompost, while the greatest biological yield (5560 kg/ha) resulted from 100% water requirement and 15 tons/ha vermicompost. The treatment with 50% water requirement demonstrated superior water consumption productivity and use efficiency. Applying 15 tons/ha vermicompost significantly improved water use efficiency. Notably, the highest quinoa harvest index emerged at 125% of crop water requirement. These findings highlight the potential benefits of optimizing irrigation and vermicompost levels for enhanced Quinoa yield and water use efficiency in agroecosystems.

How to cite this paper: Sheykhi Sanandaji, D., Heydari, G., Fathi, P., Khodaverdiloo, H. and Sharifi, Z. (2024). Effect of different levels of irrigation water and vermicompost on yield and water productivity of quinoa crop in Dehgolan Plain, Iran. *Environ. Water Eng.*, 10(1), 37-48. <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.384881.1843> [In Persian]



© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) is a crop classified within the Chenopodiaceae subfamily of the Amaranthaceae family. Indigenous to the Andes region spanning Bolivia, Peru, and Chile, this ancient crop boasts a history exceeding 5000 years. Characterized by roots with extensive penetration capabilities and wide, alternate leaves giving rise to diverse inflorescences, quinoa plants exhibit variable heights ranging from 20 to 300 cm. The duration of their growth phase spans 95 to 125 days contingent upon cultivar selection and prevailing climatic conditions. In the context of contemporary challenges, burgeoning population dynamics and diminishing water resources, particularly in arid and semi-arid regions, have introduced complexities associated with water allocation across various consumption sectors. As the largest consumer of water, the agricultural sector contends with escalating demands from the industrial and urban domains. Strategic alterations to crop patterns, emphasizing the adoption of crops with lower water requirements, present a viable avenue for mitigating water consumption within the agricultural sector. Vermicompost, a composite of vermi (earthworms) and compost (organic fertilizer), is derived through the collaborative activity of earthworms and microorganisms (bacteria, fungi, and actinomycetes). This process unfolds during a non-thermal and aerobic decomposition of industrial, urban, and agricultural waste. Vermicompost serves to enhance the physical, chemical, and biological attributes of soil, mitigating adverse effects associated with water stress and consequently fostering crop growth. This research endeavors to systematically explore the influence of varied irrigation water levels and vermicompost application on crop water productivity within the Dehgolan Plain, situated in the Kurdistan province of Iran.

Material and Methods

In 2021, this study was conducted at the research farm of Kurdistan University situated in the Dehgolan Plain. The geographic area experiences an average annual rainfall of 350 mm, with average annual maximum and minimum temperatures of 23 and 6.6 degrees, respectively. Soil samples were procured from diverse depths of the field before quinoa seed sowing and

subjected to comprehensive physical and chemical analyses.

Employing a split-plot design within a completely randomized block configuration, the primary and secondary experimental factors encompassed four levels of irrigation water (50%, 75%, 100%, and 125% of water requirement) and four vermicompost levels (0, 5, 10, and 15 tons per hectare), each replicated thrice. Sub-plot dimensions were standardized at 3 x 4 meters, with a spacing of 0.5 and 1 meter between main and secondary plots, respectively, to mitigate marginal effects.

Utilizing a drip-tape irrigation system, the vermicompost was meticulously weighed and incorporated into the field soil before quinoa planting. Irrigation tapes were spaced at 50 cm intervals within each plot. Irrigation water quantities were accurately measured using a volumetric meter on the main pipe, where the main, water supply, and irrigation tape diameters were set at 56, 32, and 15 mm, respectively. The irrigation interval was consistent at 7 days, and the soil moisture balance method determined the depth of irrigation water.

Upon conclusion of the growing season, comprehensive assessments were made, encompassing grain yield, biological yield, harvest index, water productivity, and water use efficiency. These parameters were systematically evaluated to provide insights into the impact of varied irrigation and vermicompost levels on quinoa cultivation in the specified agricultural setting.

Results

Table 1 reveals statistically significant effects of irrigation and vermicompost fertilizer levels on seed yield, biological yield, water productivity, and irrigation water use efficiency, with a significance level of 1%. Additionally, irrigation levels demonstrated a statistically significant impact on the harvest index at the 5% probability level. The interaction between irrigation levels and vermicompost fertilizer exerted a significant effect on seed yield and biological yield at the 1% probability level, specifically when the irrigation depth was set at 75% of the crop water requirement.

Table 1 Analysis of Variance Results for the Impact of Irrigation Levels and Vermicompost Fertilizer on Grain Yield, Biological Yield, Water Productivity, Irrigation Water Efficiency, and Harvest Index.

ANOVA	Df	Seed yield (kg/ha)	Biological yield (kg/ha)	Water Productivity (kg/m ³)	Irrigation Water Use Efficiency (kg/m ³)	Harvest Index (%)
Replication	2	8924.86 ^{ns}	206634.36 ^{ns}	0.0025 ^{ns}	0.0025 ^{ns}	11.24 ^{ns}
Irrigation (I)	3	301995.32 ^{**}	1643836.52 ^{**}	0.03 ^{**}	0.02927 ^{**}	29.05 [*]
Error I	6	9602.69	58546.68	0.001	0.0013	11.09
Vermicompost (V)	3	223492.28 ^{**}	1046225.31 ^{**}	0.035 ^{**}	0.0357 ^{**}	11.14
I × V	9	20561.08 [*]	129455.31 ^{**}	0.002 ^{ns}	0.0017 ^{ns}	33.42 ^{ns}
Error 2	24	7954.74	24170.77	24166.8	0.0018	8.35
CV%		5.41	3.85	9.34	9.32	7.07

ns: non-significant, *: significant at $P \leq 0.05$, **: significant at $P \leq 0.01$, respectively

Figure 1 illustrates that the disparity in harvest index between I2 and I3 irrigation treatments (equivalent to 75% and 100% of water requirement) did not exhibit statistical significance. However, the treatment with a 50% water requirement yielded the lowest harvest index, while the highest harvest index was observed in the irrigation treatment set at 125% of the water requirement for quinoa.

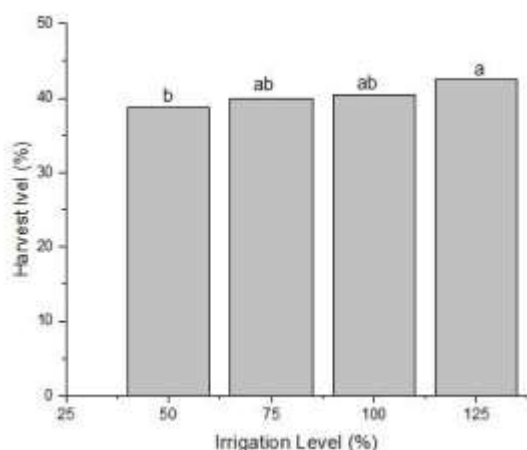


Fig. 1 Average Comparison of the Effect of Different Irrigation Levels on Harvest Index.

Results indicate that the optimal conditions for seed yield (2357.5 kg/ha) and biological yield (5415.9 kg/ha) were achieved with an irrigation water depth equal to 100% of the crop water requirement and a vermicompost fertilizer rate of 15 tons/ha. Furthermore, the highest water productivity (0.53 kg/m³) and water use

efficiency (0.53 kg/m³) were attained at varying irrigation water levels. These findings contribute valuable insights into the intricate interplay between irrigation practices, vermicompost application, and their collective impact on quinoa productivity metrics.

Conclusions

The findings from this study reveal that the optimal conditions for maximizing seed yield (2374.5 kg/ha) and biological yield (5415.9 kg/ha) were achieved through the application of a 100% crop water requirement and vermicompost fertilizer at a rate of 15 tons/ha. In light of these results, it is recommended that, for lands situated in the Dehgolan plain of Kurdistan province, Iran, the judicious utilization of irrigation water depth set at 100% of the water requirement, coupled with vermicompost fertilizer at the rate of 15 tons/ha, is conducive to achieving a commendable yield (2132 kg/ha) and concurrently ensuring high water consumption productivity (0.53 kg/ha). These findings offer practical insights into agronomic strategies tailored to optimize productivity and resource utilization in the specified agricultural context.

Data Availability

The data used in this research can be sent by the corresponding author via email.

Conflicts of interest

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



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir

مقاله پژوهشی

اثر سطوح مختلف آب آبیاری و ورمی کمپوست بر عملکرد و بهره‌وری آب گیاه کینوا در دشت دهگلان

دیا شیخی سندنجدی^۱، غلامرضا حیدری^۲، پرویز فتحی^{۳*}، حبیب خداوردیلو^۴ و زاهد شریفی^۵

^۱ دانشجوی دکتری، گروه ژنتیک و تولید گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

^۲ دانشیار، گروه ژنتیک و تولید گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

^۳ دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

^۴ استاد، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۵ دانشیار، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ دریافت: [۱۴۰۱/۱۱/۱۷]
تاریخ بازنگری: [۱۴۰۱/۱۲/۱۵]
تاریخ پذیرش: [۱۴۰۱/۱۲/۱۵]

واژه‌های کلیدی:

آبیاری قطره‌ای
شاخص برداشت
کارایی مصرف آب
کود آلی

آزمایشی با هدف بررسی اثر سطوح مختلف آبیاری و کود ورمی کمپوست بر عملکرد و میزان بهره‌وری آب آبیاری محصول کینوا انجام شد. این آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سال ۱۴۰۰ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه کردستان واقع در شهرستان دهگلان انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل چهار سطح آبیاری شامل ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵٪، نیاز آبی گیاه کینوا و متغیر فرعی شامل چهار سطح کود ورمی کمپوست صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ ton/h بود. روش آبیاری مورد استفاده در این آزمایش‌ها از نوع سامانه آبیاری قطره‌ای-نواری بود. میزان آب آبیاری توسط یک کنتور حجمی تعبیه شده بر روی لوله اصلی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد بالاترین عملکرد دانه کینوا معادل ۲۳۷۵ kg/ha در تیمار ۱۲۵٪ نیاز آبی و ۱۵ ton/ha ورمی کمپوست، عملکرد بیولوژیک ۵۵۶۰ kg/ha در تیمار ۱۰۰٪ نیاز آبی و ۱۵ ton/ha ورمی کمپوست مشاهده شد. بیش‌ترین مقادیر بهره‌وری آب مصرفی و کارایی مصرف آب در تیمار ۵۰٪ نیاز آبی بود. همچنین کاربرد ۱۵ ton/ha ورمی کمپوست موجب افزایش معنی‌دار بهره‌وری آب مصرفی و کارایی مصرف آب در مقایسه با تیمار شاهد شد. بالاترین شاخص برداشت کینوا در تیمار ۱۲۵٪ نیاز آبی گیاه به دست آمد. این یافته‌ها مزایای بالقوه بهینه‌سازی سطوح آبیاری و ورمی کمپوست را برای افزایش عملکرد کینوا و راندمان مصرف آب در اکوسیستم‌های کشاورزی نشان می‌دهد.

*نویسنده مسئول:

p.fathi@uok.ac.ir



نحوه استناد به این مقاله:

شیخی سندنجدی، دیا، حیدری، غلامرضا، فتحی، پرویز، خداوردیلو، و شریفی، زاهد. (۱۴۰۳). اثر سطوح مختلف آب آبیاری و ورمی-کمپوست بر عملکرد و بهره‌وری آب گیاه کینوا در دشت دهگلان. محیط زیست و مهندسی آب، 10(1)، 48-37

<https://doi.org/10.22034/ewe.2023.384881.1843>



۱- مقدمه

کینوا گیاهی با نام علمی *Chenopodium quinoa Willd*، از زیرخانواده *Chenopodiaceae* و خانواده *Amaranthaceae* می‌باشد. این گیاه، بومی منطقه آند در بولیوی، پرو و شیلی است که قدمت آن به بیش از ۵۰۰۰ سال می‌رسد (Hemalatha et al. 2018). این گیاه دارای ریشه‌هایی با نفوذپذیری عمیق، برگ‌های پهن و متناوب با گل‌آذین متنوع می‌باشد. ارتفاع بوته کینوا از ۲۰ تا ۳۰۰ cm متفاوت بوده و طول دوره رشد آن بسته به رقم و شرایط آب و هوایی محل رشد از ۹۵ تا ۱۲۵ روز متفاوت است (Rathore and Kumar 2021).

افزایش جمعیت و کاهش کمیت و کیفیت منابع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک سبب شده است تا پیچیدگی مسائل مرتبط با تأمین آب بخش‌های مختلف مصرف، دوچندان اهمیت یابند. بخش کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب، در رقابت با تقاضای رو به رشد بخش‌های صنعتی و شهری قرار دارد. مدیریت تلفات تبخیر یکی از مؤلفه‌های اصلی در مدیریت آب مصرفی کشاورزی است. به‌کارگیری سامانه‌های آبیاری با کارایی بالا نظیر سامانه آبیاری قطره‌ای یکی از راهکارهای مؤثر جهت افزایش بهره‌وری آب و صرفه‌جویی در مصرف آب در بخش کشاورزی به شمار می‌رود. اصلاح الگوی کشت به‌ویژه استفاده از محصولات جایگزین کم-مصرف در الگوی کشت از دیگر راهکارهای مؤثر جهت کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی است (Afshar et al. 2020). کودهای شیمیایی رایج‌ترین نوع کودهای مصرفی در اراضی کشاورزی می‌باشند. مصرف بی‌رویه این کودها باعث ایجاد مخاطرات زیست‌محیطی ازجمله آلودگی آب‌های سطحی، زیرزمینی و تالاب‌ها، آلودگی و کاهش کیفیت خاک، کاهش میزان ماده آلی خاک و ورود عناصر سمی این کودها (نظیر نیترات) به زنجیره غذایی انسان می‌شود. به‌خاطر همین مشکلات، توصیه شده است که کودهای آلی جایگزین کودهای شیمیایی شود (Adekiya and Agbede 2017).

استفاده از کودهای آلی علاوه بر مزایای اقتصادی و حفاظت از محیط‌زیست، باعث حفظ و استفاده پایدار از منابع آب و خاک نیز می‌شود. ورمی کمپوست، متشکل از ورمی (کرم‌های خاکی) و کمپوست (کود آلی) که از فعالیت کرم‌های خاکی به همراه

ریزجاندارانی نظیر باکتری‌ها، قارچ‌ها و اکتینومیست‌ها روی پسماندهای صنعتی، شهری و کشاورزی در طی یک فرآیند غیرحرارتی و هوازی حاصل می‌شود. ورمی کمپوست به‌طور مستقیم با داشتن عناصر پرمصرف و کم‌مصرف ضروری مورد نیاز گیاه و همچنین فاکتورهای رشد ازجمله ویتامین‌ها، اسیدهای آمینه و هورمون‌ها و غیرمستقیم با افزایش فعالیت فراوانی ریز جانداران خاک و همچنین با افزایش و بهبود ساختمان خاک سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک و تعدیل اثرات منفی ناشی از تنش خشکی و به‌تبع آن سبب افزایش رشد گیاه می‌شود (Jabeen and Ahmad 2019; Rezvani et al. 2021). در پژوهشی اثر کاربرد ۲۰ ton/h ورمی کمپوست و دور آبیاری با سه سطح ۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ mm از تشتک تبخیر مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج نشان داد کاربرد ورمی کمپوست باعث افزایش قدرت جذب و نگهداری رطوبت خاک خصوصاً در تیمارهای تنش، افزایش عناصر غذایی سبب بهبود مراحل نمو گیاه شده و افزایش عملکرد دانه کینوا را به همراه دارد (Mohkami et al. 2021). نتایج پژوهش Praveen et al. (2018) در مورد اثر روش‌های آبیاری قطره‌ای و سطحی بر مؤلفه‌های رشد، اجزای عملکرد، عملکرد و بهره‌وری اقتصادی محصول کینوا (*Chenopodium quinoa Willd*) در منطقه حیدرآباد کشور هند را بررسی و گزارش نمودند، در شرایط تنش آبی متوسط، میزان مؤلفه‌های رشدی نظیر ارتفاع بوته و تعداد شاخه و صفات عملکردی نظیر طول خوشه اصلی و تعداد خوشه در بوته محصول کینوا در سامانه آبیاری قطره‌ای به‌طور معنی‌داری بیشتر از سامانه آبیاری سطحی (تیمار شاهد) بود.

در پژوهش دیگری اثر کم‌آبیاری و کاربرد ورمی کمپوست بر کشت مخلوط گیاه کینوا و نخود توسط Hirich et al. (2014) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تأمین مواد آلی در شرایط کم‌آبیاری می‌تواند راه حلی عملی برای جبران اثر منفی تنش کم‌آبی باشد. بیشترین عملکرد دانه ۳/۳ ton/ha برای کینوا و ۶/۵ ton/ha برای نخود تحت آبیاری کامل و کاربرد ۱۰ ton/ha ورمی کمپوست گزارش شد. نتایج مطالعه‌ی فوق‌الذکر نشان داد که کاربرد ورمی کمپوست به مقادیر ۵ و ۱۰ ton/ha به‌طور معنی‌داری به ترتیب باعث

آب آبیاری و کود ورمی کمپوست مورد نیاز جهت حصول بهره وری آب بالاتر محصول کینوا تحت سیستم آبیاری قطره‌ای در شهرستان دهگلان بود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در سال زراعی ۱۴۰۰، در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه کردستان واقع در دشت دهگلان انجام شد. مزرعه مذکور با مختصات جغرافیایی 35° و 18° شمالی و 47° و 18° شرقی و ارتفاع ۱۸۶۶ m از سطح دریا در ۴۱ km شرق سنندج واقع شده است. میانگین بارندگی سالیانه این منطقه برابر ۳۵۰ mm و میانگین سالانه دمای حداکثر و حداقل به ترتیب ۲۳ و $6/6^{\circ}\text{C}$ می‌باشد (Saeedi et al. 2022).

۲-۲- مشخصات آب و خاک مزرعه

ویژگی‌های خاک، ورمی کمپوست و آب آبیاری مورد استفاده در این پژوهش به ترتیب در جدول‌های (۱) و (۲) آورده شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی خاک مزرعه و ورمی کمپوست مورد استفاده در این پژوهش

Table 1 Physicochemical properties of field soil and vermicompost used in this research

Properties	Unit	Soil depth		Vermicompost
		(0-30 cm)	30-60 cm	
Texture	-	clay loam	clay	-
Sand	%	42.84	27.55	-
Clay	%	41.28	32.24	-
Silt	%	15.88	40.21	-
Field Capacity	%	34	34	-
Electrical Conductivity	dS/m	0.49	0.52	1.12
Acidity	-	7.62	7.83	7.95
Nitrogen	%	0.08	0.05	0.9
Available Potassium	mg/kg	320	309	1.52
Available Iron	mg/kg	2/2	2.4	0.55
Available Phosphorus	mg/kg	13.5	15.5	0.76
Organic Carbon	%	0.76	0.74	16.99
Lime	%	0.98	1.16	-

۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵٪ آبی گیاه محصول کینوا و فاکتور فرعی شامل ۴ سطح کود ورمی کمپوست F_1, F_2, F_3 و F_4 به ترتیب برابر صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ ton/ha بود. طول و عرض کرت‌های فرعی طرح به ترتیب برابر با ۴ و ۳ m بود. رقم کینوا مورد

افزایش ۱۱ و ۱۸٪ عملکرد دانه در مقایسه با تیمار عدم کاربرد کود در شرایط تنش کم‌آبی و آبیاری کامل برای گیاه کینوا شد (Hirich et al. 2014). Rathore and Kumar (2021) اثر سطوح مختلف ورمی کمپوست بر عملکرد و اجزای عملکرد محصول کینوا در کشور هند مورد بررسی قرار دادند و گزارش کردند که کاربرد ۵ ton/ha ورمی کمپوست باعث افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته، عملکرد دانه، اجزای عملکرد، کیفیت دانه در مقایسه با تیمار شاهد (عدم کاربرد کود ورمی-کمپوست) گردید. نتایج تحقیق Soltanzadeh et al. (2021) تأثیر کودهای شیمیایی و سطوح مختلف ورمی کمپوست بر برخی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه کینوا را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که اثر ورمی کمپوست بر صفات مورفولوژیکی مانند ارتفاع بوته، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه، وزن هزار دانه و شاخص برداشت معنی‌دار شد.

پژوهش‌های کمی در رابطه با میزان نیاز آبی و کودی کینوا انجام شده است. لذا، این پژوهش با هدف تعیین مقدار بهینه

۲-۳- طرح آزمایش‌ها

این پژوهش به صورت کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتور اصلی طرح شامل ۴ سطح آبیاری I_1, I_2, I_3 و I_4 به ترتیب معادل

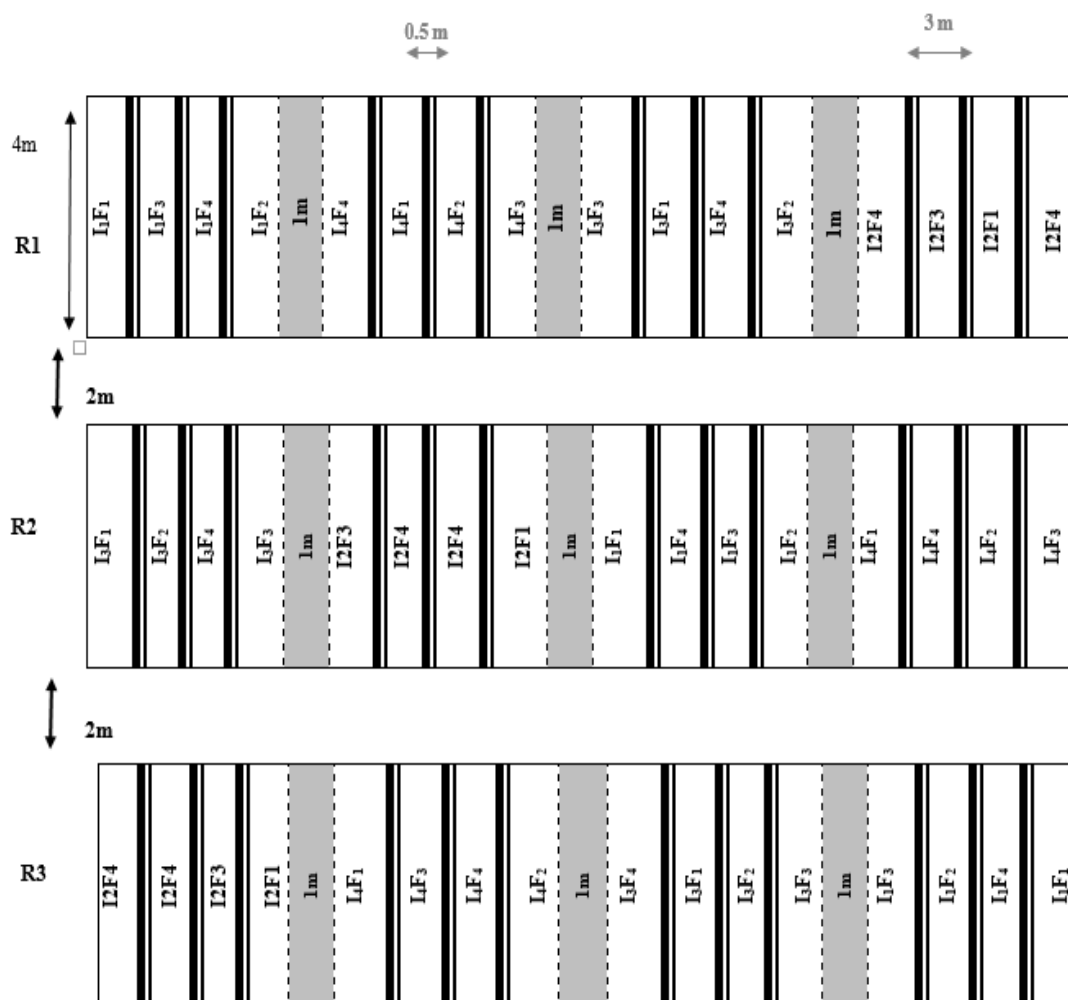
گرفت. در شکل (۱) شمایی از طرح آزمایشی و نحوه قرارگیری تیمارها و تکرارهای آن در مزرعه آورده شده است.

جدول ۲- برخی ویژگی‌های کیفی آب آبیاری

Table 2 Some quality characteristics of irrigation water

Properties	unit	Value
Electrical conductivity	dSm ⁻¹	0.35
Acidity	-	7.50
Total soluble salts	meq/lit	298.75
Sodium absorption ratio	meq/lit	0.756
Sodium	meq/lit	0.52
Calcium	meq/lit	2.80
Magnesium	meq/lit	1.20
Sulphate	meq/lit	0.09
Chlorine	meq/lit	0.50
Carbonate	meq/lit	0.00
Bicarbonate	meq/lit	5.23

کشت در این پژوهش، رقم زودرس تیتی کاکا (Titicaca) تهیه شده در مرکز تحقیقات بذر جهاد کشاورزی استان کردستان بود. این رقم سازگار با کشت در مناطق کوهستانی می‌باشد (Alvar-Beltran et al. 2019). در این پژوهش، ابتدا زمین محل آزمایش‌ها به وسیله گاواهن برگردان‌دار تا عمق ۳۰ cm شخم زده شد. پیش از کاشت بذر، برای خرد کردن کلوخه‌ها و تسطیح زمین از دیسک و ماله استفاده شد. پس از شخم و پیاده‌سازی نقشه کرت‌های آزمایشی، میزان ورمی کمپوست محاسبه شده برای هر کرت، توزین و به وسیله تیلر دستی تا عمق ۳۰ cm با خاک مزرعه مخلوط شد. در هر کرت فرعی، ۶ ردیف کشت با فاصله ۵۰ cm از همدیگر کشت شد. کشت بذر کینوا در اوایل تیرماه و به صورت دستی صورت



شکل ۱- شمایی از طرح آزمایشی و قرارگیری تیمارها و تکرارهای آن

Fig 1 Schematic of the experimental design and locations of treatments and its replications

جدول ۳- عمق آب آبیاری مؤثر و عمق آب مصرفی در انتهای فصل رشد کینوا

Table 3 Depth of effective irrigation water and depth of consumed water at the end of the Quinoa growing season

Treatment	Irrigation water (mm)	Deep Percolation (%)	Water consumed (mm)
I ₁ F ₁	220	11	209
I ₁ F ₂	216	20	196
I ₁ F ₃	209	16	193
I ₁ F ₄	198	8	190
I ₂ F ₁	317	22	295
I ₂ F ₂	313	17	296
I ₂ F ₃	300	15	285
I ₂ F ₄	292	10	282
I ₃ F ₁	417	35	382
I ₃ F ₂	408	27	381
I ₃ F ₃	403	25	378
I ₃ F ₄	401	28	373
I ₄ F ₁	518	42	476
I ₄ F ₂	512	35	477
I ₄ F ₃	506	33	473
I ₄ F ₄	491	26	465

۴-۲- مشخصات سامانه آبیاری

روش آبیاری مورد استفاده در این پژوهش از نوع سامانه آبیاری قطره‌ای-نواری بود. ضخامت نوارهای مورد استفاده ۱۷۵ میکرون، فاصله سوراخ‌های آبد ۲۰ cm، فشار کارکرد برابر ۰/۷ bar و آبدهی برابر ۴ l/hr بود. فاصله نوارهای آبیاری در هر کرت برابر ۵۰ cm بود. میزان آب آبیاری به وسیله یک کنتور حجمی تعبیه شده روی لوله اصلی اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، برای کنترل و تنظیم میزان آب آبیاری ورودی به هر کرت، شیرهای قطع و وصل در ابتدای لوله لاترال نصب شد. قطر لوله اصلی، آب‌رسان و نوارهای آبیاری به ترتیب برابر ۵۶، ۳۲ و ۵۰ mm در نظر گرفته شد. برای تعیین عمق آب آبیاری از روش بیلان رطوبتی خاک استفاده شد. برای اندازه‌گیری نیاز آبی گیاه و عمق آب آبیاری، یک روز پیش از هر آبیاری، پایش رطوبت ناحیه توسعه ریشه در کرت شاهد عمق آب آبیاری برابر ۱۰۰٪ نیاز آبی و بدون کاربرد ورمی-کمپوست به روش وزنی صورت پذیرفت. عمق آب آبیاری از رابطه (۱) محاسبه شد (Xu et al. 2016).

$$I_g = R_{eff} + (\theta_{fc} - \theta_f) \times D_r / \eta \quad (1)$$

که، I_g ، عمق ناخالص آبیاری در هر بار آبیاری بر حسب (mm)، R_{eff} : بارندگی مؤثر در حد دو فاصل آبیاری بر حسب (mm)، θ_{fc} : رطوبت حجمی خاک در حد ظرفیت زراعی بر حسب (%)، θ_f : رطوبت حجمی خاک قبل از آبیاری بر حسب (%)، D_r : عمق توسعه ریشه بر حسب (mm) و η راندمان سامانه آبیاری قطره‌ای (سطحی و زیرسطحی) که برابر ۹۰٪ در نظر گرفته شد. درصد حجمی رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی نیز در مزرعه و با احداث کرتی به مساحت ۱ m² اندازه‌گیری شد (Daillo and Marico 2013). در این پژوهش عمق آب آبیاری مؤثر ناحیه ریشه گیاه از طریق کسر مقدار تلفات نفوذ عمقی از عمق ناخالص آب آبیاری محاسبه گردید. میزان بارندگی مؤثر نیز از روش اداره حفاظت خاک آمریکا به‌دست آمد. مقادیر عمق آب آبیاری، نفوذ عمقی و عمق آب آبیاری مؤثر در تیمارهای مختلف در جدول (۳) نمایش داده شده است.

۴-۲- نمونه‌برداری و اندازه‌گیری متغیرها

در این پژوهش مقدار عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه در انتهای فصل رشد اندازه‌گیری شد. برای این منظور، پس از حذف اثرات حاشیه‌ای هر کرت، اندام هوایی گیاه برداشت شد. برای محاسبه میزان کارایی مصرف آب آبیاری ($IWUE^1$)، بهره‌وری آب و شاخص برداشت که عبارت است از نسبت جزء قابل فروش (دانه) به کل وزن خشک (عملکرد بیولوژیک)، به ترتیب از روابط (۲) تا (۴) استفاده شد (Xu et al. 2016).

$$IWUE = Y / I_w \quad (2)$$

$$wp = \frac{Y}{P_e + i_{we}} \quad (3)$$

$$HI = \frac{GY}{BY} \quad (4)$$

که، $IWUE$: کارایی مصرف آب آبیاری بر حسب kg/m³، Y : عملکرد بر حسب kg/ha، Wp : بهره‌وری مصرف آب بر حسب kg/m³، Y : عملکرد بر حسب kg/ha، P_e : بارندگی مؤثر بر حسب mm³/ha، i_e : میزان آب آبیاری مؤثر فصل رشد بر حسب mm³/ha، HI : عبارت است از نسبت عملکرد اقتصادی (عملکرد

¹Water Use Efficiency Irrigation

برداشت در جدول (۴) نشان داده شده است. نتایج مندرج در جدول (۴) نشان می‌دهد که اثر سطوح آبیاری و اثر سطوح کود ورمی کمپوست بر عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک شاخص بهره‌وری آب مصرفی و کارایی مصرف آب آبیاری، در سطح یک درصد معنی‌دار بوده است. همچنین سطوح آبیاری بر شاخص برداشت در سطح پنج درصد اثر معنی‌داری داشت. اثر متقابل سطوح آبیاری و کود ورمی کمپوست نیز بر عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک در سطح یک درصد معنی‌دار می‌باشد.

دانه، GY) بر عملکرد بیولوژیک (وزن خشک کل، BY) بر حسب kg/ha (Xu et al. 2016).

۲-۶- تحلیل داده‌ها

تحلیل داده‌های به‌دست آمده به‌وسیله نرم‌افزار SAS9.1 انجام شد. برای مقایسه میانگین تیمارها از آزمون ^۱LSD استفاده شد. همچنین رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام شد.

۳- یافته‌ها و بحث

نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر عملکرد دانه و بیولوژیک، بهره‌وری آب مصرفی، کارایی مصرف آب و شاخص

جدول ۴- تحلیل واریانس اثر سطوح آبیاری و کود ورمی کمپوست بر عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص بهره‌وری آب مصرفی، کارایی مصرف آب آبیاری و شاخص برداشت

Table 4 Variance analysis of the effect of irrigation levels and vermicompost fertilizer on grain yield, biological yield, water efficiency index, irrigation water efficiency and harvest index

ANOVA	df	Seed Yield (kg/ha)	Biological Yield (kg/ha)	Water Productivity (kg/m ³)	Irrigation Water Use Efficiency (kg/m ³)	Harvest Index (%)
Replication	2	8924.86 ^{ns}	206634.36 ^{ns}	0.0025 ^{ns}	0.0025 ^{ns}	11.24 ^{ns}
Irrigation (I)	3	301995.32**	1643836.52**	0.03**	0.02927**	29.05*
Error 1	6	9602.69	58546.68	0.001	0.0013	11.09
Vermicompost (V)	3	223492.28**	1046225.31**	0.035**	0.0357**	11.14
I × V	9	20561.08*	129455.31**	0.002 ^{ns}	0.0017 ^{ns}	33.42 ^{ns}
Error 2	24	7954.74	24170.77	24166.8	0.0018	8.35
CV%		5.41	3.85	9.34	9.32	7.07

ns غیر معنی‌دار، * و ** به ترتیب معنی‌دار سطح احتمال ۵ و ۱ درصد می‌باشند.

ns: non-significant, *: significant at $P \leq 0.05$, **: significant at $P \leq 0.01$, respectively

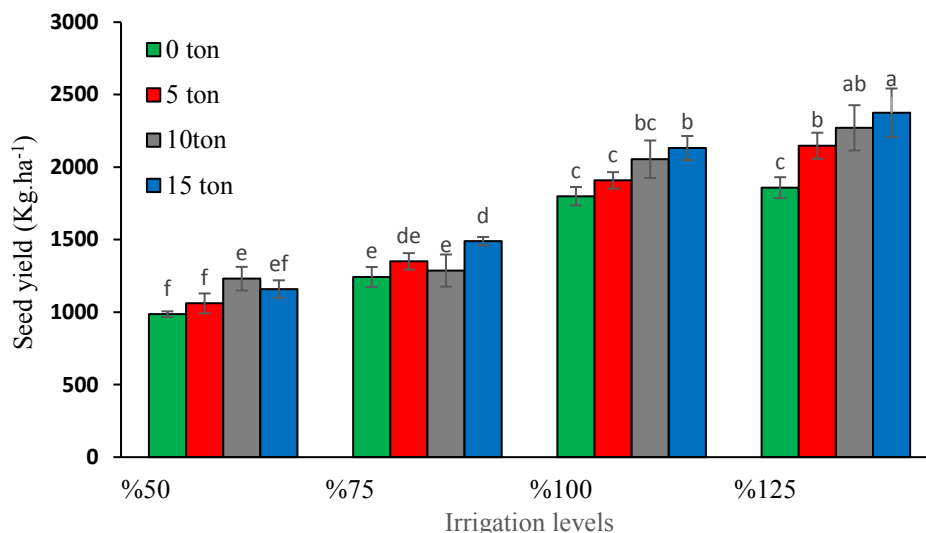
Soltanzadeh et al. این نتیجه می‌تواند به دلیل جذب

بهتر مواد معدنی به دلیل وجود رطوبت کافی در خاک و انتقال بهتر ترکیبات بهبود دهنده فتوسنتز از خاک به گیاه و در نتیجه رشد رویشی بهتر به‌ویژه در مراحل پر شدن دانه باشد (Praveen et al. 2018). از سوی دیگر کود ورمی کمپوست دارای میزان بالایی از مواد غذایی مورد نیاز گیاه می‌باشد که این امر نیز باعث بهبود قابلیت دسترسی گیاه به مواد غذایی در سطوح بالاتر آبیاری و به‌تبع آن سبب افزایش عملکرد دانه کینوا شود (Alvar-Beltran et al. 2019).

۳-۱- عملکرد دانه

نتایج مقایسه میانگین مربوط به اثر متقابل سطوح مختلف آب آبیاری و ورمی کمپوست بر عملکرد دانه در شکل (۳) نشان داده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش سطوح آبیاری و کود ورمی کمپوست عملکرد دانه افزایش می‌یابد. بررسی داده‌های حاصل از آزمایش حاکی از برتری تیمار ۱۲۵٪ نیاز آبی گیاه و ۱۵ ton/ha ورمی کمپوست با عملکردی برابر با kg/ha ۲۳۷۵ بود. کمترین عملکرد دانه نیز در تیمار ۵۰٪ نیاز آبی گیاه و بدون کاربرد ورمی کمپوست kg/ha ۹۵۹ به دست آمد. نتایج حاصل از تحقیق حاضر همسو با تحقیقات (2021)

¹Least Significant Difference



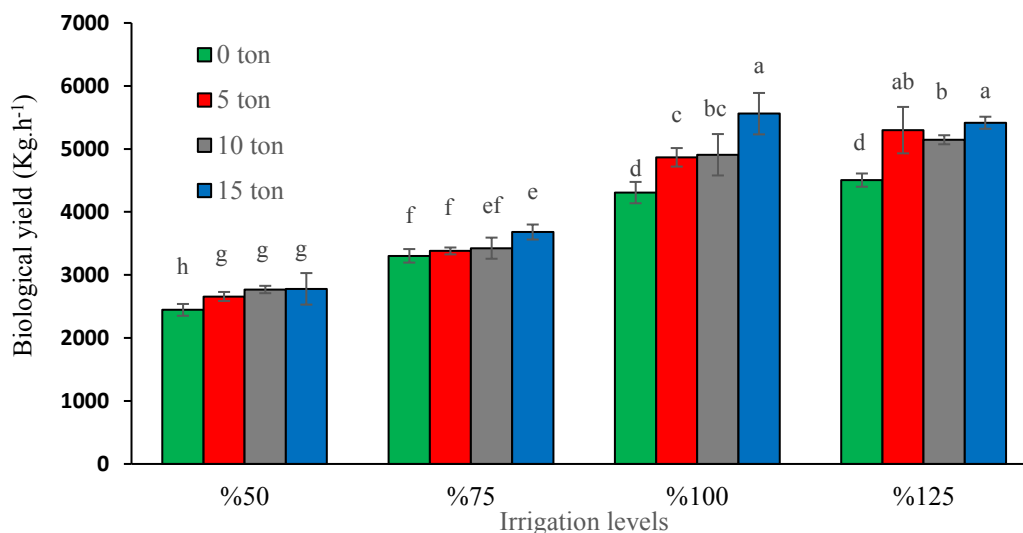
شکل ۳- نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل تیمارها بر عملکرد دانه کینوا

Fig. 3 Results of mean comparison related to the interaction of treatments on the Quinoa seed yield

افزایش عملکرد بیولوژیک ناشی از کاربرد کود ورمی کمپوست در تیمارهای دارای تنش آبی نشان دهنده این امر می باشد که در شرایط کم آبیاری، وجود ماده آلی قابل توجه در خاک تا حدود اثرات ناشی از تنش آبی را خنثی می نماید. زیرا مواد آلی، ظرفیت نگهداری آب در خاک را بهبود می بخشد و دسترسی به آب و مواد مغذی برای گیاه را افزایش می دهد (Wesseling et al. 2019). لذا کاربرد میزان مناسب کود آلی در شرایط کم آبیاری می تواند راهکاری مؤثر در جهت حصول عملکرد و بهره وری بالاتر در شرایط کم آبیاری و محدودیت آب باشد.

۳-۲- عملکرد بیولوژیک

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف آب آبیاری و ورمی کمپوست بر عملکرد بیولوژیک کینوا نشان داد، بیشترین عملکرد بیولوژیک کینوا در تیمار ترکیبی ۱۵ ton/ha ورمی کمپوست و ۱۰۰٪ نیاز آبی حاصل شد (شکل ۴). این نتیجه همسو با نتایج پژوهشی در خصوص افزایش قابل توجه تولید عملکرد بیولوژیک با افزایش میزان کود ورمی کمپوست کاربردی در سطوح آبیاری کامل معادل ۱۰۰٪ نیاز آبی گیاه و تنش آبی ۵۰٪ نیاز آبی گیاه می باشد (Hirich et al. 2014).



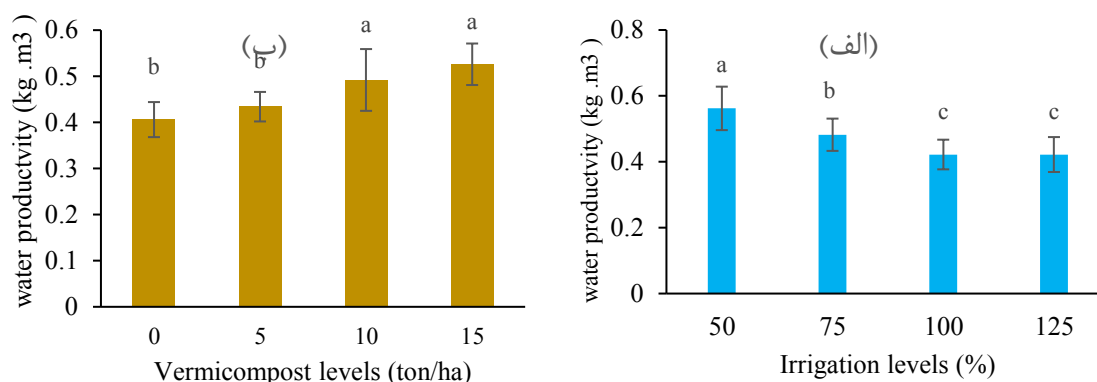
شکل ۴- نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل تیمارها بر عملکرد بیولوژیک کینوا

Fig. 4 Results of mean comparison related to the interaction of treatments on the Quinoa biological yield

۳-۳- بهره‌وری آب مصرفی

شکل (۵-الف) بیانگر این مطلب است که با کاهش عمق آب آبیاری، میزان بهره‌وری محصول کینوا افزایش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که اختلاف معنی‌دار بین اثر تیمارهای آبیاری ۵۰ و ۷۵٪ نیاز آبی بر بهره‌وری آب محصول کینوا وجود دارد. حال آنکه اختلاف بین تیمارهای آبیاری ۱۰۰ و ۱۲۵٪ نیاز آبی معنی‌دار نیست. این یافته در هماهنگی با نتایج به دست آمده توسط Topak et al. (2016) می‌باشد. این پژوهشگران گزارش نمودند با افزایش عمق آب آبیاری، میزان بهره‌وری آب محصول کینوا افزایش یافت. کاهش رطوبت موجود در خاک باعث کاهش هدایت روزنه برگ‌ها می‌شود این مسئله نشان می‌دهد که بهبود شاخص بهره‌وری مصرف آب ناشی از بسته شدن روزنه برگ می‌باشد (Pantani et al. 2017).

مشاهده شکل (۵-ب) این نکته را بیان می‌کند که با افزایش میزان کود ورمی کمپوست میزان بهره‌وری آب آبیاری افزایش می‌یابد. به بیانی دیگر افزایش کارایی مصرف آب با تأمین نیاز غذایی و کودی گیاه افزایش می‌یابد. این نتیجه می‌تواند ناشی از بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک توسط ورمی کمپوست و به تبع آن افزایش کمی و کیفی ویژگی‌های رشدی گیاه باشد. چرا که با بهبود کیفیت خاک و وضعیت تغذیه‌ای گیاه میزان رشد و ریشه‌دوانی گیاه در خاک بیشتر شده و گیاه به حجم بیشتری از خاک برای تأمین آب خود دسترسی دارد. از طرفی با افزایش حجم اندام فتوسنتز کننده گیاه و افزایش طول دوره رشد آن میزان بهره‌وری آب را افزایش می‌دهد (Khosravi Shakib et al. 2019).

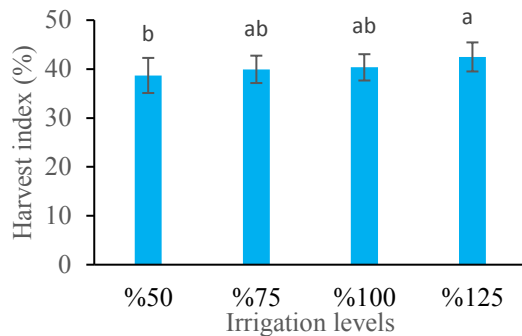


شکل ۵- مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف: الف- سطوح آبیاری و ب- ورمی کمپوست بر شاخص بهره‌وری آب مصرفی
Fig. 5 The result of the comparison of the average effect of different levels of: a) irrigation and b) vormicompost levels on the water productivity efficiency index

۳-۴- شاخص کارایی مصرف آب

نتایج مقایسه میانگین اثر مستقل کاربرد ورمی کمپوست و سطوح مختلف آبیاری بر شاخص کارایی مصرف آب در شکل (۶) ارائه شده است. با کاهش عمق آب آبیاری و افزایش کود ورمی کمپوست مصرفی، میزان کارایی مصرف آب آبیاری افزایش یافت. نتایج سایر پژوهش‌ها نیز نشان می‌دهد که کم آبیاری سبب بهبود شاخص کارایی مصرف آب محصول کینوا خواهد شد. میزان میانگین کارایی مصرف آب برای محصول کینوا رقم تی‌تی‌کاکا برابر 0.53 kg/m^3 آب آبیاری گزارش شده است (Alvar-Beltran et al. 2019). کم آبیاری تنظیم شده، باعث افزایش کارایی مصرف آب گیاه شده اما در کاهش میزان عملکرد محصول اثر کمی دارد. افزایش کارایی مصرف

آب از طریق تنظیم دقیق بازشدگی روزنه‌های برگ صورت می‌گیرد، زیرا گیاهان روزنه‌های خود را برای جذب دی اکسیدکربن باز می‌کنند و در همان زمان آب از دست می‌دهند در نتیجه، تولید زیست‌توده ممکن است کاهش یابد، زیرا تبادل گاز به دلیل بسته شدن روزنه باعث صرفه‌جویی در آب می‌شود (Pantani et al. 2017). کاربرد ورمی کمپوست، هدایت هیدرولیکی خاک، رطوبت در نقطه پژمردگی دائم و ظرفیت زراعی خاک را بهبود داده و باعث افزایش معنی‌دار گنجایش رطوبتی و رطوبت در دسترس خاک می‌گردد. بدین ترتیب گیاه می‌تواند آب بیشتری جذب نموده و عملکرد و کارایی مصرف آب بالاتری را به دست دهد (Mirzaei and Ghamarnia 2017).



شکل ۷- نتایج مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف سطوح آبیاری بر شاخص برداشت

Fig. 9 Comparison results of the average effect of different levels of irrigation levels on harvest index

نتایج پژوهش‌های Tabiei et al. (2022) در مورد بررسی اثر آبیاری و مدیریت تغذیه بر عملکرد و اجزای عملکرد کینوا نیز نشان داد که شاخص برداشت تحت تأثیر تیمار آبیاری قرار نگرفت اما کاربرد سطوح مختلف کود ورمی کمپوست موجب افزایش شاخص برداشت شد که این نتیجه مغایر با نتیجه حاصل از آزمایش حاضر می‌باشد.

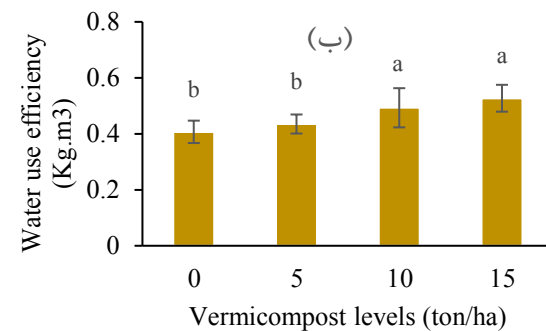
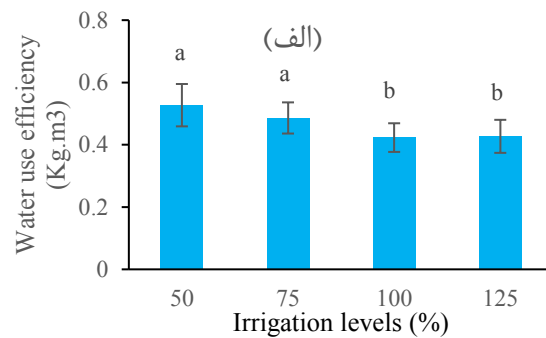
۴- نتیجه‌گیری

۱- حداکثر عملکرد دانه $2357/5 \text{ kg/h}$ و عملکرد بیولوژیک $5415/9 \text{ kg/h}$ در تیمار با عمق آب آبیاری ۱۰۰٪ نیاز آبی گیاه و کود ورمی کمپوست به میزان 15 ton/ha به دست آمد.

۲- بیش‌ترین بهره‌وری آب مصرفی 563 kg/m^2 و کارایی مصرف آب 527 kg/m^2 در سطوح کم آبیاری (۵۰ و ۷۵٪ نیاز آبی گیاه) مشاهده شد. حداکثر شاخص برداشت $41/64\%$ و حداقل مقدار آن $38/69\%$ در تیمار با عمق آب آبیاری برابر $125/125\%$ نیاز آبی حاصل گردید.

۳- اعمال عمق آب آبیاری برابر ۱۰۰٪ نیاز آبی و کود ورمی-کمپوست به میزان 15 ton/h منجر به حصول عملکرد قابل قبول (2132 kg/h) و بهره‌وری آب مصرفی بالا (kg/m^2) $0/53$ گردید.

براساس نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان که کشت و کار گیاه کینوا با سطوح آبیاری و کودی مورد آزمایش به کشاورزان سطح استان توصیه گردد.



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف: الف- سطوح آبیاری و ب- ورمی کمپوست بر شاخص کارایی مصرف آب

Fig. 7 The results of comparing the average effect of different levels of: a) irrigation and b) vormicompost levels on the water use efficiency index

۳-۵- شاخص برداشت

بالاترین شاخص برداشت $41/64\%$ در تیمار آبیاری $125/125\%$ نیاز آبی گیاه بود (شکل ۷). همچنین میزان شاخص برداشت در تیمارهای آبیاری ۷۵ و $100/100\%$ نیاز آبی اختلاف معنی‌دار نداشتند. صفت شاخص برداشت نشان دهنده چگونگی توزیع مواد پرورده بین اندام‌های رویشی و دانه گیاه می‌باشد، بنابراین هر عاملی که میزان این توزیع را تغییر دهد، باعث تغییر در شاخص برداشت می‌شود. این روند در نهایت موجب می‌شود که وزن کل بوته نسبت به وزن دانه رشد بیشتر دارد و موجب کاهش شاخص برداشت شود (Djaman and Irmak 2012). نتایج پژوهش Fazeli et al. (2022) نیز نشان داد به دلیل رابطه مستقیم شاخص برداشت با عملکرد اقتصادی و رابطه معکوس آن با عملکرد بیولوژیک، با افزایش عمق آب آبیاری، مقدار شاخص برداشت افزایش پیدا نمود که دلیل آن بیشتر بودن اثر افزایش عمق آب آبیاری بر عملکرد دانه در مقایسه با عملکرد بیولوژیک و اندام‌های هوایی بود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که، هیچ‌گونه تضاد منافع‌ی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های این پژوهش، حسب درخواست، از طریق ایمیل نویسنده مسئول مقاله قابل ارسال می‌باشد.

References

- Adekiya, A. O., & Agbede, T. M. (2017). Effect of methods and time of poultry manure application on soil and leaf nutrient concentrations, growth and fruit yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill). *J. Saudi Soc. Agric. Sci.*, 16, 383-388. DOI: [10.9755/EJFA.V21I1.5154](https://doi.org/10.9755/EJFA.V21I1.5154)
- Afshar, H., Sharifan, H., Ghahraman, B., & Bannayan, M. (2020). Investigation of wheat water productivity in drip irrigation (tape) (Case study of Mashhad and Torbat Heydariyeh). *Iran. J. Irrig. Drain.*, 14(1), 39-48. DOI: [20.1001.1.20087942.1399.14.1.4.7](https://doi.org/20.1001.1.20087942.1399.14.1.4.7) [In Persian]
- Alvar-Beltran, J., Saturnin, C., Dao, A., Marta, A. D., Sanou, J., & Orlandini, S. (2019). Effect of drought and nitrogen fertilisation on quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under field conditions in Burkina Faso. *Ital. J. Agrometeorol.*, 1, 33-43. DOI: [10.13128/ijam-289](https://doi.org/10.13128/ijam-289)
- Daillo, D., & Marico, A. (2013). Field capacity (FC) and permanent wilty point (PWP) of clay soils developed on quaternary alluvium in niger river loop (Mali). *Int. J. Eng. Res. Ind. Appl.*, 3(1), 1085-1089. DOI: [17998579](https://doi.org/17998579)
- Djaman, K., & Irmak, S. (2012). Soil water extraction patterns and crop, irrigation, and vapor transpiration water use efficiency of maize under full and limited irrigation and rain fed settings. *Trans J ASABE.*, 55(2), 1223-1238. DOI: [10.13031/2013.42262](https://doi.org/10.13031/2013.42262)
- Fazeli, F., Akbari, G. A., Akbari, G. A., & Naderi Arefi, A. (2022). Investigation of the effect of irrigation management on morphological traits, yield and yield components of different genotypes of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Environ. Stress. Crop Sci.*, 15(2), 327-334. DOI: [10.22077/escs.2020.3743.1905](https://doi.org/10.22077/escs.2020.3743.1905) [In Persian]
- Hemalatha, P., Bomzan, D. P., Sathyendra Rao, B.V., & Sreerama, Y. N. (2018). Distribution of phenolic antioxidants in whole and milled fractions of quinoa and their inhibitory effects on a-amylase and aglucosidase activities. *Food Chem.*, 199, 330-338. DOI: [10.1016/j.foodchem.2015.12.025](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.025)
- Hirich, A., Choukr-Allah, R., & Jacobsen, S. E. (2014). Deficit irrigation and organic compost improve growth and yield of quinoa and pea. *J. Agron. Crop Sci.*, 200(14), 0931-2250. DOI: [10.1111/jac.12073](https://doi.org/10.1111/jac.12073)
- Jabeen, N., & Ahmad, R. (2019). Growth response and nitrogen metabolism of sunflower (*Helianthus annuus* L.) to vermicompost and biogas slurry under salinity stress. *J. Plant Nutr.*, 40(1), 104-114. DOI: [10.1080/01904167.2016.1201495](https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1201495)
- Khosravi Shakib, A., Rezaei Najad, A., Khandan Mirkohi, A., & Kalate Jari, S. (2019). Vermicompost and Manure Compost Reduce Water – Deficit Stress in Pot Marigold (*Calendula officinalis* L. cv. Candyman Orange). *Compost Sci Util.*, 27(1), 61-68. DOI: [10.1080/1065657X.2019.1602489](https://doi.org/10.1080/1065657X.2019.1602489)
- Mirzaei, H., & Ghamarnia, H. (2017). The concurrent effect of Vermicompost and unconventional water on soil physical properties. *Water Irrig. Manag.*, 7(2), 197-210. DOI: [10.22059/JWIM.2017.239662.555](https://doi.org/10.22059/JWIM.2017.239662.555) [In Persian]
- Mohkami, A., Yazdanpanah, N., & Said nejad, (2021). A The effect of vermicompost and biochar application on morphophysiological characteristics of quinoa under drought stress conditions. *Iran. J. Soil Water Res.*, 53(1), 129-140. DOI: [10.22059/ijswr.2021.329540.669058](https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.329540.669058) [In Persian]
- Pantani, C., La Rosa, S., Pellegrino, A., Sortino, O., & Saita, A. (2017). Water productivity and yield response factor in two cultivars of processing tomato as affected by deficit irrigation under semi-arid climate conditions. *Acta Hort.*, 1038, 449-454. DOI: [10.17660/ActaHortic.2014.1038.55](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1038.55)

- Praveen Kadam, V., Suneetha Devi, K. B., Hussain, S. A., & Uma Devi, M. (2018). Growth, yield attributes, yield and economics of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) as influenced by variable irrigation water supply through drip and surface methods. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.*, 7, 2319-7706. [10.20546/ijcmas.2018.707.398](https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.707.398)
- Rathore, Sh., & Kumar, R. (2021). Vermicompost fertilization and pinching improves the growth, yield, and quality of super food (*Chenopodium quinoa* Willd.) in the western Himalaya. *Acta Physiol. Plant.*, 43(2), 234-251. DOI: [10.1007/s11738-020-03184-z](https://doi.org/10.1007/s11738-020-03184-z)
- Rezvani, H., Fazeli Khaki, F., & Khazaeian, R. (2021). The Effect of Different Levels of Vermicompost and Urea on Quantitative and Qualitative Characteristics of Sesame in Field Condition in Gorgan. *Agri. Sci. Sustain. Product.*, 31 (3), 341-356. DOI: [10.22034/SAPS.2021.41869.2550](https://doi.org/10.22034/SAPS.2021.41869.2550) [In Persian]
- Saeedi, M., Fathi, P., & Kouchakzadeh, M. (2022). Effect of irrigation water on water productivity and yield of winter wheat under surface and subsurface drip irrigation. *Environ. Water Eng.*, 8(1), 192-204 [In Persian]. DOI: [10.22034/jewe.2021.292016.1587](https://doi.org/10.22034/jewe.2021.292016.1587)
- Soltanzadeh, A., Ghanbari, A., Seyedabadi, E., & Dahmardeh, M. (2021). Effects of chemical fertilizers and vermicompost on morphological and chemical characteristics of quinoa (*chenopodium quinoa*). *J. Crop Improv.*, 24(5), 24-35. DOI: [10.22059/JCI.2021.323005.2546](https://doi.org/10.22059/JCI.2021.323005.2546) [In Persian]
- Tabiei, H., Baradan, R., Seghatoleslami, M. J., & Mousavi, S. Gh. (2022). Effect of Irrigation and Nutrition Management on Yield and Yield Components of Quinoa in Birjand Conditions. *Iran. J. Field Crops Res.*, 20(1), 65-80. DOI: [10.22067/jcsc.2021.69421.1036](https://doi.org/10.22067/jcsc.2021.69421.1036) [In Persian]
- Topak, R., Acar, B., Uyanöz, R., & Ceyhan, E. (2016). Performance of partial root-zone drip irrigation for sugar beet production in a semi-arid area. *Agri. Water Manag.*, 176, 180-190. DOI: [10.1016/j.agwat.2016.06.004](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.06.004)
- Wesseling, J., C. Stoof, C. Ritsema, K. Oostindie., & Dekker, L. (2019). The effect of soil texture and organic amendment on the hydrological behaviour of coarse textured soils. *Soil Use Manag.*, 25, 274-283. DOI: [10.1111/j.1475-2743.2009.00224.x](https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00224.x)
- Xu, X., He, P., Pampolino, M.F., Li, Y., Liu, S., Xie, J., Hou, Y., & Zhou, W. (2016). Narrowing yield gaps and increasing nutrient use efficiencies using the Nutrient Expert system for maize in Northeast China. *Field Crop. Res.*, 194, 75-82. DOI: [10.1016/j.fcr.2016.05.005](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.05.005)



Environment and Water Engineering

Homepage: www.jewe.ir



ISSN: 2476-3683

Research Paper

Assessing Zayandeh-Rud Coasts Pollution with Plastic Waste Based on the Clean-Coast Index

Mokarrameh Behmanesh¹, Atefeh Chamani^{2*} and Elham Chavoshi³

¹Ph.D. Scholar, Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

²Assoc. Professor, Department of Environmental Science and Engineering, Waste and Wastewater Research Center, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

³ Assoc. Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

Article information

Received: March 25, 2023

Revised: May 17, 2023

Accepted: May 17, 2023

Keywords:

Clean-Coast Index

Macroplastic

Mesoplastic

Plastic pollution

Zayandeh-Rud

*Corresponding author:

a.chamani@khuisf.ac.ir



Abstract

Plastic pollution is an important emerging environmental problem with possible impacts on biodiversity and human health. Although the majority of the scholarly attention in this field has been directed to oceans, plastic pollution has not been fully elucidated in freshwater ecosystems. Hence, this study aimed to investigate the spatial distribution and macro- and meso-characteristics of sedimentary plastic waste items along the Zayandeh-Rud River course. A number of 400 types of anthropogenic debris were collected from 21 sampling sites consisting of macroplastic 58.3% (233 items), mesoplastic 18% (72 items), and other waste 23.8% (94 items). Bags (polyethylene), food packs (mainly polypropylene and polystyrene), and bottles (polyethylene terephthalate) were the dominant plastics. The Clean-Coast index was used to determine the river's cleanliness, showing that most parts of the river are clean. The Clean-Coast Index revealed useful implications in evaluating the continuity and success of protective measures such as educational, media, and enforcement actions to reduce river pollution.

How to cite this paper: Behmanesh, M., Chamani, A. and Chavoshi, E. (2024). Assessing Zayandeh-Rud coasts pollution with plastic wastes based on clean-coast index. *Environ. Water Eng.*, 10(1), 63-78. <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.389483.1857> [In Persian]



© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Over the decades, humans have caused the pollution of beaches and waters by disposing of plastic litter in the sea and rivers. At present, plastic pollution has been identified as an emerging environmental problem that may affect human health and biodiversity in the near to medium term. Plastics enter aquatic systems from several sources such as sanitary sewage overflows, coastal tourism, inadequate waste disposal and management, industrial activities, construction, and illegal dumping, and cause harmful ecological effects on living organisms at all trophic levels. Plastics are classified according to size into macroplastics (diameter larger than 2.50 cm), mesoplastics (diameter: 2.50-0.500 cm), and microplastics (diameter smaller than 5 mm). Widespread effects of beach litter have been reported around the world. Wastes are considered important as one of the damaging factors of beaches with adverse impacts on the economy and ecosystems. Therefore, indices have been developed to measure marine debris pollution in coastal environments, such as the Clean-Coast Index. This index provides the possibility to grade the pollution of the beaches. Since there is no published study on plastic pollution in coastal sediments of Iranian rivers, this study was conducted to investigate the spatial distribution of microplastics and mesoplastics, determine the composition of plastic waste and evaluate the cleanliness of the beaches in Zayandeh-Rud River.

Material and Methods

From the upstream to the downstream of Zayandeh-Rud River, 21 stations were sampled during the summer season of 2020 based on land use, the degree of industrialization and urbanization around the river, distance and proximity to various sources of pollutants, the presence of the tourism industry, and ease of access to the river. To investigate plastic litter at each sampling station, a plot of $2 \times 2 \text{ m}^2$ was selected (the plot size was selected according to field observations and regional conditions). All visible plastic litter on the surface of each plot was collected and photographed. Finally, to classify the plastic into meso or macroplastic, the diameter of each particle was measured. Then all these particles were weighed and classified according

to the type of plastic (line, film, hard, and foam). In this study, the CCI index was used to show the cleanliness of the studied beaches. CCI for beaches was calculated according to Eq. 1. In this index, the density of plastic litter is determined based on the number per m^2 by applying a fixed value ($K=20$). According to the CCI scale, beaches are classified from "clean" to "very dirty", 0-2 is very clean, 2-5 is clean, 5-10 is fairly clean, 10-20 is dirty, and more than 20 is very dirty.

$$CCI = \frac{\sum \text{Plastic Litter}}{\text{Length(m)} \times \text{Width(m)}} \times k \quad (1)$$

Results

The average abundance of plastic litter 2.8 macroplastics and 1.4 mesoplastics (item/ m^2) collected from the beaches of Zayandeh-Rud is more than the Caribbean beaches (0.910 ± 0.500 items/ m^2), the beaches of Alicante, Spain (0.120 items/ m^2) and the Silveria coast. Brazil (2 items/ m^2) was obtained. The results of the abundance of plastic litter for all the studied stations are also considerably higher than the global average (1 item/ m^2). Based on the comparison with the studies, it can be concluded that the beaches of the Zayandeh-Rud River are considerably polluted with plastics. The evaluation of macro and mesoplastics identified in this study showed that land resources such as waste disposal and tourism in the region are essential and the main factors of plastic litter in the region. Based on the results of the mean comparison test, the highest and lowest number of macroplastics were identified in stations 13 (22 particles) and stations 4 and 18 (4 particles), respectively. The low pollution of these stations can be related to the low population density and the presence of agriculture and gardening around them. Considering that Station 13 (Bagh Bahadoran) has historical and recreational attractions, the high amount of large plastic litter in this area is not far from expected. The highest number of mesoplastics in the samples was observed at station 15 (26 particles). Station 15 is close to the residential area, which is therefore exposed to a lot of litter due to the concentration of the population. On average, 11.1 ± 6.04 macroplastics and 5.54 ± 7.30 mesoplastics were identified with an average weight of 65.8 and 0.462 grams, respectively. The highest macro and meso weight were related to station 6 (222 g) and 20 (3.06 g), respectively, and the lowest

macro (1.33 g) was related to station 21 (Shakh Kenar). On the edge of Zayandeh-Rud dam Lake (station 6), Chadegan tourist village is located, which can be attributed to the high mass of plastics in this area due to tourism activities, while the low amount of plastic litter in Shakh Kenar station can be attributed to factors such as long distance from population centers and tourism activities. The abundance of macro and mesoplastics in the region was classified into different types of film, line, hard, and foam in terms of shape (Table 1). As shown in Table 1, hard and film had higher repetition and foam had the lowest repetition. Leaving litter such as drink bottles, food packaging, bags, and disposable

containers by tourists into the water and the shores of the Zaindeh-Rud River can be the origin of the high presence of macro and mesoplastics, hard and films. Among all registered polymers, bags (polyethylene) were more than other polymers. On the other hand, bottles (PET) were the heaviest group of plastics (Table 1). Based on the CCI scale, 52.4% were classified as clean, 28.6% as very clean, and 14.3% as fairly clean, and only station 15 was placed in the dirty class. Although the abundance of plastic litter on the beaches of Zayandeh-Rud is considerably higher than the world average based on the CCI, they are not classified as dirty.

Table 2 Characteristics of found plastics on the coast of Zayandeh-Rud river based on type, number, weight and polymer

Plastic Debris	Type	Number of Items	Weight (g)	Polymer
Bags	Film	109	181	PE
Packing	Film	76	235	PP, PS
Hard Food Container	Hard	70	258	PS, PET
Foam Food Containers	Foam	7	12.5	EPS
Drink Bottles	Hard	15	419	PET
Fish Lines	Line	10	17.4	Nylon
Others	Others	18	266	PVC, SAN
Total		305	1389	8

Conclusions

Collected plastics were determined as 58.25% macroplastics and 18% as mesoplastics. The presence of plastic items, such as food packaging, bottles, and bags, indicates the predominance of household waste over industrial waste. According to the CCI index, all the beaches except station 15 were classified in the clean range. Despite the cleanness of the beaches, improving solid waste management, supporting public awareness programs, and carrying out beach cleaning

activities are necessary to prevent or reduce plastic litter pollution.

Data Availability

The data used in this research are presented in the paper.

Conflicts of interest

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



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir

مقاله پژوهشی

ارزیابی آلودگی سواحل زاینده رود به پسماندهای پلاستیکی بر اساس شاخص ساحل پاک

مکرمه بهمنش^۱، عاطفه چمنی^{۲*} و الهام چاوشی^۳

^۱ دانشجوی دکترا، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

^۲ دانشیار گروه علوم و مهندسی محیط زیست، مرکز تحقیقات پسماند و پساب، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

^۳ دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: [۱۴۰۲/۰۱/۰۵]

تاریخ بازنگری: [۱۴۰۲/۰۲/۲۷]

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۲/۰۲/۲۷]

واژه‌های کلیدی:

آلودگی پلاستیک

زاینده رود

شاخص ساحل پاک

ماکروپلاستیک

مزوپلاستیک

*نویسنده مسئول:

a.chamani@khuisf.ac.ir

آلودگی پلاستیکی یک مشکل محیط زیستی مهم در نظر گرفته می‌شود و به عنوان یک موضوع نوظهور که ممکن است تنوع زیستی و سلامت انسان را تحت تأثیر قرار دهد، شناسایی شده است. باین حال، علی‌رغم مطالعات علمی گسترده برای بررسی پلاستیک‌ها در اقیانوس‌ها، مطالعات به نسبت کمی روی سامانه‌های آب شیرین متمرکز شده‌اند. هدف از این مطالعه بررسی توزیع مکانی و ویژگی‌های ماکرو و مزوپلاستیک در رسوبات خط ساحلی رودخانه زاینده رود است. بدین منظور، در امتداد رودخانه زاینده رود در مجموع ۴۰۰ نوع زباله انسانی از ۲۱ ایستگاه نمونه برداری جمع‌آوری شد که شامل ماکروپلاستیک ۵۸/۳٪ (۲۳۳ مورد)، مزوپلاستیک ۱۸٪ (۷۲ مورد) و سایر زباله‌ها ۲۳/۸٪ (۹۴ مورد) بودند. کیسه‌ها (پلی اتیلن)، بسته بندی مواد غذایی (به طور عمده پلی پروپیلن و پلی استایرن) و بطری‌ها (پلی اتیلن ترفتالات) پلاستیک‌های غالب ثبت شده در این مطالعه بودند. برای شناسایی سطح تمیزی سواحل از شاخص ساحل پاک استفاده شد. بر اساس این شاخص، اکثر سواحل در محدوده تمیز طبقه بندی شدند. شاخص ساحل پاک ابزاری مفید برای ارزیابی میزان پیشرفت و موفقیت فعالیت‌هایی مانند اقدامات آموزشی، رسانه‌ای و اجرایی در راستای کاهش آلودگی سواحل است.

نحوه استناد به این مقاله:

بهمنش، مکرمه، چمنی، عاطفه & چاوشی، الهام. (۱۴۰۳). ارزیابی آلودگی سواحل زاینده رود به پسماندهای پلاستیکی بر اساس شاخص ساحل پاک. محیط زیست و مهندسی آب. 10 (1) 63-78 <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.389483.1857>



۱- مقدمه

طبقه‌بندی به شناسایی زباله‌های پلاستیکی و منابع آن‌ها کمک می‌کند. پلاستیک‌ها بر اساس اندازه به ماکرو پلاستیک (قطر بزرگ‌تر از ۲/۵۰ cm)، مزوپلاستیک (قطر ۵۰۰-/۰-۲/۵۰) و میکروپلاستیک (قطر کوچک‌تر از ۵ mm) طبقه‌بندی می‌شوند (Garces-Ordonez et al. 2020). با کاهش اندازه ذرات پلاستیک، اثر آن‌ها بر موجودات افزایش می‌یابد (Sun et al. 2017). بنابراین، تعیین مقدار ماکرو و مزوپلاستیک‌ها قبل از تجزیه آن‌ها از طریق شرایط محیطی مانند اشعه ماوراءبنفش، واکنش‌های شیمیایی، میکروارگانیسم‌ها و امواج، مرحله مهمی است (Guo and Wang 2019).

بیشتر پلاستیک‌های شناخته شده در رودخانه‌ها، از نظر جرم، ماکروپلاستیک‌ها هستند (Weideman et al. 2020). کاربری اراضی شهری و تراکم جمعیت، ارتباط مثبتی با غلظت پلاستیک‌های مشاهده‌شده دارد (Baldwin et al. 2016).

در مقایسه با آلاینده‌های معمولی آبی، تهدید پلاستیک‌ها پیچیده‌تر است. به جز تأثیر خود پلاستیک‌ها، آن‌ها به عنوان ناقل مهم سایر آلاینده‌ها مانند بسیاری از آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین نیز عمل می‌کنند (Munier and Bendell 2018). سمیت پلاستیک‌ها می‌تواند توسط خود پلیمرهای پلاستیک، مواد افزودنی موجود در آن‌ها یا سایر آلاینده‌های جذب‌شده روی پلاستیک‌ها ایجاد شود. جذب آلاینده‌ها روی پلاستیک‌ها یک فرایند مهم محیط‌زیستی تلقی می‌شود زیرا این امر بر تحرک و فراهمی زیستی این آلاینده‌ها تأثیر می‌گذارد (Zettler et al. 2013). هنگامی که این ذرات وارد محیط‌های آبی شده و تحت تأثیر عوامل مختلفی تخریب می‌شوند، به اشتباه به وسیله گونه‌های مختلف آبزی بلعیده می‌شوند و در نهایت می‌توانند از طریق مصرف غذاهای آبی آلوده به پلاستیک وارد بدن انسان شوند (Mishra et al. 2021). همچنین درهم‌تنیدگی گونه‌های موجود در بوم‌سازگان آبی با ماکرو پلاستیک‌ها (از جمله تورهای ماهیگیری رهاشده، طناب‌ها و زباله‌های عمومی مانند کیسه‌های پلاستیکی)، به عنوان یک مشکل جهانی شناخته می‌شود (Laist 1997).

در طول دهه‌های گذشته، انسان‌ها با دفع زباله‌های پلاستیکی در دریا و رودخانه‌ها باعث آلودگی سواحل و آب‌ها شده‌اند (Faure et al. 2015). در حال حاضر، آلودگی پلاستیکی به عنوان یک مشکل محیط‌زیستی، به یک موضوع جدی در مقیاس جهانی تبدیل شده است. آلودگی پلاستیکی در کنار تغییرات اقلیمی، به عنوان یک موضوع نوظهور، ممکن است در آینده نزدیک تا میان مدت بر سلامت انسان و تنوع زیستی تأثیر بگذارد (William et al. 2010). علی‌رغم تلاش‌های پژوهشی گسترده برای بررسی پلاستیک‌ها در اقیانوس‌ها، مطالعات کمی روی سامانه‌های آب شیرین متمرکز شده‌اند.

به طور تقریبی نیمی از جمعیت جهان در ۱۰۰ km سواحل زندگی می‌کنند. از این رو، قابلیت این گونه پلاستیک‌ها، برای ورود به سامانه‌های دریایی از طریق رودخانه‌ها و سیستم‌های فاضلاب یا بادهای وزش یافته از خشکی افزایش می‌یابد. ورود زباله‌های پلاستیکی به محیط‌های آبی، تهدیدی برای سلامت انسان و موجودات دریایی ایجاد می‌کند و باعث کاهش چشمگیر ارزش فعالیت‌های دریایی، ماهیگیری، گردشگری و خدمات اکوسیستمی می‌شود (Haberstroh et al. 2021a). برخی از مطالعات اخیر، اهمیت نسبی عواملی مانند طوفان‌ها و بارندگی‌های شدید را بر روی الگوهای انتقال پلاستیک در سامانه‌های آب شهری نشان داده‌اند (Roebroek et al. 2021).

پلاستیک‌ها از منابع متعددی مانند سرریز فاضلاب‌های بهداشتی، گردشگری ساحلی، دفع و مدیریت ناکافی زباله، فعالیت‌های صنعتی، ساخت‌وساز و تخلیه غیرقانونی وارد سامانه‌های آبی شده (Cowger et al. 2019) و باعث اثرات بوم‌شناختی مضر روی موجودات زنده در تمام سطوح تغذیه‌ای می‌شوند (Erni-Cassola et al. 2019). مطالعات انجام گرفته بر روی سامانه‌های آبی کشورهای فیلیپین (Sajorne et al. 2021)، هند (Mugilarasan et al. 2021)، قبرس (Loizia et al. 2021) و جنوب آفریقا (Weideman et al. 2020) منشأ و خطرات ناشی از حضور زباله‌های پلاستیکی در محیط‌های آب شیرین را نشان می‌دهند.

Akarsu et al. (2022) نیز میزان CCI در چهار ساحل ترکیه را بسیار کثیف ارزیابی کردند. از آنجا که مطالعه منتشر شده‌ای در خصوص آلودگی پلاستیکی در رسوبات ساحلی رودخانه‌های ایران وجود ندارد، این پژوهش با هدف بررسی توزیع مکانی ماکرو و مزوپلاستیک‌ها، تعیین ترکیب زباله‌های پلاستیکی و ارزیابی میزان تمیزی سواحل در رودخانه زاینده‌رود انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز زاینده‌رود به‌عنوان سومین حوضه پرجمعیت ایران با میزبانی نزدیک به ۴ میلیون نفر که ۵٪ از جمعیت کشور را تشکیل می‌دهد، طبقه‌بندی می‌شود (Sharifinejad et al. 2020). رودخانه زاینده‌رود با طول تقریبی ۴۵۰ km به‌عنوان مهم‌ترین جاذبه بوم‌گردی حوضه، از ارتفاعات غربی سرچشمه گرفته و از بخش میانی منطقه از جمله جنوب شهر اصفهان می‌گذرد و در شرق، به تالاب بین‌المللی گاوخونی می‌ریزد (Karimian et al. 2020).

به دلیل مجاورت با سکونتگاه‌های انسانی، انواع مختلف زباله‌های پلاستیکی ناشی از فاضلاب‌های خانگی و صنعتی، فعالیت‌های گردشگری، ماهیگیری و غیره به این رودخانه سرازیر شده و کیفیت این بوم‌سازگان را کاهش داده است.

۲-۲- نمونه‌برداری

از بالادست تا پایین‌دست رودخانه زاینده‌رود، از ۲۱ ایستگاه، بر اساس کاربری زمین، میزان صنعتی‌شدن و شهرنشینی در اطراف رودخانه، دوری و نزدیکی به منابع مختلف آلاینده‌ها، حضور صنعت گردشگری و سهولت دسترسی به رودخانه، در طول فصل تابستان ۱۴۰۰ نمونه‌برداری شد (شکل ۱). قبل از انجام نمونه‌برداری، برخی از اطلاعات سواحل مانند ویژگی‌های مورفولوژیکی و تأثیرات انسانی (به‌عنوان مثال، نوع استفاده از سواحل در فصول تابستان و زمستان)، بر اساس تفاهم‌نامه فنی NOAA مورد بررسی و در انتخاب سواحل نمونه‌برداری مورد استفاده قرار گرفت (Lippiatt et al. 2013). برای بررسی زباله‌های پلاستیکی در هر ایستگاه نمونه‌برداری، یک کرت $2 \times 2 \text{ m}^2$ باتوجه به مشاهدات میدانی و شرایط منطقه

وجود ماکروپلاستیک‌ها هم‌چنین می‌تواند باعث انسداد سامانه‌های زهکشی شهری شود (Windsor et al. 2019) که منجر به تحمیل هزینه‌های اضافی برای نگهداری و نظافت می‌شود. در شهرهایی که سیستم زهکشی و فاضلاب ترکیبی دارند، وجود پلاستیک (مانند دستمال مرطوب و پوشک بچه)، همراه با اجزای دیگر، مانند روغن و گریس، می‌تواند انسداد سامانه را تشدید کند (Okwori et al. 2020). علاوه بر این، وجود پلاستیک در رودخانه‌ها می‌تواند ارزش زیبایی‌شناختی منظره را کاهش دهد و در نتیجه بر بازدهی اقتصادی مناطق آلوده تأثیر منفی بگذارد (Gabrielides 1995). هم‌چنین، مواد سمی و فلزات سنگین جذب‌شده توسط زباله‌های پلاستیکی می‌توانند از طریق زنجیر غذایی وارد بدن انسان شوند و تأثیرات احتمالی بر سلامت داشته باشند (Holmes et al. 2014).

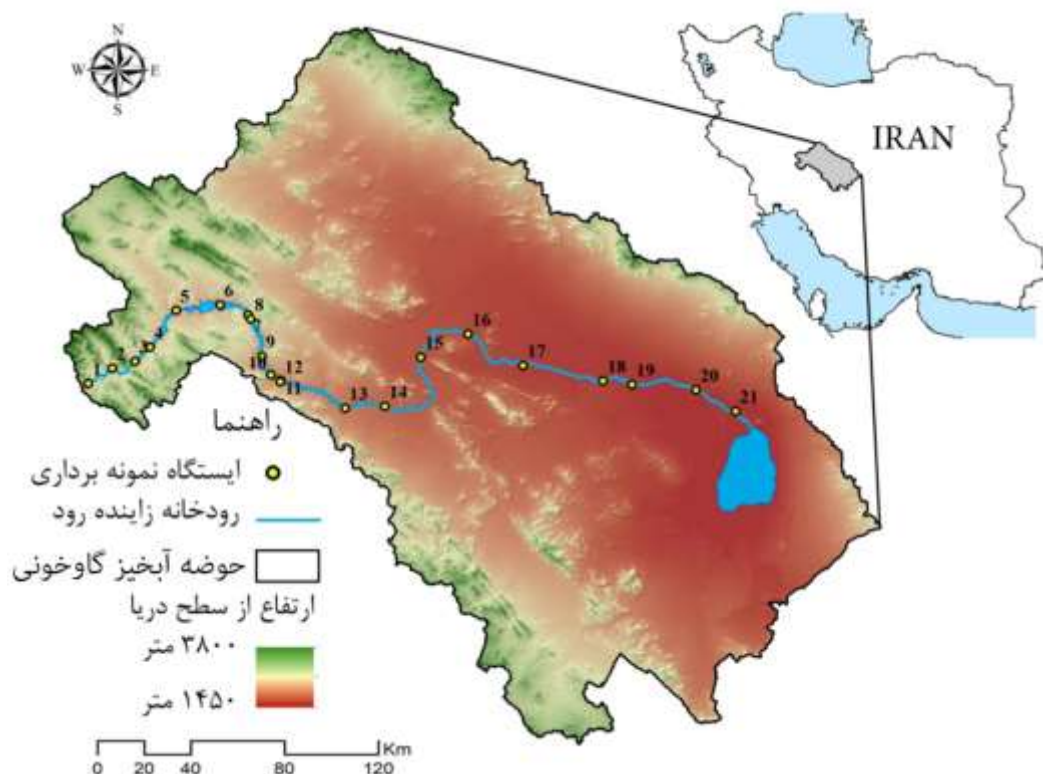
در سال ۲۰۲۰، سازمان بین‌المللی حفاظت از زیست‌بوم اقیانوس‌ها، گزارش بین‌المللی سواحل پاک را منتشر کرد و وضعیت فعلی فراوانی زباله در مناطق ساحلی ۱۱۶ کشور را نشان داد. بر اساس این گزارش، پلاستیک‌های یک‌بارمصرف در رتبه اول قرار دارند و پس از آن، بطری‌های پلاستیکی، درب بطری‌ها و کیسه‌های پلاستیکی قرار دارند (Simeonova and Chuturkova 2020). مواد پلاستیکی به‌عنوان شایع‌ترین زباله‌های سواحل یافت می‌شوند (Chen et al. 2019). از این رو، مطالعه زباله‌ها به‌عنوان یکی از عوامل مخرب سواحل با اثرات نامطلوب بر اقتصاد و بوم‌سازگان، حائز اهمیت است. بدین منظور، در دهه‌های اخیر، مطالعات مختلفی برای معرفی شاخص‌هایی به‌منظور مقایسه داده‌های کمی زباله‌ها در سواحل انجام شده‌است. برخی از این شاخص‌ها مانند شاخص ساحل پاک (CCI^۱) تنها تعداد زباله‌ها را اندازه‌گیری می‌کند و جنبه کمی آن‌ها را در نظر می‌گیرد (Rangel-Buitrago et al. 2020). از سوی دیگر، برخی از شاخص‌ها بر قابلیت خطر انواع مختلف زباله‌ها تمرکز می‌کنند و موضوع را از نظر خطر برای سواحل ارزیابی می‌کنند، مانند شاخص زباله‌های انسانی خطرناک (HALI^۲)، که توسط Rangel-Buitrago et al. (2020) استفاده شده است. این شاخص‌ها امکان درجه بندی آلودگی سواحل را فراهم می‌کنند.

²Hazardous Anthropogenic Litter Index
Environment and Water Engineering
Vol. 10, No. 1, 2024

¹Clean-Coast Index (CCI)

نوع پلاستیک به رشته، فیلم، خرده ذره و فوم، طبقه‌بندی شدند. طبقه‌بندی پلاستیک‌های یافت‌شده، مانند الگوی مورد استفاده در طبقه‌بندی میکروپلاستیک‌ها (Viršek et al. 2016)، انجام شد.

انتخاب شد. تمامی زباله‌های پلاستیکی قابل‌مشاهده در سطح هر کرت جمع‌آوری و عکس‌برداری شد. درنهایت، به‌منظور طبقه‌بندی پلاستیک به مزو یا ماکرو پلاستیک، طول هر قطعه اندازه‌گیری شد. سپس همه این ذرات وزن شده و بر اساس



شکل ۱- ایستگاه‌های نمونه‌برداری در رودخانه زاینده‌رود

Fig. 1 Sampling stations in Zayandeh-Rud River

۴-۲- آنالیزهای آماری

تمامی نمودارها و تجزیه و تحلیل داده‌ها در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزارهای IBM SPSS Statistics 26 و Excel 2013 انجام شد. باتوجه به ماهیت داده‌ها، برای بررسی نرمال بودن از آزمون شاپیرو-ویلک^۱، برای بررسی همگنی واریانس از آزمون لوین^۲ و برای مقایسه میانگین بین ایستگاه‌ها از آزمون ولش^۳ استفاده شد.

۳- یافته‌ها و بحث

باتوجه به شرایط اولیه و شرایط مرزی، حل عددی به‌صورت غیردائمی شروع شده و تا زمان رسیدن جریان به حالت ماندگار و پایدار، ادامه پیدا می‌کند.

۳-۲- شاخص ساحل پاک

در این مطالعه از شاخص ساحل پاک برای نشان‌دادن میزان تمیزی سواحل مورد مطالعه و مقایسه با مطالعات مشابه استفاده شد. شاخص ساحل پاک برای سواحل طبق رابطه (۱) محاسبه شد (Jafari et al. 2021).

$$CCI = \frac{\sum \text{قطعات پلاستیکی}}{\text{طول}(m) \times \text{عرض}(m)} \times k \quad (1)$$

در این رابطه، K یک مقدار ثابت است که طبق بررسی منابع، ۲۰ در نظر گرفته می‌شود. بر اساس مقیاس این شاخص، طبقه‌بندی سواحل از تمیز به بسیار کثیف انجام می‌شود. ۲-۰ نشان‌دهنده بسیار تمیز، ۵-۲ تمیز، ۱۰-۵ نسبت تمیز، ۲۰-۱۰ کثیف و بیش‌تر از ۲۰ بسیار کثیف است.

³Welsh

¹Shapiro-Wilk

²Levene

۳-۱- فراوانی ماکرو و مزوپلاستیک‌ها

پلاستیک ۱۸٪ با ۷۲ مورد و سایر زباله‌ها ۲۳/۸٪ با ۹۴ مورد است. اگرچه ۷۶/۳٪ زباله‌های جمع‌آوری شده در سواحل از جنس پلاستیک است، ولی تفاوت بین نسبت اقلام جمع‌آوری شده در مقایسه با سایر مطالعات، کمتر است. در اکثر سواحل، بیش از ۸۰٪ از کل اقلام جمع‌آوری شده پلاستیکی هستند (Neto 2014).

جدول (۱) آمار توصیفی ماکرو پلاستیک‌ها و مزوپلاستیک‌های شناسایی شده رسوبات سطحی رودخانه زاینده‌رود را در تمامی ایستگاه‌ها نشان می‌دهد. در مجموع ۴۰۰ مورد از انواع زباله از ۲۱ نقطه نمونه‌برداری جمع‌آوری شد که شامل ماکرو پلاستیک ۵۸/۳٪ با ۲۳۳ مورد، مزو

جدول ۱- فراوانی ماکرو و مزوپلاستیک در رسوبات

Table 1 Abundance of macro and mesoplastic in sediments

Macroplastics				Mesoplastics		
Stations	Number	Size range (cm)	weight (g)	Number	Size range (cm)	weight (g)
1	5	53-6.30	71.5	-	-	-
2	6	48-3.10	15.2	-	-	-
3	9	38.5-4.50	48.8	1	2	0.010
4	4	32-14.4	12.9	-	-	-
5	15	59.5-3.30	129	-	-	-
6	13	32.7-3	222	-	-	-
7	21	106-3	94.4	1	0.500	2.04
8	20	44-5	112	-	-	-
9	8	98-3	38.3	1	1.80	0.001
10	11	43-3	69.14	-	-	-
11	7	11-8	24.62	12	1.50-0.500	0.012
12	10	150-3	44.77	1	0.600	0.001
13	22	41-3	184	3	2.50-2	2.51
14	19	52-3	103	4	2.50-0.500	0.029
15	18	35-3	25.5	26	2.50-0.500	0.091
16	13	44-3	40.9	2	2.50-0.800	0.013
17	12	150-3	66.1	6	2.50-0.800	0.038
18	4	20-3.50	9.47	-	-	-
19	7	31-8	54.6	12	1.90-0.500	0.042
20	5	26.5-4.50	13.2	2	2.50-2	3.06
21	4	11-6.50	1.33	1	2.50	1.85
Sum	233	-	1380	72	-	9.70
Min	4	-	1.33	1	-	0.001
Max	22	-	222	26	-	3.06
Mean	11.1	-	65.8	5.54	-	0.462
Std.Deviation	6.04	-	58.2	7.30	-	0.969

ایستگاه‌ها می‌تواند مربوط به تراکم کم جمعیت و حضور زمین‌های کشاورزی و باغداری اطراف آن‌ها باشد. باتوجه به اینکه ایستگاه ۱۳ یعنی باغ بهادران، دارای جاذبه‌های تفریحی و تاریخی است، بالابودن میزان زباله‌های پلاستیکی بزرگ در این منطقه دور از انتظار نیست. بیشترین تعداد مزو پلاستیک

بر اساس نتایج آماره و لش، اختلاف معنادار بین میانگین تعداد قطعات ماکرو و مزو پلاستیک جمع‌آوری شده بین ایستگاه‌های مختلف وجود دارد (جدول ۳). بیش‌ترین و کم‌ترین تعداد ماکرو پلاستیک به ترتیب در ایستگاه ۱۳ با ۲۲ قطعه و ایستگاه‌های ۴ و ۱۸ با ۴ قطعه شناسایی شد. آلودگی کم این

داده است که مقادیر زیادی از آلودگی پلاستیکی در مناطق پرجمعیت و مناطق با فعالیت‌های شدید انسانی ظاهر می‌شود (Horton and Dixon, 2018). میانگین فراوانی زباله‌های پلاستیکی، $2/8$ ماکرو پلاستیک و $1/4$ مزو پلاستیک (مورد در m^2) جمع‌آوری شده از سواحل زاینده‌رود از مطالعات Asensio-(2019), Scisciolo et al. (2016), Montesinos et al. (2019), Marin et al. به ترتیب از سواحل کارائیب ($0/500 \pm 0/910$ مورد در m^2)، سواحل آلیکانته اسپانیا ($0/12$ مورد در m^2) و ساحل سیلوریا برزیل (2 مورد در m^2) بیشتر است.

بر اساس نتایج آزمون شاپیرو-ویلک، داده‌ها از توزیع نرمال برخوردار نیستند ($P\text{-value} < 0/05$ ، جدول ۲). همچنین نتایج آزمون لوین نشان داد که داده‌ها همگن نیستند (جدول ۳).

جدول ۳ آزمون همگنی واریانس لوین و مقایسه میانگین ولش

	Levene Statistic	df1	df2	P-value
Size	3.003	20	284	.000
weight	3.111	20	284	.000

	Statistic	df1	df2	Sig.
Size	5.215	20	60.959	.000
Weight	2.573	20	62.892	.002

نتایج فراوانی زباله‌های پلاستیکی برای همه ایستگاه‌های مورد مطالعه نیز به‌طور قابل توجهی بیش‌تر از میانگین جهانی که یک قطعه در m^2 است، گزارش شده است (Galvani et al. 2015). بر اساس مقایسه با مطالعات مذکور می‌توان نتیجه گرفت که سواحل زاینده‌رود آلودگی قابل توجهی به پلاستیک‌ها دارد. در ایران، Sarafranz et al. (2016) فراوانی و ترکیب زباله‌های دریایی در بندرعباس را بررسی کرده و فعالیت‌های گردشگری را مسئول بیش از ۹۰٪ زباله‌های تولیدشده در منطقه مورد مطالعه اعلام کردند. این مطالعه نیز نشان داد که منابع زمینی مانند دفع زباله و گردشگری در منطقه از عوامل مهم و اصلی وجود زباله‌های پلاستیکی در منطقه است. این موضوع در مطالعه Jeyasanta et al. (2020) و Blaskovic et al. (2017) نیز تأیید شده‌است.

فراوانی ماکرو و مزو پلاستیک در منطقه از لحاظ شکل به انواع مختلف فیلم، رشته، خرده ذره و فوم طبقه‌بندی شدند (جدول

در نمونه‌ها در ایستگاه ۱۵ با ۲۶ قطعه مشاهده شد. ایستگاه ۱۵ نزدیک به منطقه مسکونی است که در نتیجه به دلیل تمرکز جمعیت، در معرض زباله‌های زیادی قرار می‌گیرد.

جدول ۲- آزمون شاپیرو-ویلک به منظور بررسی نرمالیت داده‌ها

Stations	P-value based on size	P-value based on weight
1	0.263	0.049
2	0.355	0.240
3	0.003	0.000
4	0.525	0.134
5	0.045	0.002
6	0.038	0.010
7	0.000	0.000
8	0.000	0.000
9	0.004	0.000
10	0.329	0.001
11	0.000	0.000
12	0.000	0.000
13	0.000	0.000
14	0.099	0.000
15	0.000	0.000
16	0.000	0.000
17	0.000	0.000
18	0.473	0.992
19	0.000	0.000
20	0.356	0.753
21	0.833	0.043

از نظر وزنی، g ۱۳۸۰ ماکروپلاستیک و g ۹/۷۰ مزو پلاستیک از نمونه‌های رسوب ساحلی جدا شد. به‌طور میانگین $6/04 \pm$ و $11/1$ ماکروپلاستیک و $7/30 \pm 5/54$ مزو پلاستیک به ترتیب با میانگین وزنی g ۶۵/۸ و g ۰/۴۶۲ شناسایی شد. بیشترین وزن ماکرو و مزو به ترتیب مربوط به ایستگاه ۶ با $222g$ و ۲۰ با $306g$ و کمترین ماکرو مربوط به ایستگاه ۲۱ با $133g$ بود. در حاشیه دریاچه سد زاینده‌رود، دهکده توریستی چادگان قرار دارد که می‌توان دلیل بالابودن جرم پلاستیک‌ها در این منطقه را به فعالیت‌های گردشگری نسبت داد درحالی‌که ناچیز بودن جرم زباله‌های پلاستیکی در ایستگاه شاخ کنار، نزدیک‌ترین ایستگاه به پایاب زاینده‌رود را می‌توان به عواملی مانند فاصله زیاد از مراکز جمعیتی و فعالیت‌های گردشگری نسبت داد. محدوده اندازه ذرات ماکرو و مزو شناسایی شده به ترتیب ۳-۱۵۰ و cm ۲/۵۰-۰/۵۰۰ است.

به دلیل فرآیند نمونه‌گیری متفاوت، مقایسه این آمار با سایر مطالعات دشوار است. اما مطالعات رودخانه‌ها و سواحل نشان

راستا، نمونه‌های زیادی از جنس پلی‌اتیلن (عمدتاً کیسه‌های مواد غذایی) بین رسوبات مشاهده شد (جدول ۴). منشأ بیشتر آلودگی پلاستیک در این منطقه زباله‌های جامد خانگی است. نتایج (Gasper et al. 2014) نشان دادند که بسته‌بندی مواد غذایی، ظروف و کارد و چنگال‌های پلاستیکی به‌عنوان زباله‌های شناور غالب در رودخانه سن است. از بین همه پلیمرهای ثبت شده، کیسه‌های پلاستیکی (پلی‌اتیلن) از سایر پلیمرها بیشتر بود (جدول ۴). بر خلاف این مطالعه، Morritt et al. (2014) مقدار نسبتاً کمی از کیسه‌های پلاستیکی (کمتر از ۰.۲٪) را در امتداد رودخانه تایمز گزارش کردند. آن‌ها اذعان داشتند که سیاست‌های عمومی بریتانیا مردم را تشویق می‌کند از کیسه‌های حمل سوپرمارکت استفاده نکنند که می‌تواند به توضیح این اختلاف کمک کند. تصور می‌شود مونومرهایی که برخی از کیسه‌های پلاستیکی را تشکیل می‌دهند نسبتاً بی‌ضرر هستند. باین‌حال، این مواد هنوز هم می‌توانند با جذب سایر آلاینده‌ها سمی شوند. از سوی دیگر، بطری‌های نوشیدنی (PET) سنگین‌ترین گروه پلاستیک‌ها بودند (جدول ۴). از منظر محیط‌زیستی، بطری‌ها می‌توانند باعث هجوم گونه‌هایی شوند که سطوح سخت را ترجیح می‌دهند در نتیجه می‌تواند منجر به جابه‌جایی گونه‌های بومی از زیستگاه خود شوند (Derraik, 2002).

۴. همان‌طور که در جدول (۴) نشان داده شده است خرده ذره و فیلم دارای تکرار بالاتر و فوم کمترین تکرار را داشت. رهاکردن زباله‌هایی مانند بطری‌های نوشابه، بسته‌بندی مواد غذایی، کیسه‌های پلاستیکی و ظروف یک‌بارمصرف توسط گردشگران به درون آب و سواحل رودخانه زاینده‌رود، می‌تواند منشأ حضور بالای ماکرو و مزو پلاستیک‌های خرده ذره و فیلم باشد (Behmanesh et al. 2022). PP به طور گسترده در بسته‌بندی مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد (جدول ۴). تخریب PP در اثر گرما و تابش اشعه UV و توانایی آن در جذب آلاینده‌های آلی پایدار، ممکن است باعث افزایش مشکلات محیط زیستی شود. اطلاعات کمی در مورد اثرات PP در سامانه‌های آب شیرین وجود دارد. باین‌حال، Mato et al. (2001) گزارش کردند که غلظت PCB^۱ و DDT^۲ موجود بر سطح قطعات PP یافت شده در دریا، ۱۰۰۰۰ تا ۱ میلیون برابر بیشتر از قطعات PP یافت شده در آب‌های اطراف است. Williams and Simmons (1996) علت اصلی تخریب پلیمر پلی‌اتیلن در سواحل رودخانه را تخریب نوری بیان کردند. این پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که طول عمر چنین پلاستیک‌هایی دلیل اصلی فراوانی و توزیع گسترده آن‌ها در سواحل رودخانه‌ها است. در این

جدول ۴- خصوصیات پلاستیک‌ها در سواحل رودخانه زاینده‌رود براساس نوع، تعداد، وزن و پلی‌مر

Table 4 Characteristics of plastics on the coast of Zayandeh-Rud river based on type, number, weight and polymer

Plastic debris	Type	Number of items	Weight (g)	Polymer
Bags	Film	109	181	PE
Packing	Film	76	235	PP, PS
Hard food container	Hard	70	258	PS, PET
Foam food containers	Foam	7	12.5	EPS
Drink bottles	Hard	15	419	PET
Fish lines	Line	10	17.4	Nylon
Others	Others	18	266	PVC, SAN
Total		305	1389	8

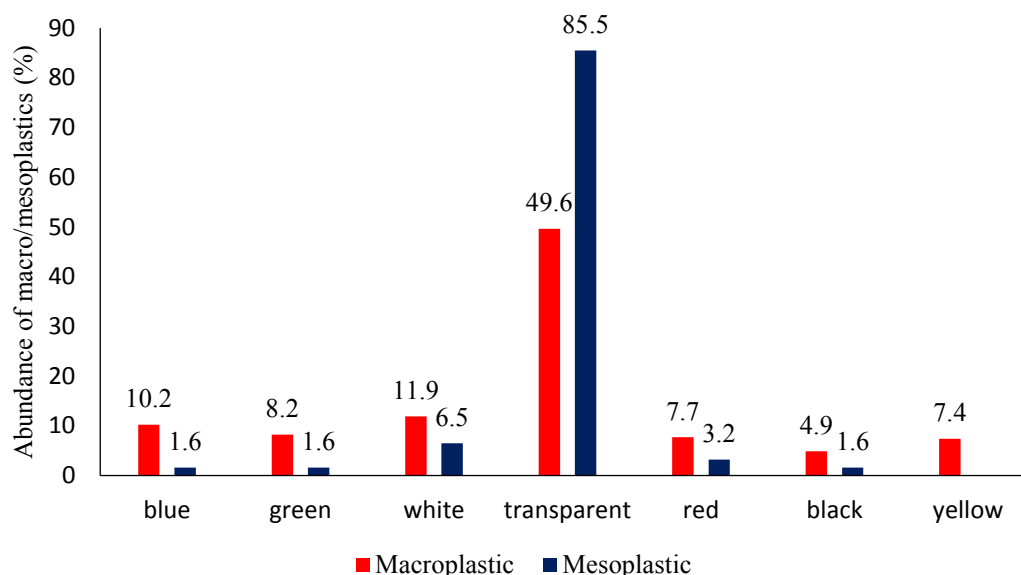
PE: پلی‌اتیلن، PP: پلی‌پروپیلن، PS: پلی‌استایرن، PET: پلی‌اتیلن ترفتالات، EPS: پلی‌استایرن منبسط شده، Nylon: پلی‌آمید خشک، PVC: پلی‌وینیل کلراید، SAN: استایرن آکریل نیتریل

قرمز و مشکی شناسایی شدند. بیشترین درصد رنگ ماکرو پلاستیک‌ها و مزو پلاستیک‌ها به ترتیب با ۴۹/۶٪ و ۸۵/۵٪ مربوط به رنگ شفاف است که با نتایج (Blettler et al. 2017) مطابقت دارد. آن‌ها گزارش دادند که بیشتر مزو

شکل (۲) فراوانی ماکرو و مزو پلاستیک را بر اساس رنگ ظاهری نشان می‌دهد. ماکرو پلاستیک‌های شناسایی شده در ۹ رنگ آبی، زرد، سبز، سفید، شفاف، قرمز، کرمی، مشکی و نارنجی و مزو پلاستیک‌ها در ۶ رنگ آبی سبز، سفید، شفاف،

فرابنفش، امواج) به وجود می آیند حضور این قطعات بزرگ پلاستیکی رنگی می تواند نگران کننده باشد. چراکه ذرات میکروپلاستیکی رنگی به راحتی توسط موجودات وابسته به بوم سازگان آبی به عنوان غذا اشتباه گرفته می شود (Arias- Andres et al. 2018).

پلاستیک های شناسایی شده در سواحل، سفید و شفاف هستند و تنوع رنگ آن ها به دلیل منشأ پلاستیک هایی است که از منابع مختلف منشأ می گیرند یا تحت تأثیر عوامل محیطی مختلف مانند هوازدگی قرار می گیرند (Blettler et al. 2017). از آنجایی که ذرات میکروپلاستیک در اثر تجزیه و قطعه قطعه شدن اقلام پلاستیکی بزرگ تر (بر اثر هوازدگی، اشعه



شکل ۲- درصد فراوانی ماکرو و مزوپلاستیک در نمونه های رسوبی منطقه مورد مطالعه بر اساس رنگ

Fig. 2 Abundance of macro and mesoplastic in the sediment samples of the study area based on color

جدول ۵- نتایج شاخص ساحل پاک برای هر ایستگاه

Table 5 Clean-coast index for each station

Stations	CCI	Classification
1	1.25	CV
2	1.50	CV
3	2.50	C
4	1	CV
5	3.75	C
6	3.25	C
7	5.50	MC
8	5	C
9	2.25	C
10	2.75	C
11	4.75	C
12	2.75	C
13	6.25	MC
14	5.75	MC
15	11	D
16	3.75	C
17	4.50	C
18	1	CV
19	4.75	C
20	1.75	CV
21	1.25	CV

very clean (VC), clean (C), moderately clean (MC), dirty (D), extremely dirty (ED)

۳-۲- نتایج شاخص CCI

مقیاس CCI در محدوده تمیز و خیلی کثیف طبقه‌بندی شدند (Sajorne et al. 2021). نتایج پژوهش‌های مختلف به شدت به روش مورد استفاده برای نمونه‌برداری وابسته است و مقایسه مطالعات را نسبتاً دشوار می‌کند (Filella 2015). در این پژوهش، سواحل بر اساس مقیاس CCI در محدوده خیلی تمیز تا نسبتاً تمیز و تنها ایستگاه ۱۵ در طبقه کثیف قرار گرفت. هر چند که فراوانی زباله‌های پلاستیکی سواحل زاینده‌رود به طور قابل توجهی بالاتر از میانگین جهانی است، ولی بر اساس شاخص ساحل پاک، در طبقه کثیف قرار نمی‌گیرند.

در این پژوهش، بر اساس مقیاس CCI، ۵۲/۴٪ سواحل تمیز، ۲۸/۶٪ سواحل بسیار تمیز و ۱۴/۳٪ سواحل نسبتاً تمیز طبقه‌بندی شد (جدول ۵). نتایج این پژوهش با مطالعات انجام‌شده در سواحل دیگر در جدول (۶) مقایسه شد. مشابه این پژوهش، سواحل مطالعات Loizi et al. (2021) و Nachite et al. (2019) به ترتیب در طبقه تمیز و خیلی تمیز قرار گرفتند. در صورتی که سواحل فیلیپین، بر اساس

جدول ۶- مقایسه میزان شاخص ساحل پاک در سواحل سایر نقاط جهان

Table 6 Comparison of the Clean-Coast Index in the beaches of other parts of the world

Area – beach name	Country	CCI	CCI description	Reference
San Manuel	Philippines	16.7	D	Sajorne et al. (2021)
San Miguel	Philippines	45.8	ED	
Bacungan	Philippines	5	C	
Inagawan	Philippines	111	ED	
El Salvador City	Philippines	2.27	C	Kalnasa et al. (2019)
Bulua	Philippines	33.3	ED	Esquinas et al. (2020)
Macabalan	Philippines	93.3	ED	
Talsari	India	14.8	D	Mugilarasan et al. (2021)
New Digha	India	32.1	ED	
Sankarpur	India	7.70	MC	
Paralimni	Cyprus	0.900-2.60	C	Loizia et al. (2021)
Centro	Brazil	12.6	D	
Meia Praia	Brazil	34.8	ED	Marin et al. (2019)
Silveria	Brazil	1	VC	
Taquarinhas	Brazil	4	C	
Vermelha	Brazil	71.8	ED	

۴- نتیجه‌گیری

۴- بر اساس شاخص CCI تمامی سواحل به جز ساحل ایستگاه ۱۵ در محدوده تمیز طبقه‌بندی شدند.

با وجود تمیز بودن سواحل زاینده‌رود، بهبود شیوه‌های مدیریت زباله جامد، حمایت از برنامه‌های افزایش آگاهی عمومی و انجام فعالیت‌های پاک‌سازی سواحل، برای جلوگیری یا کاهش آلودگی زباله‌های پلاستیکی ضروری است. مطالعات بیشتری برای توصیف کامل تأثیر آلودگی پلاستیکی در این سواحل مورد نیاز است. از این رو لازم است که شاخص زباله‌های انسانی خطرناک برای بررسی پتانسیل خطر انواع زباله‌های تجمع یافته در سواحل رودخانه زاینده‌رود محاسبه شود. همچنین با توجه به اینکه رودخانه، تغییرات درون سالانه قابل توجهی را تجربه می‌کند، بررسی‌های زمانی دقیق می‌تواند درک ما را از توزیع

در این پژوهش توزیع مکانی و ویژگی‌های ماکرو و مزو پلاستیک در رسوبات خط ساحلی رودخانه زاینده‌رود بررسی و نتایج کلی به شرح ذیل حاصل شد:

۱- ۵۸/۲۵٪ پلاستیک‌های جمع‌آوری شده به‌عنوان ماکرو پلاستیک و ۱۸٪ به‌عنوان مزو پلاستیک تعیین شدند.

۲- حضور اقلام پلاستیکی، مانند بسته‌بندی مواد غذایی، بطری‌ها و کیسه‌ها نشان‌دهنده غلبه زباله‌های خانگی بر زباله‌های صنعتی است.

۳- وجود مقادیر زیاد پلاستیک مشاهده‌شده، بوم‌سازگان رودخانه را به خطر می‌اندازد و نیازمند بهبود سیاست‌های محیط‌زیستی و راهبردهای آموزشی است.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده‌شده (یا تولیدشده) در این پژوهش در متن مقاله ارائه شده‌است.

تضاد منافع نویسندگان

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

ماکرو پلاستیک‌ها در رودخانه بهبود بخشید. اگرچه در این مطالعه از شاخص ساحل پاک برای بررسی آلودگی پلاستیکی سواحل استفاده شده است؛ ولی باتوجه به رفرنس‌های موجود، این شاخص برای همه انواع زباله‌های موجود در ساحل قابل اجرا است.

References

- Akarsu, C., Sönmez, V. Z., Altay, M. C., Pehlivan, T., & Sivri, N. (2022). The spatial and temporal changes of beach litter on Istanbul (Turkey) beaches as measured by the clean-coast index. *Mar. Pollut. Bull.*, 176, 113407. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2022.113407](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113407).
- Arias-Andres, M., Klümper, U., Rojas-Jimenez, K., & Grossart, H. P. (2018). Microplastic pollution increases gene exchange in aquatic ecosystems. *Environ. Pollut.*, 237, 253-261. DOI: [10.1016/j.envpol.2018.02.058](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.058).
- Asensio-Montesinos, F., Anfuso, G., Randerson, P., & Williams, A. (2019). Seasonal comparison of beach litter on Mediterranean coastal sites (Alicante, SE Spain). *Ocean Coast Manag.*, 181, 104914. DOI: [10.1016/j.ocecoaman.2019.104914](https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104914).
- Baldwin, A. K., Corsi, S. R., & Mason, S. A. (2016). Plastic debris in 29 Great Lakes tributaries: relations to watershed attributes and hydrology. *Environ. Sci. Technol.*, 50(19), 10377-10385. DOI: [10.1021/acs.est.6b02917](https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02917).
- Behmanesh, M., Chamani, A., & Chavoshi, E. (2022). Occurrence, Abundance and Characteristics of Microplastics in the Sediments of the Zayandeh- Rud River. *Environ. Interdisciplin. Develop.*, 7(76), 74-89. DOI: [10.22034/envj.2022.159474](https://doi.org/10.22034/envj.2022.159474) [In persian]. [10.22034/envj.2022.159474](https://doi.org/10.22034/envj.2022.159474).
- Blašković, A., Fastelli, P., Čížmek, H., Guerranti, C., & Renzi, M. (2017). Plastic litter in sediments from the Croatian marine protected area of the natural park of Telašćica bay (Adriatic Sea). *Mar. Pollut. Bull.*, 114(1), 583-586. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2016.09.018](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.09.018).
- Blettler, M., Ulla, M. A., Rabuffetti, A. P., & Garello, N. (2017). Plastic pollution in freshwater ecosystems: macro-, meso-, and microplastic debris in a floodplain lake. *Environ. Monit. Assess.*, 189(11), 1-13. DOI: [10.1007/s10661-017-6305-8](https://doi.org/10.1007/s10661-017-6305-8).
- Chen, H., Wang, S., Guo, H., Lin, H., Zhang, Y., Long, Z., & Huang, H. (2019). Study of marine debris around a tourist city in East China: Implication for waste management. *Sci. Total Environ.*, 676, 278-289. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2019.04.335](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.335).
- Cowger, W., Gray, A., Eriksen, M., Moore, C., & Thiel, M. (2019). Evaluating wastewater effluent as a source of microplastics in environmental samples. Microplastics in Water and Wastewater. London: IWA Publishing, 109-131. DOI: [10.2166/9781789061697_0109](https://doi.org/10.2166/9781789061697_0109).
- de Scisciolo, T., Mijts, E. N., Becker, T., & Eppinga, M. B. (2016). Beach debris on Aruba, Southern Caribbean: attribution to local land-based and distal marine-based sources. *Mar. Pollut. Bull.*, 106(1-2), 49-57. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2016.03.039](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.03.039).
- Derraik, J. G. (2002). The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Mar. Pollut. Bull.*, 44(9), 842-852. DOI: [10.1016/S0025326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025326X(02)00220-5).
- Erni-Cassola, G., Zadjelovic, V., Gibson, M. I., & Christie-Oleza, J. A. (2019). Distribution of plastic polymer types in the marine environment; A meta-analysis. *J. Hazard. Mater.*, 369, 691-698. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.06>.
- Esquinas, G. G. M. S., Mantala, A. P., Atilano, M. G., Apugan, R. P., & Van Ryan Kristopher, R. G. (2020). Physical characterization of litter

- and microplastic along the urban coast of Cagayan de Oro in Macajalar Bay, Philippines. *Mar. Pollut. Bull.*, 154, 111083. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2020.111083](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111083).
- Faure, F., Demars, C., Wieser, O., Kunz, M., & De Alencastro, L. F. (2015). Plastic pollution in Swiss surface waters: nature and concentrations, interaction with pollutants. *Environ. Chem.*, 12(5), 582-591. DOI: [10.1071/EN14218](https://doi.org/10.1071/EN14218).
- Gabrielides, G. (1995). Pollution of the Mediterranean sea. *Water Sci. Technol.*, 32(9-10), 1-10. DOI: [10.1016/0273-1223\(96\)00070-4](https://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00070-4).
- Galgani, F., Hanke, G., & Maes, T. (2015). Global distribution, composition and abundance of marine litter. In *Marine anthropogenic litter* (pp. 29-56): Springer, Cham. DOI: [10.1007/978-3-319-16510-3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3).
- Garcés-Ordóñez, O., Espinosa, L. F., Cardoso, R. P., Cardozo, B. B. I., & Dos Anjos, R. M. (2020). Plastic litter pollution along sandy beaches in the Caribbean and Pacific coast of Colombia. *Environ. Pollut.*, 267, 115495. DOI: [10.1016/j.envpol.2020.115495](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115495).
- Gasperi, J., Dris, R., Bonin, T., Rocher, V., & Tassin, B. (2014). Assessment of floating plastic debris in surface water along the Seine River. *Environ. Pollut.*, 195, 163-166. DOI: [10.1016/j.envpol.2014.09.001](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.09.001).
- Guo, X., & Wang, J. (2019). The chemical behaviors of microplastics in marine environment: A review. *Mar. Pollut. Bull.*, 142, 1-14. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2019.03.019](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.019).
- Haberstroh, C. J., Arias, M. E., Yin, Z., & Wang, M. C. (2021). Effects of hydrodynamics on the cross-sectional distribution and transport of plastic in an urban coastal river. *Water Environ. Res.*, 93(2), 186-200. DOI: [10.1002/wer.1386](https://doi.org/10.1002/wer.1386).
- Holmes, L. A., Turner, A., & Thompson, R. C. (2014). Interactions between trace metals and plastic production pellets under estuarine conditions. *Mar. Chem.*, 167, 25-32. DOI: [10.1016/j.marchem.2014.06.001](https://doi.org/10.1016/j.marchem.2014.06.001).
- Horton, A. A., & Dixon, S. J. (2018). Microplastics: An introduction to environmental transport processes. *WIREs Water*, 5(2), e1268. DOI: [10.1002/wat2.1286](https://doi.org/10.1002/wat2.1286).
- Jafari, A. J., Latifi, P., Kazemi, Z., Kazemi, Z., Morovati, M., Farzadkia, M., & Torkashvand, J. (2021). Development a new index for littered waste assessment in different environments: A study on coastal and urban areas of northern Iran (Caspian Sea). *Mar. Pollut. Bull.*, 171, 112684. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2021.112684](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112684).
- Jeyasanta, K. I., Sathish, N., Patterson, J., & Edward, J. P. (2020). Macro-, meso-and microplastic debris in the beaches of Tuticorin district, Southeast coast of India. *Mar. Pollut. Bull.*, 154, 111055. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2020.111055](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111055).
- Kalnasa, M. L., Lantaca, S. M. O., Boter, L. C., Flores, G. J. T., & Van Ryan Kristopher, R. G. (2019). Occurrence of surface sand microplastic and litter in Macajalar Bay, Philippines. *Mar. Pollut. Bull.*, 149, 110521. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2019.110521](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110521).
- Karimian, S., Chamani, A., & Shams, M. (2020). Evaluation of heavy metal pollution in the Zayandeh-Rud River as the only permanent river in the central plateau of Iran. *Environ. Monit. Assess.*, 192(5), 1-13. DOI: [10.1007/s10661-020-8183-8](https://doi.org/10.1007/s10661-020-8183-8).
- Laist, D. W. (1997). Impacts of marine debris: entanglement of marine life in marine debris including a comprehensive list of species with entanglement and ingestion records. In *Marine debris*. 99-139 pp. Springer. DOI: [10.1007/978-1-4613-8486-1_10](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8486-1_10).
- Lippiatt, S., Opfer, S., & Arthur, C. (2013). Marine debris monitoring and assessment. NOAA Technical Memorandum NOS-ORandR-46,82.
- Loizia, P., Voukkali, I., Chatziparaskeva, G., Navarro-Pedreno, J., & Zorpas, A. A. (2021). Measuring the level of environmental performance on coastal environment before and during the COVID-19 pandemic: a case study from Cyprus. *Sustain.*, 13(5), 2485. DOI: [10.3390/su13052485](https://doi.org/10.3390/su13052485).
- Marin, C. B., Niero, H., Zinnke, I., Pellizzetti, M. A., Santos, P. H., Rudolf, A. C., Beltrão, M., de Souza Waltrick, D., & Polette, M. (2019).

- Marine debris and pollution indexes on the beaches of Santa Catarina State, Brazil. *Reg. Stud. Mar. Sci.*, 31, 100771. DOI: [10.1016/j.rsma.2019.100771](https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100771).
- Mato, Y., Isobe, T., Takada, H., Kanehiro, H., Ohtake, C., & Kaminuma, T. (2001). Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. *Environ. Sci. Technol.*, 35(2), 318-324. DOI: <https://doi.org/10.1021/es0010498>.
- Mishra, S., Rout, P. K., & Das, A. P. (2021). Emerging microfiber pollution and its remediation. In *Environmental Pollution and Remediation*. 247-266 pp. Springer. DOI: [10.1007/978-981-15-5499-5_9](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5499-5_9).
- Morritt, D., Stefanoudis, P. V., Pearce, D., Crimmen, O. A., & Clark, P. F. (2014). Plastic in the Thames: a river runs through it. *Mar. Pollut. Bull.*, 78(1-2), 196-200. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2013.10.035](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.035).
- Mugilarasan, M., Karthik, R., Purvaja, R., Robin, R. S., Subbareddy, B., Hariharan, G., Rohan, S., Jinoj, T. P. S., Anandavelu, I., Pugalenth, P., & Ramesh, R. (2021). Spatiotemporal variations in anthropogenic marine litter pollution along the northeast beaches of India. *Environ. Pollut.*, 280, 116954. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116954>.
- Munier, B., & Bendell, L. (2018). Macro and micro plastics sorb and desorb metals and act as a point source of trace metals to coastal ecosystems. *PLoS One*, 13(2), e0191759. DOI: [10.1371/journal.pone.0191759](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191759).
- Nachite, D., Maziane, F., Anfuso, G., & Williams, A. T. (2019). Spatial and temporal variations of litter at the Mediterranean beaches of Morocco mainly due to beach users. *Ocean Coast Manag.*, 179, 104846. DOI: [10.1016/j.ocecoaman.2019.104846](https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104846).
- Neto, A. (2014). Ocorrência, distribuição e grau de poluição por pellets, lixo de praia e lixo bentônico nas praias do município de Salvador, Bahia, Brasil. <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/21545>.
- Okwori, E., Viklander, M., & Hedström, A. (2020). Performance assessment of Swedish sewer pipe networks using pipe blockage and other associated performance indicators. *H2 Open*, 3(1), 46-57. DOI: [10.2166/h2oj.2020.027](https://doi.org/10.2166/h2oj.2020.027).
- Rangel-Buitrago, N., Velez-Mendoza, A., Gracia, A., & Neal, W. J. (2020). The impact of anthropogenic litter on Colombia's central Caribbean beaches. *Mar. Pollut. Bull.*, 152, 110909. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2020.110909](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110909).
- Roebroek, C. T., Harrigan, S., Van Emmerik, T. H., Baugh, C., Eilander, D., Prudhomme, C., & Pappenberger, F. (2021). Plastic in global rivers: are floods making it worse? *Environ. Res. Lett.*, 16(2), 025003. DOI: [10.1088/1748-9326/abd5df](https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd5df).
- Sajorne, R. E., Bacosa, H. P., Cayabo, G. D. B., Ardines Jr, L. B., Sumeldan, J. D., Omar, J. M., and Creencia, L. A. (2021). Plastic litter pollution along sandy beaches in Puerto Princesa, Palawan Island, Philippines. *Mar. Pollut. Bull.*, 169, 112520. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2021.112520](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112520).
- Sarafraz, J., Rajabizadeh, M., & Kamrani, E. (2016). The preliminary assessment of abundance and composition of marine beach debris in the northern Persian Gulf, Bandar Abbas City, Iran. *J. Mar. Biol. Assoc. U K*, 96(1), 131-135. DOI: [10.1017/S0025315415002076](https://doi.org/10.1017/S0025315415002076).
- Sharifinejad, A., Zahraie, B., Majed, V., Ravar, Z., & Hassani, Y. (2020). Economic analysis of water-food-energy nexus in Gavkhuni basin in Iran. *J. Hydro-environ. Res.*, 31, 14-25. DOI: [10.1016/j.jher.2020.03.001](https://doi.org/10.1016/j.jher.2020.03.001).
- Simeonova, A., & Chuturkova, R. (2020). Macroplastic distribution (Single-use plastics and some Fishing gear) from the northern to the southern Bulgarian Black Sea coast. *Reg. Stud. Mar. Sci.*, 37, 101329. DOI: [10.1016/j.rsma.2020.101329](https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101329).
- Sun, X., Li, Q., Zhu, M., Liang, J., Zheng, S., & Zhao, Y. (2017). Ingestion of microplastics by natural zooplankton groups in the northern South China Sea. *Mar. Pollut. Bull.*, 115(1-2), 217-224. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2016.12.004](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.12.004).
- Viršek, M. K., Palatinus, A., Koren, Š., Peterlin, M., Horvat, P., & Kržan, A. (2016). Protocol for microplastics sampling on the sea surface

- and sample analysis. *J. Vis. Exp.*, e55161. DOI: [10.3791/55161](https://doi.org/10.3791/55161).
- Weideman, E. A., Perold, V., & Ryan, P. G. (2020). Limited long-distance transport of plastic pollution by the Orange-Vaal River system, South Africa. *Sci. Total Environ.*, 727, 138653. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.138653](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138653).
- Williams, A., & Simmons, S. (1996). The degradation of plastic litter in rivers: implications for beaches. *J. Coast Conserv.*, 2(1), 63-72. DOI: [10.1007/BF02743038](https://doi.org/10.1007/BF02743038).
- William, J. S., Mick, C., Isabelle, M. C., Peter, D., Michael, H. D., Liz, F., & Lloyd, S. P. (2010). A horizon scan of global conservation issues for 2010. *Trends Ecol. Evol.*, 25(1), 1-7. DOI: [10.1016/j.tree.2009.10.003](https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.10.003).
- Windsor, F. M., Durance, I., Horton, A. A., Thompson, R. C., Tyler, C. R., & Ormerod, S. J. (2019). A catchment-scale perspective of plastic pollution. *Glob. Change Biol.*, 25(4), 1207-1221. DOI: [10.1111/gcb.14572](https://doi.org/10.1111/gcb.14572).
- Zettler, E. R., Mincer, T. J., & Amaral-Zettler, L. A. 2013. Life in the "plastisphere": microbial communities on plastic marine debris. *Environ. Sci. Technol.*, 47(13), 7137-7146. DOI: [10.1021/es401288x](https://doi.org/10.1021/es401288x).



Environment and Water Engineering

Homepage: www.jewe.ir



ISSN: 2476-3683

Research Paper

Flood Potential Zonation Using Analytic Hierarchy Process in Kurdistan Province, Iran

Bahar Akrami Moqadam¹, Rasoul Ilkhani Pour Zeynali² and Saman Nikmehr^{3*}

¹M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

²Assist. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

³Assist. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

Article information

Received: March 03, 2023

Revised: June 09, 2023

Accepted: June 11, 2023

Keywords:

Drainage

Land Use

Rainfall

River

Slope

*Corresponding author:

s.nikmehr@uok.ac.ir



Abstract

Preparation of flood zoning maps is one of the primary and necessary measures in the management of flood prone areas. In this study, analytic hierarchy process, and geographic information system were used to assess and zoning the flood potential map in Kurdistan province, Iran. The factors involved in flooding including rainfall, slope, distance from river, drainage density, land use and topographic wetness index were used for zoning and providing flood maps. Effective criteria, except for land use and rainfall, were prepared using the digital elevation model, and each factor was weighted by Expert Choice software. The results showed that rainfall, slope, and distance from the river with weights of 0.409, 0.295, and 0.134 were the most important factors, respectively. In terms of flood potential zoning, different areas of the province were placed in five categories: very low (0.1%), low (1.9%), medium (43%), high (52%) and very high (3%). The flood potential at the outlet of the watersheds limited to the downstream and low-slope areas of main rivers in the western and central parts of the province was very high.

How to cite this paper: Akrami Moqadam, B., Ilkhani Pour Zeynali, R. & Nikmehr, S. (2024). Flood Potential Zonation Using Analytic Hierarchy Process in Kurdistan Province, Iran. *Environ. Water Eng.*, 10(1), 79-93. <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.388125.1850> [In Persian]



© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Flood is a major natural phenomenon, prevalent with an extremely large impact on social-ecological systems due to human interventions in nature. Flood is a common phenomenon not only to low-lying or adjacent to rivers areas, but also to mountainous plateaus. Worldwide floods especially during the last decades has been extremely severe, and record significant high rates which means the intensity of flood are increasing due to extreme weather events and climate change. Consequently, this kind of natural phenomenon is critical to be controlled through proper management. According to climate change, the mean precipitation is projected to become more severe in the future which causes river floods, flash floods, urban floods, coastal and sewer flooding, hence findings and assessing of utmost rainfall events could be beneficial in terms of flood management. Floods have affected the geo-environment through the transportation of chemicals wastes, which have this ability to contaminate surface and subsurface waters as well as agricultural lands. The current understanding is that floods are naturally occurring incidents and hence cannot be entirely prevented. Many Asian countries including Iran are heavily affected by floods in recent decades and were the site of the life-threatening natural disaster. In recent years, extreme rainfall events and as a result of ongoing urbanization and accelerated climate change as particular concern which may lead to more frequent and severe rainfall events, urban areas around the world have experienced several floods especially in the Kurdistan province, Iran. Thus, the identification and developing reliable and efficient tools to identify flood-vulnerable areas is vital for comprehensive flood zoning management. Due to the importance of this issue, the main aim of this study was to identify the flood-prone zones in Kurdistan province, Iran.

Material and Methods

The present work introduces a local scale flood potential zonation assessment methodology, using multi-criteria analysis and analytical hierarchy process (AHP) techniques in a GIS environment, which mainly focuses on flood-prone zones in Kurdistan province. Many studies have been conducted to identify the main factors contributing to the severity of floods. A variety of

techniques can be used to incorporate different criteria into an integrated tool for both flood prediction and mitigation, depending on the availability of data. Fig.1 illustrates the stage of the current research. In this study, the geological and hydrological features of the province were evaluated. In order of the most prone flooding areas to be identified, six factors, which are directly related to flood occurrence and generation, were combined in a GIS environment.

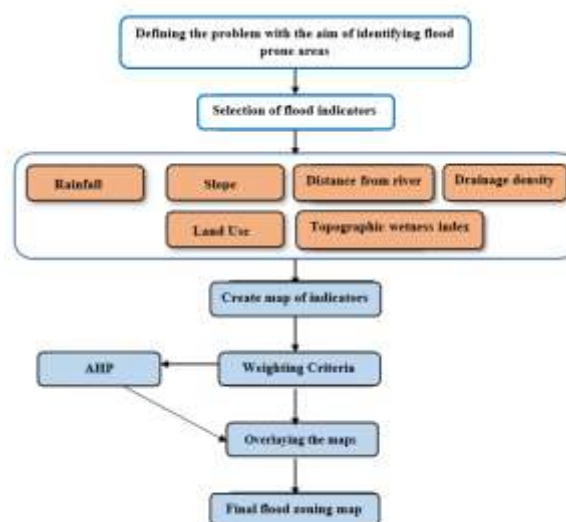


Fig. 1 Flowchart of the stages of research

These conditioning factors involved in the present study are: rainfall, slope, distance from rivers, drainage density, land cover and topographic wetness index. It is notable that for all kinds of flood potential mapping, the digital elevation model (DEM) is one of the principal parameters to derive most of the conditioning factors (Fig. 2).

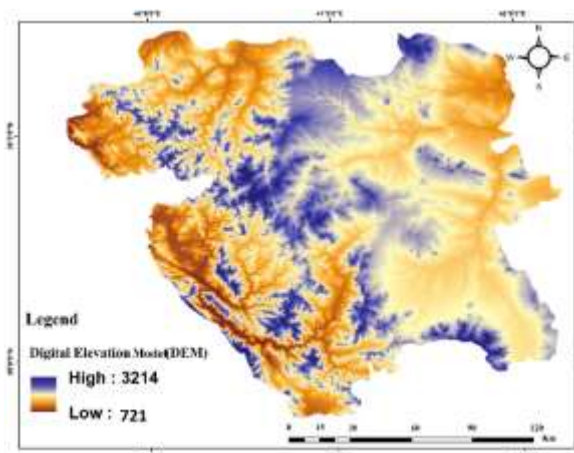


Fig. 2 Digital elevation model of Kurdistan province

By integrating these parameters, flood-prone areas in the study region were mapped. The analytical hierarchy process was used to determine and weight each factor of flood parameter and flood occurrences based on their greater influence towards flooding. By overlaying these six parameters, the final flood hazard map in geographical information system (GIS) was determined. All factors were resampled into a pixel size of 30×30 m and were reclassified through the natural break method and the final flood-zoning map was prepared and reclassified into five categories: Very high, High, Medium, Low and Very low.

Results

According to the results of this study, rainfall, slope and distance from the river have the most important impact in the flood proneness of the province with weights of 0.409, 0.295 and 0.134 respectively. In addition, drainage density, land use and topographic wetness index were the next significant criteria, respectively. Moreover, the results show that almost most of the western areas (northwest and west) and south of the province were the most vulnerable and flood-prone regions in Kurdistan province due to higher rainfall, lower slope, and proximity to rivers. These areas were Saez city in Urmia basin, Divandarreh city in Karkheh basin and parts of Sanandaj city while the eastern parts of the province were the least flood-prone zones mainly due to lower amount of annual rain.

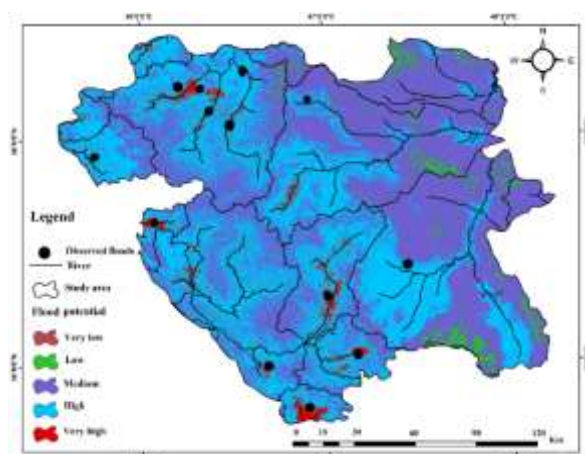


Fig. 3 Flood potential map for Kurdistan Province, Iran

As shown in Fig. 3, it demonstrates that historical flood events have occurred in moderate to very high flood hazard areas, which was consistent with historical floods data. The percentage of different areas prone to flooding were very low

(0.1%), low (1.9%), medium (43%), high (52%), and very high (3%). In addition, it is worth noting that areas with rich vegetation such as forests are far less likely to flood than urban areas and agricultural lands. In addition to the mentioned cases, most of the western and central regions that had a higher flood potential were located in the outlet of the watersheds limited to areas with a low slope and close to the large and main rivers, where rainfall was also significant in these areas.

The highest harvest index was obtained in the irrigation treatment equal to 125% of the water requirement of quinoa. The results showed that the maximum seed yield (2357.5 kg/ha) and biological yield (5415.9 kg/ha) were obtained in the treatment with irrigation water depth equal to 100% of crop water requirement and vermicompost fertilizer at the rate of 15 Ton/ha. The highest water productivity (53 kg/m³) and water use efficiency (527/527 kg/m³) were observed at irrigation water levels.

Conclusions

The method analyzed six parameters combining the information in rainfall, slope, distance from river, Land use, drainage density and topographic wetness index which rainfall and slope were the most effective criteria, respectively and by combining these six criteria, Urmia and Karkheh basins were the most flood-prone areas which were severely affected by flood in past decades. Moreover, about 3% of highly affected areas were located in western and central parts of the province. Therefore, the findings of this study can play a key role in flood potential management in the target region; the local disaster management authority, researchers, planners of local government, and line agencies dealing with flood risk management can use them. In addition, models such as decision tress, random forest and HEC-RAS can be used to improve the final zoning map, basin management, development of flood prevention and mitigation plans that may lead to a reduction of flood impact or damage caused by extensive precipitation.

Data Availability

The data used in this research are presented in the paper.

Conflicts of interest

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



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir

مقاله پژوهشی

پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی در استان کردستان

بهار اکرمی مقدم^۱، رسول ایلخانی پور زینالی^۲ و سامان نیک‌مهر^{۳*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۲ استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۳ استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ دریافت: [۱۴۰۱/۱۲/۱۲]

تاریخ بازنگری: [۱۴۰۲/۰۳/۱۹]

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۲/۰۳/۲۱]

واژه‌های کلیدی:

بارش

رودخانه

زهکشی

شیب

کاربری اراضی

تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی سیل از اقدامات اولیه و ضروری در مدیریت مناطق سیل‌گیر است. در این پژوهش به‌منظور بررسی و پهنه‌بندی نقشه پتانسیل سیل‌گیری در استان کردستان از روش تحلیل سلسله مراتبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده شد. از متغیرهای مؤثر بر سیل‌گیری شامل بارش، شیب، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، کاربری اراضی و شاخص رطوبت توپوگرافی به‌منظور پهنه‌بندی و تهیه نقشه سیل‌گیری استفاده شد. معیارهای مؤثر بر پتانسیل سیل‌گیری به‌جز کاربری اراضی و بارش به‌وسیله مدل رقومی ارتفاع تهیه و هریک از معیارهای مذکور به‌وسیله نرم‌افزار Expert Choice وزن‌دهی شدند. نتایج نشان داد که معیارهای بارش، شیب و فاصله از رودخانه به‌ترتیب با وزن‌های ۰/۴۰۹، ۰/۲۹۵ و ۰/۱۳۴ از بیش‌ترین اهمیت در پتانسیل سیل‌گیری برخوردار بوده‌اند. نواحی مختلف استان از نظر پتانسیل سیل‌گیری در پنج رده خیلی کم (۰/۱٪)، کم (۱/۹٪)، متوسط (۴۳٪)، زیاد (۵۲٪) و خیلی زیاد (۳٪) قرار گرفتند. پتانسیل سیل‌گیری در خروجی حوزه‌های آبخیز، محدود به نواحی پایین‌دست و کم شیب رودخانه‌های پرآب بخش غربی و مرکزی استان، خیلی زیاد بود.

*نویسنده مسئول:

s.nikmehr@uok.ac.ir



نحوه استناد به این مقاله:

اکرمی مقدم، بهار، ایلخانی پور زینالی، رسول & نیک‌مهر، سامان. (۱۴۰۳). پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی در استان کردستان. محیط زیست و مهندسی آب. 10(1) 79-93. <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.388125.1850>



۱- مقدمه

همواره در سراسر جهان وقایع طبیعی فراوانی رخ می‌دهد که برخی سبب آسیب جانی و اقتصادی می‌شوند. در دنیا بیش‌ترین مرگ‌ومیر ناشی از حوادث طبیعی در اثر توفان‌ها و سیلاب‌ها رخ می‌دهد. سیل یک پدیده طبیعی است که به‌دنبال مداخلات انسان در طبیعت، بیش از هر واقعه طبیعی دیگری بر انسان و شرایط اقتصادی و اجتماعی جامعه اثر می‌گذارد (Sheikhalishahi et al. 2016). دلایل مختلفی برای رخداد سیل وجود دارد. از مهم‌ترین آنها می‌توان به دخالت‌های انسانی، تغییر کاربری اراضی و عوامل اقلیمی اشاره کرد. بررسی‌های اخیر نشان داد که برای کاهش آثار سیل شناخت مناطق سیل‌گیر و درجه‌بندی این مناطق از لحاظ میزان احتمال رخداد سیل ضروری است. تا بتوان در رابطه با نحوه استفاده از اراضی و کاربری‌های مختلف از جمله کشاورزی، شهری و صنعتی تصمیم‌گیری کرد (Hamidi et al. 2016). در این میان سکونت‌گاه‌های انسانی دارای بیش‌ترین پتانسیل سیل‌گیری هستند.

پژوهش‌های مختلفی به‌منظور ارزیابی و پهنه‌بندی سیل با استفاده از روش و فن‌های مختلف انجام گرفته است. (Amirahmadi et al. 2012) با استفاده از معیارهای ضریب رواناب محدوده‌های بحرانی شهری در برابر سیل و آب‌گرفتگی مشخص و خسارات حاصله، نقشه‌ی ارزیابی خسارت ارائه کردند. بر اساس نقشه مذکور احتمال سیل ۴۵٪، در محدوده پتانسیل سیل‌گیری زیاد قرار داشت. (Mahmoodzadeh et al. 2015) در بررسی خود ریزپهنه‌بندی شهر تبریز و محدوده‌های بحرانی در معرض سیلاب را مشخص کردند. بر این اساس درصد مناطق با پهنه پتانسیل سیل‌گیری متوسط بیش‌تر از زیاد و خیلی زیاد بود. (Hassanzadeh and Khajebafghi 2016) میزان پتانسیل سیل‌گیری زیر حوزه‌های آبخیز شیطان بافق را با بهره از پارامترهای زمین‌شناسی و هیدرولوژی ارزیابی کردند. نتایج بررسی مذکور نشان داد که با افزایش اندازه پیکسل‌ها میزان پتانسیل سیل نیز افزایش می‌یابد. (Kazemi et al. 2016) با استفاده از شبیه‌سازی جریان رودخانه و سایر مشخصه‌های هیدرولیکی،

مکان‌های مستعد سیل در رودخانه سیمینه‌رود را مشخص کردند. (Rahmati et al. 2016) با بهره از چهار پارامتر فاصله از رودخانه^۱، کاربری اراضی^۲، ارتفاع^۳ و شیب^۴ اراضی، مناطق سیل‌گیر بخش‌هایی از رودخانه یاسوج را شناسایی کردند. (Hatami Nejad et al. 2017) پهنه‌بندی پتانسیل سیل-گیری شهرستان ایزه را به‌وسیله ۱۱ شاخص انجام دادند. نتایج نشان داد که مناطق کم شیب بیش‌تر در معرض سیل قرار دارند. (Kourgialas and Karatzas 2017) پتانسیل احتمال رخداد سیل در یونان را بررسی کردند. نتایج نشان داد مناطق شهری و کشاورزی از بیش‌ترین آسیب‌پذیری برخوردار بودند. همچنین ۲۴٪ از کل مساحت یونان دارای پتانسیل سیل‌گیری بسیار زیاد است. (Rostami and Kazemi 2019) پهنه‌بندی پتانسیل سیل در محدوده شهر ایلام را انجام دادند. مناطق مختلف با درجه پتانسیل سیل‌گیری را در پنج رده دسته‌بندی نمودند. مناطق با پتانسیل سیل خیلی کم و خیلی زیاد به‌ترتیب ۷٪ و ۵۶٪/۸ بود. (Valizadeh Kamran et al. 2019) پهنه‌بندی سیل و شناسایی مناطق سیل‌گیر در محدوده‌ی رودخانه لیقوان را انجام دادند. نتایج نشان داد که به‌ترتیب باغات، اراضی بایر و مراکز مسکونی بیش‌تر از سایر کاربری‌ها تحت تأثیر سیل قرار می‌گیرند. (Ajjur and Mogheir 2020) با شناسایی مناطق سیل‌گیر در محدوده‌ی شهری غزه به تهیه نقشه‌ی سیل‌گیری پرداختند. از پارامترهای شیب، ارتفاع و کاربری اراضی به‌منظور ارزیابی و پهنه‌بندی سیل استفاده نمودند. نتایج حاصل از این پژوهش با داده‌های سیل‌های تاریخی مقایسه و مطابقت داده شد. (Singha et al. 2022) عوامل مؤثر بر پتانسیل سیل‌گیری را براساس شاخص‌های مورفومتریک، هیدرولوژیکی، نفوذپذیری خاک، خصوصیات فیزیکی زمین و استنتاج‌های انسانی بررسی کردند. نتایج نشان داد فاکتورهای شیب و نفوذپذیری از مهم‌ترین عوامل پتانسیل سیل‌گیری بودند. نتایج بررسی‌های (Daneshparvar et al. 2022) نشان داد که فاکتورهای ارتفاع و شیب به‌ترتیب دارای بیش‌ترین تأثیر بودند. همچنین شماره منحنی و فاصله از رودخانه کم‌ترین وزن را در

³Elevation⁴Slope¹Distance from river²Land use/Land cover

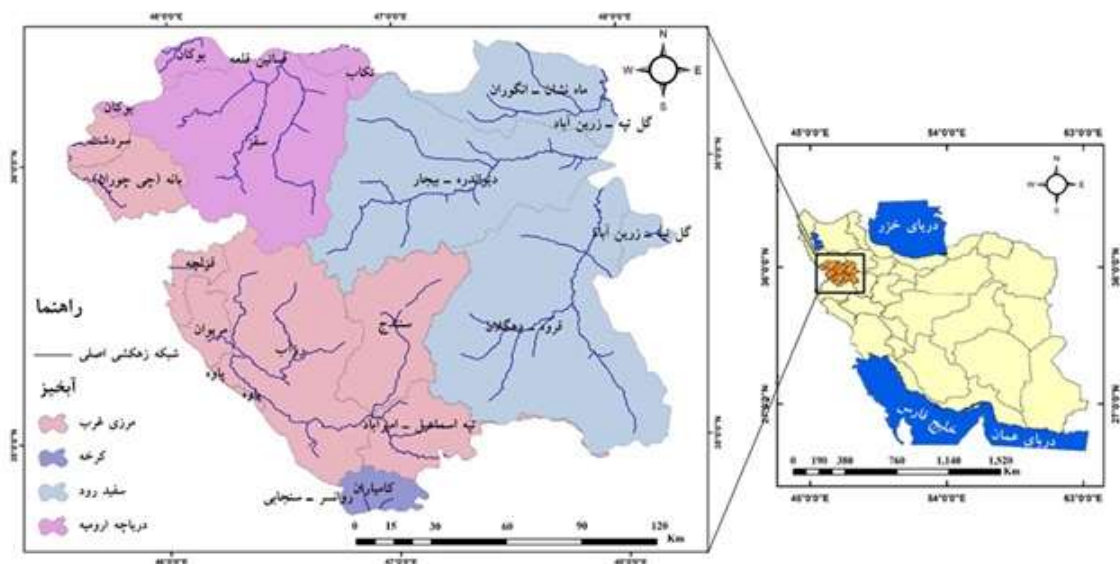
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در محدوده استان کردستان است که در شکل (۱) نشان داده شده است. این استان با مساحت km^2 ۲۹۱۳۷ بین مختصات جغرافیایی 34° و 44° تا 36° و $30'$ عرض شمالی و 45° و $31'$ تا 48° و $16'$ طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. استان کردستان منطقه‌ای کوهستانی است که دارای دشت‌های مرتفع و دره‌های پهن می‌باشد. بخش غربی دارای پوشش جنگلی است. عمده پوشش جنگلی در شهرستان‌های بانه و میوان قرار دارد. بخش‌های شرقی و مرکزی استان بیش‌تر به‌صورت دشت و مراتع کوهستانی است. استان کردستان دارای آب و هوای معتدل و کوهستانی و با پتانسیل بالای بارش است و میزان بارندگی سالیانه در آن حدود 417 mm است. استان کردستان در چهار حوزه آبخیز دریاچه ارومیه، مرزی غرب، سفیدرود و کرخه واقع شده است و هر حوزه از محدوده‌های مطالعاتی مختلفی تشکیل شده‌اند (شکل ۱).

هر دو روش تحلیل سلسله مراتبی^۱ و فرایند تحلیل شبکه‌ای^۲ داشتند. (Dung et al. (2022 عوامل مؤثر بر پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری را بر اساس روش AHP ارزیابی کردند. کلیه عوامل مؤثر در گروه‌هایی مرتبط با خصوصیات هیدرولوژیکی، ژئومورفولوژیکی، هواشناسی، پوشش و کاربری اراضی، خاک‌شناسی و زیرساخت‌ها و ویژگی‌های اجتماعی و اقتصادی دسته‌بندی شدند.

امروزه با توجه به توسعه فن‌آوری‌های مدرن، روش‌های زیادی به‌منظور پهنه‌بندی و تهیه نقشه‌ی پتانسیل سیل‌گیری و محیط ارائه و نمایش این نقشه‌ها، ابداع شده است. در پژوهش حاضر از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) که دارای قابلیت بالایی در تهیه نقشه‌های پتانسیل سیل‌گیری است، استفاده شد (Ajjur and Mogheir 2020). هم‌چنین نرم‌افزار Expert choice برای وزن‌دهی معیارهای مؤثر در سیل‌گیری بکار گرفته شد (Rostami and Kazemi 2019). هدف اصلی پژوهش حاضر تهیه نقشه پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری استان کردستان با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی و استفاده از داده‌های قابل‌اعتماد و نرم‌افزار GIS بود. در این پژوهش پهنه‌بندی و تهیه نقشه پتانسیل سیل‌گیری بر اساس خصوصیات زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی استان انجام شد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه‌های آبخیز استان کردستان

Fig. 1 Geographical location of watersheds in Kurdistan province

²Analytic network process
Environment and Water Engineering

Vol. 10, No. 1, 2024

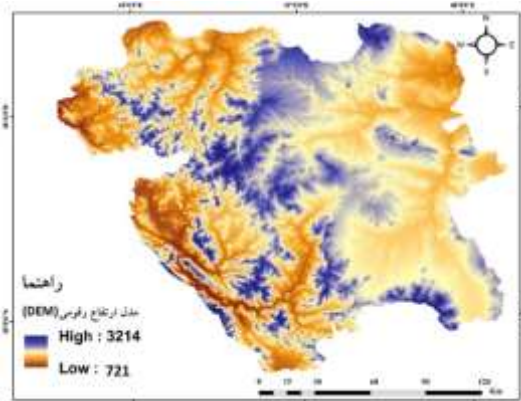
¹Analytic hierarchy process

محیط‌زیست و مهندسی آب

دوره ۱۰، شماره ۱، بهار ۱۴۰۳

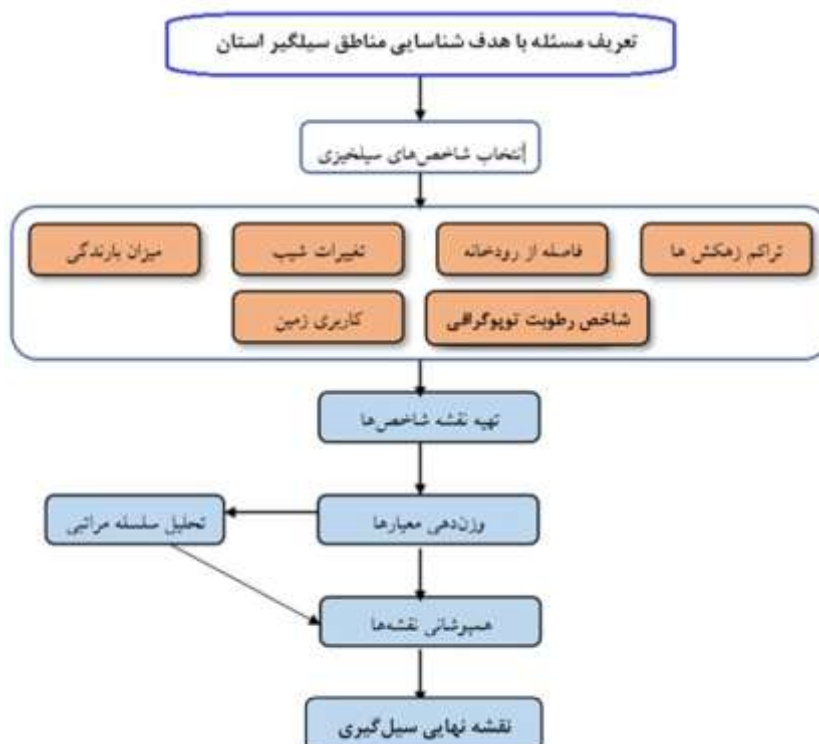
۲-۲- داده‌های مورد استفاده

می‌رسد. ویژگی‌ها و مشخصات هر فاکتور در طبقه‌هایی تقسیم می‌شوند که مرز بین آن‌ها در جایی است که تفاوت‌های نسبتاً زیادی در مقادیر داده، وجود دارد. محیط GIS، بازه هر کدام از زیرمعیارها را به صورت خودکار مشخص می‌کند. در مرحله بعد هر یک از زیرمعیارهای بدست آمده با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی وزن‌دهی شدند.



شکل ۲- مدل ارتفاع رقومی استان کردستان
Fig. 2 Digital elevation map of Kurdistan province, Iran

برای تعیین مناطق مخاطره‌آمیز سیل شیوه‌های مختلفی وجود دارد. در این پژوهش از معیارهای هیدرواقليمی، توپوگرافیک و پوشش زمین استفاده شد. داده‌های اولیه مورد استفاده در این پژوهش برای ارزیابی و پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری شامل مدل رقومی ارتفاع استان کردستان با دقت ۳۰m (شکل ۲)، داده‌های ایستگاه‌های باران سنجی و نقشه کاربری اراضی استان بود. براساس منابع مرتبط و نظر کارشناسان متخصص در این حوزه و با توجه به گستردگی منطقه مطالعاتی، در پژوهش حاضر نقشه‌های شش عامل مؤثر بر امکان پتانسیل سیل‌گیری شامل میزان بارش باران، شیب، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی و شاخص رطوبت توپوگرافی، در محیط GIS تهیه و بررسی شدند. شکل (۳) مراحل و روند کلی پژوهش را نشان می‌دهد. همچنین با استفاده از روش بهینه‌سازی دسته‌بندی طبیعی^۱ هر یک از این معیارها به پنج رده یا زیرمعیار تقسیم شدند. لازم به ذکر است که در این روش طبقات بر اساس گروه‌بندی طبیعی داده‌ها تشکیل می‌شوند. همچنین در این روش تفاوت بین طبقه‌ها به حداکثر



شکل ۳- مراحل انجام پژوهش
Fig. 3 the stages of research

^۱Natural Break

۲-۱-۲- میزان بارندگی

اطلاعات اخذ شده از شبکه ایستگاه‌های بارشی موجود وابسته به وزارت نیرو و همچنین سازمان هواشناسی در سطح استان کردستان، داده‌های اولیه و پایه در این پژوهش را تشکیل دادند. در این پژوهش مقدار بارش روزانه مربوط به کل ایستگاه‌های موجود در استان در یک بازه زمانی ۳۰ ساله مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تکمیل و بازسازی داده‌های بارش، در حوزه‌های آبخیز مشترک و در مجاورت با ایستگاه‌هایی با داده‌های مفقوده، ایستگاه یا ایستگاه‌های مناسب به‌عنوان مرجع انتخاب شدند. یکی دیگر از معیارهای انتخاب ایستگاه مناسب، وجود ضریب همبستگی بالا بین داده‌های ایستگاه مرجع و ایستگاه مورد بازسازی بود. بنابراین ایستگاه نزدیک‌تر و دارای داده‌های کامل‌تر با ضریب همبستگی بالاتر به عنوان ایستگاه مرجع انتخاب شد. لازم به ذکر است که داده‌های مفقوده با استفاده از روش آماری کلاسیک و رگرسیون خطی بازسازی شدند.

۲-۲-۲- شیب و فاصله از رودخانه

نقشه شیب با استفاده از مدل رقومی ارتفاع استان کردستان با دقت ۳۰ m و ابزار شیب در محیط GIS تهیه شد. معیار فاصله از رودخانه با استفاده از لایه اطلاعاتی شبکه رودخانه‌های استان که به‌وسیله تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 با دقت ۳۰ m تهیه می‌شود، محاسبه شد. هر دو معیار شیب و فاصله از رودخانه با سیل‌گیری رابطه معکوس دارد. با کمتر شدن درجه شیب و فاصله از رودخانه میزان سیل‌گیری افزایش می‌یابد.

۲-۲-۳- تراکم زهکشی

برای تهیه تراکم زهکشی و وجود رواناب‌های سطحی که رابطه مستقیمی با سیل دارد از نسبت طول کل آبراهه‌های استان به کل مساحت استان با بهره‌گیری از روش Line density در محیط GIS و با دقت ۳۰ m استفاده شد.

۲-۲-۴- کاربری اراضی

در پژوهش حاضر نقشه کاربری اراضی استان با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat 8 با هدف تفکیک مناطق مسکونی، مراتع و پوشش جنگلی، زمین‌های کشاورزی (دیم و آبی) و پوشش آبی و با دقت ۳۰ m تهیه شد. همچنین از نقاط زمینی جهت آموزش و طبقه‌بندی نظارت شده برای تهیه نقشه کاربری اراضی نهایی استفاده شد.

۲-۲-۵- شاخص رطوبت توپوگرافی

برای تهیه شاخص رطوبت توپوگرافی^۱ در محیط GIS ابتدا به‌ترتیب جهت جریان، جریان تجمعی و مقدار شیب محاسبه شد. در مرحله بعد تانژانت شیب بدست آمده استان بر حسب رادیان محاسبه شد. در مرحله آخر با استفاده از رابطه (۱) شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI) محاسبه شد.

$$TWI = Ln\left(\frac{A}{\tan(\beta)}\right) \quad (1)$$

که، A مساحت منطقه مورد مطالعه و $\tan(\beta)$ ، تانژانت شیب ناحیه مورد نظر است (Ullah and Zhang 2020).

۲-۳- روش تحلیل سلسله مراتبی

تحلیل سلسله مراتبی بر سه اصل (۱) تهیه سلسله مراتبی (۲) قضاوت و مقایسه بین معیارها و زیرمعیارها و (۳) ترکیب اولویت‌ها، پایدار است (Dağdeviren 2008). در بررسی حاضر بر اساس روش AHP هدف اصلی مسئله یا تهیه نقشه پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری مورد نظر قرار گرفت و در سطوح بعدی معیارها و زیرمعیارها تعیین شدند. با استفاده از ماتریس‌های زوجی، معیارها دو به دو با یکدیگر مقایسه شده و براساس درجه اهمیت هریک نسبت به سایر پارامترها وزن‌دهی شدند. این مقایسه‌ها به دو صورت کمی و کیفی بر مبنای مقیاس ارائه شده (Saaty and Vargas 2001) انجام گرفت (جدول ۱).

جدول ۱- ارزش‌گذاری شاخص‌ها برای مقایسه زوجی

Table 1 Pairwise comparison scale for preferences

Importance	Definition	Description
9	Extremely Preferred	Extremely high preference
7	Very Strongly Preferred	Too much preference
5	Strongly Preferred	High preference
3	Moderately Preferred	Relative preference
1	Equally Preferred	The two elements are equally important
2,4,6,8		Intermediate values in judgments

^۱ Topographic wetness index

کم‌تر یا مساوی ۰/۱ باشد تا اینکه سازگاری سیستم قابل قبول باشد.

$$C.I = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad (3)$$

$$C.R = \frac{C.I}{R.I} \quad (4)$$

۲-۴- سیل‌های مشاهداتی در سطح استان

در پژوهش حاضر به منظور صحت‌سنجی و ارزیابی میزان دقت نتایج حاصل از پهنه‌بندی نقشه پتانسیل سیل‌گیری در استان کردستان، از ۱۳ رخدادهای سیل ثبت شده در مرکز مدیریت بحران استان در فاصله زمانی سال ۱۳۸۴ الی ۱۴۰۱ استفاده شد. طبق این آمار بیش‌تر سیل‌های مشاهده شده در استان مربوط به شهرستان‌های سقز در حوزه‌ی آبخیز دریاچه ارومیه و بخش‌هایی از شهرستان کامیاران واقع در حوزه‌ی آبخیز کرخه و مسیر رودخانه قشلاق در شهرستان سنندج بود. پس از تهیه نقشه‌ی معیارهای مؤثر در سیل‌گیری، وزن‌دهی هر یک از معیارها انجام شد. سپس نقشه‌ی نهایی پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری با استفاده از هم‌پوشانی معیارها در محیط GIS و با استفاده از ابزار کاربردی همپوشانی پارامترهای وزن‌دار تهیه و ارزیابی شد. برای صحت‌سنجی نتایج حاصله، نقشه نهایی پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری با داده‌های سیل‌های مشاهداتی در سطح استان کردستان مقایسه شد.

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- تعیین وزن معیارها

در پژوهش حاضر براساس نتایج مستخرج از پرسش‌نامه‌های حاصل از نظرات متخصصین مربوطه و با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice وزن‌دهی معیارها مطابق جدول (۲) انجام گرفت. آهنگ ناسازگاری در این پژوهش برابر ۰/۰۸ بود.

جدول ۲- وزن‌دهی و مقایسه زوجی معیارها

Table 2 Weight calculation and pairwise comparisons of criteria

	LU/LC	Distance to river	Slope	TWI	Drainage density	Rainfall
Rainfall	8.5	5.5	1	6	5	2
Drainage density	4	1	0.18	3	0.5	0.2
TWI	1	0.25	0.117	0.25	0.16	0.125
Slope	8	5	0.5	5	4	1
Distance to river	6	2	0.2	5	1	0.25
LU/LC	4	0.33	0.16	1	0.2	0.2

به این معنی که مقدار ۱ بیانگر اهمیت برابر دو معیار مورد نظر و عدد ۹ بیانگر اهمیت بسیار بالای یک معیار نسبت به دیگری است. اولویت‌بندی هر یک از معیارها و زیرمعیارهای مورد نیاز در بررسی حاضر بر اساس ۳۰ پرسشنامه به همراه نظر افراد متخصص شامل اساتید و کارشناسان حوزه‌ی مدیریت آب انجام شد. به‌طورکلی ساخت سلسله مراتبی، محاسبه وزن و بررسی سازگاری سیستم گام‌هایی است که برای حل مسئله و گرفتن تصمیم به‌ترتیب به آن پرداخته می‌شود.

در مرحله نهایی با روش AHP ارزیابی میزان سازگاری در قضاوت‌ها و مقایسه‌های زوجی انجام شد. روشی که برای ارزیابی و بررسی ناسازگاری در مقایسه‌ها و قضاوت‌ها استفاده می‌شود آهنگ سازگاری^۱ (C.R) است. این آهنگ حاصل تقسیم شاخص سازگاری^۲ (C.I) و شاخص تصادفی بودن^۳ (R.I) است. شاخص تصادفی بودن بر اساس تعداد زوج داده‌های مورد مقایسه محاسبه می‌گردد. از دو تا حداکثر ۱۵ زوج داده به‌منظور مقایسه و محاسبه شاخص تصادفی بودن استفاده می‌شود. مقدار شاخص تصادفی بودن بین صفر تا ۱/۵۹ متغیر است (Bowen et al. 1993). بنابراین ابتدا λ_{max} که میانگین بردار سازگار می‌باشد طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Saaty 1980).

$$\lambda_{max} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_{ii} \times W_{i,j} / W_{i,j} \quad (2)$$

که، λ_{max} میانگین بردار سازگاری، α میانگین هندسی ماتریس ij و N تعداد جایگزین‌های مقایسه شده است. به کمک محاسبه میانگین بردار سازگاری، شاخص سازگاری (C.I) بر اساس رابطه (۳) محاسبه گردید (Saaty 1977). در نهایت نرخ سازگاری بر اساس رابطه (۴) به دست آمد (Pant et al. 2022). نرخ سازگاری (C.R) در این روش تصمیم‌گیری باید

³Randomness Index

¹Consistency Ratio

²Consistency Index

جدول ۳- وزن معیارها و زیرمعیارها در تعیین پتانسیل سیل گیری
Table 3 Categorization of the factors affecting flood potential

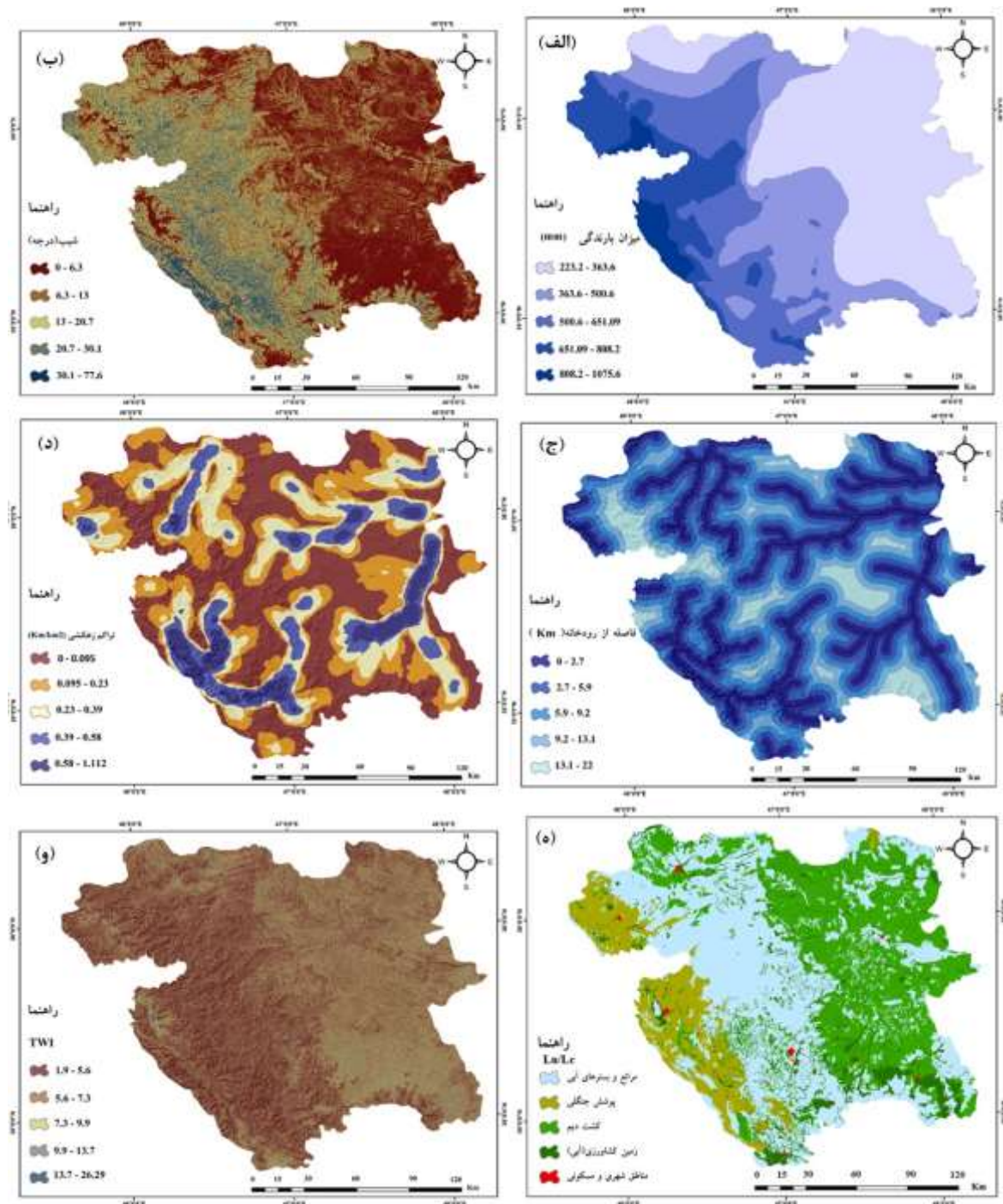
Criteria	Relation	Criteria weight	Sub-criteria	Sub-criteria weight
Rainfall	Direct	0.409	223.2-363.6	0.040
			363.6-500.6	0.068
			500.6-651.09	0.164
			651.09-808.2	0.269
			808.2-1075.6	0.460
Slope	Indirect	0.295	0-6.3	0.515
			6.3-13	0.274
			13-20.7	0.115
			20.7-30.1	0.060
			30.1-77.6	0.037
Distance to river	Indirect	0.134	0-2.7	0.478
			2.7-5.9	0.288
			5.9-9.2	0.119
			9.2-13.1	0.072
			13.1-22	0.043
Drainage density	Direct	0.084	0-0.095	0.052
			0.095-0.231	0.076
			0.231-0.396	0.144
			0.396-0.588	0.289
			0.588-1.112	0.440
Land use	Direct	0.052	Pastures and water	0.051
			Forest	0.072
			Dryland farming	0.153
			agricultural land	0.286
			urban settlements	0.438
TWI	Direct	0.026	1.92-5.65	0.067
			5.65-7.37	0.094
			7.37-9.95	0.165
			9.95-13.77	0.255
			13.77-26.29	0.418

شامل بخش اعظمی از شرق استان کردستان، بخشی از شهرستان کامیاران و قسمت‌هایی از مناطق غربی استان بود. در مقابل تغییرات شیب بیش‌تر از $77/6^\circ$ اثر کم‌تری در پتانسیل سیل‌گیری داشت. این مناطق شامل مساحت زیادی از بخش‌های غربی و قسمت‌هایی از مناطق مرکزی استان بود. لازم به‌ذکر است که بخش‌های غربی استان به‌دلیل وجود ارتفاعات زیاد و مناطق کوهستانی دارای شیب بیش‌تری نسبت به دیگر مناطق استان بود.

معیار فاصله از رودخانه (شکل ۴-ج) بر اساس داده‌های رودخانه‌ای و شبکه آبراهه‌های استان محاسبه شد. این شاخص نیز مانند سایر معیارها به پنج رده طبقه‌بندی شد. نتایج

نقشه متغیرهای مورد استفاده در تهیه و بررسی پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری استان کردستان در شکل (۴) به‌ترتیب نشان داده شده است. شاخص میزان بارندگی به‌طور مستقیم از داده‌های بارندگی روزانه تهیه شد. این شاخص مهم‌ترین و اساسی‌ترین فاکتور در بررسی پتانسیل سیل‌گیری بود. مقدار بارش در مناطق مرکزی و غربی استان به‌مراتب بیش‌تر از مناطق شرقی استان بود (شکل ۴-الف). در این پژوهش تغییرات شیب استان (شکل ۴-ب) پس از میزان بارندگی به‌عنوان مهم‌ترین عامل اثرگذار بر پتانسیل سیل‌گیری در نظر گرفته شد. ارزیابی مقدار شیب نشان داد که بازه‌ی صفر تا $6/3^\circ$ دارای بیش‌ترین پتانسیل سیل‌گیری بود. این محدوده

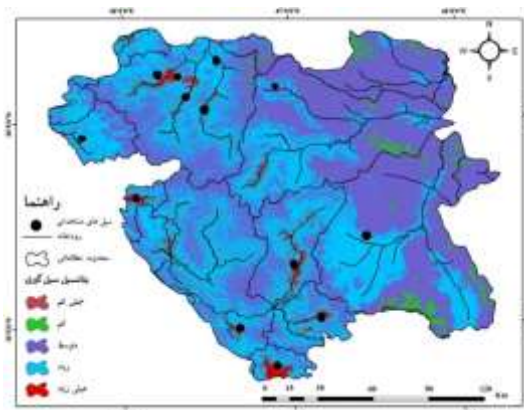
نشان‌داد که فاصله صفر تا ۲/۷۹ km از رودخانه دارای بیش‌ترین و فاصله ۲۲ - ۱۳/۱ km دارای کم‌ترین پتانسیل سیل‌گیری بود. هم‌چنین بازه‌های صفر تا ۲/۷۹ بیش‌ترین و ۱۳/۲۲-۱ کم‌ترین وزن را به خود اختصاص دادند.



شکل ۴- نقشه‌های پهنه‌بندی معیارهای مؤثر در پتانسیل سیل‌گیری استان کردستان: (الف) بارش، (ب) شیب، (ج) فاصله از رودخانه، (د) تراکم زهکشی، (ه) کاربری اراضی، (و) TWI

Fig. 4 Zoning maps of effective criteria in flood potential in Kurdistan province: a) rainfall; b) slope; c) distance to river; d) drainage density; e) land use; f) TWI

زیاد رودخانه‌ها و بارش مناسب در بخش غربی استان پتانسیل سیل‌گیری را تا حد زیادی افزایش داده بود.



شکل ۵- نقشه نهایی پتانسیل سیل‌گیری استان کردستان
Fig. 5 Final flood potential map for Kurdistan Province

در حوزه‌های آبخیز واقع در بخش مرکزی و غربی استان به دلیل رطوبت توپوگرافی بالا پتانسیل سیل در طبقه زیاد و خیلی زیاد قرار داشت. رطوبت توپوگرافیک، نفوذپذیری خاک را به درجات مختلف در این نواحی کاهش و پتانسیل سیل‌گیری را افزایش داده بود. نقاط مرتفع و کوهستانی حوزه های آبخیز استان در طبقه پتانسیل کم و خیلی کم سیل‌گیری قرار داشتند. شیب زیاد یکی از مهم ترین عوامل برای کاهش پتانسیل سیل‌گیری در نواحی کوهستانی و مرتفع بود. در حوزه آبخیز سفیدرود واقع در شرق استان با وجود شیب پائین زمین، پتانسیل سیل‌گیری در طبقه متوسط و کم قرار داشت. بارش‌های کم در بخش شرقی استان از اصلی ترین عامل کاهش پتانسیل سیل‌گیری در این ناحیه بود. با مقایسه و انطباق رخدادهای سیل ثبت شده در استان با نقشه پتانسیل سیل‌گیری، نواحی با طبقه پتانسیل زیاد و خیلی زیاد سیل با محل وقوع سیلاب‌های ثبت شده انطباق مطلوبی داشتند. بخش‌های زیادی از شهرستان سقز دارای بیش تر سیل‌های مشاهداتی ثبت شده بود. این در حالی است که محدوده شهرستان سقز در طبقه پتانسیل زیاد و خیلی زیاد سیل‌گیری قرار داشتند. در این پژوهش از میان عوامل مؤثر بر سیل‌گیری، سه فاکتور میزان بارندگی، شیب و فاصله از رودخانه بیش ترین تاثیر را بر پتانسیل سیل‌گیری داشتند. در بررسی انجام شده توسط Thirumurugan and Krishnaveni (2019) میزان بارش سالیانه در درجه اول و ژئومورفولوژی منطقه و تراکم زهکش‌ها در درجه دوم بیشترین اثرگذاری را بر سیل‌گیری

براساس شکل (۴-۵)، تراکم زهکشی از دیگر شاخص‌های تاثیر گزار بر پتانسیل سیل‌گیری است. معیار تراکم زهکشی رابطه مستقیمی با پتانسیل سیل‌گیری مناطق مختلف استان داشت. تراکم زهکشی به دلیل شرایط توپوگرافی در بخش‌های غربی استان زیادتر بود. مناطق با تراکم بالای زهکشی با بازه ۱/۱۱۲ - ۰/۵۸۸ بیش‌ترین و بازه صفر تا ۰/۰۹۵ کم‌ترین وزن را مطابق جدول (۳) به خود اختصاص دادند. بخش غربی استان به دلیل تراکم بالای شبکه رودخانه‌ها از پتانسیل سیل‌گیری بیشتری برخوردار بود. شاخص رطوبت توپوگرافی از دیگر معیارهای تاثیرگذار بر پتانسیل سیل‌گیری است (شکل ۴-۵). مقدار بالای رطوبت توپوگرافی در مناطقی با شیب کم رخ داده بود. این بخش‌ها بیشتر شامل مناطق شرقی و جنوب شرقی استان کردستان بود. بخش‌های شرقی استان به دلیل بالا بودن رطوبت توپوگرافی از پتانسیل سیل‌خیزی کمتری برخوردار بود. نقشه کاربری اراضی (شکل ۴-۵) استان به لحاظ کاربری به پنج گروه کلی تقسیم‌بندی شده است. براین اساس، نوع کاربری شامل مراتع، پوشش جنگلی، کشت دیم، زمین‌های کشاورزی (آبی) و مناطق مسکونی و شهری بود. طبق نقشه کاربری اراضی، مراتع دارای بیش‌ترین مساحت و کم‌ترین پتانسیل سیل‌گیری بودند. مناطق شهری و مسکونی کم‌ترین مساحت و بیش‌ترین میزان پتانسیل سیل‌گیری را دارا بودند.

۳-۲- نقشه پتانسیل سیل‌گیری

پس از وزن‌دهی معیارها در محیط Expert Choice نقشه‌ی نهایی پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری استان کردستان در محیط GIS تهیه شد (شکل ۵). به‌منظور تهیه نقشه نهایی پتانسیل سیل‌گیری از ابزار همپوشانی پارامترهای وزن‌دار در محیط GIS استفاده شد. نتایج نشان داد که پتانسیل سیل‌گیری در نواحی با میزان بارش نسبتاً زیاد و شیب کم بیش‌تر بود. در حوزه‌های آبخیز دریاچه ارومیه و کرخه بیش ترین پتانسیل سیل‌گیری وجود داشت. در این حوزه‌های آبخیز در نواحی مجاور رودخانه‌ها به ویژه در قسمت‌های انتهایی و پایین دست رودخانه‌ها پتانسیل سیل‌گیری بالا بود. در بخش جنوبی شهرستان کامیاران واقع در حوزه آبخیز کرخه و همچنین ناحیه روانسر-سنجایی پتانسیل سیل‌گیری خیلی زیاد بود. در همگی این نواحی پتانسیل سیل‌گیری به‌دلیل شیب کم و مجاورت با رودخانه بالا بود. همچنین تراکم نسبتاً

۱- روش تحلیل سلسله مراتبی با ادغام شاخص‌های توپوگرافیک، هیدرواقليمی و پوشش زمین برای تجزیه و تحلیل و تهیه نقشه پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری استان کردستان قابل اطمینان است.

۲- میزان بارش مهم‌ترین عامل در پتانسیل سیل‌گیری بود. عامل شیب در درجه دوم اثرگذاری اهمیت بوده و بازه شیب صفر تا $6/3^\circ$ ، بیش‌ترین پتانسیل سیل‌گیری را داشت. معیار فاصله از رودخانه در درجه سوم اثرگذاری قرار داشت.

۳- ۳٪ از وسعت کل استان در طبقه پتانسیل خیلی زیاد سیل‌گیری قرار داشت. این نواحی در خروجی حوزه‌های آبخیز محدود به نواحی پایین‌دست و کم شیب رودخانه‌های پرآب بخش غربی و مرکزی استان قرار داشت.

باید توجه داشت که علاوه بر میزان بارش، لازم است اثر بارش‌های رگباری و شدت آنها در مطالعات مربوط به سیل‌گیری مد نظر قرار گیرد. همچنین به‌منظور تحلیل و پهنه‌بندی سیل می‌توان مدل‌های هوشمند مانند درخت تصمیم، ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی را بکار برد و نیز برای ارتقاء نقشه نهایی پهنه‌بندی سیل از مدل‌هایی نظیر HEC-RAS استفاده کرد.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های به دست آمده در این پژوهش در متن مقاله ارائه شده است.

تضاد منافع نویسندگان

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

References

- Ajjur, S. B., & Mogheir, Y. K. (2020). Flood hazard mapping using a multi-criteria decision analysis and GIS (case study Gaza Governorate, Palestine). *Arab. J. GeoSci.*, 13(44), 1-11. DOI: [10.1007/s12517-019-5024-6](https://doi.org/10.1007/s12517-019-5024-6)
- Amirahmadi, A., Behniafar, A., & Ebrahimi, M. (2012). Microzonation of Flood Risk in

منطقه دارا بودند. در مطالعه‌ای دیگر توسط Mishra and Sinha (2020) نیز فاکتور بارش بیش‌ترین و شیب و فاصله از آبراهه‌های به ترتیب در رده‌های بعدی اهمیت قرار داشتند. در بررسی انجام شده توسط Ullah and Zhang (2020) شیب، کاربری اراضی و ارتفاع به‌ترتیب بیش‌ترین و معیار تراکم زهکش و میزان بارش سالیانه کم‌ترین تاثیر را در سیل‌گیری داشتند. در مطالعه‌ای که توسط Toosi et al. (2019) انجام پذیرفت عوامل مؤثر در سیل‌گیری به‌ترتیب ضریب نفوذپذیری خاک، ارتفاع و شیب ناحیه ذکر شده بود. با افزایش شیب، سرعت جریان رواناب‌های حاصل از بارش زیاد و با کاهش درجه شیب، پتانسیل سیل‌گیری منطقه افزایش یافت که با پژوهش حاضر مطابقت داشت. همچنین نتیجه پژوهش حاضر درخصوص اثر معیار شیب بر سیل‌گیری با نتایج مطالعه Ullah and Zhang (2020) مطابقت داشت که شیب رابطه عکسی با میزان سیل‌گیری ناحیه دارد.

به طور کلی در نواحی با میزان بارش بالا و شیب زمین کم، پتانسیل سیل‌گیری بالا بود. درجه اهمیت و وزن میزان بارش سالیانه در پژوهش Mishra and Sinha (2020) با پژوهش حاضر مطابقت داشت. با توجه به نقشه نهایی پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری، از کل مساحت استان، ۳٪ در طبقه خیلی‌زیاد، ۵۲٪ زیاد، ۴۳٪ متوسط، ۱/۹ و ۰/۱٪ به‌ترتیب در طبقه‌های کم و خیلی کم قرار داشتند.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با هدف شناسایی مناطق سیل‌گیر در استان کردستان، پهنه‌بندی نقشه سیل‌گیری انجام شد. به این منظور ابتدا عوامل مؤثر در سیل‌گیری منطقه مشخص شد. سپس با استفاده از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی هریک از این عوامل وزن‌دهی شدند. به‌طور کلی با توجه به نتایج این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که:

Sabzevar Suburb with the aim of sustainable urban development. *Amayesh J.*, 5(16), 17-32. [In Persian].

Bowen, W. M., Klosterman, R., & Brail, R. (1993). AHP: Multiple criteria evaluation: Spreadsheet models for urban and regional analysis. New Brunswick, Center for Urban Policy Research, 333-356.

- Dağdeviren, M. (2008). Decision making in equipment selection: an integrated approach with AHP and PROMETHEE. *J. Intell. Manuf.*, 19, 397-406. DOI: [10.1007/s10845-008-0091-7](https://doi.org/10.1007/s10845-008-0091-7)
- Daneshparvar, B., Rasi Nezami, S., Feizi, A., & Aghlmand, R. (2022). Comparison of results of flood hazard zoning using AHP and ANP methods in GIS environment: A case study in Ardabil province, Iran. *J. Appl. Res. Water Wastewater.*, 9(1), 1-7. DOI: [10.22126/arww.2022.6667.1218](https://doi.org/10.22126/arww.2022.6667.1218).
- Dung, N. B., Long, N. Q., Goyal, R., An, D. T., & Minh, D. T. (2022). The role of factors affecting flood hazard zoning using analytical hierarchy process: a review. *Earth Syst. Environ.*, 6(3), 697-713. DOI: [10.1007/s41748-021-00235-4](https://doi.org/10.1007/s41748-021-00235-4).
- Hamidi, N., Vafakhah, M., & Najafi, A. (2016). Development of urban flood hazard map for Nour city using analytical hierarchy process and fuzzy logic. *J. Watershed Manag. Res.*, 7(14), 11-19. DOI: [10.29252/jwmr.7.14.19](https://doi.org/10.29252/jwmr.7.14.19). [In Persian]
- Hassanzadeh, N. M., & Khajebafghi, H. (2016). Flood hazard zoning using multiple criteria decision analysis system (Case study: Sheytoor watershed in Bafgh). *J. Watershed Manag. Res.*, 7(14), 29-37 DOI: [10.29252/jwmr.7.14.37](https://doi.org/10.29252/jwmr.7.14.37). [In Persian]
- Hatami Nejad, H., Atashafrooz, N., & Arvin, M. (2017). Flood hazard zonation using multi-criteria analysis and GIS (case study: Izeh Township). *Disaster Prev. Manag. Know.*, 7(2), 44-57. [In Persian]
- Kazemi, A., Rezaei Moghaddam, M. H., Nikjoo, M. R., Hejazi, M. A., & Khezri, S. (2016). Zoning and management of the hazards of floodwater in the Siminehrood river using the HEC-RAS hydraulic model. *Environ. Manag. Hazard.*, 3(4), 379-393 DOI: [10.22059/jhsci.2016.62373](https://doi.org/10.22059/jhsci.2016.62373). [In Persian]
- Kourgialas, N. N., & Karatzas, G. P. (2017). A national scale flood hazard mapping methodology: The case of Greece – Protection and adaptation policy approaches. *Sci. Total Environ.*, 601-602, 441-452. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.05.197](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.197).
- Mahmoodzadeh, H., Emami Kia, V., & Rasooli, A. A. (2015). Micro zonation of flood risk in Tabriz suburb with using analytical hierarchy. *Process. GeoRes.*, 30(116), 167-180. [In Persian].
- Mishra, K., & Sinha, R. (2020). Flood risk assessment in the Kosi megafan using multi-criteria decision analysis: A hydro-geomorphic approach. *Geomorphol.*, 350, 1-19. DOI: [10.1016/j.geomorph.2019.106861](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106861).
- Pant, S., Kumar, A., Ram, M., Klochkov, Y., & Sharma, H. K. (2022). Consistency Indices in Analytic Hierarchy Process: A Review. *Math.*, 10(8), 1206. DOI: [10.3390/math10081206](https://doi.org/10.3390/math10081206).
- Rahmati, O., Zeinivand, H., & Besharat, M. (2016). Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. *Geomat. Nat. Hazard. Risk.*, 7(3), 1000-1017. DOI: [10.1080/19475705.2015.1045043](https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1045043).
- Rostami, N., & Kazemi, Y. (2019). Flood hazard zoning in the Ilam city using AHP and GIS. *J. Spatial Anal. Environ. Hazard.*, 6(1), 179-192 [In Persian]. DOI: [10.29252/jsaeh.6.1.10](https://doi.org/10.29252/jsaeh.6.1.10).
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *J. Math. Psychol.*, 15(3), 234-281. DOI: [10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5).
- Saaty, T. L. (1980). The Analytical Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. New York, McGraw Hill. 287 pp. ISBN: 9780070543713, 0070543712.
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2001). How to make a decision. models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process. International Series in Operations Research & Management Science., Springer, Boston, MA. 34, 1-25. DOI: [10.1007/978-1-4615-1665-1_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1665-1_1).
- Sheikhalishahi, N., Akbarjamali, A., & Hasanzadeh, N. M. (2016). Flood mapping using hydraulic modeling of rivers (case study: Manshad watershed, Yazd Province). *Geogra. Space.*, 16(53), 77-96 [In Persian]
- Singha, C., Swain, K. C., Meliho, M., Abdo, H. G., Almohamad, H., & Al-Mutiry, M. (2022). Spatial analysis of flood hazard zoning map using novel hybrid machine learning technique in Assam, India. *Remote Sens.*, 14(24), 6229-6255. DOI: [10.3390/rs14246229](https://doi.org/10.3390/rs14246229).

- Thirumurugan, P., & Krishnaveni, M. (2019). Flood hazard mapping using geospatial techniques and satellite images—a case study of coastal district of Tamil Nadu. *Environ. Monit Assess.*, 191(3), 1-17. DOI: [10.1007/s10661-019-7327-1](https://doi.org/10.1007/s10661-019-7327-1).
- Toosi, A. S., Calbimonte, G. H., Nouri, H., & Alaghmand, S. (2019). River basin-scale flood hazard assessment using a modified multi-criteria decision analysis approach: A case study. *J. Hydrol.*, 574, 660-671. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2019.04.072](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.072).
- Ullah, K., & Zhang, J. (2020). GIS-based flood hazard mapping using relative frequency ratio method: A case study of Panjkora River Basin, eastern Hindu Kush, Pakistan. *PloS One*, 15(3), 1-18. DOI: [10.1371/journal.pone.0229153](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229153).
- Valizadeh Kamran, K., Delire Hasannia, R., & Azari Amghani, K. (2019). Flood zoning and its impact on land use in the surrounding area using unmanned aerial vehicles (UAV) images and GIS. *J. RS GIS Nat. Resour.*, 10(3), 59-75. DOI: [20.1001.1.26767082.1398.10.3.4.5](https://doi.org/10.1001.1.26767082.1398.10.3.4.5). [In Persian]



Environment and Water Engineering

Homepage: www.jewe.ir



ISSN: 2476-3683

Research Paper

Performance Evaluation of LS-SVR Model in Predicting Scour Depth in Bridge Piers

Bijan Sanaati^{1*}

¹Assist. Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Bukan Branch, Bukan, Iran

Article information

Received: May 08, 2023
Revised: June 19, 2023
Accepted: July 01, 2023

Keywords:

ANFIS
 Bridge Piers
 LS-SVR
 Machine Learning
 Prediction
 Scour Depth

*Corresponding author:

bijan.sanaati@iau.ac.ir



Abstract

In this research work, two machine learning models including Least Squares Support Vector Machines (LS-SVR) and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) were used to predict the scour depth around the bridge piers. For this purpose, 240 data series including pier geometry, flow condition, sediment characteristics, and some dimensional parameters were used. Dimensional and no dimensional parameters were considered. The performance of the models was evaluated using root mean square error (RMSE), mean absolute percentage error (MAPE), and Nash–Sutcliffe efficiency (NSE) criteria. The results showed that in both models, the use of dimensional parameters for prediction leads to high prediction accuracy. The comparison between the models also showed that the LS-SVR algorithm with the criteria RMSE=46.84, MAPE=38.03, NSE=0.62 for the test data of the first model and RMSE=28.62, MAPE=38.97, NSE=0.67 for the test data results of the second pattern are more accurate than the ANFIS algorithm. This research indicates that machine-learning models are a suitable alternative to empirical models in predicting scour depth of bridge piers.

How to cite this paper: Sanaati, B. (2024). Performance evaluation of LS-SVR model in predicting scour depth in bridge piers. *Environ. Water Eng.*, 10(1), 94-108. <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.396394.1861> [In Persian]



© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The existence of structures with inappropriate dimensions inevitably increases the rate of the scouring process around the bridge piers and the flow area. The scour depth around the bridge pier plays a crucial role in the safety and operation of bridges as one of the transportation infrastructures. The construction of a bridge over a river changes the flow pattern. So far, several methods have been proposed to predict scour depth. The application of empirical methods is the most common method of calculating the scour depth. Empirical methods are not accurate enough to predict the dimensions of the scour hole. Because these methods do not take into account the effect of all effective parameters on the scour phenomenon. Therefore, the main objective of this research is to predict scour depth using the LS-SVR model, which can be used as an alternative to empirical methods. For this purpose, laboratory data were used. Since a wide range of dimensional and dimensionless parameters are effective in estimating scour depth, in this research, two methods were considered in different input patterns. In the first input pattern, dimensionless parameters and in the second pattern, dimensional parameters were used and the results were compared.

Material and Methods

To predict the scour depth around the bridge piers using machine-learning models, the data used by previous researchers were used. The statistical analysis of the applied data set is given in Table 1. In Table 1, D is the diameter of the bridge pier, U is the flow velocity, U_c is the sediment critical velocity, L is the length of the pier, Y is the depth of the flow, and d_{50} is the sediment grain size, of which 50% of the bed material is finer by weight. According to Table 1, the maximum and minimum equivalent scour depths are 440 and 10 mm, respectively.

Table 1 Statistical characteristics of the used parameters

Parameters	Max	Min	Average	St.D
d_{se} (mm)	440	10	127.09	75.3
d_{50} (mm)	7.8	0.24	1.6	1.42
D (m)	1000	10	148.46	160.77
U (m/s)	12.546	0.17	0.53	0.86
U_c (m/s)	1.88	0.194	0.59	0.413
Y (mm)	600	0.15	173.9	127.75

According to the materials and methods, first, the data were analyzed for homogeneity. Then the data were used for modeling through two different patterns. In the first pattern, dimensionless parameters including shields number, critical shields number, the ratio of flow depth to average particle size, the ratio of washing water depth to average depth, and the ratio of flow velocity to critical flow velocity were considered. In the second pattern, dimensional parameters including bridge pier diameter, flow velocity, sediment critical velocity, flow depth, and average particle size were considered. In both cases, the output parameter of scouring depth is in mm. About 70% of the data was considered for training the models, and 30% of the data was considered for testing the models. Both patterns were implemented by two machine learning models, LS-SVR and ANFIS. At first, the models were validated using the training data. Statistical tests were used to check the accuracy of the models. The process of training and testing the models continued until the desired results were achieved. The estimation of the scour depth was achieved while the results of both sets of data (training and test) were acceptable using error evaluation criteria.

Results

The primary results by two machine-learning models, LS-SVR and ANFIS were evaluated using error evaluation criteria for both cases. The results are presented in Table 2. According to this table, it is clear that the performance of the second pattern in estimating scour depth is better than the first pattern. In addition, the results show that the performance of the LSSVR model is better than ANFIS. Moreover, for the dimensionless pattern using the LSSVR model, the error evaluation criteria of MAPE, RMSE, and NSE in the test data are 38.03 mm, 46.84 mm, and 0.62 mm, respectively. While these values for the ANFIS model are 50.38 mm, 61.89 mm, and 0.29 mm, respectively. For dimensional pattern using the LSSVR model, the error evaluation criteria of MAPE, RMSE, and NSE in the test data are 38.97 mm, 28.62 mm, and 0.67 mm, respectively, which is more accurate than the first pattern. Therefore, it can be concluded that the dimensional pattern has better estimation accuracy than the dimensionless pattern. Moreover, the performance of the LS-SVR model has better estimation accuracy than the ANFIS model.

Table 2 Error evaluation criteria for training and test data

Input Pattern Parameters	Model	MAPE		RMSE		NSE	
		Training	Test	Training	Test	Training	Test
Dimensionless	LS-SVR	25.71	38.03	34.65	46.84	0.79	0.62
	ANFIS	36.9	50.38	52.38	61.89	0.52	0.29
Dimensional	LS-SVR	20.21	38.97	32.65	28.62	0.81	0.67
	ANFIS	32.13	38.72	43.44	49.45	0.66	0.47

The comparison of the performance of two models was done using Taylor's diagram (Fig. 1). For both applied models, the correlation coefficient between all the data is between 0.8 - 0.9. This value is slightly higher for the LS-SVR model than the ANFIS model. Therefore, in this pattern, the LS-SVR model is more accurate than the ANFIS model in estimating the scour depth. In Fig.1b for the dimensionless parameters, the

correlation coefficient for the LS-SVR model is around 0.85, but this value is around 0.65 for the ANFIS model. In addition, the RMSD value for LS-SVR and ANFIS models are 40 and 60 mm, respectively. Despite the lower accuracy of the two models in this dimensionless pattern, the accuracy of the LS-SVR model is higher than the ANFIS model in estimating the scour depth.

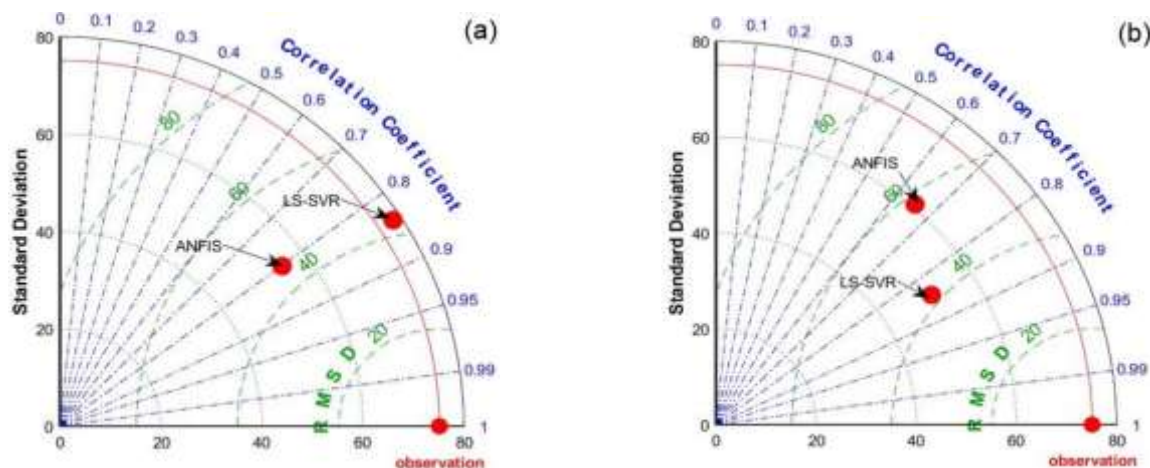


Fig. 1 Taylor diagram for input patterns: a) dimensional and b) dimensionless

Conclusions

In the present research, the scour depth around the bridge piers was predicted using two smart models, ANFIS and LS-SVR. For this purpose, the parameter values affecting the scour depth including flow velocity, critical velocity, flow depth, the average diameter of grain, and the diameter of the bridge pier, were extracted from previous experimental research. Two input patterns including dimensionless and dimensional parameters were compiled. The total number of data used was 240 samples, 70% of which were used for training and the remaining data were considered as test data. The most important results of this research can be expressed as follows:

1. In the ANFIS model, Gaussian membership function and first-order linear function were elected as the most appropriate fuzzy

membership function and the best type of output function, respectively.

2. The results of this research showed that the accuracy of both models in estimating the scour depth around the bridge piers increases using the dimensional parameters.
3. The LS-SVR model is more accurate than the ANFIS model in predicting the scour depth around the bridge piers for the used data.

Data Availability

The data and results used in this research will be available through correspondence with the corresponding author.

Conflicts of interest

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



ISSN: 2476-3683

محیط‌زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir

مقاله پژوهشی

ارزیابی عملکرد مدل LS-SVR در تخمین عمق آبشستگی در پایه پل‌ها

بیژن صناعتی^{*}

استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بوکان، بوکان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت: [۱۴۰۲/۰۲/۱۸]	در این پژوهش از دو مدل یادگیری ماشین شامل LS-SVR و ANFIS برای پیش‌بینی عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل استفاده شد. برای این منظور از ۲۴۰ سری داده شامل پارامترهای مرتبط با هندسه پایه‌ها، شرایط جریان و خصوصیات جریان و نیز پارامترهای بدون بعد استفاده شد. برای پیش‌بینی از دو الگوی ورودی استفاده شد. در الگوی اول، پارامترهای بدون بعد و در الگوی دوم پارامترهای با بعد در نظر گرفته شدند. عملکرد مدل‌ها با استفاده از معیارهای ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین درصد مطلق خطا (MAPE) و ضریب نش-سائکلیف (NSE) ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که در هر دو مدل، استفاده از پارامترهای با بعد برای پیش‌بینی منجر به دقت بالای پیش‌بینی می‌شود. مقایسه بین مدل‌ها نیز نشان داد که الگوریتم LS-SVR با معیارهای $RMSE=46.84$ ، $MAPE=38.03$ ، $NSE=0.62$ برای داده‌های آزمون الگوی اول و $RMSE=28.62$ ، $MAPE=38.97$ ، $NSE=0.67$ برای داده‌های آزمون الگوی دوم دقت بالاتری نسبت به الگوریتم ANFIS دارد. نتایج این تحقیق حاکی از این است که مدل‌های یادگیری ماشین جایگزین مناسبی برای مدل‌های تجربی در پیش‌بینی عمق آبشستگی پایه‌های پل هستند.
تاریخ بازنگری: [۱۴۰۲/۰۳/۲۹]	
تاریخ پذیرش: [۱۴۰۲/۰۴/۱۰]	
واژه‌های کلیدی: پایه پل‌ها تخمین عمق آبشستگی یادگیری ماشین ANFIS LS-SVR	
*نویسنده مسئول: bijan.sanaati@iau.ac.ir	
	

نحوه استناد به این مقاله:

صناعتی، بیژن. (۱۴۰۳). ارزیابی عملکرد مدل LS-SVR در تخمین عمق آبشستگی در پایه پل‌ها. محیط‌زیست و مهندسی آب، ۱۰(۱)، ۱۰۸-۹۴.
<https://doi.org/10.22034/ewe.2023.381628.1838>



۱- مقدمه

که این روش‌ها تأثیر همه پارامترهای مؤثر بر پدیده مورد نظر را به خوبی در نظر نمی‌گیرند (Ettema et al. 1998). به عنوان نمونه، Koopaei and Valentine (2003) داده‌های عمق آبشستگی جمع‌آوری شده از کانال‌های آزمایشگاهی را با مقادیر تخمینی با استفاده از برخی معادلات تجربی مقایسه کردند. آنها دریافتند که اکثر فرمول‌ها حداکثر عمق آبشستگی را بیش از حد تخمین می‌زنند. بسیاری از معادلات تجربی مبتنی بر مدل‌های خطی یا غیرخطی با استفاده از متغیرهای اصلی مؤثر بر پدیده آبشستگی پیشنهاد شدند (Richardson and Davis 2001; Johnson 1992). مدل‌های تجربی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی پیاده‌سازی می‌شوند. روش دیگر تخمین عمق آبشستگی استفاده از مدل‌های داده‌کاوی است. این روش‌ها که تحت عنوان مدل‌های یادگیری ماشین شناخته می‌شوند رابطه‌ای بین مجموعه‌ای از متغیرهای مؤثر به عنوان ورودی مدل و عمق آبشستگی به عنوان متغیر هدف پیدا می‌کنند. در این رویکرد نیازی به معرفی روابط ریاضی بین متغیرهای ورودی و خروجی نیست. این روش‌ها اغلب برای تخمین عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل با استفاده از اندازه‌های مختلف نمونه و برای موقعیت‌های مختلف استفاده شده‌اند. (Azamathulla 2012) استفاده از سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS^۲) را برای تخمین عمق آبشستگی در خروجی‌های کانال توصیف کرد.

(Samadi et al. 2021) از روش‌های داده محور برای پیش-بینی عمق آبشستگی پایه‌ها تحت اثر جریان یکنواخت استفاده کردند. از میان روش‌های مورد استفاده، روش MARS از بهترین دقت تخمین با ضریب همبستگی ۰/۸۷۲ و مجذور مربعات خطای ۰/۲۳۳ برخوردار بود (Samadi et al. 2021). در تحقیق دیگری (Najafzadeh and Azamathulla 2015) با استفاده از روش عصبی-فازی مبتنی بر دسته‌بندی گروهی داده‌ها (NF-GMDH)^۳ به بررسی و تخمین آبشستگی تحت اثر موج با بهره‌گیری از داده‌های موجود در سوابق مطالعاتی پرداختند. آنها نتایج را با نتایج مدل درخت و روش‌های تجربی مقایسه کردند. نتایج به دست آمده نشان داد روش NF-GMDH پیش‌بینی‌های دقیق‌تری نسبت به

وجود سازه‌های با ابعاد نامناسب به طور اجتناب‌ناپذیری سرعت فرآیند آبشستگی اطراف پایه‌های پل و ناحیه جریان را افزایش می‌دهد. این عمل نه تنها منجر به انحراف قابل توجه جریان می‌شود، بلکه باعث افزایش سرعت در اطراف پایه‌های پل می‌شود. عمق آبشستگی در اطراف پایه پل نقش مهمی در ایمنی و بهره‌برداری از پل‌ها به عنوان عنصر زیرساخت‌ها دارد. ساخت پل بر روی رودخانه الگوی جریان را تغییر می‌دهد و در نتیجه دو نوع اصلی گرداب (یعنی گرداب‌های نعل اسبی و گرداب‌های داخل خیابان گرداب‌های فون کارمن^۱) ایجاد می‌شود (Shamshirband et al. 2020). از دهه ۱۹۵۰ چندین بررسی میدانی نشان داده است که توسعه آبشستگی در اطراف پایه‌ها، عامل اصلی ریزش پل‌ها در سراسر جهان است و باعث بروز مشکلات اقتصادی و زیست‌محیطی می‌شود. به دلیل اهمیت این موضوع، تحقیقات زیادی برای مطالعه پدیده آبشستگی پایه‌ها انجام شده است (Ettema et al. 2017; Ghafari and Zomorodian 2019). مطالعات عددی و تجربی انجام شده روی جریان متلاطم در اطراف پایه پل‌ها نشان می‌دهد که در طول زمان، شکل، ابعاد و مکان گرداب‌ها دچار تغییر می‌شوند (Kirkil et al. 2008; Dargahi 1990). فرآیند آبشستگی زمانی رخ می‌دهد که چنین پدیده‌هایی با رسوب بستر تعامل داشته باشند. شایان ذکر است که انتقال رسوب نیز تصادفی است و از طریق برخی رویکردهای آماری قابل برآورد است (Dodaro et al. 2014, 2016). بنابراین، می‌توان گفت فرآیند آبشستگی به طور کامل یک پدیده پیچیده است. تعیین عمق چاله آبشستگی اطراف پایه پل‌ها یکی از نکات مهم در طراحی پایه پل‌هاست که باید در نظر گرفته شود. از آنجایی که پدیده آبشستگی تابع عوامل مختلفی مانند لایه مرزی آشفته، الگوی جریان وابسته به زمان، مکانیسم انتقال رسوب، مشخصات رسوب و غیره است، تخمین دقیق مشخصات هندسی چاله کاری پیچیده است. تاکنون چندین روش برای تخمین عمق آبشستگی پیشنهاد شده است. یکی از روش‌هایی که برای تخمین عمق آبشستگی ارائه شده است، استفاده از روش‌های تجربی است. روش‌های تجربی به هنگام تخمین، اختلاف چندین برابر را نشان می‌دهند، زیرا

³Neuro-Fuzzy Based Group Method of Data Handling¹horseshoe and wake vortices²Adaptive Neuro Fuzzy Inference System

از اینرو هدف اصلی این پژوهش پیش‌بینی عمق آبشستگی با استفاده از مدل LS-SVR می‌باشد. همچنین نتایج LSSVR با یک مدل شبکه عصبی-فازی مقایسه شد. برای این منظور از داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد. از آنجایی که طیف وسیعی از پارامترهای با بعد و بدون بعد در تخمین عمق آبشستگی مؤثر هستند، در این پژوهش دو شیوه در الگوهای ورودی مختلف در نظر گرفته شد که در الگوی ورودی اول از پارامترهای بی‌بعد و در الگوی دومی از پارامترهای با بعد استفاده شده است. در ادامه با مقایسه بین مدل‌ها و الگوهای ورودی بهترین مدل و بهترین الگوی ورودی برای پیش‌بینی عمق آبشستگی انتخاب شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- داده‌های مورد استفاده

برای تخمین عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین، از داده‌های مورد استفاده در تحقیق (Bateni et al. 2007) استفاده شد. تجزیه و تحلیل آماری مجموعه داده‌های اعمال شده در جدول (۱) آورده شده است. در جدول (۱)، D قطر پایه پل، U سرعت جریان، U_c سرعت بحرانی رسوب، L طول پایه، Y عمق جریان، d_{50} اندازه متوسط دانه است که ۵۰٪ مواد بستر از نظر وزنی ریزتر است. d_{se} عمق معادل آبشستگی است که از رابطه (۱) محاسبه شد (Bateni et al. 2007).

$$d_{se} = 1.35 D^{0.7} Y^{0.3} \quad (1)$$

مطابق جدول (۱) بیش‌ترین و کم‌ترین عمق معادل آبشستگی به ترتیب برابر ۴۴۰ و ۱۰ mm است.

۲-۲- روش پژوهش

مطابق روند انجام کار (شکل ۱) داده‌ها ابتدا مورد آنالیز قرار گرفتند. سپس دو شیوه داده‌های ورودی که در شیوه اول (Case 1) پارامترهای بی‌بعد شامل عدد شیلدز، عدد شیلدز بحرانی، نسبت عمق جریان به اندازه متوسط ذرات، نسبت عمق آب شستگی به عمق متوسط و نسبت سرعت به سرعت بحرانی در نظر گرفته شدند. در شیوه دوم (Case 2) نیز پارامترهای با بعد شامل قطر پایه پل، سرعت جریان، سرعت بحرانی

روش‌های تجربی و مدل درخت تصمیم دارد (Najafzadeh and Azamathulla. 2015). (Sreedhara et al. 2019). دو مدل (PSO-SVM)^۱ و ANFIS در پیش‌بینی عمق آبشستگی استفاده کردند. در پژوهش دیگری (Chou and Nguyen 2022) الگوریتم جدید (MOSS)^۲ را برای پیش‌بینی عمق آبشستگی در پایه‌های پل ارائه دادند (Chou and Nguyen 2022). در تحقیق دیگری، Karami (2018) Moghadam and Sabzevari از الگوریتم ژنتیک برای اصلاح روابط عمق آبشستگی پایه پل استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد که مدل مورد استفاده با عملکرد بالایی توانست روابط تجربی را اصلاح کند.

یکی از مدل‌های یادگیری ماشین که در تحقیقات مختلفی استفاده شده است مدل رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)^۳ است. این مدل یک نوع سیستم یادگیری نظارت شده است که هم برای تخمین و هم برای گروه‌بندی داده‌ها استفاده می‌شود. مدل حداقل مربعات رگرسیون بردار پشتیبان (LS-SVR)^۴ برخلاف مدل SVR به جای مسئله برنامه‌نویسی درجه دوم در حل، از معادلات خطی استفاده می‌کند. بنابراین این مدل دقت محاسباتی بالاتری نسبت به ماشین‌های بردار پشتیبان کلاسیک دارد. این مدل علیرغم سادگی اما از توانایی بالایی در پیش‌بینی‌ها دارد که این الگوریتم را به یک الگوریتم خاص و قوی تبدیل کرده است (Ghordoyee Milam et al. 2020). این الگوریتم در زمینه‌های مختلفی چون پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی توسط (Ghordoyee Milam et al. 2020)، پیش‌بینی ضریب پخشیدگی طولی رودخانه توسط (Azar et al. 2021)، پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سد توسط (Kayhomayoon et al. 2022) و پیش‌بینی شاخص رد پای آب زیرزمینی توسط (Kayhomayoon et al. 2023) به کار برده شده است که نتایج تحقیقات بیانگر عملکرد مثبت این مدل بوده است (Kayhomayoon et al. 2022; Kayhomayoon et al. 2023). با این حال به‌ندرت در مسائل تخمین آبشستگی به کار گرفته شده است.

³Support Vector Regression

⁴Least Squares Support Vector Regression

¹Particle Swarm Optimization- Support Vector Machine

²Metahueristics Optimized Stacking System

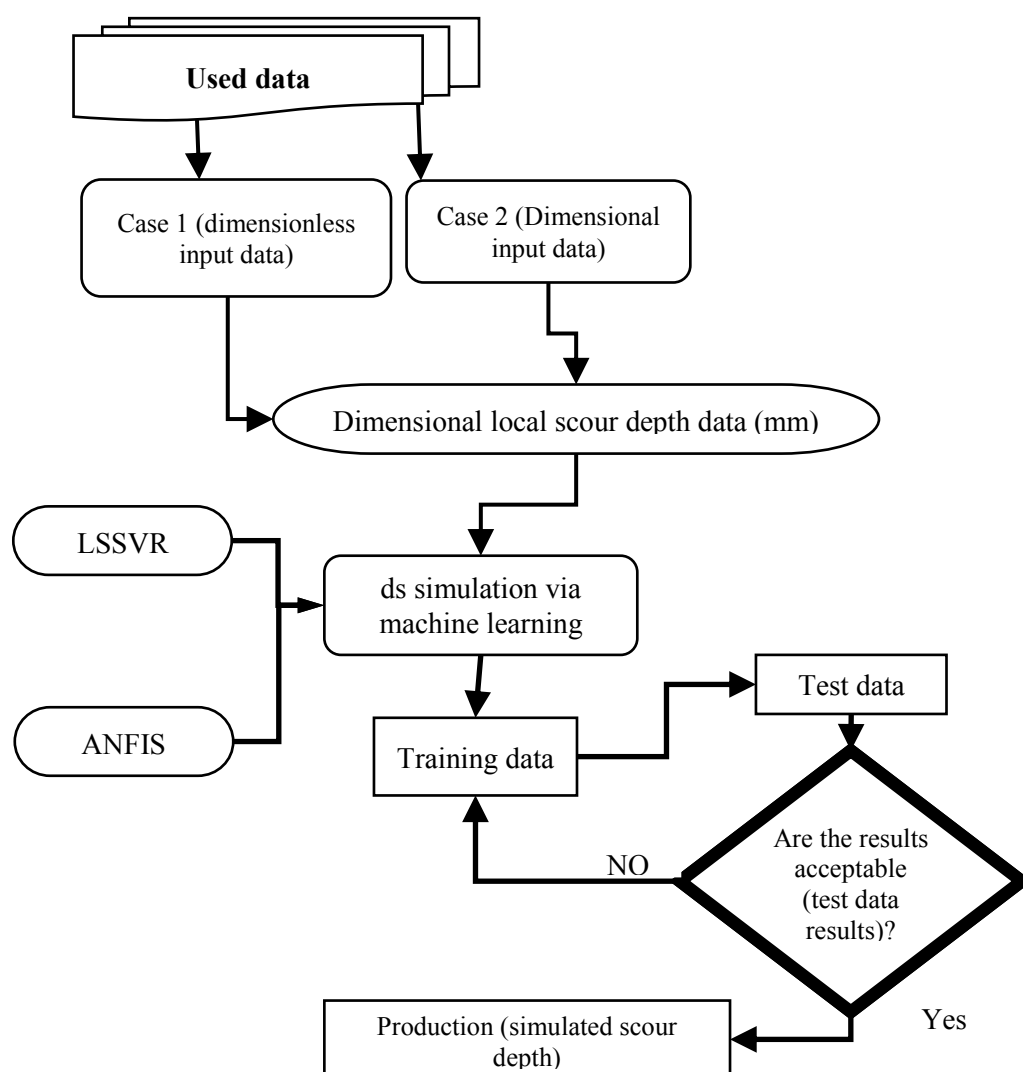
(آموزش و آزمون) با استفاده از معیارهای ارزیابی خطا قابل قبول بودند.

جدول ۱- مشخصات آماری پارامترهای مورد استفاده

Table 1 Statistical characteristics of the used parameters

Parameters	Max	Min	Average	St.D
d_{se} (mm)	440	10	127.09	75.3
d_{50} (mm)	7.8	0.24	1.6	1.42
D (m)	1000	10	148.46	160.77
U (m/s)	12.546	0.17	0.53	0.86
Uc (m/s)	1.88	0.194	0.59	0.413
Y (mm)	600	0.15	173.9	127.75

رسوب، عمق جریان و اندازه متوسط ذرات در نظر گرفته شدند. در هر دو حالت خروجی پارامتر عمق آبشستگی بر حسب mm میباشد. حدود ۷۰٪ داده‌ها برای آموزش مدل‌ها و باقیمانده داده‌ها برای آزمون مدل‌ها در نظر گرفته شد. هر دو شیوه توسط دو مدل یادگیری ماشین مذکور اجرا شد. در ابتدا مدل‌ها به وسیله داده‌های آموزش، واسنجی شدند. بعد از مشاهده نتایج مطلوب در مرحله آموزش داده‌های آزمون مورد بررسی قرار گرفتند. مراحل آموزش و آزمون مدل‌ها تا رسیدن به نتایج مطلوب ادامه پیدا کرد. زمانی پیش‌بینی مقدار عمق آب شستگی انجام گرفت که نتایج هر دو دسته از داده‌ها



شکل ۱- نمای شماتیک مراحل پیش‌بینی عمق آب شستگی

Fig. 1 Schematic view of scour depth prediction steps

مدل سامانه استنتاج عصبی فازی تطبیقی (ANFIS) در سال ۱۹۹۳ توسط Jang (1993) ارائه شد. این مدل ترکیبی از

۲-۳ مدل‌های یادگیری ماشین

۲-۳-۱ مدل شبکه عصبی-فازی

ورودی (x_2, x_1) از نوع سوگنو و با قوانین فازی if-then ، با خروجی y ، ساختار ANFIS را می توان به شرح زیر به ترتیب به وسیله روابط (۲) و (۳) توصیف کرد (Azar et al. 2021).

$$\text{Rule 1. If } (x_1 \text{ is } A_1) \text{ and } (x_2 \text{ is } B_1) \text{ then } f_1 = p_1 x_1 + q_1 x_2 + r_1 \quad (2)$$

$$\text{Rule 2. If } (x_1 \text{ is } A_2) \text{ and } (x_2 \text{ is } B_2) \text{ then } f_2 = p_2 x_1 + q_2 x_2 + r_2 \quad (3)$$

مدل LS-SVR در مقایسه با SVR محدودیت های یکسانی دارد اما پیچیدگی محاسبات کمتر ، دقت و سرعت بالاتری دارد. مجموعه داده های آموزشی مانند $\{x_k, y_k\}_{k=1}^N$ که داده ورودی آن شامل $x_k \in R^N$ و داده های خروجی $y_k \in R$ معرفی می شود. بنابراین تابع رگرسیون غیرخطی در فضای وزن دهی اولیه به صورت رابطه (۴) خواهد شد (Azar et al. 2021).

$$y(x) = W^T \varphi(x) + b \quad (4)$$

که، T, b, W به ترتیب بیانگر وزن ها، بایاس تابع رگرسیون و نشان دهنده ترانزفاده هستند. $\varphi(x)$ ترسیم غیرخطی ورودی ها در فضای ویژگی با ابعاد بالا است. رگرسیونی غیرخطی مذکور توسط رابطه بهینه سازی (۵) قابل حل است.

$$\min j(w, e) = \frac{1}{2} W^2 W + \frac{1}{2} \gamma \sum_{k=1}^N e_k^2 \quad (5)$$

با توجه به محدودیت ها، معادله (۶) بدست می آید.

$$y_k = W^T \varphi(x) + b + e_k, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

که γ پارامتر تنظیم کننده بخش خطا است و e میزان خطا را نشان می دهد. مقدار γ همواره تابع تقریب را کنترل می کنند بنابراین مقدار آن اگر بزرگ باشد خطای بیشتری ایجاد می کند. حل با استفاده از شکل لاگرانژی از تابع هدف اصلی به صورت رابطه (۷) می باشد.

$$L(w, b, e, \alpha) = j(w, e) - \sum_{i=1}^N \alpha_i \{W^T \varphi(x) + b + e_k - y_k\} \quad (7)$$

$$y(x) = \sum_{k=1}^N \alpha_k K(x, x_k) + b \quad (8)$$

که، $K(X, X_i)$ تابع کرنل نامیده می شود و مقدار آن طبق رابطه (۹) محاسبه می شود.

شبکه عصبی مصنوعی و سامانه استنتاج فازی است. رایج ترین روش آموزش در مدل ANFIS تابع سوگنو (Sugeno) است که از الگوریتم یادگیری پیوندی برای تعیین پارامترهای سیستم فازی به منظور آموزش مدل استفاده می کند. برای دو

که، A و B به ترتیب مجموعه های فازی هستند، q, p و r پارامترهای نتیجه مدل هستند که در مرحله آموزش ارزیابی می شوند. ساختار ANFIS شامل ۵ لایه می باشد. لایه اول یا لایه ورودی، در این لایه ورودی ها از توابع عضویت مختلف عبور کرده و درجه عضویت گره های ورودی به بازه های مختلف فازی با استفاده از توابع عضویت مشخص می شود. توابع عضویت انواع مختلفی دارد که می توان به توابع مثلثی، دوزنقه ای، گوسی و تابع زنگوله ای اشاره کرد. در این پژوهش از تابع عضویت گوسی استفاده شده است. در لایه دوم یا گره قانده که در آن مقادیر ورودی به هر گره در هم ضرب شده و حاصل که وزن قانون ها می باشد به دست می آید. در این لایه از عملگر "AND" استفاده شده است. لایه سوم، گره های این لایه وزن قانون ها را نرمال سازی می کنند. گره های نتیجه که لایه قوانین نامیده می شود و در این لایه قانون ها به دست می آیند. لایه پنجم آخرین لایه شبکه است شامل یک تک گره بوده که با جمع کردن همه مقادیر ورودی به آن، خروجی کلی سیستم را محاسبه می کند. این لایه نتایج هر قانون فازی را طی فرآیند غیرفازی سازی به خروجی غیرفازی تغییر شکل می دهد.

۲-۳-۲- مدل حداقل مربعات میانگین رگرسیون بردار پشتیبان

(Suykens and Vandewalle 1999) مدل حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان (LS-SVR) را معرفی کردند.

که، α_i ضریب لاگرانژ است. بر اساس شرایط کان - تاکر (Karush - Kuhn- Tucker) مدل LS-SVR به منظور تابع تقریب به صورت رابطه (۸) نوشته می شود (Kuhn et al. 1951).

خروجی آن به صورت تابع می باشد، در نتیجه بهترین نوع تابع خروجی، خطی مرتبه اول انتخاب شد. بقیه پارامترهای بهینه در جدول (۲) قابل مشاهده می باشند. مقادیر بهینه پارامترهای LS-SVR، هسته گاوسی در روش LS-SVR دارای دو پارامتر σ^2 و γ است که مقدار بهینه آن به ترتیب برابر با ۵/۳۶۵ و ۱۳۶/۰۳ به دست آمد.

جدول ۲- پارامترهای بهینه شده مدل ANFIS
Table 2 Optimized parameters of ANFIS

Model	Parameter	value
ANFIS	Fuzzy structure	Sugeno-type
	Initial FIS for training	Genfis3
	The type of membership functions	Gaussian
	The membership function of output	Linear
	Optimization method	Hybrid
	Number of fuzzy rules	10
	The maximum number of epochs	2000

۳-۲- مقایسه مدل ها و الگوهای استفاده شده

همان طور که پیشتر نیز ذکر شد برای بررسی عملکرد مدل ها از دو الگوی ورودی استفاده شد. الگوی اول پارامترهای بی بعد را شامل می شد که شامل چهار پارامتر عدد شیلدز، شیلدز بحرانی، نسبت عمق جریان به قطر پایه D ، نسبت عمق آبشستگی به قطر پایه بود. الگوی دوم شامل پارامترهایی بود که از پارامترهای دارای بعد برای تخمین عمق آب شستگی استفاده شد که در این پژوهش از پارامترهای عمق جریان، سرعت جریان، قطر پایه و قطر ذرات بستر استفاده شد. نتایج اولیه به صورت معیارهای ارزیابی خطا در هر الگو و توسط دو مدل یادگیری ماشین LS-SVR و ANFIS ارزیابی شد که در جدول (۳) ارائه شده است. مطابق این جدول مشخص است که عملکرد الگوی دوم در تخمین عمق آبشستگی بهتر از الگوی اول بوده است. همچنین نتایج نشان می دهد که عملکرد LSSVR نسبت به ANFIS بهتر بوده است؛ به طوری که در الگوی بی بعد معیارهای ارزیابی خطای $MAPE$ ، $RMSE$ و NSE در داده های آزمون و در مدل LSSVR به ترتیب برابر ۳۸/۰۳، ۸۴/۴۶ و ۰/۶۲ mm بوده است. در حالی که این مقادیر برای داده های ANFIS به ترتیب برابر ۵۰/۳۸، ۶۱/۸۹ و

$$K(\chi, \chi_k) = \exp\left(-\frac{\|\chi - \chi_k\|^2}{\sigma^2}\right) \quad (9)$$

در این پژوهش از تابع کرنل پایه شعاعی^۱ برای حل تابع تقریب رگرسیون غیرخطی یعنی رابطه (۸) استفاده شد.

۲-۴- معیارهای ارزیابی خطا

برای ارزیابی الگوها معیارهای ارزیابی برای سنجش الگوها از خطای جذر میانگین مربعات نرمال شده ($RMSE$) به صورت رابطه (۱۰)، درصد میانگین مطلق خطا ($MAPE$) به صورت رابطه (۱۱) و ضریب نش - ساتکلیف (NSE) به صورت رابطه (۱۲) استفاده شد. هر چقدر مقدار $RMSE$ و $MAPE$ به صفر نزدیک تر باشند و ضریب NSE به یک نزدیکتر باشد، کارایی مدل موردنظر نیز بهتر است (Mobayen et al. 2023).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_p - x_o)^2}{n}} \quad (10)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{x_o - x_p}{x_o} \right|}{n} \times 100 \quad (11)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_p - x_o)^2}{\sum_{i=1}^n (x_o - \bar{x}_o)^2} \quad (12)$$

که، X_p و X_o به ترتیب مقدار داده های واقعی و شبیه سازی شده هستند.

۳- یافته ها و بحث

در این بخش ابتدا نتایج مدل ها آورده شده است و سپس در ادامه بحث روی نتایج به دست آمده صورت گرفته است.

۳-۱- پارامترهای استفاده شده در مدل های LS-SVR و ANFIS

هر یک از مدل های مورد استفاده نیاز به تنظیم برخی پارامترهای خود می باشند. مقادیر تنظیمی این مدل ها در واقع ساختار مدل را تکمیل و موجب عملکرد بهتر مدل ها در پیش بینی می شوند. ساختار مناسب مدل ANFIS و مقادیر بهینه برای پارامترهای آن توسط آموزش مدل تعیین شد. این مقادیر در جدول (۲) قابل مشاهده می باشد. مطابق جدول تابع عضویت گوسی مناسب ترین تابع عضویت فازی انتخاب. از آنجایی که در ANFIS از نوع فازی سوگنو استفاده شده و

¹Radial basis kernel function

است. از این رو می توان نتیجه گرفت که الگوی با بعد دارای دقت تخمین بهتری نسبت به الگوی بی بعد است. همچنین عملکرد مدل LS-SVR دارای دقت تخمین بهتری نسبت به ANFIS می باشد.

و ۰/۲۹ mm بوده است. در الگوی با بعد نیز معیارهای ارزیابی خطای MAPE، RMSE و NSE در داده های آزمون و در مدل LSSVR به ترتیب برابر ۳۸/۹۷، ۲۸/۶۲ و ۰/۶۷ mm به دست آمده است که نسبت به الگوی اول دارای دقت بالاتری

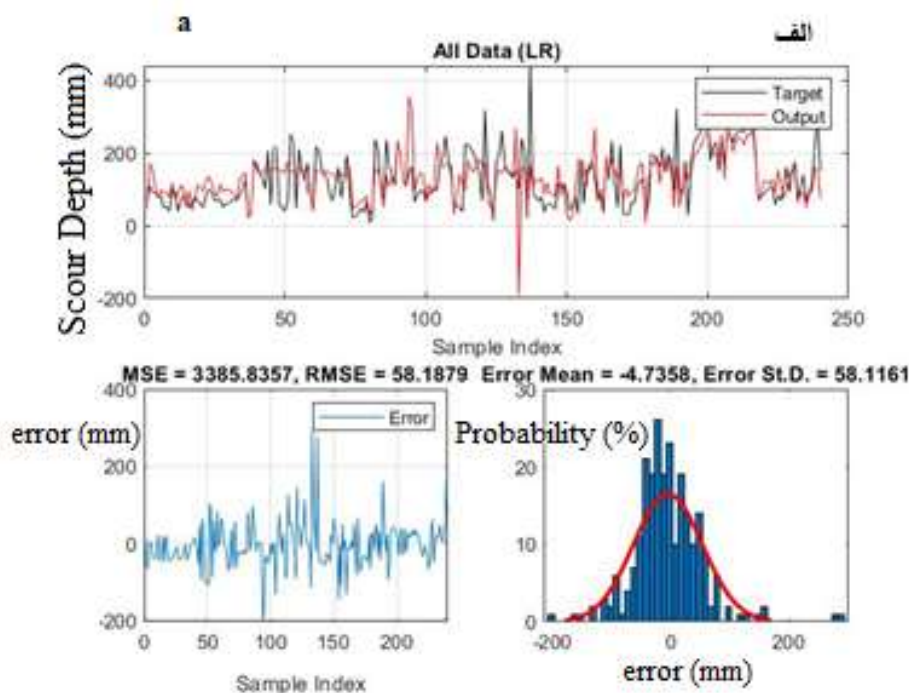
جدول ۳- معیارهای ارزیابی خطا برای داده های آموزش و آزمون

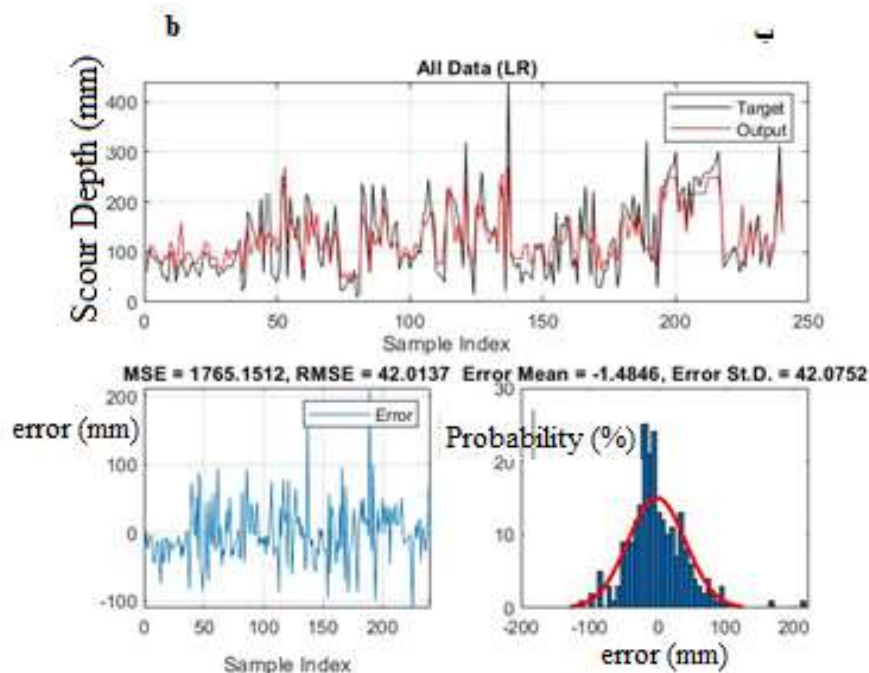
Table 3 Error evaluation criteria for training and test data

Input Pattern Parameters	Model	MAPE		RMSE		NSE	
		Training	Test	Training	Test	Training	Test
Dimensionless	LS-SVR	25.71	38.03	34.65	46.84	0.79	0.62
	ANFIS	36.9	50.38	52.38	61.89	0.52	0.29
With Dimension	LS-SVR	20.21	38.97	32.65	28.62	0.81	0.67
	ANFIS	32.13	38.72	43.44	49.45	0.66	0.47

در برخی نقاط به بین ۳۰۰ تا ۲۰۰ mm - رسیده است. در حالی که مقدار خطا برای مدل LS-SVR بین ۱۵۰ تا ۱۰۰ mm - است. مقدار انحراف معیار مدل ANFIS در مقایسه با مدل LS-SVR بیش تر است (به ترتیب ۵۸/۱۱ و ۴۲/۱۱). بنابراین برای پیش بینی با استفاده از پارامترهای بی بعد مدل LS-SVR دقت بیش تری داشته است.

نمودار داده های مشاهداتی و شبیه سازی شده برای هر دو الگو در شکل های (۲) و (۳) نشان داده شده است. برای حالت پارامترهای بی بعد (شکل ۳) مشخص است که مدل ANFIS تخمین داده ها را با خطای بیش تری انجام داده است. این ضعف بخصوص در نقاطی مانند نقاط اوج یا قعر بیش تر مشاهده می شود و با توجه به نمودار خطا، خطای حاصل از پیش بینی



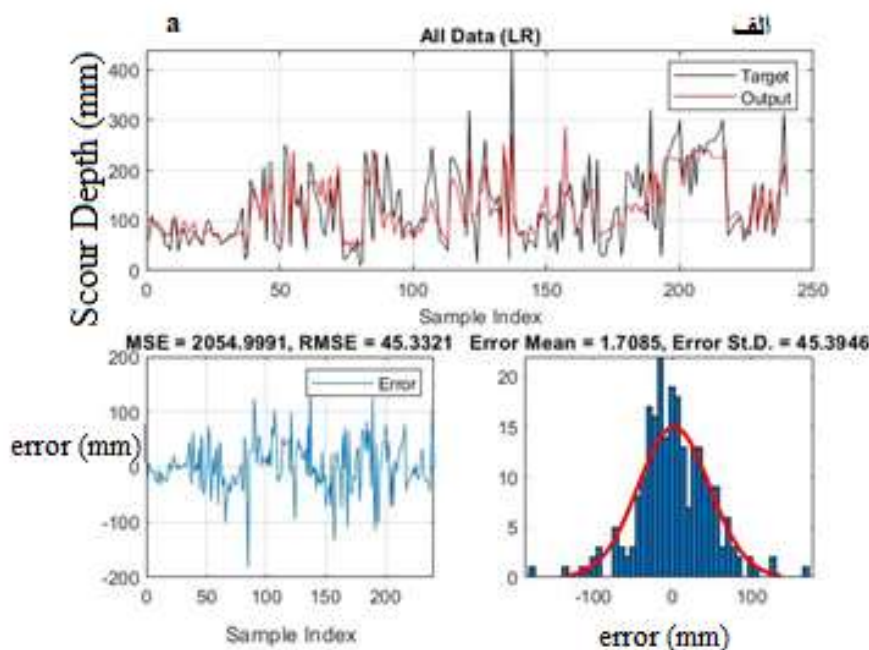


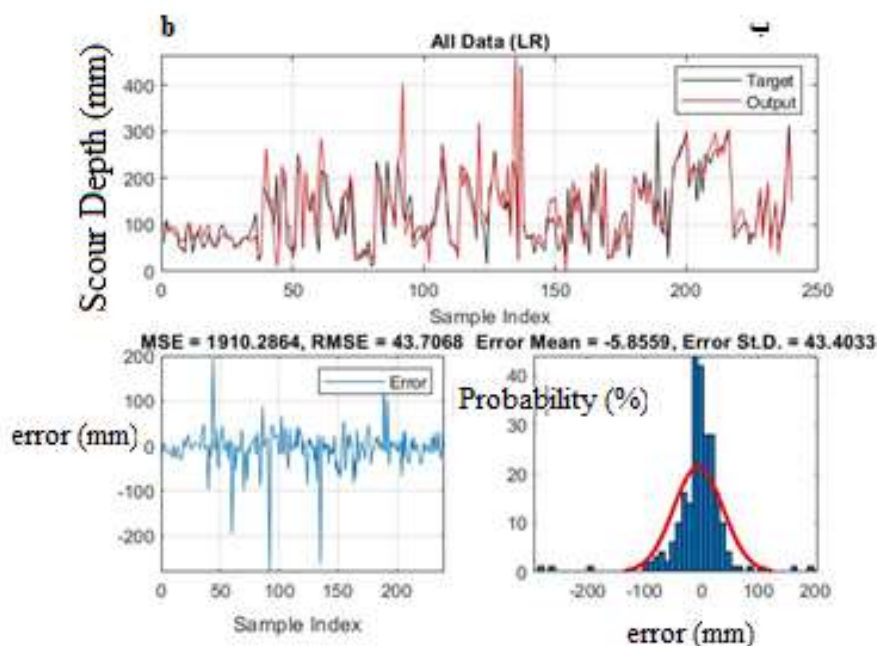
شکل ۲- نمودار داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، الگو پارامترهای بی بعد الف) ANFIS ب) LS-SVR

Fig. 3 Diagram of observed and simulated data; Horizontal axis: number of data, vertical axis, scour depth - pattern of dimensional parameters a) ANFIS b) LS-SVR

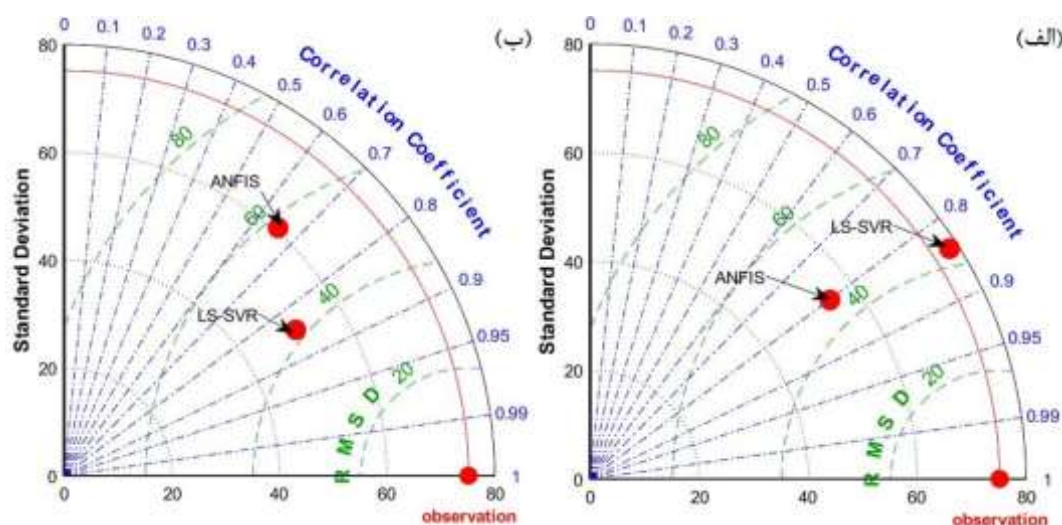
زمانی نیز نشان می‌دهد در برخی نقاط فاصله بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با ANFIS بیشتر است، درحالی‌که این ضعف‌ها در مدل LS-SVR تا حدودی پوشش داده شده است.

برای حالت استفاده از پارامترهای با بعد (شکل ۳)، نتایج هر دو مدل نزدیک‌تر هستند. مدل LS-SVR با استفاده از پارامترهای با بعد پیش‌بینی را با خطای ۴۲/۰۱ انجام داده است، در مقابل مدل ANFIS با نتایج نزدیک‌تری (RMSE=45.32) پیش‌بینی را انجام داده است. شکل سری





شکل ۳- نمودار داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، الگو پارامترهای با بعد: الف) ANFIS ب) LS-SVR
Fig. 3 diagram of observed and simulated data pattern of dimensional parameters: a) ANFIS b) LS-SVR



شکل ۴- دیاگرام تیلور برای الگوهای ورودی: الف- با بعد و ب- بی بعد
Fig. 4 Taylor diagram for input patterns: a) dimensional and b) dimensionless parameters

برای هر دو مدل بین ۰/۸ تا ۰/۹ است و این مقدار برای مدل LS-SVR کمی بیشتر از مدل ANFIS است. از طرف دیگر در این الگو، موقعیت مکانی داده‌های مدل LS-SVR به موقعیت داده‌های مشاهداتی نزدیک‌تر است، از این رو در این الگو، مدل LS-SVR از دقت بیشتری نسبت به مدل ANFIS در تخمین عمق آبشستگی با استفاده از پارامترهای با بعد برخوردار است. در شکل مربوط به پارامترهای بی بعد نیز ضریب

مقایسه مدل‌ها با استفاده از دیاگرام تیلور انجام و نتایج آن در شکل (۴) نشان داده است. این دیاگرام از آن جهت حائز اهمیت است که مقایسه مدل‌ها را با در نظر گرفتن سه معیار انحراف معیار (محور عمودی)، انحراف جذر میانگین مربعات (RMSD) (کمان‌های داخل ربع دایره) و ضریب همبستگی (کمان ربع دایره) انجام می‌دهد. مطابق شکل‌های مربوطه، ضریب همبستگی بین کل داده‌ها در الگو با پارامترهای با بعد

مدل‌ها نشان داد که مدل‌های محاسبات نرم در مقایسه با مدل‌های سنتی مانند مدل‌های تجربی HEC-Mississippi، 18 و Laursen and Toch که در تحقیق (Jafari Bavi) (2018) Olyaei et al. استفاده شده است، از دقت بیشتری برخوردار است. نتایج این پژوهش نشان داد که دقت مدل‌های یادگیری ماشین به کار رفته در حالت استفاده از پارامترهای با بعد به مراتب بالاتر از حالت استفاده از پارامترهای بی بعد است. این نتایج همسو با نتایج تحقیق Ghazanfari Hashemi and Etemad-Shahidi (2012) می‌باشد. همچنین Majedi Asl and Valizadeh (2020) در تحقیق خود نشان دادند که استفاده از پارامترهای با بعد منجر به تخمین بهتری از عمق آبشستگی اطراف پایه پل‌ها در مقایسه با استفاده از پارامترهای بی بعد با به کار بردن الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌شود. نکته‌ای دیگری که در این پژوهش حائز اهمیت است، این است که نتایج دو الگو به یکدیگر نزدیک بود. این بدین معنی است که مدل‌های یادگیری ماشین در شرایط کمبود داده نیز عملکرد مناسبی دارند، که این یک مزیت است.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، عمق آب شستگی اطراف پایه پل قائم با استفاده از دو مدل هوشمند ANFIS و LS-SVR تخمین زده شد. برای این منظور مقادیر پارامترهای مؤثر بر عمق آبشستگی شامل سرعت جریان، سرعت بحرانی، عمق جریان، قطر متوسط ذرات و قطر پایه پل‌ها از پژوهش‌های قبلی استخراج و دو الگوی ورودی شامل پارامترهای بدون بعد و پارامترهای با بعد، تدوین شد. تعداد کل داده‌های مورد استفاده ۲۴۰ نمونه بود که ۷۰٪ آن برای آموزش و باقی‌مانده داده‌ها نیز به عنوان داده‌های آزمون در نظر گرفته شدند. مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش به صورت زیر قابل بیان می‌باشد.

۱- در مدل ANFIS تابع عضویت گوسی مناسب‌ترین تابع عضویت فازی و بهترین نوع تابع خروجی، خطی مرتبه اول انتخاب شد.

۲- پارامترهای با بعد تأثیر بیشتری بر میزان عمق آب شستگی دارند. دقت هر دو مدل در پیش‌بینی عمق آب شستگی اطراف پایه پل با استفاده از پارامترهای با بعد در مقایسه با پارامترهای بی‌بعد بیشتر است.

همبستگی برای مدل LS-SVR در حدود ۰/۸۵ است. حال آنکه این مقدار برای مدل ANFIS حدود ۰/۶۵ است. همچنین مقدار RMSD برای مدل LS-SVR و ANFIS به ترتیب برابر ۴۰ و ۶۰ mm است. بنابراین با وجود اینکه در این الگو دقت مدل‌ها کمتر می‌باشد، اما دقت مدل LS-SVR بیش‌تر از مدل ANFIS در تخمین عمق آبشستگی اطراف پایه پل با استفاده از پارامترهای بدون بعد است.

مطابق شکل (۳-الف)، در سناریوی اول از یک تیغه آب‌شکن T شکل استفاده شده است. مطابق شکل (۳-الف) مشاهده شد که وضعیت آبشستگی در نوک تیغه به میزان حداکثر ۳۶ mm بوده و ۱۳ mm رسوب‌گذاری به صورت موضعی در مجاورت نوک تیغه رخ داده است. کانتور سرعت در شکل (۴-الف)، نشان‌دهنده کاهش میزان سرعت در ناحیه آب‌شکن و افزایش میزان سرعت در ناحیه فوقانی آب‌شکن است. همچنین یکنواختی کانتور سرعت در قسمت مربوط به آب‌شکن برای این سناریو منجر به یکنواختی رسوب (بدون ایجاد تلماسه یا فرسایش بالا) در ناحیه تحتانی می‌شود.

در سناریوی دوم وضعیت آبشستگی در نوک تیغه به میزان حداکثر ۱۱ mm است (شکل ۳-ب). از طرفی دیگر ۱۳ mm رسوب‌گذاری به صورت موضعی در کناره نوک تیغه آب‌شکن I شکل در وسط کانال رخ داده است. کانتور سرعت نشان‌دهنده کاهش سرعت در ناحیه آب‌شکن I شکل و افزایش سرعت در ناحیه فوقانی آب‌شکن است (شکل ۴-ب). کانتور سرعت در قسمت تیغه آب‌شکن تغییرات بسیاری دارد که این امر منجر به ایجاد ناحیه فرسایشی و تلماسه‌ای در نزدیکی یکدیگر می‌شود. به طوری که کاربرد آب‌شکن منجر به کاهش سرعت جریان در قبل و بعد از آب‌شکن شده است. دلیل آن را می‌توان به صورت مانع عمل کردن آب‌شکن دانست که منجر به کاهش میزان فرسایش در آن ناحیه می‌شود. عکس این موضوع در دیواره بالایی نیز صادق بوده و عدم وجود آب‌شکن در آن قسمت باعث افزایش سرعت جریان و به تبع آن افزایش آبشستگی می‌شود.

در پژوهش حاضر تخمین عمق آبشستگی پایه پل‌ها با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین صورت گرفت. دو الگو برای ورودی مدل‌ها در نظر گرفته شد، که در الگو اول پارامترهای باعد و در الگو دوم پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر عمق آبشستگی در نظر گرفته شد. معیارهای ارزیابی خطای به دست آمده از

تضاد منافع نویسندگان

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

۳- مدل LS-SVR دقت بالاتری نسبت به مدل ANFIS در پیش‌بینی عمق آب شستگی اطراف پایه‌های پل دارد.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها حسب درخواست، از طرف نویسنده مسئول از طریق ایمیل قابل ارسال می‌باشد.

References

- Azar, N. A., Milan, S. G., & Kayhomayoon, Z. (2021). The prediction of longitudinal dispersion coefficient in natural streams using LS-SVM and ANFIS optimized by Harris hawk optimization algorithm. *J. Contamin. Hydrol.*, 240, 103781. DOI: [10.1016/j.jconhyd.2021.103781](https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103781).
- Azamathulla, H. M. (2012). Gene expression programming for prediction of scour depth downstream of sills. *J. Hydrol.*, 460, 156–159. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2012.06.034](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.034).
- Batani, S. M., Borghei, S. M., & Jeng, D. S. (2007). Neural Network and neurofuzzy assessments for scour depth around bridge piers. *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 20(3), 401–414. DOI: [10.1016/j.engappai.2006.06.012](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2006.06.012).
- Chou, J. S., & Nguyen, N. M. (2022). Scour depth prediction at bridge piers using metaheuristics-optimized stacking system. *Autom. Construct.*, 140, 104297. DOI: [10.1016/j.autcon.2022.104297](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104297).
- Dargahi, B. (1990). Controlling mechanism of local scour. *J. Hydraul. Eng.*, 116, 1197–1214. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1990\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:1197-1214).
- Dodaro, G., Tafarojnoruz, A., Calomino, F., Gaudio, R., Stefanucci, F., Adduce, C., & Sciortino, G. (2014). An experimental and numerical study on the spatial and temporal evolution of a scour hole downstream of a rigid bed. In: *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, RIVER FLOW 2014*. Taylor and Francis Group plc, Lausanne, Switzerland, pp. 1415–1422. DOI: [10.1201/b17133-189](https://doi.org/10.1201/b17133-189).
- Dodaro, G., Tafarojnoruz, A., Sciortino, G., Adduce, C., Calomino, F., & Roberto, G. (2016). Modified Einstein sediment transport method to simulate the local scour evolution downstream of a rigid bed. *J. Hydraul. Eng.*, 142, 4016041. DOI: [10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001179](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001179).
- Ettema, R., Melville, B. W., & Barkdoll, B. (1998). Scale effect of pier-scour experiments. *J. Hydraul. Eng.*, 124, 639–642. DOI: [10.1061/\(asce\)0733-9429\(1998\)124:6\(639\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(1998)124:6(639)).
- Ettema, R., Constantinescu, G., & Melville, B. W. (2017). Flow-field complexity and design estimation of pier-scour depth: Sixty years since Laursen and Toch. *J. Hydraul. Eng.*, 143(9), 03117006. DOI: [10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001330](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001330).
- Ghafari, H., & Zomorodian, M. A. (2019). Investigating the local scour around group bridge piers in cohesive Soils. *Journal of Water and Soil Science*, 23(4), 109–123. [In Persian]
- Ghordoyee Milan, S., Aryaazar, N., Javadi, S., & Razdar, B. (2020). Simulation of groundwater head using LS-SVM and comparison with ANN and MLR. *Hydrogeol.*, 5(1), 118–133. [In Persian]
- Jafari Babil Olyaei, A., hassanzadeh, Y., Alami, M., and kardan, N. (2018). Estimation of Bridge Pier Scour using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Optimized with Imperialist competitive algorithm. *Iran. J. Irrig. Drain.*, 12(4), 872–884.
- Jang, J. S., (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, 23(3), 665–685. DOI: [10.1109/21.256541](https://doi.org/10.1109/21.256541).
- Johnson, P. A., (1992). Reliability-based pier scour engineering. *J. Hydraul. Eng.*, 118, 1344–1358. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1992\)118:10\(1344\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:10(1344)).
- Karami Moghadam, M., & Sabzevari, T. (2018). Modification of Bridge Piers Scour Depth Equations using Genetic Algorithm. *Environ.*

- Water Eng.*, 4(2), 101-114. DOI: [10.22034/jewe.2018.112907.1223](https://doi.org/10.22034/jewe.2018.112907.1223).
- Kayhomayoon, Z., Naghizadeh, F., Malekpoor, M., Arya Azar, N., Ball, J., & Ghordoyee Milan, S. (2022). Prediction of evaporation from dam reservoirs under climate change using soft computing techniques. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 30(10), 27912. DOI: [10.1007/s11356-022-23899-5](https://doi.org/10.1007/s11356-022-23899-5).
- Kirkil, G., Constantinescu, S. G., & Ettema, R. (2008). Coherent structures in the flow field around a circular cylinder with scour hole. *J. Hydraul. Eng.*, 134, 572-587. DOI: [10.1061/\(asce\)0733-9429\(2008\)134:5\(572\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2008)134:5(572)).
- Koopaei, K. B., & Valentine, E.M. (2003). Bridge Pier Scour in Self Formed Laboratory Channels; Technical Report; University of Glasgow: Glasgow, UK.
- Kuhn, H. W., & Tucker, A. W. (1951). Nonlinear programming. *Proceedings of 2nd Berkeley Symposium. Berkeley: University of California Press*. pp. 481-492. MR 0047303.
- Majedi Asl, M., & Valizadeh, S. (2019). Application of SVM algorithm in predicting vertical pier scour depth. *J. Water Soil Sci.*, 23(4), 165-181. [In Persian]
- Mobayen, R., Najafzadeh, M., & Farrahi-Moghaddam, K. (2023). Evaluation of regression-based soft computing techniques for estimating energy loss in gabion spillways. *Environ. Water Eng.*, 9(2), 241-255. [In Persian]. DOI: [10.22034/ewe.2022.329153.1724](https://doi.org/10.22034/ewe.2022.329153.1724).
- Najafzadeh, M., & Azamathulla, H. M. (2015). Neuro-fuzzy GMDH to predict the scour pile groups due to waves. *J. Comput. Civil Eng.*, 29(5), 04014068. DOI: [10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000376](https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000376).



Environment and Water Engineering

Homepage: www.jewe.ir



ISSN: 2476-3683

Research Paper

Evaluating Effect of Various Planting Densities on Some Morphophysiological and Biochemical Characteristics of Sport Turfgrass under Low Water Stress

Mehdi Rahmanifard¹, Elham Danaee^{2*} and Ahmad Khaligi³

¹M.Sc. Alumni, Department of Horticulture Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

²Assist. Professor, Department of Horticulture Sciences, Garmsar Branch, Islamic Azad University, Garmsar, Iran

³Professor, Department of Horticulture Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Article information

Received: June 13, 2023

Revised: July 19, 2023

Accepted: August 10, 2023

Keywords:

Field Capacity

Growth Indicators

Proline

Total Carbohydrates

*Corresponding author:

e.danaee@iau-garmsar.ac.ir



Abstract

This research was conducted to investigate the effect of planting densities on some morphophysiological characteristics of sports turfgrass under low water stress conditions. The experiment was carried out in the form of split plots, based on a randomized complete block design with three replications. Treatments included low water stress at three levels of 90 (control), 60 and 30% of field capacity (FC), and planting density of 20, 30, and 40 g seed/m². Seeds were planted according to the desired densities in plots measuring 2×3 m². Two months after planting, low water stress was applied for three weeks. The results showed that the treatments had a significant effect on the evaluated traits. The highest fresh and dry weight of the aerial part, leaf length, and total chlorophyll content was observed in 90% FC and the density of 20 g seed/m² treatment. The highest root fresh and dry weight, root volume, and total carbohydrates were obtained in 30% FC and density of 20 g seed/m² treatment. Moreover, the highest proline content was in 30% FC and density of 40 g seed/m² treatment. According to the results, the planting density of 20 g seed/m² and 90% FC had a more favorable effect on the vegetative and physiological indicators of sport turfgrass.

How to cite this paper: Rahmanifard, M., Danaee, E. and Khaligi, A. (2024). Evaluating effect of planting densities on some morphophysiological and biochemical characteristics of sport turfgrass under low water stress. *Environ. Water Eng.*, 10(1), 109-120. <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.402083.1870> [In Persian]



© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The grass is one of the primary and necessary elements of green cover in most gardens and parks and the field of green space designs. In the current situation, one of the main problems in maintaining lawns and developing green space is the need for more available water sources and the workforce cost for daily irrigation. Low water stress reduces the photosynthetic capacity by decreasing the synthesis of ribulose biphosphate enzyme, reducing the activity of Rubisco, and preventing plant growth by closing the stomata. It also causes an increase in reactive oxygen species and as a result, the occurrence of oxidative stress in the plant, which leads to the damage of proteins, lipids, carbohydrates, and nucleic acids. Plant density is a critical factor affecting the quantity and quality of plants. The optimal seed planting density per unit area is essential to balance plant and soil moisture. Increasing the plant density too much causes the soil moisture to be drained and as a result, the plant faces a lack of water and its performance decreases. As a result, the desired density per unit area in addition to the optimal use of environmental resources such as air, light, and soil to the extent, can also reduce the harmful effects of drought stress. This research was carried out to determine the appropriate planting density to improve sports turfgrass's growth indicators and physiological characteristics under water stress conditions.

Material and Methods

To investigate the effect of planting density (20, 30 and 40 g Seed/m²) and low water stress (90

(control), 30 and 60% field capacity) on growth indicators and physiological characteristics of sport turfgrass. The split plots experiment was carried out as a randomized complete block design with three replications. The seeds were sown in April in plots measuring 3×2 m², and irrigation was done regularly until they were fully established. After about two months, the stress treatments were applied for three weeks by weight method. To determine field capacity, first, some of the pots were randomly selected, saturated with water, and left for the water to drain out from the bottom. The weight of each pot was measured regularly until a stable value was reached. Then, the soil samples were removed to record their fresh weight (WW) and dry weight (DW) after placing them in an oven at 72°C for 24 hours. Thus, the FC value was obtained: $FC = (WW - DW / DW) \times 100$. The traits include the fresh and dry weight of the aerial part and root, root volume, leaf length, total chlorophyll, total carbohydrate and proline were measured.

Results

The results showed that the highest fresh and dry weight of the aerial parts in the treatment of 90% field capacity (control) and the density of 20 g Seed/m² (3.75-4.6 g) and the lowest fresh and dry weight of the aerial parts was obtained in 30% field capacity and density g Seed/m² 40 (2.8-2.18 g) treatment. The highest fresh and dry weight of the root was also in the treatment of 30% field capacity and density of 20 g Seed/m² (1.70-1/86 g) and the lowest fresh and dry weight of the root was in 90% field capacity and density of 40 g Seed/m² (0.76-0.70 g) treatment.

Table 1 The effect of low water stress and planting density on growth indicators of sport turfgrass

Field Capacity (%)	Plant density (g Seed /m ²)	SFW (g)	SDW (g)	RFW (g)	RDW (g)	Root Volume (ml)	Leaf Length (mm)
90 (Control)	20	4.6 ^a	3.75 ^a	0.93 ^f	0.84 ^f	7.9 ^{de}	7.7 ^a
	30	4.3 ^b	3.58 ^b	0.90 ^f	0.82 ^f	7.9 ^{de}	7.5 ^a
	40	4.2 ^c	3.42 ^c	0.76 ^g	0.70 ^g	7.7 ^e	6.9 ^b
60	20	4.1 ^c	3.21 ^d	1.63 ^b	1.52 ^b	8.6 ^b	6.8 ^{bc}
	30	3.8 ^d	3.15 ^e	1.36 ^c	1.23 ^d	8.3 ^c	6.3 ^d
	40	3.4 ^e	3.11 ^e	0.96 ^e	0.87 ^e	7.9 ^{de}	6.7 ^{bc}
30	20	3.4 ^e	2.85 ^f	1.86 ^a	1.70 ^a	8.8 ^a	6.5 ^c
	30	3.1 ^f	2.52 ^g	1.43 ^{bc}	1.30 ^c	8.4 ^{bc}	6.1 ^d
	40	2.8 ^g	2.18 ^h	1.06 ^d	0.90 ^d	8.0 ^d	5.6 ^e

The same letters indicate no significant difference at the level of $P \leq 0.05$; SFW: Shoot fresh weighth, SDW: Shoot dry weight, RFW: Root fresh weight; RDW: Root dry weight

The maximum leaf length was also (7.7 mm) in the treatment of 90% field capacity and density of 20 g Seed/m², which was not significantly different from the treatment of 90% field capacity and density of 30 g Seed/m², and the lowest leaf length (5.6 mm) was in 30% field capacity and 40g seed/m² treatment (Table 1). The highest total chlorophyll with 18.8 mg/g FW was in the treatment of 90% field capacity and density of 20 g Seed/m² and the lowest with 16.5 mg/g FW was in the treatment of 30% field capacity and density of 20 g Seed/m², the treatment of 30% field capacity and density of 30 g Seed/m² had no significant difference. In addition, the highest total carbohydrate (1.2 mg/g FW) was in the treatment of 30% field capacity and density of 20 g Seed/m² and the lowest (0.75 mg/g FW) was obtained in the treatment 90% field capacity and the density of 40 g seed/m². The highest and lowest proline content was obtained with 0.76 and 0.52 mg/g FW, respectively, in the treatment of 30% field capacity and 40 g Seed/m² density and 90% field capacity treatment and 20 g Seed/m² density (Fig. 1).

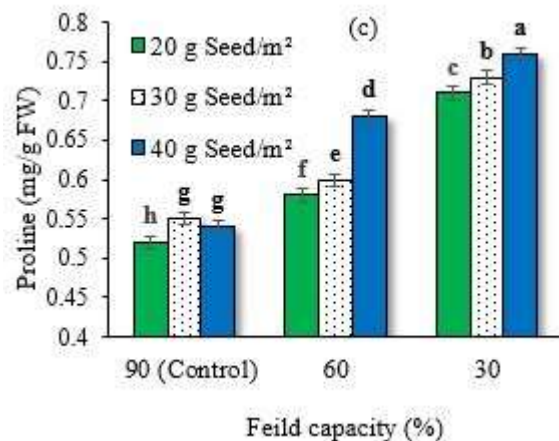
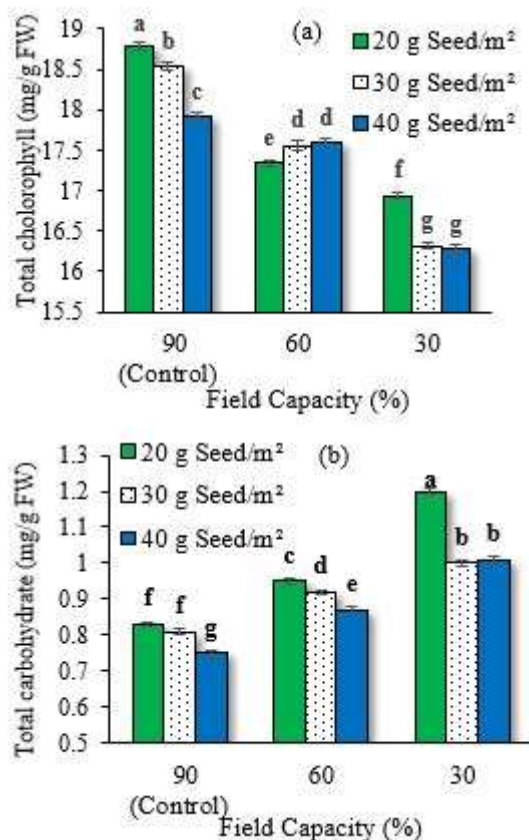


Fig. 1 The effect of low water stress and planting density on: a) total chlorophyll, b) carbohydrate and c) proline content of sport turfgrass

Conclusions

According to the importance of the issue of dehydration and the selection of appropriate planting density, increasing the low water stress and planting density caused a decrease in morphophysiological and biochemical traits in sports grass. Thus, the planting density of 20 g Seed/m² and irrigation at the level of 90% field capacity had a favorable effect on the vegetative and physiological indicators of sports turfgrass.

Data Availability

The data obtained from the experiments in this study are presented in the paper.

Conflicts of interest

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



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir

مقاله پژوهشی

ارزیابی اثر تراکم‌های مختلف کاشت بر برخی خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی چمن ورزشی در شرایط تنش کم‌آبی

مهدی رحمانی فرد^۱، الهام دانائی^{۲*} و احمد خلیقی^۳

^۱دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم باغبانی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲استادیار، گروه علوم باغبانی، واحد گرمسار، دانشگاه آزاد اسلامی، گرمسار، ایران

^۳استاد، گروه علوم باغبانی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ دریافت: [۱۴۰۲/۰۳/۲۳]

تاریخ بازنگری: [۱۴۰۲/۰۴/۲۸]

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۲/۰۵/۱۹]

واژه‌های کلیدی:

پرولین
شاخص‌های رشدی
ظرفیت زراعی
کربوهیدرات کل

*نویسنده مسئول:

e.danaee@iau-garmsar.ac.ir



این پژوهش به منظور بررسی اثر تراکم‌های مختلف کاشت بر برخی خصوصیات مورفوفیزیولوژیک چمن ورزشی در شرایط تنش کم‌آبی انجام شد. آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارها شامل تنش کم‌آبی در سه سطح ۹۰ (شاهد)، ۶۰ و ۳۰٪ ظرفیت زراعی و تراکم کاشت ۲۰، ۳۰ و ۴۰ g Seed/m² بود. بذرها با توجه به تراکم‌های مورد نظر در کرت‌هایی به ابعاد ۲×۳ m² کشت شدند. دو ماه پس از کاشت، تنش کم‌آبی به مدت ۳ هفته اعمال شد. نتایج نشان داد که تیمارها تأثیر معنی‌داری بر صفات مورد ارزیابی داشتند. بیش‌ترین وزن تر و خشک اندام هوایی، طول برگ و محتوای کلروفیل کل در تیمار ۹۰٪ ظرفیت زراعی و تراکم ۲۰ g Seed/m² مشاهده شد. در حالیکه بیش‌ترین وزن تر و خشک ریشه، حجم ریشه و کربوهیدرات کل در تیمار ۳۰٪ ظرفیت زراعی و تراکم ۲۰ g Seed/m² به دست آمد. همچنین بیش‌ترین میزان پرولین در تیمار ۳۰٪ ظرفیت زراعی و تراکم ۴۰ g Seed/m² بود. بنابراین با توجه به نتایج، تراکم کاشت ۲۰ g Seed/m² و آبیاری در سطح ۹۰٪ ظرفیت زراعی تأثیر مطلوب‌تری بر شاخص‌های رویشی و فیزیولوژیک چمن ورزشی داشت.

نحوه استناد به این مقاله:

رحمانی فرد، مهدی، دانائی، الهام & خلیقی، احمد. (۱۴۰۳). ارزیابی اثر تراکم‌های مختلف کاشت بر برخی خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی چمن ورزشی در شرایط تنش کم‌آبی. محیط زیست و مهندسی آب. 10(1) 120-109

<https://doi.org/10.22034/ewe.2023.402083.1870>



۱- مقدمه

نیز تنش کم‌آبی (۵۰٪ ظرفیت زراعی) وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، محتوای کلروفیل کل و درصد شاخص ثبات غشاء سلول را کاهش داد، در حالیکه میزان پرولین گیاه را افزایش داد (Alhverdzadeh and Danaee 2023).

تراکم گیاهی از عوامل مهمی است که بر کمیت و کیفیت گیاهان تأثیرگذار است، اگر میزان تراکم بوته بیش از حد مطلوب باشد، عوامل محیطی به اندازه کافی در اختیار گیاه قرار نمی‌گیرد و بالعکس چنانچه تراکم بوته کمتر از حد مطلوب باشد از امکانات محیطی موجود به نحو مطلوب استفاده نمی‌شود (Villalobos et al. 2016). به‌منظور ایجاد تعادل بین گیاه و رطوبت خاک تراکم مطلوب کاشت بذر در واحد سطح اهمیت بالایی دارد. افزایش تراکم بوته بیش از حد سبب می‌شود که رطوبت خاک تخلیه شود و در نتیجه گیاه با کمبود رطوبت مواجه شده و عملکرد آن کاهش یابد در نتیجه تراکم مطلوب در واحد سطح علاوه بر استفاده بهینه از منابع محیطی از جمله هوا، نور و خاک تا اندازه‌ای اثرات زیان‌بار تنش خشکی را نیز می‌تواند کاهش دهد (Emadi et al. 2012). افزایش تراکم کاشت ($4 \text{ و } 8 \text{ Plant/m}^2$) در گیاه مرزه سنبله‌ای (*Satureja spicigera* (K.Koch) Boiss) موجب کاهش وزن و عملکرد تر و خشک اندام هوایی، سطح پوشش تاج و عملکرد اسانس گردید (Yousefi et al. 2023). همچنین افزایش تراکم کاشت (50 Plant/m^2) در گیاه شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum* L.) میزان کربوهیدرات کل، فنل، فلاونوئید و کلروفیل کل را کاهش داد (Aminifard and Ghaderi 2020). در چمن (*Tripidium ravennae* (L.) H. Scholz) نیز افزایش تراکم کاشت (2000 Plant/ha) تعداد ساقه زایشی در بوته، قطر ساقه و میزان ساکاروز گیاه را کاهش داد در حالیکه عملکرد زیست توده را افزایش داد (Springer 2020).

با توجه به محدودیت آب و نیاز آبی زیاد چمن و نقش قابل توجه آن در فضای سبز، این پژوهش به‌منظور تعیین تراکم مناسب کاشت جهت بهبود شاخص‌های رشدی و خصوصیات فیزیولوژیک چمن اسپرت در شرایط تنش کم‌آبی انجام شد.

امروزه چمن یکی از عناصر اساسی و ضروری پوشش سبز بیشتر باغ‌ها و پارک‌ها و زمینه طرح‌های فضای سبز است (Zadehbagheri et al. 2016). چمن دارای جنس، گونه و واریته‌های زیادی با نیازهای محیطی و مورفولوژی مختلف است. این گیاهان باریک برگ که از تیره گندمیان می‌باشند، از لحاظ شرایط اقلیمی به دو گروه چمن‌های فصل گرم و سرد تقسیم می‌شوند. چمن اسپرت یکی از انواع چمن‌های سردسیری که از ترکیب سه گونه پوآپراتنسیس، لولیوم پرنه و فستوکا تشکیل شده است. در شرایط فعلی یکی از مشکلات اصلی در نگهداری چمن‌ها و توسعه فضای سبز کمبود منابع آب قابل دسترس و هزینه نیروی انسانی برای آبیاری روزانه است (Fazel et al. 2017).

تنش‌های محیطی مهم‌ترین عامل کاهش دهنده عملکرد محصولات کشاورزی در سطح جهان هستند که تنش کم‌آبی یکی از عوامل محدود کننده تولید گیاهان است (Tohidi et al. 2021). تنش کم‌آبی از طریق کاهش سنتز آنزیم ریبولوز بی فسفات و کاهش فعالیت روبیسکو، ظرفیت فتوسنتزی را کاهش می‌دهد و از طریق بسته شدن روزنه‌ها از رشد گیاه جلوگیری می‌کند (Shafiei et al. 2019). همچنین موجب افزایش گونه‌های فعال اکسیژن و در نتیجه بروز تنش اکسیداتیو در گیاه می‌گردد که در نهایت منجر به آسیب پروتئین‌ها، لیپیدها، کربوهیدرات‌ها و اسیدهای نوکلئیک می‌شود (Amiri Nasab et al. 2014). گیاهان از طریق سامانه‌های دفاعی آنزیمی مانند کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، گایاکول پراکسیداز و غیرآنزیمی مانند تجمع پرولین، پلی‌آمین، ترهالوز از خود در برابر تنش محافظت می‌کنند که به گونه گیاهی، شدت و مدت‌زمان تنش بستگی دارد (Rezapour Fard et al. 2015). در چمن آفریقایی (*Cynodon dactylon* (L.) Pers) تنش کم‌آبی (۴۰ و ۷۰٪ آب قابل دسترس) محتوای نسبی آب برگ و رشد شاخساره را کاهش داد، در حالیکه رشد ریشه، نسبت ریشه به شاخساره، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، درصد نشت یونی، میزان پرولین و محتوای کلروفیل کل برگ‌ها را کاهش داد (Taheri et al. 2017). در گیاه پروانش (*Catharanthus roseous*)

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- شرح آزمایش و اعمال تیمارها

به منظور بررسی اثر تراکم کاشت و تنش کم‌آبی بر شاخص‌های رشدی، محتوای کلروفیل کل، کربوهیدرات کل و پرولین آزمایشی در منطقه‌ای واقع در شهرستان کرج با حداقل حداکثر دما در این منطقه به ترتیب ۲۰- و ۳۸ °C و میانگین بارندگی ۲۳۵ mm/yr انجام شد. لازم به ذکر است اطلاعات هواشناسی از سایت اداره کل سازمان هواشناسی استان البرز می‌باشد. تیمارهای آزمایش شامل تنش کم‌آبی شامل سه سطح ۹۰ (شاهد)، ۳۰ و ۶۰٪ ظرفیت زراعی و تراکم کاشت به صورت ۲۰، ۳۰ و ۴۰ g Seed/m² بود. در ابتدا پس از آماده‌سازی زمین، نمونه‌ای جهت آنالیز از خاک محل آزمایش تهیه شد. کود دامی به میزان ۲۰ ton/ha به خاک افزوده شد، سپس بذرهای چمن ورزشی (*Lolium perenne*) Sirtaky +۳۵٪ Fandango NZ *Festucarubra Commutata* US +۲۰٪ NL +۲۳٪ *Poa pratensis* DK Baronial +۱۰٪ Musica *Poa pratensis* US Baron (۱۲٪) در فروردین ماه در کرت‌هایی به ابعاد ۳×۲ m² کشت و تا زمان استقرار کامل، آبیاری به طور منظم انجام شد. پس از حدود دو ماه، تیمارهای تنش به مدت سه هفته اعمال شد. جهت اعمال تنش کم‌آبی، ابتدا کلیه کرت‌ها به طور یکسان و یکنواخت آبیاری شدند. ۲۴ hr پس از آبیاری به منظور خروج زه‌آب و جذب یکنواخت آب در تمام قسمت‌های کرت، از هر کرت نمونه خاک برداشت و وزن تر (WW)^۱ توزین شد. جهت تعیین وزن خشک خاک (DW)^۲، نمونه‌ها به مدت ۲۴ hr به کوره در دمای ۱۰۵ °C منتقل شد. سپس درصد رطوبت خاک در حالت ۱۰۰٪ ظرفیت زراعی مزرعه (FC)^۳ با استفاده از رابطه (۱) به دست آمد (Soroori et al. 2021):

$$FC = (WW - DW) / DW \quad (1)$$

برای کنترل درصد رطوبت خاک ابتدا از روش وزنی و سپس از دستگاه TDR استفاده شد. پس از اتمام اعمال تیمارها، برداشت نمونه‌ها و ارزیابی صفات مورد نظر انجام شد (Jamali et al. 2021).

۲-۲- صفات مورد ارزیابی

۲-۲-۱- صفات مورفولوژیک

وزن تر اندام هوایی و ریشه بلافاصله پس از برداشت توسط ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ g اندازه‌گیری شد. وزن خشک اندام هوایی و ریشه، پس از نگهداری نمونه‌ها در ۶۰ °C به مدت ۴۸ ساعت به وسیله ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ g توزین شد (Asgarian et al. 2023). طول برگ با استفاده از خط‌کش فلزی بر حسب mm اندازه‌گیری شد (Tatari et al. 2016) و حجم ریشه از طریق اختلاف حجم ایجاد شده پس از قراردادن ریشه در حجم مشخصی از آب با دقت ۰/۱ ml محاسبه شد (Akhavan et al. 2012).

۲-۲-۲- کلروفیل کل

استخراج رنگ‌دانه‌های کلروفیل به وسیله دی‌متیل سولفوکساید (DMSO) انجام شد. جذب محلول به دست آمده با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (UV Visible مدل Spectro Flex 6600) در طول موج‌های ۶۶۳ nm برای کلروفیل a و ۶۴۵ nm برای کلروفیل b خوانده شد. در نهایت از طریق رابطه (۲) محاسبه و بر حسب mg/g FW یادداشت شد (Barnes et al. 1992).

$$Chl = 23.2(A645) + 8.02(A663) \times V / (1000 \times W) \quad (2)$$

که، V حجم نمونه، W وزن نمونه و A طول موج می‌باشد.

۲-۲-۳- کربوهیدرات کل

سنجش کربوهیدرات کل (قند کل) با استفاده از معرف آنترون انجام شد. جذب نمونه‌ها به وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۳۰ nm خوانده شد. با استفاده از منحنی استاندارد گلوکز میزان کربوهیدرات کل بر حسب mg/g FW یادداشت شد (Irigoyen et al. 1992).

۲-۲-۴- پرولین

محتوای پرولین برگ بر اساس روش (Danaee and Abdoss, اندازه‌گیری و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۲۰ nm قرائت شد. غلظت پرولین نمونه‌ها با استفاده از منحنی استاندارد پرولین، محاسبه و بر حسب mg/g FW یادداشت شد.

³Field Capacity

¹Wet Weight

²Dry Weight

۳-۲- طرح آزمایشی و تحلیل آماری داده‌ها

آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و دو عامل تنش خشکی و تراکم کاشت و اثر متقابل آن‌ها انجام شد. آنالیز داده‌ها به وسیله نرم‌افزار آماری SAS (ver 9.1) و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۱ و ۵٪ صورت گرفت. برای رسم نمودار از نرم‌افزار MS Excel 16 استفاده شد.

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- تحلیل واریانس داده‌ها

نتایج تجزیه واریانس نشان داد، اثر تنش کم‌آبی بر وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، حجم ریشه، طول برگ، کلروفیل کل، کربوهیدرات کل و پرولین در سطح ۱٪ معنی‌دار شد. اثر تراکم کاشت بر وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه و حجم ریشه در سطح ۱٪ و طول برگ، کلروفیل کل، کربوهیدرات کل و پرولین در سطح ۵٪ معنی‌دار شد. اثر متقابل تنش خشکی و تراکم کاشت نیز بر وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، حجم ریشه، طول برگ، کلروفیل کل، کربوهیدرات کل و پرولین در سطح ۱٪ معنی‌دار شد (جدول ۱).

جدول ۱- تحلیل واریانس اثر تنش کم‌آبی و تراکم کاشت بر خصوصیات مورفولوژیک و فیزیولوژیک چمن ورزشی
Table 1 Analysis of variance the effect of low water stress and planting density on the morphological and physiological characteristics of sport turfgrass

S.O.V	D F	Fresh weigh t of aerial part	Dry weigh t of aerial part	Roots fresh weigh t	Roots dry weigh t	Root Volum e	Leaf lengt h	Total chlorophyl l	Total carbohydrat e	Prolin e
Block	2	4.6*	3.3**	0.19**	0.14*	0.19**	2.01*	0.33*	0.09*	0.006*
Stress	2	4.2**	3.01**	0.85**	0.72**	0.85**	3.96**	7.74**	0.16**	0.2**
Stress Error Plant	4	0.2	0.2	0.06	0.04	0.06	0.28	0.02	0.02	0.003
Densit y	2	0.63**	0.44**	0.66**	0.57**	0.66**	0.76*	0.41*	0.03*	0.01*
Stress× Plant Densit y	4	0.07**	0.04**	0.08**	0.07**	0.08**	0.28**	0.43**	0.008**	0.003*
Error CV (%)	12 --	0.04 5.5	0.03 5.5	0.01 9.7	0.01 9.1	0.01 1.44	0.03 2.93	0.008 10.5	0.0001 10.3	0.003 8.7

ns و * و ** به ترتیب، معنی‌دار در سطح احتمال ۱ و ۵٪ و غیر معنی‌دار است.

۳-۲- صفات مورفولوژیک

مقایسه میانگین داده‌ها در جدول (۲) نشان می‌دهد بیش‌ترین وزن تر و خشک اندام هوایی در تیمار ۹۰٪ ظرفیت زراعی (شاهد) و تراکم 20 g Seed/m^2 به ترتیب با $4/6$ - $3/75$ و کم‌ترین وزن تر و خشک اندام هوایی در تیمار ۳۰٪ ظرفیت زراعی و تراکم 40 g Seed/m^2 به ترتیب با $2/2$ - $18/8$ به دست آمد. بیش‌ترین وزن تر ریشه با $1/86$ و وزن خشک ریشه با $1/70$ در تیمار ۳۰٪ ظرفیت زراعی و تراکم g

20 Seed/m^2 و کم‌ترین وزن تر و خشک ریشه در تیمار ۹۰٪ ظرفیت زراعی و تراکم 40 g Seed/m^2 به ترتیب با $0/76$ - $0/70$ به دست آمد. همچنین بیش‌ترین حجم ریشه با $8/8 \text{ ml}$ و کم‌ترین حجم ریشه با $7/7 \text{ ml}$ به ترتیب در تیمار ۳۰٪ ظرفیت زراعی و تراکم 20 g Seed/m^2 و تیمار ۹۰٪ ظرفیت زراعی و تراکم 40 g Seed/m^2 بود. بیش‌ترین طول برگ نیز با $7/7 \text{ mm}$ در تیمار ۹۰٪ ظرفیت زراعی و تراکم $g \text{ Seed/m}^2$ ۲۰ بود که با تیمار ۹۰٪ ظرفیت زراعی و تراکم 30 g Seed/m^2

برگان است (Tatari et al. 2016). در شرایط تنش نسبت ریشه به اندام هوایی در اکثر گیاهان افزایش می‌یابد که دلیل اصلی آن کاهش رشد اندام هوایی نسبت به ریشه و توانایی بیشتر ریشه در حفظ فشار تورژسانس است. همچنین در شرایط کم‌آبی اسید آبسزیک موجب جلوگیری از رشد اندام هوایی می‌شود، در حالیکه رشد ریشه را حفظ می‌کند. از سویی دیگر تخصیص کربن به ریشه‌ها نسبت به اندام هوایی به بهبود ریشه در شرایط تنش کم‌آبی کمک می‌کند (Taheri et al. 2017). افزایش تراکم کاشت بذر در متر مربع به دلیل کاهش فضا برای رشد گیاه و افزایش رقابت به‌منظور دستیابی به فاکتورهای حیاتی نظیر نور، رطوبت، عناصر غذایی و فضای کافی برای رشد موجب صرف انرژی برای گیاه، کاهش مواد فتوسنتزی و در نتیجه کاهش رشد می‌گردد (Villalobos et al., 2016). نتایج این آزمایش با نتایج (Ramezan Abbaszadeh and Taheri et al. (2017) در گیاه چمن آفریقایی (*Cynodon dactylon* L.) و (Shamsabadi et al. (2015) در گیاه ذرت شیرین همسو می‌باشد. همچنین خصوصیات خاک منطقه مورد مطالعه در جدول (۳) نشان داده شده است.

اختلاف معنی‌داری نداشت. کم‌ترین طول برگ با ۵/۶ mm در تیمار ظرفیت زراعی ۳۰٪ و تراکم ۴۰ g Seed/m² مشاهده شد. یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که افزایش تنش کم‌آبی وزن تر و خشک اندام هوایی و طول برگ را کاهش داد، در حالیکه وزن تر و خشک ریشه و حجم ریشه افزایش یافت. در شرایط تنش، کاهش پتانسیل آب در بافت گیاهی موجب کاهش گسترش و رشد سلولی می‌شود و در نتیجه دیواره‌های سلولی گیاهان انعطاف‌پذیری خود را از دست می‌دهند که این امر سبب کاهش وزن تر و خشک اندام هوایی می‌شود. همچنین، با توجه به اینکه در باریک برگان تقسیم و توسعه سلولی در قاعده برگ‌ها انجام می‌شود. در اثر تنش خشکی منطقه رشد در قاعده برگ کوچکتر است. این امر منجر به کاهش رشد سلولی و طول برگ می‌شود (Amiri Nasab et al. 2014). در شرایط تنش کم‌آبی، محتوای کلروفیل و میزان فتوسنتز کاهش می‌یابد و افزایش انرژی مصرفی گیاه جهت بالا بردن غلظت شیره سلولی و تغییر در مسیرهای تنفسی و فعال شدن مسیر پنتوز فسفات موجب کاهش رشد و وزن اندام هوایی گیاه می‌گردد (Hashemi et al. 2018). یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌های سازگاری جهت بهبود کارایی جذب آب در شرایط تنش خشکی افزایش وزن و توسعه ریشه در باریک

جدول ۲- اثر تنش کم‌آبی و تراکم کاشت بر صفات مورفولوژیک چمن ورزشی

Table 2 The effect of low water stress and planting density on growth indicators of sport turfgrass

Field capacity (%)	(g Plant density Seed /m ²)	Shoot fresh weight (g)	Shoot dry weight (g)	Root fresh weight (g)	Root dry weight (g)	Root volume (ml)	Leaf length (mm)
90 (Control)	20	4.6 ^a	3.75 ^a	0.93 ^f	0.84 ^f	7.9 ^{de}	7.7 ^a
	30	4.3 ^b	3.58 ^b	0.90 ^f	0.82 ^f	7.9 ^{de}	7.5 ^a
	40	4.2 ^c	3.42 ^c	0.76 ^g	0.70 ^g	7.7 ^e	6.9 ^b
60	20	4.1 ^c	3.21 ^d	1.63 ^b	1.52 ^b	8.6 ^b	6.8 ^{bc}
	30	3.8 ^d	3.15 ^e	1.36 ^c	1.23 ^d	8.3 ^c	6.3 ^d
	40	3.4 ^e	3.11 ^e	0.96 ^e	0.87 ^e	7.9 ^{de}	6.7 ^{bc}
30	20	3.4 ^e	2.85 ^f	1.86 ^a	1.70 ^a	8.8 ^a	6.5 ^c
	30	3.1 ^f	2.52 ^g	1.43 ^{bc}	1.30 ^c	8.4 ^{bc}	6.1 ^d
	40	2.8 ^g	2.18 ^h	1.06 ^d	0.90 ^d	8.0 ^d	5.6 ^e

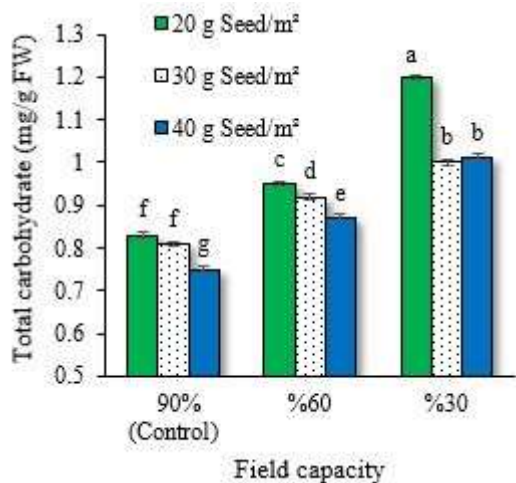
حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح $P \leq 0.05$ است.

جدول ۳- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل پژوهش

Table 3 Physicochemical characteristics of research soil

Soil Texture	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Organic Carbon (%)	Nitrogen (%)	phosphorus (ppm)	Potassium (ppm)	pH (1:1)	EC (dS/m)
Loam	16	40	44	0.75	0.1	14.4	198.4	7.36	1.33

آمد. افزایش کربوهیدرات کل در پاسخ به تنش کم آبی و تراکم‌های بالای کاشت بذر می‌تواند به دلیل انتقال کمتر این مواد از اندام هوایی به نقاط دیگر و یا مصرف آهسته‌تر این مواد به علت کاهش رشد یا هیدرولیز نشاسته باشد (Akbari et al. 2017). همچنین انباشت قندهای محلول در شرایط تنش علاوه بر نقش‌های فیزیولوژیکی مهمی که از نظر تأمین انرژی دارد، موجب تنظیم اسمزی و تورژسانس سلول‌ها می‌شود و با حفاظت و پایداری از غشاء و پروتئین میزان تحمل گیاه به خشکی را افزایش می‌دهد (Soroori et al. 2021). نتایج این آزمایش همسو با نتایج (Akbari et al. 2017) پیرامون تأثیر تنش کم آبی و تراکم کاشت در گیاه سیر (*Allium sativum* L.) است، همچنین (Aminifard and Ghaderi 2020) نیز تأثیر افزایش تراکم کاشت را بر کربوهیدرات کل شنبليله (*Trigonella foenum-graecum* L.) گزارش نمودند.



شکل ۲- اثر تنش کم آبی و تراکم کاشت بر میزان کربوهیدرات کل چمن ورزشی

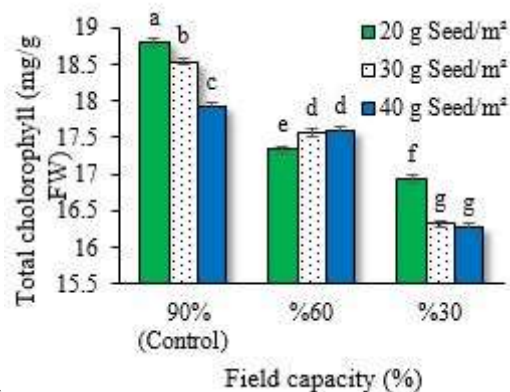
Fig. 2 The effect of low water stress and planting density on total carbohydrate content of sport turfgrass

۳-۵- پرولین

مقایسه میانگین داده‌ها در شکل ۳ نشان داد، بیش‌ترین کم‌ترین میزان پرولین به ترتیب با ۰/۷۶ و ۰/۵۲ mg/g FW در تیمار ظرفیت زراعی ۳۰٪ و تراکم ۴۰ g Seed/m² و تیمار ظرفیت زراعی ۹۰٪ و تراکم ۲۰ g Seed/m² به دست آمد. افزایش تنش کم آبی و تراکم کاشت میزان پرولین گیاه را افزایش داد. تجمع اسمولیت‌هایی همچون پرولین، یکی از شناخته شده‌ترین سازوکارهای افزایش تحمل تنش در گیاهان

۳-۳- کلروفیل کل

نتایج در شکل (۱) نشان می‌دهد، بیش‌ترین کلروفیل کل با ۱۸/۸ mg/g FW در تیمار ۹۰٪ ظرفیت زراعی و تراکم ۲۰ g Seed/m² و کمترین با ۱۶/۵ mg/g FW در تیمار ظرفیت زراعی ۳۰٪ و تراکم ۴۰ g Seed/m² بود که با تیمار ظرفیت زراعی ۳۰٪ و تراکم ۳۰ g Seed/m² اختلاف معنی‌داری نداشت. کاهش محتوای کلروفیل کل در شرایط تنش کم آبی می‌تواند به دلیل افزایش گونه‌های فعال اکسیژن، کاهش پتانسیل آب خاک، بسته شدن سریع روزنه‌ها، تجزیه و کاهش رنگدانه‌ها در شرایط تنش کم آبی، باشد. همچنین افزایش برخی تنظیم کننده‌های رشد نظیر اتیلن و اسید آبسزیک، فعالیت آنزیم کلروفیل‌لاز و تجزیه کلروفیل را تحریک می‌کند (Tohidi 2021). از آنجا که محتوای کلروفیل به میزان زیادی تحت تأثیر فتوسنتز است و فاکتورهایی نظیر نور و مواد غذایی نقش مؤثری در ساخت کلروفیل دارند، افزایش تراکم کاشت بذر موجب ایجاد رقابت و در نتیجه کاهش ساخت رنگدانه‌های فتوسنتزی، ماده سازی و رشد نمو می‌شود (Antoniotta et al. 2014). در گیاه پونه معطر (*Mentha pulegium* L.) نیز افزایش تراکم کاشت محتوای کلروفیل کل را کاهش داد (Faraji et al. 2019).



شکل

۱- اثر تنش کم آبی و تراکم کاشت بر محتوای کلروفیل کل چمن ورزشی

Fig. 1 The effect of low water stress and planting density on total chlorophyll content of sport turfgrass

۳-۴- کربوهیدرات کل

همانطور که در شکل (۲) نمایان است، بیش‌ترین میزان کربوهیدرات کل با ۱/۲ mg/g FW در تیمار ظرفیت زراعی ۳۰٪ و تراکم ۲۰ g Seed/m² و کم‌ترین با ۰/۷۵ mg/g FW در تیمار ۹۰٪ ظرفیت زراعی و تراکم ۴۰ g Seed/m² به دست

۱- بیشترین وزن تر و خشک اندام هوایی g ۴/۶ - ۳/۷۵، طول برگ ۷/۷ mm و محتوای کلروفیل کل ۱۸/۸ mg/g FW در تیمار ۹۰٪ ظرفیت زراعی و تراکم ۲۰ g Seed/m² مشاهده شد.

۲- بیشترین وزن تر و خشک ریشه g ۱/۸۶ - ۱/۷۰، حجم ریشه ۸/۸ ml و میزان کربوهیدرات کل ۱/۲ mg/g FW در تیمار ۳۰٪ ظرفیت زراعی و تراکم ۲۰ g Seed/m² به دست آمد.

۳- بیشترین میزان پرولین ۰/۷۶ mg/g FW در تیمار ۳۰٪ ظرفیت زراعی و تراکم ۴۰ g Seed/m² بود.

در نهایت با توجه به اهمیت موضوع کم‌آبی و انتخاب تراکم مناسب کاشت و نتایج پژوهش انجام شده افزایش تنش کم‌آبی و تراکم کشت موجب کاهش صفات مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در چمن ورزشی شد. بطوریکه در تراکم کاشت ۲۰ g Seed/m² و آبیاری در سطح ۹۰٪ ظرفیت زراعی تأثیر مطلوب‌تری بر شاخص‌های رویشی و فیزیولوژیک چمن ورزشی مشاهده شد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده جهت کاهش اثرات کم‌آبی در چمن ورزشی، محلول‌پاشی سایر ترکیبات نظیر اسیدهای آمینه، اسیدهای آلی و عناصر غذایی مورد بررسی قرار گیرد.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های حاصل از انجام آزمایش‌ها در این پژوهش، در متن مقاله ارائه شده است.

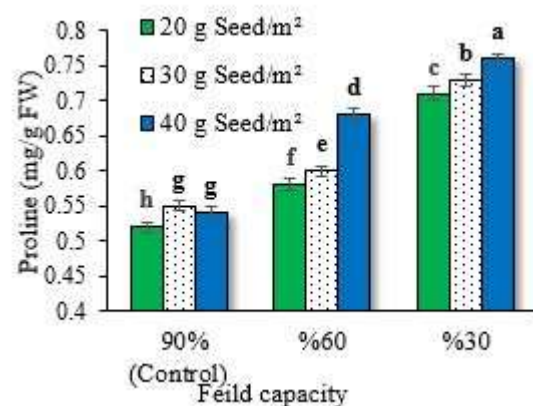
تضاد منافع نویسندگان

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

References

- Akbari, S., Kafi, M., & Rezvan Beidokhti, S. (2017). Effect of Drought Stress on Growth and Morphological Characteristics of Two Garlic (*Allium sativum* L.) Ecotypes in Different Planting Densities. *J. agroecol.*, 9(2), 559-574. DOI: [10.22067/jag.v9i2.62141](https://doi.org/10.22067/jag.v9i2.62141) [In Persian].
- Akhavan, S., Shabanpour, M., & Esfahani, M. (2012). Soil Compaction and Texture Effects on the Growth of Roots and Shoots of Wheat.

است. پرولین موجب افزایش بیان پروتئین‌های مرتبط با افزایش تحمل تنش در گیاهان می‌شود و افزایش فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی توسط پرولین، گیاهان را در مقابل خسارت‌های اکسیداتیو ناشی از تنش محافظت می‌نماید (Maurel and Prado 2017). اثر تنش خشکی بر افزایش میزان پرولین در چهار گونه گیاه پوششی چمن *Lolium* *Potentilla perenne* و *Trifolium repens* (Samieani et al. 2013) و در گیاه سویا نیز افزایش تراکم کاشت به دلیل وجود رقابت تنگاتنگ بر سر آب، نور و مواد غذایی سبب افزایش میزان پرولین شد (Nasiri et al. 2017).



شکل ۳- اثر تنش کم‌آبی و تراکم کاشت بر محتوای پرولین چمن ورزشی

Fig. 3 The effect of low water stress and planting density on proline content of sport turfgrass

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر تنش کم‌آبی و تراکم کاشت بذر در گیاه چمن ورزشی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که:

J. Water. Soil, 26(3), 727-735. DOI: [10.22067/jsw.v0i0.948514941](https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.948514941) [In Persian].

AlhverdiZadeh, S., & Danaee, E. (2023). Effect of Humic Acid and Vermicompost on Some Vegetative Indices and Proline Content of *Catharanthus roseus* under Low Water Stress. *Environ. Water Eng.*, 9 (1), 141-152. DOI: [10.22034/ewe.2022.333951.1745](https://doi.org/10.22034/ewe.2022.333951.1745) [In Persian].

- Aminifard, M. H., & Ghaderi, H. (2020). Effects of different levels of humic acid and planting density on antioxidant activity and biochemical properties of *Trigonella foenum-graecum* L., *EJMP*, 8(1), 77-89. DOI: [20.1001.1.23223235.1399.8.1.5.5](https://doi.org/10.1001.1.23223235.1399.8.1.5.5) [In Persian].
- Amiri Nasab, K., Zakizadeh, H., Ghasemnezhad, M., & Biglouei, H. (2014). The effect of drought preconditioning on increasing drought stress tolerance in two turfgrass creeping bentgrass and tall fescue. *J. Crop Improv.*, 16(3), 599-611. DOI: [10.22059/jci.2014.53261](https://doi.org/10.22059/jci.2014.53261) [In Persian].
- Antonietta, M., Fanello, D. D., Acciaresi, H. A., & Guiamet, J. J. (2014). Senescence and yield responses to plant density in stay green and earlier-senescing maize hybrids from Argentina. *Field Crops Res.*, 155, 111-119. DOI: [10.1016/j.fcr.2013.09.016](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.09.016).
- Asgarian, H., Abdossi, V., Danaee, E., & Ladan Moghadam, A. (2021). Variations of phytochemical properties of *Calendula officinalis* L. under salinity stress and treatment with humic acid and selenium. *Eur.J. Hortic. Sci.*, 86(4), 431-440. DOI: [10.17660/eJHS.2021/86.4.11](https://doi.org/10.17660/eJHS.2021/86.4.11)
- Barnes, J.D., Balaguer, L., Manrique, E., Elvira, S., & Davison, A.A. (1992). A reappraisal of the use of DMSO for extraction and determination of chlorophyll a and b in lichens and higher plants. *Environ. Experim Bot. J.*, 32, 85-100. DOI: [10.1016/0098-8472\(92\)90034-Y](https://doi.org/10.1016/0098-8472(92)90034-Y).
- Danaee, E., & Abdossi, V. (2021). Effects of silicon and nano-silicon on some morpho-physiological and phytochemical traits of peppermint (*Mentha piperita* L.) under salinity stress. *IJMAPR*, 37(1), 98-112. DOI: [10.22092/ijmapr.2021.343340.2810](https://doi.org/10.22092/ijmapr.2021.343340.2810) [In Persian].
- Emadi, N., Balouchi, H., & Jahanbin, Sh. (2012). Effect of drought stress and plant density on yield, yield components and some morphological characters of pinto bean (cv. C.O.S16) in Yasouj region. *J. Crop Prod.*, 5(2), 1-18. DOI: [20.1001.1.2008739.1391.5.2.1.2](https://doi.org/10.1001.1.2008739.1391.5.2.1.2) [In Persian].
- Faraji, B., Sahraroo, A., Hamidoghli, Y., & Olfati, J. (2019). Effect of harvest time, nitrogen and plant density on yield and some physiological traits of pennyroyal (*Mentha pulegium* L.), *J. Plant Prod. Res.*, 26(3), 121-136. DOI: [10.22069/jopp.2019.15236.2367](https://doi.org/10.22069/jopp.2019.15236.2367).
- Fazel, F., Gheysari, M., Mohamadian, M., & Etemadi, N. A. (2017). Effect of maximum allowable depletion on irrigation use and plant parameters of grass under subsurface drip irrigation management. *JISE*, 40(1), 155-165. DOI: [20.1001.1.25885952.1396.40.1.13.2](https://doi.org/10.1001.1.25885952.1396.40.1.13.2) [In Persian].
- Hashemi, E., Mahdi Nezhad, N., Fakheri, B. A., & Mohammadpour, R. (2018). Effect of biodegradable and nanotropic fertilizers (Manganese, Copper, and Zinc) on economic yield, antioxidant enzymes and concentration of some elements in Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) under drought Stress. *J. Plant Physiol.*, 13(51), 108-120. DOI: [20.1001.1.76712423.1397.13.51.8.5](https://doi.org/10.1001.1.76712423.1397.13.51.8.5) [In Persian].
- Irigoyen, J. J., Emerich D. W., & Sanchez- Dias, M. (1992). Water stress Induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago Sativa*) plants. *Plant Physiol.*, 84, 55-60. Doi: [10.1111/j.1399-3054.1992.tb08764.x](https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1992.tb08764.x).
- Jamali, S., Banejad, H., Safarizadeh Sani, A., & Attarn, S. (2021) Investigating the effects of irrigation levels on Marigold growth and yield properties under different soil texture. *Environ. Water Eng.*, 7(1), 119-131. DOI: [10.22034/jewe.2020.248510.1423](https://doi.org/10.22034/jewe.2020.248510.1423) [In Persian].
- Maurel, C., & Prado, K. (2017). Aquaporins and Leaf Water Relations. Plant Aquaporins, Springer International Publishing. 155-165. DOI: [10.1007/978-3-319-49395-4_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-49395-4_7).
- Nasiri, A., Samdaliri, M., Shirani Rad, A., Shahsavari, N., Mosavi Kale, A., & Jabbari, H. (2017). Effect of plant density on yield and physiological characteristics of six canola cultivars. *J. Agri. Sci.*, 1, 249-253. DOI: [10.25081/jsa.2017.v1.819](https://doi.org/10.25081/jsa.2017.v1.819)
- Ramezan, G., & Abbaszadeh, B. (2016). The effect of drought stress on yield, content and percentage of essential oil of *Nepeta pogonosperma* Jamzad et Assadi under different plant density. *IJMAPR*, 31(6), 1071-

1085. DOI: [10.22092/ijmapr.2016.105895](https://doi.org/10.22092/ijmapr.2016.105895) [In Persian].
- Rezapour Fard, J., Kafi, M., & Naderi, R. (2015). The enhancement of drought stress tolerance of Kentucky Bluegrass by prohexadione-calcium treatment. *J. Ornament. Plant*, 5(4), 197-204.
- Samieani, E., Ansari, H., Azizi, M., Hashminia, M., & Selahvarzi, Y. (2013). The effect of drought stress on some biochemical indicators in four types of cover plants (*Lolium perenne* grass, *Potentilla*, *Trifolium repens* and *Frankenia*) with the ability to be used in green spaces. *Sci. Technol. Greenhouse Cul.*, 4, 101-109 [In Persian].
- Shafiei, N., Khaleghi, E., & Moallemi, N. (2019). Effect of salicylic acid on some morphological and physiological characteristics of olive cv. 'Konservalia' under water deficit condition. *J. Horticult. Sci.*, 49(4), 881-890. Doi: [10.22055/ppd.2019.22031.1477](https://doi.org/10.22055/ppd.2019.22031.1477) [In Persian].
- Shamsabadi, H., Taheri rad, A., Khoram deel, S., & Nikkhah, A. (2015). The effect of tillage methods, plant density and planting arrangement on the growth characteristics, yield components and yield of sweet corn in the climatic conditions of Malaysia. *J. Crop Prod.*, 8(1), 79-98 [In Persian].
- Soroori, S., Danaee, E., Hemmati, K., & Ladan Moghadam A. (2021). The metabolic response and enzymatic activity of *Calendula officinalis* L. to foliar application of Spermidine, Citric Acid and Proline under drought stress and in a Post-Harvest. *JAST*, 23(06), 1339-1353. Doi: [10.1001.1.16807073.2021.23.6.6.9](https://doi.org/10.1001.1.16807073.2021.23.6.6.9).
- Springer, T. L. (2020). How does plant population density affect the biomass of Ravenna grass. *GCB Bioenergy.*, 13, 175- 184. DOI: [10.1111/gcbb.12767](https://doi.org/10.1111/gcbb.12767).
- Taheri, S., Arghavani, M., & Mortazavi, S. N. (2017). The study of morphological, biochemical and physiological of bermuda grass as affected by sodium nitroprosside under water deficit stress. *J. Crop Improv.*, 19(2), 417-430. DOI: [10.22059/jci.2017.60424](https://doi.org/10.22059/jci.2017.60424) [In Persian].
- Tatari, M., Fotohi Ghzvini, R., Mosavi, A., & Etemadi, N. (2016). Study of some morphological characteristics in three turfgrass species under drought stress conditions. *J. Arid Biome*, 5(2), 11-27. [In Persian].
- Tatari, M., Fotohi Ghzvini, R., Etemadi, N., Ahadi, A., & Mosavi, R. (2013). Study of some physiological responses in three species of turfgrass in drought stress conditions. *J. Plant Product*, 20(1), 63-88. DOI: [20.1001.1.2008790.1394.5.2.2.0](https://doi.org/10.1001.1.2008790.1394.5.2.2.0) [In Persian].
- Tohidi, Z., Sobhanian, H., & Baghizadeh, A. (2021). Evaluation and comparison of ten ecotypes of *Teucrium polium* L. in tolerance to drought stress. *J. Plant Physiol.*, 16(62), 123-138. DOI: [10.30495/iper.2021.679559](https://doi.org/10.30495/iper.2021.679559) [In Persian].
- Villalobos, F.J., Victor, O., & Sadras, E.F. (2016). Plant density and competition. Springer International Publishing, 159-168. Doi: [10.1007/978-3-319-46116-8_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46116-8_12).
- Yousefi, B., Lebaschy, M., Sefidkon, F., & Safari, H. (2023). Effects of different planting densities and organic fertilizers on yield characteristics of *Satureja spicigera* (K.Koch) Boiss. under rainfed conditions. *IJMAPR*, 39(1), 69-81. DOI: [10.22092/ijmapr.2021.353696.2947](https://doi.org/10.22092/ijmapr.2021.353696.2947) [In Persian].
- Zadehbagheri, M., Salehi Salmi M R., & Zadehbagheri, M. (2016). The Physiological, Morphological and Bio-Chemical Comparison of the Current Grass Shiraz City's Green Space with Tall Fescue (*Festuca arundinacea* Schreb). *J. Crop. Product. Proc.*, 5(18), 15-25. DOI: [10.18869/acadpub.jcpp.5.18.15](https://doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.5.18.15) [In Persian].



Environment and Water Engineering

Homepage: www.jewe.ir



ISSN: 2476-3683

Research Paper

Numerical Investigation of the Performance of Blade Groynes on Scouring and its Effect on Hydraulic Parameters of Sediment and Flow

Kiyoumars Roushangar^{1*}, Sepehr Goodarzi² and Hamidreza Abbaszadeh³

¹Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

³Ph.D. Scholar, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Article information

Received: March 08, 2023
Revised: April 05, 2023
Accepted: April 15, 2023

Keywords:

Erosion
 Groyne
 Sedimentation
 Scouring
 VOF

*Corresponding author:
roshangari@tabrizu.ac.ir



Abstract

One of the significant issues in hydraulic engineering is reducing erosion in rivers by using groynes to preserve soil. The purpose of this study is to investigate numerically the groynes' presence on the sedimentary flow parameters using FLOW-3D software. For this purpose, groynes were examined at angles 30°, 60°, and 90° under 10 scenarios in various discharge and hydraulic conditions. Here, the mesh block with dimensions of 5 mm was chosen as the optimal mesh block for simulating models. In addition, Large Eddy Simulation (LES) turbulence model was used for simulations. In the scenarios where two blades are used scouring is observed in the first blade, while the sedimentation phenomenon was observed in the groyne after the first groyne in the direction of the flow. In the two blades with a distance of 0.60 m from each other, 48 mm erosion occurred. The highest amount of scour is related to the arched groyne (I-Left-Q285) with 45 mm. Discharges have an increased effect on scouring, so by comparing the scenarios with one groyne (I-Q285, I-Q200, and I-Q350), the lowest amount is with the value of 5.5mm corresponding to I-Q200. The insufficient erosion in the angled groynes corresponds to the smaller angle scenario.

How to cite this paper: Roushangar, K., Goodarzi, S. and Abbaszadeh, H. (2024). Numerical investigation of the performance of blade groynes on scouring and its effect on hydraulic parameters of sediment and flow. *Environ. Water Eng.*, 10(1), 121-136. <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.381628.1838> (In Persian)



© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The spreading of the river water to the sides of the river and the washing of the walls inward causes the water to expand on the river's surface. It destroys the walls and wastes of river water. In addition, the depth of the river decreases. This issue leads to problems such as the loss of aquatic life and disturbance in the movement of floating vehicles on the river and causing damage to devices such as turbines. This issue is especially significant in low-water seasons and dry areas. This problem can be compensated and prevented by some structures. The groynes structures are used to deepen rivers and prevent the destruction of riverbanks, which is sometimes dangerous in sensitive areas. Groynes are structures perpendicular to the river wall that reduce the flow velocity depending on their type and placement angle. On the other hand, these structures direct the flow to the inside of the river. Since the lands around the rivers have special agricultural importance, the restoration of these lands by preventing water from advancing to the sides due to the destruction of the walls is another reason for using groynes. In the current research, the factors affecting scouring around the groyne structure in submerged conditions were investigated so that the performance of different types of groynes according to various geometric and hydraulic conditions would be discussed and examined more closely. For this purpose, in this research, using the FLOW-3D numerical model, various types of blade groynes have been modeled under different scenarios in single and double modes at different angles and positions in the flow path

with var hydraulic and geometric characteristics in order to improve the efficiency of groynes.

Material and Methods

To select the optimal mesh, simulations were first performed with large mesh dimensions; then in the next steps, simulations were performed with smaller mesh dimensions than the previous step in order to obtain acceptable results. Here, the optimal mesh was selected by performing simulation in 5 modes, with different mesh dimensions. Since in the mesh with the dimensions of 4.5 and 5 mm, the simulation results were very close to each other and had similar results in the velocity contours and sedimentation rate; therefore, the mesh with the dimensions of 5 mm was chosen for the simulation of other models. In selecting the boundary conditions, the volume flow rate has been used for the inlet and the outflow condition has been selected at the end of the channel. Also, for the walls and bottom, and upper surface, wall and symmetry boundary conditions are chosen, respectively. In this research, the LES turbulence model was chosen for the simulations. Among the reasons for choosing this model, we can mention things such as reliability in answering various problems, accurate solution of equations, and high accuracy in showing details of the flow and review of previous studies. In the definition of the initial conditions, the pressure distribution is defined as hydrostatic. A duration of 500 s was considered for the simulation. The research was investigated in the discharges of 20, 28.5 and 35 l/s with 10 scenarios. In addition, the sediment properties of sand were with a diameter of 0.001 m, density of 2650 kg/m³ and thicknesses of 0.06 m (Table 1).

Table 1 The examined scenarios

No.	Scenario Name	Geometric Conditions	Q (l/s)
1	T-Q285	1 T-shaped groyne	28.5
2	I-Q285	1 I-shaped groyne	28.5
3	LRight-Q285	1 L-shaped groyne	28.5
4	LLeft-Q285	1 L-shaped groyne	28.5
5	I30-Q285	1 I-shaped groyne with an angle of 30°	28.5
6	I60-Q285	1 I-shaped groyne with an angle of 60°	28.5
7	DI80-Q285	2 I-shaped groynes with a distance of 0.80 m from each other	28.5
8	DI60-Q285	2 I-shaped groynes with a distance of 0.60 m from each other	28.5
9	I-Q200	1 I-shaped groyne	20
10	I-Q350	1 I-shaped groyne	35

Results

In Table (2) by examining the results obtained from the modeled scenarios, the highest scouring is related to the single scenario with arc mode (LLeft-Q285) by 45 mm. It shows the effect of the operation of opposite blades in the flow direction. In other words, if the shape of the blade is not in accordance with the direction of the flow, more erosion will occur in its vicinity. By comparing I-Q285, DI60-Q285, and DI80-Q285 scenarios, we can see the highest scour rate for DI60-Q285 and then the DI80-Q285 scenarios. Discharge changes have a high effect on scouring, so by comparing the single mode scenarios such as I-Q285, I-Q200, and I-Q350, the lowest amount with the value of 5.5 mm is related to the I-Q200 scenario. Therefore, with the increase in the discharge, the scouring rate increases. In addition to the local

scouring that occurred in the vicinity of the blade, knowing the amount of sediment removed from the channel also provides valuable information. For this purpose, the changes in the volume of sediment on the bottom of the channel after the completion of the simulation have been calculated. Among the 10 mentioned scenarios, the highest amount of sediment removed is related to the DI80-Q285 scenario, in this scenario due to the presence of two blades in the channel, the eddies between them lead to high erosion of the bed. So that in the two blades with distance of 0.60 m from each other, 48 mm erosion has been occurred. In contrast, I30-Q285 and I-Q200 scenarios have the lowest amount of erosion, which for the first case is due to the direction of the blade flow. In addition, for the second case, the root is in the reduction of the inlet discharge.

Table 2 General results of the examined scenarios

Scenario No.	Scenario Name	Erosion of the Channel Bottom (cm ³)	Maximum Dune Height (mm)	Maximum Scouring Depth (mm)
1	T-Q285	5780	14	36
2	I-Q285	1320	13	11
3	LRight-Q285	2340	22	20
4	LLeft-Q285	5670	45	45
5	I30-Q285	1010	14	12
6	I60-Q285	1260	26	16
7	DI80-Q285	6210	22	24
8	DI60-Q285	5750	12	48
9	I-Q200	810	6	5.5
10	I-Q350	2520	6	23

Conclusions

The range of scours generally occurred near the blade. The eddy current in the area of the blades has created dunes with a height proportional to the scour depth in its vicinity. In the scenarios where the angular mode of the blade is used, in the upper wall, repeated scours and dunes can be seen, which is the reason for the change of the flow gradient towards the upper wall. In the scenarios where two blades are used, severe scouring occurs in the first blade, while sedimentation phenomenon is observed in the second groyne. By comparing the first to the fourth scenario, it can be seen that the lowest amount of erosion is for the I-shaped groyne, while the highest amount of erosion is related to the T-shaped groyne. In

addition to the mentioned case, the maximum scour depth is related to the L-shaped groyne. Among the scenarios in which the two groynes are used, the amount of erosion for the case where the distance between the two groynes is 0.60 m has been assigned a lower value.

Data Availability

The data can be sent by the corresponding author via email.

Conflicts of interest

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



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir

مقاله پژوهشی

بررسی عددی عملکرد آبشکن‌های تیغه‌ای بر آبشستگی و تأثیر آن بر پارامترهای هیدرولیکی رسوب و جریان

کیومرث روشنگر^{۱*}، سپهر گودرزی^۲ و حمیدرضا عباس‌زاده^۳

^۱استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۲دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۳دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ دریافت: [۱۴۰۱/۱۲/۱۷]

تاریخ بازنگری: [۱۴۰۲/۰۱/۱۶]

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۲/۰۱/۲۶]

واژه‌های کلیدی:

آبشستگی

آبشکن

رسوب‌گذاری

فرسایش

VOF

*نویسنده مسئول:

roshangari@tabrizu.ac.ir

یکی از مسائل مهم در مهندسی هیدرولیک کاهش میزان فرسایش در رودخانه‌ها با استفاده از آبشکن‌ها به منظور حفظ خاک است. هدف از پژوهش حاضر بررسی عددی تأثیر وجود آبشکن بر پارامترهای رسوبی جریان با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D است. بدین منظور آبشکن‌ها در زوایای 30° ، 60° و 90° تحت ۱۰ سناریوی مختلف در دبی و شرایط هیدرولیکی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. در پژوهش حاضر شبکه‌بندی با ابعاد 5 mm به عنوان شبکه بهینه برای شبیه‌سازی مدل‌ها انتخاب شد. همچنین مدل آشفتگی LES (شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ) برای شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در سناریوهایی که از دو عدد تیغه استفاده شده است، در تیغه اول آبشستگی مشاهده می‌گردد درحالی‌که در آبشکن بعد از آبشکن اول در جهت جریان، پدیده رسوب‌گذاری رؤیت شد. به‌طوری‌که در سناریوی دو تیغه‌ای با فاصله 0.6 m از هم، 48 mm فرسایش رخ داد. بیشترین میزان آبشستگی مربوط به آبشکن با حالت قوسی (L-Left-Q285) به میزان 45 mm است. تغییرات دبی در میزان آبشستگی تأثیر بالایی دارد. به‌طوری‌که با مقایسه سناریوهای با یک آبشکن (I-Q285، I-Q200 و I-Q350) کم‌ترین میزان آن با مقدار $5/5\text{ mm}$ مربوط به I-Q200 است. بررسی نتایج نشان داد که کم‌ترین میزان فرسایش در آبشکن‌های زاویه‌دار مربوط به سناریو با زاویه کم‌تر است.

نحوه استناد به این مقاله:

روشنگر، کیومرث، گودرزی، سپهر & عباس‌زاده، حمیدرضا. (۱۴۰۳). بررسی عددی عملکرد آبشکن‌های تیغه‌ای بر آبشستگی و تأثیر آن بر پارامترهای هیدرولیکی رسوب و جریان. محیط زیست و مهندسی آب. 10 (1) 136-121
<https://doi.org/10.22034/ewe.2023.388931.1851>



۱- مقدمه

پراکنده شدن آب رودخانه به طرفین رود و شسته شدن دیواره‌ها به داخل، موجب گسترش آب در بستر رودخانه می‌شود. این امر ضمن تخریب دیواره‌ها باعث هدر رفت آب رودخانه می‌گردد. همچنین با توجه به دبی مشخص رودخانه عمق مقطع رودخانه کاهش می‌یابد، این موضوع منجر به ایجاد مشکلاتی از قبیل تلف شدن آبزیان و اخلاص در حرکت وسایل نقلیه شناور در سطح رودخانه و وارد آوردن خسارت به ادواتی همچون توربین‌ها می‌گردد. این مسئله به‌خصوص در فصول کم آب و مناطق خشک اهمیت خاصی به خود می‌گیرد که به‌وسیله برخی سازه‌ها قابل جبران و پیشگیری است. در علم مهندسی آب برای تعمیق رودخانه‌ها و جلوگیری از تخریب سواحل رود که بعضاً در مناطق حساس خطرآفرین است از سازه‌هایی بنام آب‌شکن استفاده می‌شود. آب‌شکن‌ها سازه‌هایی عمود بر دیواره رود هستند که بسته به نوع و زاویه‌شان از سرعت جریان آب می‌کاهند. از طرفی این سازه‌ها باعث هدایت جریان به‌طرف داخل رودخانه می‌شوند. از آنجایی که زمین‌های اطراف رودخانه‌ها دارای اهمیت کشاورزی خاصی هستند احیای این اراضی با جلوگیری از پیشروی آب به طرفین در اثر تخریب دیواره‌ها یکی دیگر از دلایل استفاده از آب‌شکن‌ها است. با انحراف جریان، کناره رودخانه در حد فاصل دیواره‌های طبیعی موجود با مرز راستای اصلاح شده به‌تدریج با ته‌نشست رسوبات توسعه می‌یابد و با استقرار تدریجی پوشش گیاهی در درازمدت تثبیت می‌شود؛ بنابراین باگذشت زمان، جریان در بخش میانی بازه رودخانه متمرکز می‌شود. آب‌شکن‌ها به‌منظور کنترل نرخ انتقال رسوب ساحلی، جلوگیری از فرسایش ساحل یا جلوگیری از ورود امواج و رسوب به مسیر رودخانه و کانال‌های منتهی به دریا ساخته می‌شود.

Yazdi et al. (2010) الگوهای جریان در اطراف یک آب‌شکن منفرد با جریان سطح آزاد را با استفاده از مدل عددی فلوئنت شبیه‌سازی کردند. مقایسه سطح آزاد و سرعت مدل سه‌بعدی تطابق خوبی با نتایج تجربی به‌دست‌آمده توسط محققان دیگر نشان داد. (Abbasi et al. 2011) به بررسی عددی زاویه و هندسه آب‌شکن L شکل بر روی جریان و رژیم فرسایش در خم رودخانه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که دامنه حداکثر سرعت‌ها و جریان‌های گردابی و آب‌شستگی در زاویه جان 75° به میزان حداکثر و کم‌ترین مقدار در زاویه جان 30° رخ داده

است. (Hosseini et al. 2018) عمق آب‌شستگی اطراف گروه شمع را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد که در مقایسه بین روش‌های متفاوت شبکه عصبی، روش Bagging روش قابل اعتمادتری است. Amini and Asadi Parto (2017) الگوی جریان و مکانیسم آب‌شستگی موضعی اطراف گروه شمع‌ها با آرایش کنار هم و دو ردیف را با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D شبیه‌سازی نمودند. نتایج نشان داد که این نرم‌افزار به‌خوبی اندرکنش بین گروه شمع‌ها را شبیه‌سازی نموده و عدد رینولدز و فاصله بین شمع‌ها متغیرهای اصلی در تشکیل گردابه‌ها است. Nayyer et al. (2018) تأثیر آب‌شکن‌های سری ساده، T شکل و L شکل در کانال مستقیم بر تغییرات زمانی آب‌شستگی اطراف آن‌ها بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که آب‌شکن T شکل در 10% اول مدت‌زمان آب‌شستگی به بیش از 90% آب‌شستگی تعادلی می‌رسد. برای آب‌شکن ساده و L شکل در 15% اول مدت‌زمان آب‌شستگی، این مقدار بیش از 80% است. همچنین بیشترین عمق آب‌شستگی در آب‌شکن ساده و L شکل دیده شده است. (Abbasi et al. 2018) به بررسی عددی الگوی جریان، فرسایش و رسوب‌گذاری در اطراف آب‌شکن‌های با طول نامساوی تحت شرایط هیدرولیکی و هندسی متفاوت پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در چینش آب‌شکن‌ها از بزرگ به کوچک، عمق آب‌شستگی در زاویه 45° ، 55% و در چینش کوچک به بزرگ با زاویه 135° ، این عمق 72% نسبت به آب‌شکن با طول مساوی و در حالت عمود بر ساحل کاهش دارد. (Giglou et al. 2018) به بررسی تأثیر آب‌شکن بر الگوی رسوب‌گذاری پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش زاویه آب‌شکن بر طول و عرض منطقه رسوب‌گذاری تأثیر می‌گذارد. هنگامی که زاویه آب‌شکن از 90° به 120° افزایش می‌یابد، عرض و طول منطقه ته‌نشینی به ترتیب تا حدود 72% و 92% افزایش می‌یابد. استفاده ترکیبی از آب‌شکن‌ها به‌صورت سری رویکردی است که Nayyer et al. (2019) بررسی و تحلیل کرده‌اند. آن‌ها ترکیب LTT را به‌عنوان ترکیبی بهینه از یک سری ۳ آب‌شکن برای کاهش سرعت، تنش برشی، فشار و انرژی متلاطم معرفی کردند. (Ansary et al. 2019) به شبیه‌سازی توپوگرافی بستر و میدان جریان در اطراف موانع دو ردیف و توری سنگی در کانال

بر روی آبشکن‌های نفوذپذیر و غیرقابل نفوذپذیر انجام شده است. بنابراین در پژوهش حاضر عوامل مؤثر بر آبشستگی در اطراف سازه آبشکن در شرایط غوطه‌ور تحت سناریوهای مختلف در حالت تکی و دابل در زوایا و موقعیت‌های مختلف در مسیر جریان با مشخصات هیدرولیکی و هندسی متفاوت بررسی شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معادلات حاکم بر جریان

معادلات پیوستگی و ناویر استوکس به‌وسیله مدل عددی FLOW-3D برای انجام شبیه‌سازی سه‌بعدی حرکت سیال گسسته سازی می‌شوند. معادله پیوستگی یا بقای جرم در یک جریان سیال غیرقابل تراکم به‌صورت روابط (۱) و (۲) است (Othman Ahmed et al. 2019; Man et al. 2019):

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i A_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + G_i + f_i \quad (2)$$

که، u_i مؤلفه بردار سرعت در راستای i می‌باشد. نرم‌افزار جهت تحلیل سه‌بعدی جریان، معادلات ناویر استوکس را با استفاده از روش حجم محدود بر روی یک میدان شبکه‌بندی شده حل می‌کند. معادلات در دستگاه مختصات کارتزین به‌صورت روابط (۳) تا (۶) است (Amini and Asadi Parto 2017; Daneshfaraz et al. 2021):

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (5)$$

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

P نمایانگر فشار می‌باشند. معادلات ناویر استوکس معادلات مومنوم حاکم بر جریان سیالات نیوتنی لزج است. این معادله در حالت کلی به‌صورت رابطه (۷) بیان می‌شود (Daneshfaraz et al. 2022):

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + B_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \quad (7)$$

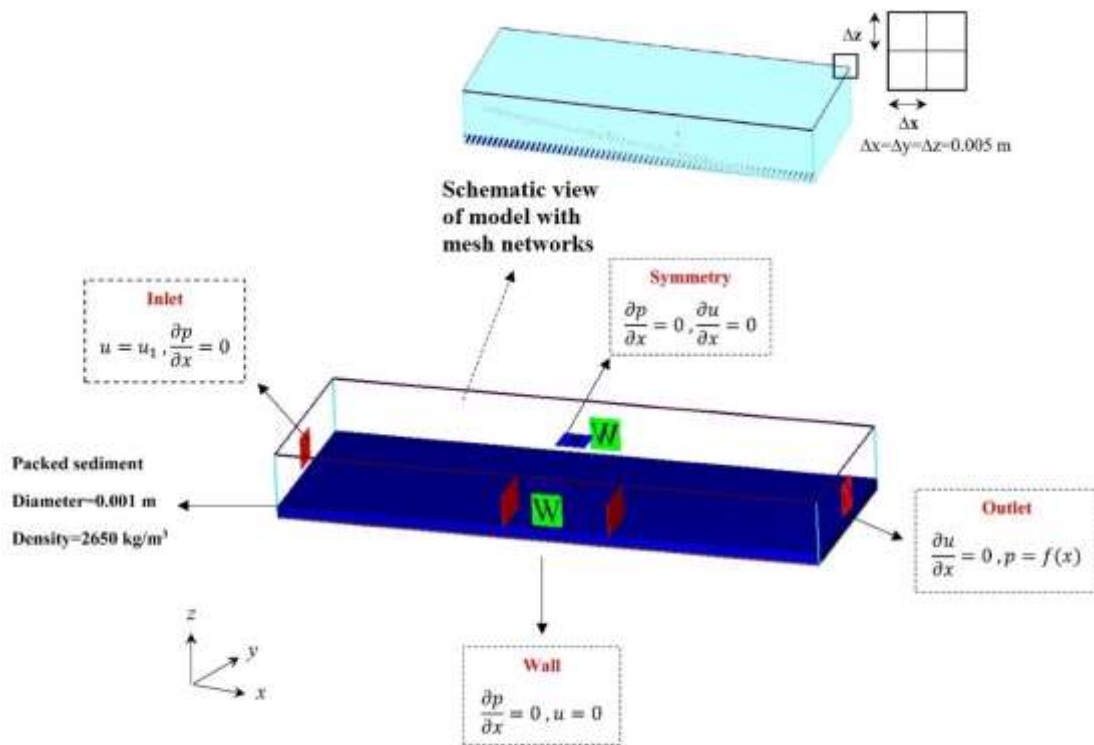
مستقیم پرداختند. نتایج نشان داد که با کاهش فاصله محور به محور آبشکن‌های باز دو ردیف، توانایی و دقت مدل عددی در برآورد مقدار حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. Pourshahbaz et al. (2022) مورفولوژی و هیدرودینامیک در اطراف آبشکن‌ها را بررسی کردند. نتایج مطالعه نشان داد که دقت شبیه‌سازی تحت تأثیر عدد فرود و نسبت سرعت بحرانی قرار گرفته است. دقت حداکثر عمق آبشستگی و مورفولوژی سطح در اطراف آبشکن‌ها برای شدت جریان کم‌تر از $(U_{ave}/U_{cr} = 0.65)$ دقیق‌تر بود. Alasadi et al. (2023) به بررسی آزمایشگاهی آبشستگی در اطراف آبشکن‌های V شکل پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش تعداد آبشکن‌ها و فاصله بین آن‌ها منجر به کاهش عمق آبشستگی می‌شود.

با توجه به بررسی‌های انجام شده و مطالعات صورت گرفته توسط محققین مختلف در زمینه بهبود کارایی انواع آبشکن‌ها به جهت کاهش از بین رفتگی ساحل رودخانه‌ها، مشاهده می‌شود که انواع شرایط هیدرولیکی حاکم بر جریان در هر رودخانه و همچنین مشخصات هندسی آبشکن‌های مورد استفاده اثر بسزایی در فرسایش و آبشستگی کرانه‌ها دارند. پارامترهای مختلفی مانند طول، فاصله، شکل دماغه، نوع مواد، زاویه با توجه به جهت جریان و نفوذپذیری می‌تواند در عملکرد آبشکن‌ها مؤثر باشد؛ بنابراین بحث در مورد ویژگی‌های چاله آبشستگی اطراف سازه ضروری به نظر می‌رسد. از سوی دیگر بررسی مطالعات گذشته بیانگر این است که بیشتر پژوهش‌ها،

که، (u, v, w) مؤلفه‌های سرعت، (A_x, A_y, A_z) کسری از مساحت مرتبط با جریان، (G_x, G_y, G_z) شتاب بدنه، (f_x, f_y, f_z) شتاب ناشی از لزجت در جهت‌های (x, y, z) R_{SOR} منبع جرم، R_{DIF} عبارت پخش آشفته‌گی، V_F کسر حجمی سیال و

۲-۲- شبکه حل، شرایط مرزی و انتخاب مدل آشفتگی در این پژوهش از مصالح ماسه با مشخصات چگالی kg/m^3 ۲۶۵۰، قطر 0.001 m و ضخامت 0.06 m در کف کانال به طول $3/6 \text{ m}$ ، عرض $1/2 \text{ m}$ و ارتفاع 0.8 m استفاده شد. هندسه سه‌بعدی و شبکه‌بندی مدل در شکل (۱) نشان داده شده است.

که، B_i نیروی حجمی در راستای i و μ لزوجت دینامیکی سیال، ρ جرم مخصوص آب، x_i و x_j به ترتیب مختصات جریان در راستای فضایی i و j و δ_{ij} دلتای کرونگر که در آن اگر $i=j$ باشد مقدار آن برابر ۱ و در غیر این صورت مقداری برابر صفر دارد (Daneshfaraz et al. 2022).



شکل ۱- هندسه سه‌بعدی و مش بندی مدل

Fig. 1 The 3D geometry and model meshing

از این‌رو مش با ابعاد 5 mm برای شبیه‌سازی سایر مدل‌ها انتخاب شد (Ghaderi et al. 2020). در انتخاب شرایط مرزی، برای ورودی جریان از شرط مرزی دی^۱ و در انتهای کانال از شرط مرزی خروجی^۲ استفاده شده است. همچنین برای دیواره‌ها و کف کانال از شرط مرزی دیوار^۳ و برای مرز بالایی، شرط مرزی متقارن^۴ انتخاب شد. در پژوهش حاضر مدل آشفتگی LES^۵ برای شبیه‌سازی‌ها انتخاب شد. از دلایل انتخاب این مدل می‌توان به مواردی همچون اطمینان‌پذیری در پاسخ‌گویی به مسائل گوناگون، حل دقیق معادلات و دقت بالا در نشان دادن جزئیات جریان و بررسی مطالعات پیشین

برای انتخاب شبکه‌بندی بهینه ابتدا شبیه‌سازی با ابعاد مش بزرگ انجام پذیرفت و سپس در مراحل بعدی شبیه‌سازی‌ها با ابعاد مش کوچک‌تر از مرحله قبل اجرا شد (Daneshfaraz et al. 2022). در این پژوهش، شبکه بهینه با انجام شبیه‌سازی در 5 حالت، با ابعاد شبکه متفاوت انتخاب گردید (Norouzi et al. 2023). با توجه به اینکه در شبکه با ابعاد $4/5 \text{ mm}$ و 5 نتایج شاخص‌های آماری در تحقیق‌های (Abbaszadeh et al. 2023; Hassanzadeh and Abbaszadeh 2023) حاصل از شبیه‌سازی به یکدیگر بسیار نزدیک بوده و نتایج مشابهی را در کانتورهای سرعت و میزان رسوب‌گذاری داشتند.

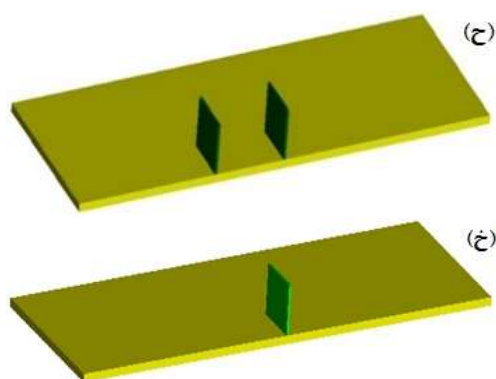
⁴symmetry

⁵Large Eddy Simulation

¹volume flow rate

²outflow

³wall



شکل ۲- مدل‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر: الف- سناریوی ۱: آب‌شکن T شکل، ب- سناریوی ۲: آب‌شکن I شکل، پ- سناریوی ۳: آب‌شکن L شکل، ت- سناریوی ۴: آب‌شکن L شکل، ث- سناریوی ۵: آب‌شکن I شکل با زاویه 30° ، ج- سناریوی ۶: آب‌شکن I شکل با زاویه 60° ، ح- سناریوی شماره ۷: دو آب‌شکن I شکل با فاصله 0.80 m از یکدیگر، ح- سناریوی شماره ۸: دو آب‌شکن I شکل با فاصله 0.60 m از یکدیگر، و خ- سناریوی شماره ۹ و ۱۰: یک آب‌شکن I شکل

Fig. 2 Studied models in the present research: a) Scenario No. 1: T-shaped groyne, b) Scenario No. 2: I-shaped groyne, c) Scenario No. 3: L-shaped groyne, d) Scenario No. 4: L-shaped groyne, e) Scenario No. 5: I-shaped groyne with an angle of 30° , f) Scenario No. 6: I-shaped groyne with an angle of 60° , g) Scenario No. 7: 2 I-shaped groynes with a distance of 0.80 m from each other, h) Scenario No. 8: two I-shaped groynes with a distance of 0.60 m from each other, and i) Scenario No. 9 and 10: I-shaped groyne

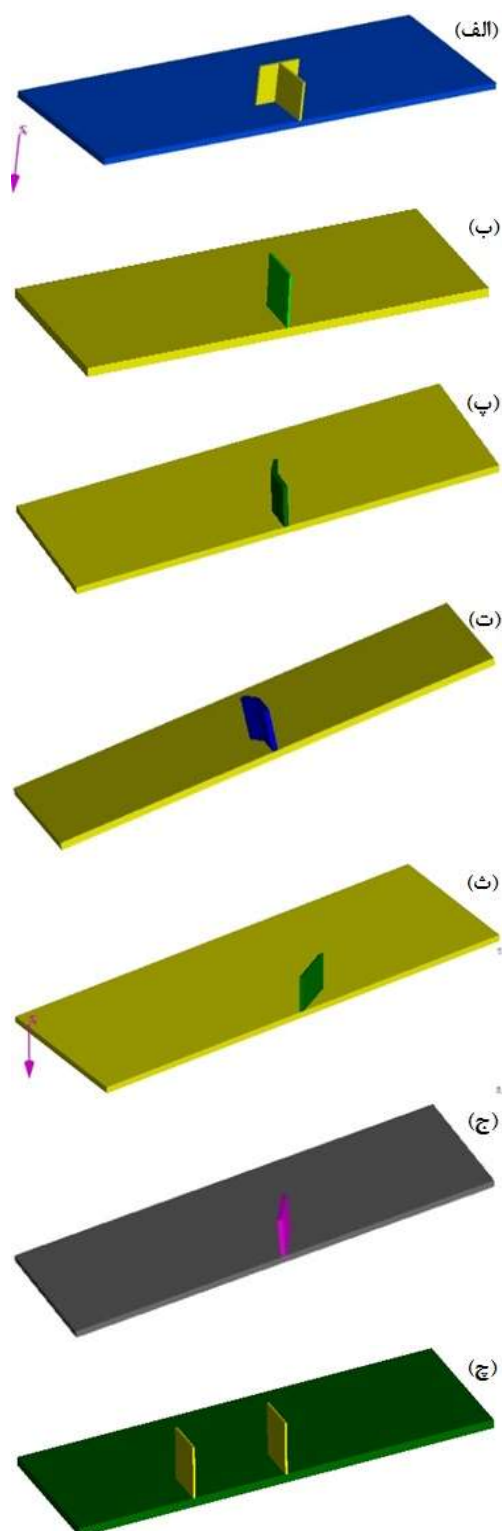
جدول ۱- سناریوهای مورد بررسی
Table 1 The examined scenarios

No.	Scenario name	Q (l/s)
1	T-Q285	28.5
2	I-Q285	28.5
3	LRight-Q285	28.5
4	LLeft-Q285	28.5
5	I30-Q285	28.5
6	I60-Q285	28.5
7	DI80-Q285	28.5
8	DI60-Q285	28.5
9	I-Q200	20
10	I-Q350	35

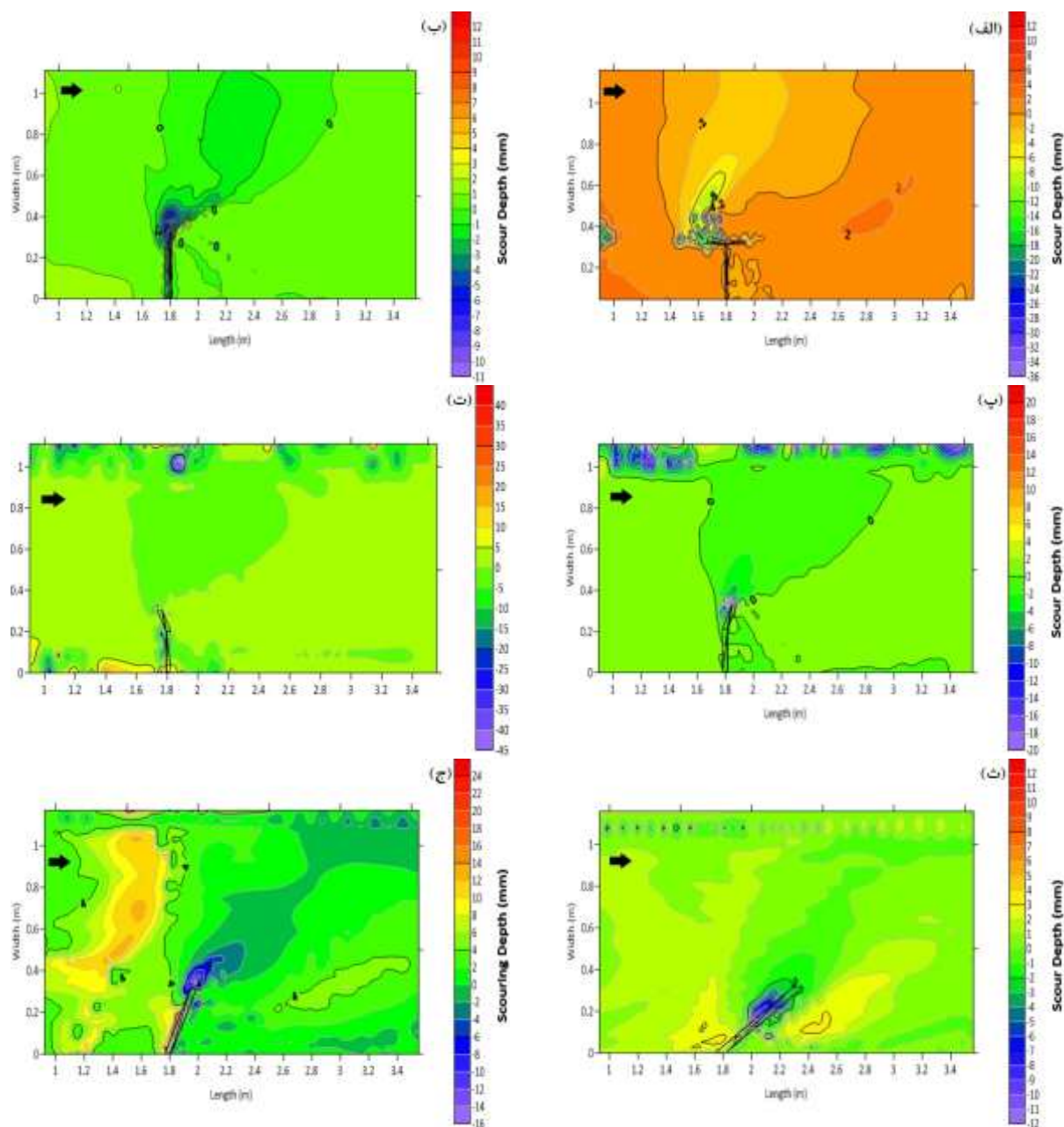
۳- یافته‌ها و بحث

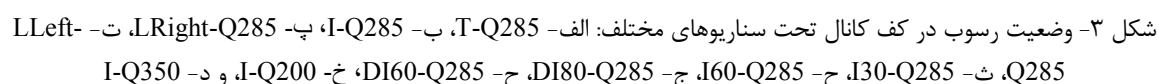
با توجه به شرایط اولیه و شرایط مرزی، حل عددی به صورت غیردائمی شروع شده و تا زمان رسیدن جریان به حالت ماندگار و پایدار، ادامه پیدا می‌کند. در شکل‌های (۳) و (۴)، به ترتیب

اشاره نمود (McCoy et al. 2008; Kirkil et al. 2009; Daneshfaraz et al. 2023). در تعریف شرایط اولیه توزیع فشار به صورت هیدرواستاتیکی تعریف شده است. همچنین مدل‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر در شکل (۲) و جدول (۱) آورده شده است.



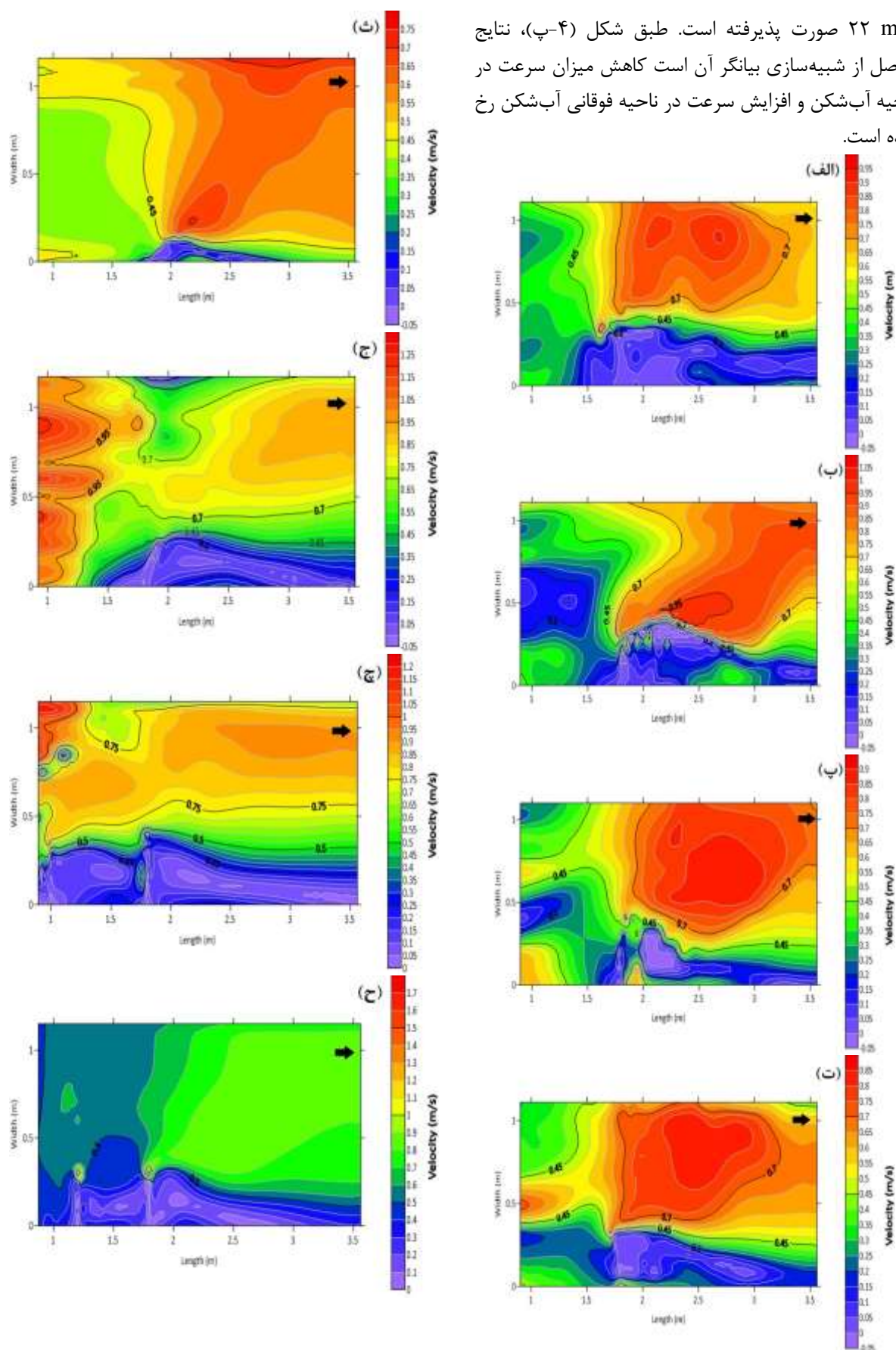
وضعیت رسوب و سرعت تحت سناریوهای مختلف نشان داده شده است که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته شده است.





در سناریوی دوم وضعیت آبشستگی در نوک تیغه به میزان حداکثر ۱۱ mm است (شکل ۳-ب). از طرفی دیگر ۱۳ mm رسوب‌گذاری به صورت موضعی در کناره نوک تیغه آب‌شکن I شکل در وسط کانال رخ داده است. کانتور سرعت نشان‌دهنده کاهش سرعت در ناحیه آب‌شکن I شکل و افزایش سرعت در

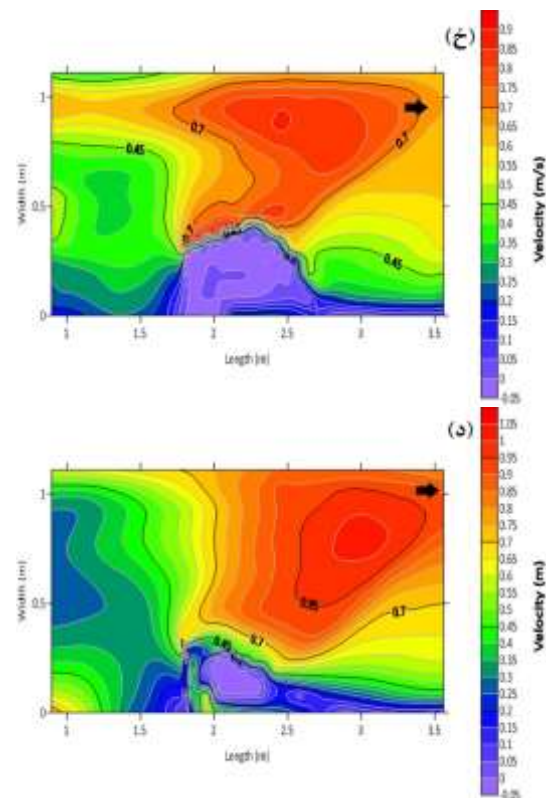
۲۲ mm صورت پذیرفته است. طبق شکل (۴-پ)، نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر آن است کاهش میزان سرعت در ناحیه آب‌شکن و افزایش سرعت در ناحیه فوقانی آب‌شکن رخ داده است.



فوقانی آب‌شکن است. شکل (۴-ث) مؤید این است که کاربرد آب‌شکن در حالت زاویه‌دار اثرگذاری آن را کم کرده است، به‌طوری‌که زاویه بسیار آب‌شکن منجر به کاهش مساحت با سرعت کم در کانال می‌شود که نشان‌دهنده کم اثر بودن این سناریو در کاهش میزان سرعت جریان است. سناریو I60-Q285 از یک تیغه آب‌شکن I شکل با زاویه 60° از دیواره پائینی استفاده شده و دبی $28/5 \text{ l/s}$ به آن وارد می‌شود. بر اساس شکل (۳-ج) و با شبیه‌سازی جریان می‌توان مشاهده کرد که وضعیت آب‌شستگی در نوک تیغه به میزان حداکثر mm ۱۶ بوده و رسوب‌گذاری به‌صورت موضعی در وسط تیغه به میزان mm ۲۶ رخ داده است. کانتور سرعت در شکل (۴-ج)، نشان‌دهنده کاهش سرعت در ناحیه آب‌شکن و افزایش سرعت در ناحیه فوقانی آب‌شکن است. در سناریوی ششم با زاویه 60° ، آب‌شکن علاوه بر کاهش سرعت در ناحیه تحتانی منجر به افزایش سرعت در ناحیه فوقانی آب‌شکن به‌اندازه سایر سناریوها نشده است. این سناریو در مقایسه با سناریوی پنجم به‌دلیل کاهش زاویه به‌کارگیری آب‌شکن و نزدیکی آن به حالت قائم، اثرگذاری بیشتری در کاهش میزان سرعت جریان در ناحیه آب‌شکن دارد.

در سناریوی هفتم مطابق شکل (۳-چ)، مشاهده می‌گردد که وضعیت آب‌شستگی در نوک تیغه اول به میزان حداکثر mm ۲۴ شده است. درحالی‌که در تیغه دوم میزان رسوب‌گذاری به‌اندازه mm ۶ قابل‌مشاهده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد جریان با سرعت کم در طول کانال و در ناحیه آب‌شکن به‌صورت یکنواخت توزیع شده است. کانتور سرعت نشان‌دهنده کاهش سرعت در ناحیه آب‌شکن و افزایش سرعت در ناحیه فوقانی آب‌شکن است (شکل ۴-چ).

بر اساس نتایج حاصل از مدل عددی FLOW-3D مقدار آب‌شستگی در سناریوی هشتم در آب‌شکن I شکل با فاصله m ۰/۶۰ از هم در وسط تیغه به mm ۴۸ رسیده است. در این سناریو، mm ۱۰ رسوب‌گذاری به‌صورت موضعی در انتهای کانال رخ داده است که در شکل (۳-ح) قابل مشاهده است. با توجه به شکل (۴-ح)، کانتور سرعت نشان‌دهنده کاهش سرعت در ناحیه آب‌شکن و افزایش سرعت در ناحیه فوقانی آب‌شکن می‌باشد. همچنین جریان با سرعت کم در طول کانال در ناحیه آب‌شکن به‌صورت یکنواخت توزیع شده است.



شکل ۴- کانتور سرعت تحت سناریوهای مختلف: الف- T-Q285، ب- I-Q285، پ- LRight-Q285، ت- LLeft-Q285، ث- DI60-Q285، ج- I30-Q285، ح- DI80-Q285، خ- I-Q200، و ذ- I-Q350

Fig. 4 Velocity contour under the different scenarios: a) T-Q285, b) I-Q285, c) LRight-Q285, d) LLeft-Q285, e) I30-Q285, f) I60-Q285, g) DI80-Q285, h) DI60-Q285, i) I-Q200, and j) I-Q350

مطابق شکل (۳-ت)، در سناریوی چهارم، وضعیت آب‌شستگی در نوک تیغه به میزان حداکثر mm ۴۵ است. همچنین mm ۴۵ رسوب‌گذاری به‌صورت موضعی در دیواره پائینی رخ داده است. کانتور سرعت در شکل (۴-ت)، نشان‌دهنده کاهش سرعت در ناحیه آب‌شکن و افزایش سرعت در ناحیه فوقانی آب‌شکن می‌باشد. همچنین در این سناریو ناحیه عظیم تأثیر پذیرفته از آب‌شکن تا انتهای کانال امتداد دارد که منجر به یکنواختی رسوب می‌شود.

بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای سناریوی پنجم نشان می‌دهد که وضعیت آب‌شستگی در وسط تیغه به میزان حداکثر mm ۱۲ رسیده است. همچنین mm ۱۴ رسوب‌گذاری به‌صورت موضعی در مجاورت قسمت آب‌شسته در شکل (۳-ث) قابل مشاهده است. مطابق شکل (۴-ث)، کانتور سرعت بیانگر کاهش سرعت در ناحیه آب‌شکن و افزایش سرعت در ناحیه

شکل (۴-د)، کانتور سرعت نشان‌دهنده کاهش سرعت در ناحیه آبشکن و افزایش سرعت در ناحیه فوقانی آبشکن هست. در محدوده قبل از آبشکن، سرعت به دلیل وجود جریان‌های برگشتی دارای مقادیر بسیار کوچک است که البته این سرعت‌های کوچک در مقایسه با آبشکن‌های دو تیغه مشابه به دلیل آب‌گذری کمتر، کوچک‌تر از آبشکن‌های یک تیغه است. در مقایسه با تحقیق (Ansary et al. (2019 کاربرد آبشکن‌های دو تیغه‌ای مانع از ایجاد سرعت‌های منفی شده و میزان سرعت را تا انتها ثابت نگه می‌دارد که منجر به عدم فرسایش بیشتر می‌شود. البته عمده سرعت طولی جریان از نزدیکی مقطع نصب آبشکن آغاز می‌شود و در عرض کانال از مقطع آبشکن تا محل دماغه، افزایش جزئی سرعت و در ادامه تا دیواره مقابل افزایش قابل توجه سرعت جریان مشاهده می‌شود.

سناریوی نهم بنام I-Q200 است که در آن از یک تیغه آبشکن I شکل استفاده شده است. در این حالت دبی ۲۰ l/s در آن وارد می‌شود. همچنین همانند سناریوهای قبلی کف کانال به اندازه ۰/۰۶ m با ماسه پوشانده شده است. وضعیت آبشستگی در نوک تیغه به میزان حداکثر ۵/۵ mm بوده و ۵/۵ mm رسوب‌گذاری به صورت موضعی در سمت راست نوک تیغه انباشته شده است (شکل ۳-خ). کانتور سرعت در شکل (۴-خ) نشان‌دهنده کاهش سرعت در ناحیه آبشکن و افزایش سرعت در ناحیه فوقانی است.

در سناریوی دهم میزان دبی ورودی ۳۵ l/s است. مطابق شکل (۳-د)، وضعیت آبشستگی در نوک تیغه به میزان حداکثر ۲۳ mm شده است. از طرفی دیگر ۶ mm رسوب‌گذاری به صورت موضعی در سمت راست نوک تیغه رخ داده است. با توجه به

جدول ۲- نتایج سناریوهای مورد بررسی
Table 2 Results of the examined scenarios

Scenario No.	Scenario Name	Erosion of the Channel Bottom (cm ³)	Maximum Dune Height (mm)	Maximum Scouring Depth (mm)
1	T-Q285	5780	14	36
2	I-Q285	1320	13	11
3	LRight-Q285	2340	22	20
4	LLeft-Q285	5670	45	45
5	I30-Q285	1010	14	12
6	I60-Q285	1260	26	16
7	DI80-Q285	6210	22	24
8	DI60-Q285	5750	12	48
9	I-Q200	810	6	5.5
10	I-Q350	2520	6	23

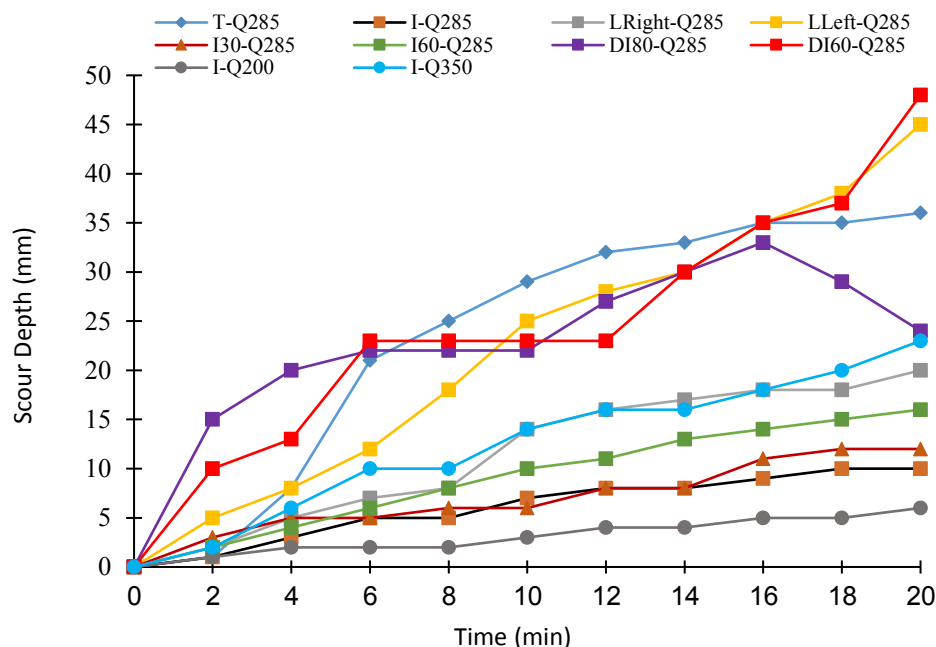
Q285، می‌توان متوجه بیشترین میزان آبشستگی برای سناریوی DI60-Q285 و سپس DI80-Q285 شد. تغییرات دبی در میزان آبشستگی تأثیر بسزایی دارد که این امر به وضوح با مقایسه سناریوهای I-Q285، I-Q200 و I-Q350 قابل مشاهده است. به طوری که با افزایش میزان دبی میزان آبشستگی نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر آبشستگی موضعی رخ داده در مجاورت تیغه، اطلاع داشتن از میزان رسوب خارج شده از کانال نیز اطلاعات ارزشمندی را ارائه می‌کند. بدین منظور تغییرات حجم رسوب در کف کانال پس از اتمام شبیه‌سازی‌ها محاسبه شده است (جدول ۲). از بین ۱۰

با بررسی نتایج به دست آمده از سناریوهای مدل‌سازی شده در جدول (۲) بیش‌ترین عمق آبشستگی در حالت‌هایی که صرفاً یک تیغه موجود بود مربوط به سناریو LLeft-Q285 و LRight-Q285 است. این موضوع در تحقیق (Nayyer et al. (2018 نیز وجود دارد و بیش‌ترین میزان آبشستگی در آبشکن‌های ساده و L شکل دیده شده است. این امر بیانگر تأثیر عملکرد تیغه‌های مخالف در جهت جریان است. به عبارتی دیگر، در صورتی که شکل تیغه موافق جهت جریان نباشد میزان آبشستگی بیشتری در مجاورت آن رخ می‌دهد. با مقایسه سناریوهای I-Q285 و DI60-Q285 و DI80-

می‌کند. این موضوع در پژوهش (Abbasi et al. 2018) نیز دیده شده است. به‌طوری‌که این پدیده تا جایی پیش می‌رود که چاله آبشستگی در آب‌شکن‌های متوالی به یکدیگر متصل می‌شوند.

بهره‌گیری از سری زمانی عمق آبشستگی برای سناریوهای مختلف در کسب اطلاعات در خصوص روند تکاملی آن بسیار حائز اهمیت است. بدین منظور سری زمانی این تغییرات مطابق شکل (۵) رسم شده است. همان‌طور که مشخص است عمق آبشستگی در تمامی سناریوها با گذر زمان در حال افزایش است و تعادل نیافته است و صرفاً در بازه‌های محدودی رفتاری برخلاف افزایش عمق از خود نشان داده است.

سناریوی مذکور، بیشترین میزان خروج رسوب مربوط به سناریوی DI60-Q285 است. در این سناریو به علت وجود دو عدد تیغه در کانال، گرداب‌های بین آن‌ها منجر به فرسایش زیاد بستر می‌شود. در مقابل سناریوهای I30-Q285 و I-Q200 کم‌ترین میزان فرسایش را دارند که برای مورد اول علت این امر موافق جهت جریان بودن تیغه است. همچنین برای مورد دوم ریشه در کاهش دبی ورودی می‌باشد. لازم به‌ذکر است با مقایسه موارد تک تیغه در شرایط دبی یکسان، سناریوی I-Q200 بیشترین فرسایش را داشته است. هرچند تقریباً در همه حالات، رسوب‌گذاری در بین آب‌شکن‌ها دیده می‌شود، اما در پای آب‌شکن‌ها نیز فرسایش وجود دارد. با افزایش زاویه از 45° به 90° اندازه چاله آبشستگی افزایش پیدا



شکل ۵- سری زمانی عمق آبشستگی

Fig. 5 Time series of scour depth

مورد بررسی، سناریوهای اول، چهارم، ششم، هفتم، هشتم و نهم این شرط را تأمین نموده‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

۱- محدوده آبشستگی‌ها عموماً در مجاورت تیغه رخ داده است که به علت جریان گردابی در محدوده تیغه‌ها، تلماسه‌هایی با ارتفاع متناسب با عمق آبشستگی در مجاورت آن ایجاد شده است. در سناریوهایی که از حالت زاویه‌دار تیغه استفاده شده

با بررسی کانتورهای سرعت در سناریوهای مختلف می‌توان نتیجه گرفت که در تمامی سناریوها به‌جز سناریوی که در آن آب‌شکن با زاویه 30° قرار دارد، آب‌شکن قابلیت انتقال جریان از قسمت‌های تحتانی کانال به قسمت‌های مرکزی کانال را داشته است. سناریوی مقبول از این بین در صورت اولویت‌دهی به کانتورهای سرعت، مربوط به سناریوهایی هست که سرعت را تا انتهای کانال ثابت نگه‌داشته است تا از رخداد تلماسه و فرسایش‌های موضعی جلوگیری نمایند. از بین سناریوهای

۴- در تمامی سناریوها، سرعت جریان در ناحیه مربوط به آبشکن به مراتب کمتر از قسمت‌های مرکزی است. این امر منجر می‌گردد تا از فرسایش در نقاط ساحلی جلوگیری شود.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها حسب درخواست، از طرف نویسنده مسئول از طریق ایمیل قابل ارسال می‌باشد.

تضاد منافع نویسندگان

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

است، در دیواره فوقانی، آبشستگی‌ها و تلماسه‌های تکرارشونده رخ می‌دهد.

۲- کاربرد دو آبشکن باعث می‌شود تا در آبشکن اول فرسایش بالایی به وجود آید این درحالی است که در آبشکن بعد از آبشکن اول رسوب‌گذاری رخ می‌دهد.

۳- در حالتی که از دو عدد آبشکن استفاده می‌شود، آبشستگی با کاهش فاصله بین آبشکن‌ها کاهش می‌یابد. با مقایسه نتایج تحت شرایط دبی ورودی مختلف، رابطه مستقیم بین افزایش دبی و افزایش فرسایش وجود دارد.

References

- Abbasi, S., Kamanbedast, A., & Ahadian, J. (2011). Numerical investigation of angle and geometric of l-shape groin on the flow and erosion regime at river bends. *World Appl. Sci. J.*, 15(2), 279-284.
- Abbasi, S., Poorshahbaz, H., & Taghvai, P. (2018). Numerical investigation of flow pattern, erosion and sedimentation around parallel unequal spur dikes under different geometric and hydraulic condition: numerical analysis. *J. Hydraul.*, 13(3), 17-29. DOI: [10.30482/jhyd.2018.81354](https://doi.org/10.30482/jhyd.2018.81354) [In Persian].
- Abbaszadeh, H., Norouzi, R., Sume, V., Kuriqi, A., Daneshfaraz, R., & Abraham, J. (2023). Sill role effect on the flow characteristics (experimental and regression model analytical). *Fluid.*, 8(8), 235. DOI: [10.3390/fluids8080235](https://doi.org/10.3390/fluids8080235)
- Alasadi, L. A. R., Khelif, T. H., & Hassan, F. A. (2023). Experimental investigation for the local scour around V-shaped spur-dikes. *Sci. Rev. Eng. Environ. Sci.*, 32(1), 69–86. DOI: [10.22630/srees.4506](https://doi.org/10.22630/srees.4506)
- Amini, A., & Asadi Parto, A. (2017). 3D numerical simulation of flow field around twin piles. *Acta Geophys.*, 65(6), 1243-1251. DOI: [10.1007/s11600-017-0094-x](https://doi.org/10.1007/s11600-017-0094-x)
- Ansary, S., Kahrizi, E., & Fazli, M. (2019). Numerical simulation of bed topography and flow field around double rows-barriers and gabion groin in the direct channel using Flow-3D. *Environ. Water Eng.*, 5(1), 58-70. DOI: [10.22034/jewe.2019.160925.1299](https://doi.org/10.22034/jewe.2019.160925.1299) [In Persian].
- Daneshfaraz, R., Abbaszadeh, H., Gorbanvatan, P., & Abdi, M. (2021). Application of sluice gate in different positions and its effect on hydraulic parameters in free-flow conditions. *J. Hydraul. Struct.*, 7(3), 72-87. DOI: [10.22055/jhs.2022.39208.1196](https://doi.org/10.22055/jhs.2022.39208.1196)
- Daneshfaraz, R., Norouzi, R., Abbaszadeh, H., Kuriqi, A., & Di Francesco, S. (2022). Influence of sill on the hydraulic regime in sluice gates: an experimental and numerical analysis. *Fluid.*, 7(7), 244. DOI: [10.3390/fluids7070244](https://doi.org/10.3390/fluids7070244)
- Daneshfaraz, R., Norouzi, R., Ebadzadeh, P., & Kuriqi, A. (2023). Influence of sill integration in labyrinth sluice gate hydraulic performance. *Innov. Infrastruct. Solution.*, 8(4), 118. DOI: [10.1007/s41062-023-01083-z](https://doi.org/10.1007/s41062-023-01083-z)
- Ghaderi, A., Daneshfaraz, R., Dasineh, M., & Di Francesco, S. (2020). Energy dissipation and hydraulics of flow over trapezoidal–triangular labyrinth weirs. *Water*, 12(7), 1992. DOI: [10.3390/w12071992](https://doi.org/10.3390/w12071992)
- Giglou, A. N., Mccorquodale, J. A., & Solari, L. (2018). Numerical study on the effect of the spur dikes on sedimentation pattern. *Ain Shams Eng. J.*, 9(4), 2057-2066. DOI: [10.1016/j.asej.2017.02.007](https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.02.007)
- Hassanzadeh, Y., & Abbaszadeh, H. (2023). Investigating discharge coefficient of slide gate-sill combination using expert soft computing models. *J. Hydraul. Struct.*, 9(1), 63-80. DOI: [10.22055/jhs.2023.43683.1251](https://doi.org/10.22055/jhs.2023.43683.1251)

- Hosseini, R., Fazloul, R., Saneie, M., & Amini, A. (2018). Bagged neural network for estimating the scour depth around pile groups. *Int. J. River Basin Manage.*, 16(4), 401-412. DOI: [10.1080/15715124.2017.1372449](https://doi.org/10.1080/15715124.2017.1372449)
- Kirkil, G., Constantinescu, G., & Ettema, R. (2009). Detached eddy simulation investigation of turbulence at a circular pier with scour hole. *J. Hydraul. Eng.*, 135, 888-901. DOI: [10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000101](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000101)
- Man, C., Zhang, G., Hong, V., Zhou, S., & Feng, Y. (2019) Assessment of turbulence models on bridge-pier scour using Flow-3D. *World J. Eng. Technol.*, 7(2), 241-255. DOI: [10.4236/wjet.2019.72016](https://doi.org/10.4236/wjet.2019.72016)
- McCoy, A., Constantinescu, G., & Weber, L. J. (2008). Numerical investigation of flow hydrodynamics in a channel with a series of groynes. *J. Hydraul. Eng.*, 134(2), 157-172. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:2\(157\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:2(157))
- Nayyer, S., Farzin, S., Karami, H., & Rostami, M. (2018). Experimental study on the effect of spur dike's different shapes and on time variation of scour depth around them. *Irrig. Drain. Struct. Eng. Res.*, 19(72), 33-50. DOI: [10.22092/idser.2017.114741.1238](https://doi.org/10.22092/idser.2017.114741.1238) [In Persian].
- Nayyer, S., Farzin, S., Karami, H., & Rostami, M. (2019). A numerical and experimental investigation of the effects of combination of spur dikes in series on a flow field. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 41, 256. DOI: [10.1007/s40430-019-1757-0](https://doi.org/10.1007/s40430-019-1757-0)
- Norouzi, R., Ebadzadeh, P., Sume, V., & Daneshfaraz, R. (2023). Upstream vortices of a sluice gate: An experimental and numerical study. *AQUA—Water Infrastruct., Ecosyst. Soc.*, 72(10), 1906-1919. DOI: [10.2166/aqua.2023.269](https://doi.org/10.2166/aqua.2023.269)
- Othman Ahmed, K., Amini, A., Bahrami, J., Kavianpour, M. R., & Hawez, D. M. (2021). Numerical modeling of depth and location of scour at culvert outlets under unsteady flow conditions. *J. Pipeline Syst. Eng. Practice*, 12(4), 04021040. DOI: [10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000578](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000578)
- Pourshahbaz, H., Abbasi, S., Pandey, M., Pu, J. H., Taghvaei, P., & Tofangdar, N. (2022). Morphology and hydrodynamics numerical simulation around groynes. *ISH J. Hydraul. Eng.*, 28(1), 53-61. DOI: [10.1080/09715010.2020.1830000](https://doi.org/10.1080/09715010.2020.1830000)
- Yazdi, J., Sarkardeh, H., Azamathulla, H. Md., & Ghani, A. A. (2010). 3D simulation of flow around a single spur dike with free-surface flow. *Int. J. River Basin Manage.*, 8(1), 55-62. DOI: [10.1080/15715121003715107](https://doi.org/10.1080/15715121003715107)



Environment and Water Engineering

Homepage: www.jewe.ir



ISSN: 2476-3683

Research Paper

Effect of Inflow on the Hydrodynamic Behavior of Ponds in Recirculating Aquaculture Systems

Atefeh Moghbeli¹, Mohammad Bagher Rahnema², Nasrin Sayari³, Mahdi Naghizadeh⁴ and Mohammad Zounemat-Kermani^{2*}

¹Ph.D. Scholar, Department of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

²Assoc. Professor, Department of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

³Assist. Professor, Department of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

⁴Assist. Professor, Department of Plant Productions, Agricultural Faculty of Bardsir, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Article information

Received: March 12, 2023

Revised: May 21, 2023

Accepted: May 23, 2023

Keywords:

Hydraulic Efficiency
Recirculating Aquaculture Systems
Residence Time Distribution
RTD Curve
Stagnant Region

*Corresponding author:

zounemat@uk.ac.ir



Abstract

Constant and proper mixing of water in fish farms is essential for creating maximum uniformity, minimizing stagnant areas, properly distributing oxygen, and removing solid waste from the bottom of the ponds. The effect of the inflow installation mode and inflow momentum force in octagonal ponds was examined on the hydrodynamic flow mixing by laboratory modeling. For this purpose, the inflow was analyzed in three modes with angles of 90, 60, and 30° and the inflowing force at four levels with values of 0.004, 0.009, 0.013, and 0.018 N by the residence time distribution curve and hydraulic efficiency of octagonal ponds. The laboratory modeling results revealed that the inflow at the 90° mode for all four-momentum forces does not form an eddy current and short circuit in the pond's flow, as the result of which the hydraulic efficiency of the pond falls in the weak range. To improve the hydraulic efficiency of the pond, the inflow was installed at 60 and 30° modes; the results demonstrated 2.68 and 3.26 times higher efficiency than the 90° mode. Moreover, for all three inflow installation modes, the hydraulic efficiency had an inverse relationship with the inflow momentum force.

How to cite this paper: Moghbeli, A., Rahnema, M. B., Sayari, N., Naghizadeh, M. and Zounemat-Kermani, M. (2024). Numerical investigation of the performance of blade groynes on scouring and its effect on hydraulic parameters of sediment and flow. *Environ. Water Eng.*, 10(1), 137-150. <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.389363.1853> (In Persian)



© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Various methods are used for breeding aquatic animals, and recirculating aquaculture systems (RAS) are expanding since they reduce the need for healthy water resources. Usually, circular and octagonal fish breeding ponds are used in these systems due to suitable hydrodynamic mixing. Researchers have stated that the flow hydrodynamic behavior in octagonal and circular ponds depends on the geometric and hydraulic design of the pond, which includes the inlet and outlet systems. Hydraulic efficiency is an indicator used for evaluating the geometric design and hydraulic performance of the ponds. The residence time distribution (RTD) category was used to calculate hydraulic efficiency. The RTD curve expresses the flow hydrodynamic and indicates the formation or non-formation of the stagnant regions in the pond. Considering that each plug of the flow injected into the breeding pond has its own hydraulic retention time, which depends on the momentum of the inlet and outlet flow and the internal design of the pond (including the installation location and design of inlet and outlet systems), the combined effect of the direct inlet installation mode with the inlet flow momentum force in the octagonal fish breeding pond was investigated in the present study. The findings of this research are presented in the form of hydraulic efficiency, curve RTD, and the percentage of stagnant regions.

Material and Methods

The present research was based on a Froude number similarity model from an octagonal fish breeding pond with a 1:10 scale. The built model has dimensions of 100×100×50 cm and is filled with water to a depth of 20 cm. In addition, the changing time of the pond water volume was taken into account on an hourly basis. Therefore, the flow discharge of the inlet to the pond was adjusted to 3.4 l/min. This research examines two important inlet flow characteristics: the flow inlet installation mode and the inlet flow momentum force. For this purpose, the inlet flow installation mode and the inlet flow momentum force are tested by changing the inlet flow angle in the direction of the z-axis at three levels as 90°, 60°, and 30°, and the inlet flow velocity at four levels as 0.004 N, 0.009 N, 0.013 N, and 0.018 N, respectively. The design of the present study's experiments is shown in Table 1.

Table 1 Laboratory settings

Installation angle of flow inlet (α)	Inlet flow momentum forces (F_n) (N)	The velocity of the inlet flow (cm/s)	Test
90°	0.004	10	Ta1
	0.009	20	Ta2
	0.013	30	Ta3
	0.018	40	Ta4
60°	0.004	10	Tb1
	0.009	20	Tb2
	0.013	30	Tb3
	0.018	40	Tb4
30°	0.004	10	Tc1
	0.009	20	Tc2
	0.013	30	Tc3
	0.018	40	Tc4

Moreover, tracer sodium chloride is used for the RTD curve and the hydraulic efficiency related to each test. The tracer contains 3 L of sodium chloride solution with a concentration of 50 g/l. To make the inlet flow and flow movement visible, 5 g of potassium permanganate is added to the tracer solution. After setting the inlet flow installation angle, the inlet flow momentum force for each test, and the flow discharge stability of the inlet flow, the tracer solution is injected into the inlet flow with a sudden pulse test and the test begins. The tracer concentration in the outlet flow is measured every 60 s for 60 min using the TDS meter device.

Results

The TDS-time diagram shows the combined examination of the inlet current installation mode and the inlet flow momentum force (Fig. 1). According to laboratory observations and RTD curves in the TDS-time diagram, installing the flow inlet in 90° leads to the non-formation of the eddy current and creates a short circuit between the inlet and outlet flows. The occurrence of short-circuiting in ponds causes the formation of stagnant regions. If there is a partial flow between the stagnant regions and the main flow, the tracer trapped in the stagnant regions will cause a tail on the right arm of the RTD curve (Fig. 1a). In the 60° and 30° degrees of inlet flow installation, the RTD curve peak shifts to the right side of the graph, indicating an increase in the average hydraulic retention time. In these cases, the inlet flow follows a circular

path in the pond, moving from all parts of the pond volume.

Changes in hydraulic efficiency as a result of modifying the studied parameters are presented in Fig. 2. Installing the flow inlet in 90° mode for every F_n results in weak hydraulic efficiency. Thus, changing the inlet flow installation mode from 90° to 60° and 30° increases hydraulic efficiency by 2.68 and 3.26 times, respectively. The hydraulic efficiency in mode 30° and all four inlet flow momentum forces is in the high range, and the pond exhibits desirable hydrodynamic behavior. In addition, the inlet flow in mode 60° for F_{n1} and F_{n2} shows a hydraulic efficiency of less than 75%. Only by reducing the momentum force to the same level as 0.013 N and 0.018 N and in the same operating conditions, the hydraulic efficiency becomes more than 75%. Therefore, under the same operating conditions and inlet flow discharge, the hydraulic efficiency of the pond increases only by reducing the momentum force.

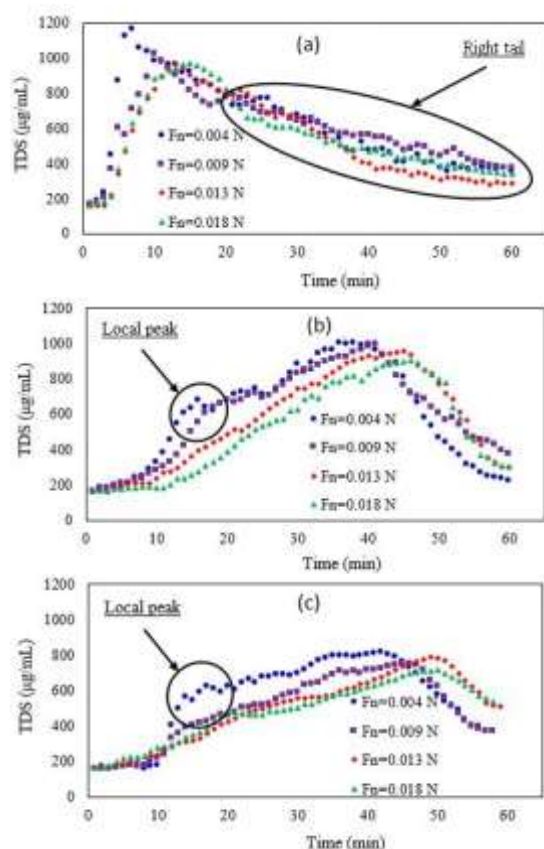


Fig. 1 The TDS-time diagram is the result of the combined investigation of the inlet flow mode and the momentum force of the inlet flow at different angles: a) 90, b) 60, and c) 30°

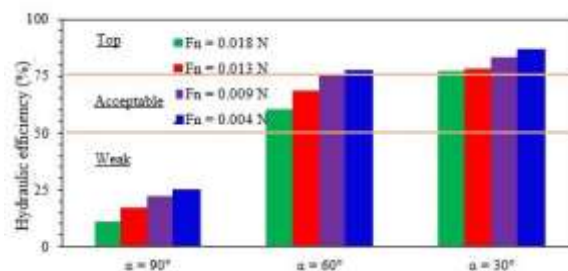


Fig. 2 Changes in the hydraulic efficiency due to modifying the inlet flow mode and the momentum force of the inlet flow

Conclusions

This study investigated the influence of the parameters of the flow inlet installation angle in three modes and the inlet flow force at four levels on the hydrodynamic behavior of a RAS octagonal pond. The most important results of this laboratory study are summarized below:

1. Setting the inlet flow angle to 90° at the lowest momentum force of the inlet flow results in more than 75% stagnant regions, with an increase in the inlet flow momentum force causing an increase in the stagnant regions.
2. Reducing the inlet flow momentum force improves the hydrodynamic performance of the pond for all three inlet flow installation angles.
3. Installing the inlet flow in the 90° mode for all four inlet flow momentum forces causes a short circuit flow in the pond.

Data Availability

The data collected during the research experiments are presented in the form of a TDS-time graph. The data can be sent via email by the corresponding author upon request.

Conflicts of interest

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



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir

مقاله پژوهشی

اثر جریان ورودی بر رفتار هیدرودینامیکی حوضچه های مزارع مدار بسته پرورش ماهی

عاطفه مقبلی^۱، محمدباقر رهنما^۲، نسرين سياري^۳، مهدی نقی زاده^۴ و محمد ذونعمت کرمانی^{۲*}^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران^۲ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران^۳ استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران^۴ استادیار، گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی بردسیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ دریافت: [۱۴۰۱/۱۲/۲۱]

تاریخ بازنگری: [۱۴۰۲/۰۲/۳۱]

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۲/۰۳/۰۲]

واژه های کلیدی:

آبزی پروری چرخشی

توزیع زمان ماند

حجم مرده

راندمان هیدرولیکی

منحنی RTD

* نویسنده مسئول:

zounemat@uk.ac.ir

اختلاط دائمی و مناسب آب در حوضچه های پرورش ماهی با هدف ایجاد بالاترین میزان یکنواختی، به حداقل رساندن مناطق راکد، توزیع مناسب اکسیژن و حذف پسماندهای جامد در کف حوضچه ها امری ضروری است. در این پژوهش اثر حالت نصب ورودی جریان و نیروی مومنتم جریان ورودی در حوضچه های هشت ضلعی بر اختلاط هیدرودینامیکی جریان به وسیله مدل سازی آزمایشگاهی بررسی شد. بدین منظور حالت نصب ورودی جریان در سه سطح با زاویه های ۹۰، ۶۰ و ۳۰° و نیروی مومنتم جریان ورودی در چهار سطح با مقادیر ۰/۰۰۹، ۰/۰۱۳، ۰/۰۱۸ N و به وسیله منحنی توزیع زمان ماند و راندمان هیدرولیکی حوضچه های هشت ضلعی تجزیه و تحلیل شد. نتایج نشان داد که حالت نصب ورودی جریان با زاویه ۹۰° به ازای هر چهار نیروی مومنتم موجب عدم تشکیل جریان گردابی و وقوع اتصال کوتاه در جریان حوضچه می شود که به موجب آن راندمان هیدرولیکی حوضچه در محدوده ضعیف قرار می گیرد. به منظور ارتقا راندمان هیدرولیکی حوضچه، ورودی جریان در زاویه های ۶۰ و ۳۰° نصب شد که نتایج بیانگر افزایش عملکرد راندمان به میزان ۲/۶۸ و ۳/۲۶ برابر زاویه نصب ۹۰° است. همچنین مشاهده شد برای هر سه حالت نصب ورودی جریان، راندمان هیدرولیکی رابطه ای عکس با نیروی مومنتم جریان ورودی دارد.

نحوه استناد به این مقاله:

مقبلی، عاطفه، رهنما، محمدباقر، سیاری، نسرين، نقی زاده، مهدی & ذونعمت کرمانی، محمد. (۱۴۰۳). اثر جریان ورودی بر رفتار هیدرودینامیکی حوضچه های مزارع مدار بسته پرورش ماهی. محیط زیست و مهندسی آب. 10(1) 137-150

<https://doi.org/10.22034/ewe.2023.389363.1853>



۱- مقدمه

هیدرودینامیکی جریان در محیط آبی است (Zounemat-Kermani 2016).

پژوهشگران متعددی با استفاده از منحنی توزیع زمان ماند^۴ اختلاط هیدرودینامیکی جریان در حوضچه‌های پرورش ماهی را بررسی کردند. (Watten et al. (2000 ویژگی‌های هیدرولیکی حوضچه‌های مستطیلی چندگردابی را بر اساس منحنی RTD بررسی کردند که حجم فعال این نوع حوضچه ۷۷٪/۹-۱۰۰٪ از کل حجم آن برآورد شد. Oca and Masalo (2013) تأثیر ویژگی‌های هندسی حوضچه و ویژگی‌های ورودی و خروجی جریان بر توزیع سرعت جریان در حوضچه‌های دایره‌ای پرورش ماهی بررسی کردند. (Labatut et al. (2015 به کمک شبیه‌سازی زمان اقامت ذرات در حوضچه‌های مستطیلی چندگردابی مکانیسم حذف پسماندهای جامد آبی‌پروری را بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد که ۱۰۰٪ ذرات بزرگتر از $500 \mu\text{m}$ کمتر از ۱۵ دقیقه، ۱۰۰٪ ذرات $100 \mu\text{m}$ در یک HRT° (۳۶ دقیقه) و برای ذرات $10 \mu\text{m}$ فقط ۵۰٪ آن‌ها پس از ۱۷ HRT حذف شدند. (Zounemat-Kermani (2016 راندمان هیدرولیکی حوضچه‌های مستطیلی را به‌وسیله منحنی توزیع زمان ماند تعیین کرد. (Naserian et al. (2018 به‌منظور بررسی تأثیر ترکیب سه نوع ورودی مختلف در حوضچه‌های دایره‌ای و هشت‌ضلعی از معیار زمان ماند هیدرولیکی استفاده کردند. در حوضچه هشت‌ضلعی با دو ورودی عمودی پس از یک ساعت، مقدار شوری از ۲۰ به $20 \pm 6/0 \text{ gr/l}$ و با یک ورودی عمودی و افقی مقدار شوری از ۲۰ به $20 \pm 6/67 \text{ gr/l}$ رسید. (Papáček et al. (2020 تأثیر مکان تزریق خوراک ماهی روی زمان اقامت ذرات خوراک در یک حوضچه آبی‌پروری استوانه‌ای شکل مطالعه کردند. کمترین زمان ماند به ازای موقعیت تزریق خوراک در مرکز سطح آب حوضچه و بزرگترین زمان ماند مربوط به تزریق در نزدیکی لبه حوضچه اندازه‌گیری شد. طبق نتایج حاصل از پژوهش (Zhang et al. (2022 منحنی RTD به‌وضوح رفتار هیدرودینامیکی حوضچه‌های آبی‌پروری را نشان داد. (Diken and Koknaroglu (2022 کاهش راندمان مصرف انرژی و عدم توزیع یکنواخت اکسیژن محلول

آبی‌پروری، صنعتی در حال رشد سریع است که این صنعت سعی در تأمین تقاضای روزافزون جهانی برای پروتئین آبیان را دارد. روش‌های مختلفی برای پرورش آبیان استفاده می‌شود که سامانه‌های مدار بسته یا آبی‌پروری چرخشی^۱ برخلاف سامانه‌های پرورش تک-گذر^۲ یک محیط کنترل شده برای آبی‌ایجاد می‌کنند و به دلیل کاهش نیاز به منابع سالم آبی در حال گسترش است (Gorle et al. 2020). مصرف آب آن‌ها ۲/۵ تا ۶/۵ برابر کمتر از میزان استاندارد پرورش ماهی است که اغلب در سامانه‌های پرورش تک-گذر انجام می‌شود (Labatut et al. 2007). همچنین اختلاط جریان آب حوضچه‌های هشت‌ضلعی که اغلب در سامانه‌های مدار بسته استفاده می‌گردد، سبب ایجاد محیطی یکنواخت برای حیات آبی می‌شود (Diken and Koknaroglu (2022).

از یک‌سو اطلاعات کلی در مورد هیدرودینامیک حوضچه‌های آبی‌پروری در سامانه‌های مدار بسته برای کشف فرصت‌های بهبود طراحی هندسی و هیدرولیکی کافی نیست (Gorle et al. 2019). از سوی دیگر هیدرودینامیک صحیح در حوضچه‌ها برای دستیابی به سرعت چرخش مطلوب (Gorle et al. 2018)، اختلاط بهینه برای کیفیت بهتر آب و الگوی جریان یکنواخت به‌منظور جلوگیری از تشکیل مناطق راکد و ته‌نشینی پسماندهای جامد (Davidson and Summerfelt 2004)، بسیار مهم است. بنابراین، پژوهشگران روش‌های گوناگونی برای دستیابی به بالاترین میزان اختلاط هیدرودینامیکی در حوضچه‌های آبی‌پروری ارائه کردند. اغلب آن‌ها به طراحی هندسه حوضچه پرداختند.

در طراحی حوضچه‌ها لازم است، شرایط مناسبی برای حذف سریع پسماندهای جامد، تعویض آب و توزیع یکنواخت ماهی در کل حجم حوضچه فراهم نمود (Stockton et al. 2016, Summerfelt and Penne 2005). شاخص راندمان هیدرولیکی^۳ جریان از مهمترین عواملی است که می‌تواند در ارزیابی عملکرد حوضچه‌ها نقش بسزایی داشته باشد (Yu et al. 2021). برای محاسبه راندمان هیدرولیکی از مقوله زمان ماند هیدرولیکی که بیانگر مدت‌زمان اقامت جریان درون حوضچه است استفاده می‌شود و وابسته به رفتار

¹Recirculating Aquaculture Systems (RAS)

²Single-Pass Aquaculture Systems

³Hydraulic efficiency

⁴Residence Time Distribution (RTD)

⁵Hydraulic Retention Time

شده با پتاسیم پرمنگنات در حوضچه مشاهده شود. کف حوضچه با پلکسی گلاس و شیب ۱۰٪ از دیواره‌های حوضچه به سمت مرکز ساخته شد. گوشه‌های حوضچه مربعی به وسیله یک صفحه پلکسی گلاس پخ زده شد و حوضچه به شکل هشت‌ضلعی تبدیل شد. همچنین اسکلت مدل از نبشی ۴ cm آهنی ساخته شد.

سیستم تأمین آب که طرح شماتیک آن در شکل (۱) نشان داده شده شامل یک مخزن تأمین آب با حجم ذخیره ۱۰۰۰ و چهار پمپ می‌باشد. مشابه مطالعه‌های Watten et al. (2000)، Lekang et al. (2013) و Labatute et al. (2015)، زمان پر شدن و تعویض آب حوضچه یک مرتبه در ساعت در نظر گرفته شد. برای تمامی آزمایش‌ها دبی جریان ورودی به حوضچه ۳/۴ l/min تنظیم شد که به روش حجمی برای هر آزمایش اندازه‌گیری شد. در پژوهش حاضر از سدیم کلرید به عنوان ردیاب استفاده شد. ردیاب شامل ۱ محلول سدیم کلرید با غلظت ۵۰ g/l بود که برای مشاهده حرکت جریان در حوضچه، ۵ g پتاسیم پرمنگنات به محلول ردیاب اضافه شد (Zhou et al. 2021).

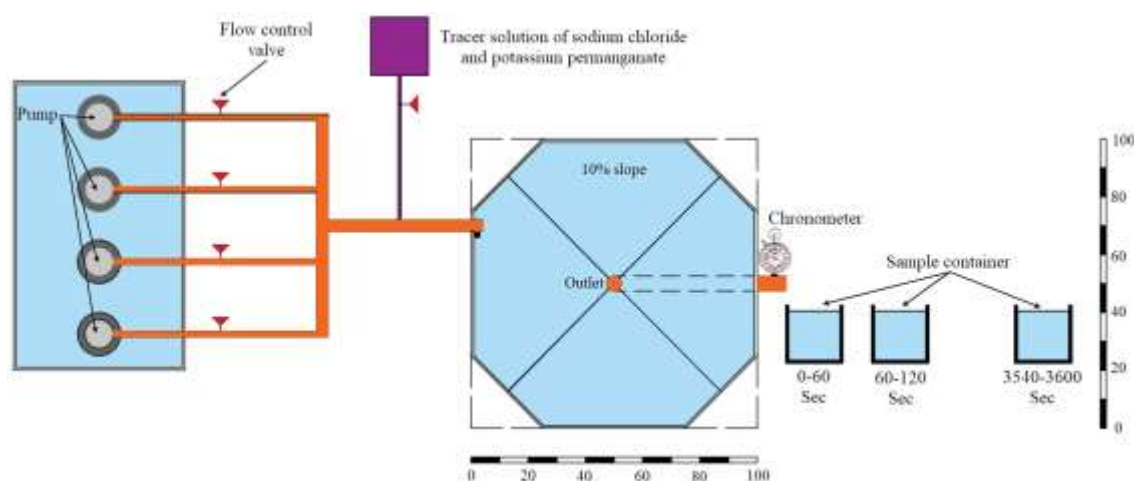
در آب را از پیامدهای تشکیل مناطق مرده در حوضچه‌های پرورش ماهی بیان کردند.

در سال‌های اخیر استفاده از حوضچه‌های هشت‌ضلعی همانند حوضچه‌های مستطیلی و دایره‌ای در آبی‌پروری رایج شده است. اما مطالعه‌ای در زمینه تأثیر توأم حالت نصب ورودی جریان مستقیم و نیروی مومنتم جریان ورودی بر رفتار هیدرودینامیکی این حوضچه صورت نگرفته است. با توجه به اینکه هر حجم جریان تزریق شده به حوضچه پرورش، زمان ماند هیدرولیکی خاص خود را دارد که به مومنتم جریان ورودی و طراحی داخلی حوضچه بستگی دارد (Gorle et al. 2020). در این پژوهش برای اولین بار تأثیر توأم حالت نصب ورودی مستقیم به همراه نیروی مومنتم جریان ورودی در حوضچه‌های هشت‌ضلعی بررسی شد. یافته‌های حاصل از این پژوهش، در قالب راندمان هیدرولیکی، منحنی RTD و درصد مناطق راکد در حوضچه ارائه شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

پژوهش حاضر روی یک مدل بر مبنای تشابه فرودی از حوضچه هشت‌ضلعی با مقیاس ۱:۱۰ که دارای ضلع ۱۰۰ cm و عمق آبیگری ۲۰ cm است، انجام شد. دیواره‌های حوضچه از جنس شیشه ساخته شد تا حرکت ردیاب رنگی



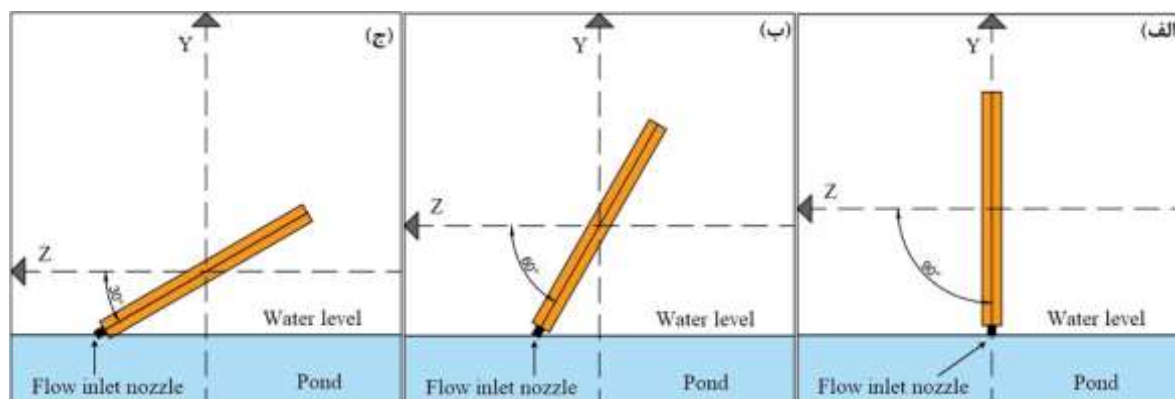
شکل ۱- طرح مدل حوضچه هشت‌ضلعی و سیستم تأمین آب در پژوهش حاضر

Fig. 1 A schematic of the octagonal pond model and the water supply system in the present study

ورودی در چهار سطح انجام می‌شود. حالت نصب ورودی جریان به صورت تغییر زاویه ورودی نسبت به محور Z و

در مطالعه حاضر ۱۲ آزمایش برای بررسی متغیرهای حالت نصب ورودی جریان در سه زاویه و نیروی مومنتم جریان

نیروی مومنتم جریان ورودی به حوضچه به وسیله تغییر سرعت جریان ورودی به ازای دبی ثابت در کل آزمایش‌ها تنظیم می‌شود. تغییر حالت نصب ورودی جریان و اندازه-گیری زاویه آن نسبت به محور Z در شکل (۲) ارائه می‌شود.



شکل ۲- سه حالت نصب ورودی جریان در حوضچه‌های پرورش ماهی در پژوهش حاضر: الف- $\alpha = 90^\circ$ ، ب- $\alpha = 60^\circ$ ، و ج- $\alpha = 30^\circ$
Fig. 2 Three modes of inlet installation in fish breeding ponds in the present study: a) $\alpha=90^\circ$, b) $\alpha=60^\circ$, and c) $\alpha=30^\circ$

جدول ۱- تنظیمات آزمایشگاهی

Table 1 Laboratory settings

Installation angle of flow inlet (α)	Inlet flow momentum forces (Fn) (N)	The velocity of the inlet flow (cm/s)	Test
90°	0.004	10	Ta1
	0.009	20	Ta2
	0.013	30	Ta3
	0.018	40	Ta4
60°	0.004	10	Tb1
	0.009	20	Tb2
	0.013	30	Tb3
	0.018	40	Tb4
30°	0.004	10	Tc1
	0.009	20	Tc2
	0.013	30	Tc3
	0.018	40	Tc4

مدت ۶۰ min به وسیله دستگاه TDS^1 متر ساخت کشور ژاپن با توانایی اندازه‌گیری کل مواد جامد محلول در آب در مقیاس $\mu g/ml$ اندازه‌گیری شد. کلیه آزمایش‌ها بدون حضور ماهی انجام و هر یک از این آزمایش‌ها سه مرتبه تکرار شد.

سرعت چرخش جریان در حوضچه‌های حاوی جریان چرخشی حدود ۲۰٪ جریان ورودی است (Li et al. 2019). بنابراین میانگین سرعت جریان در حوضچه حدود ۲ cm/s تا ۸ cm/s است. بعلاوه سرعت جریان مطلوب برای رشد بهینه

$$Fn = \rho Q(V_{in} - V_{avg}) \quad (1)$$

که، ρ چگالی آب، Q دبی جریان، V_{in} سرعت جریان ورودی و V_{avg} میانگین سرعت جریان در حوضچه است. در ادامه، متغیرهای مربوط به هر آزمایش مطابق جدول (۱) تنظیم و حوضچه تا عمق ۲۰ cm آبیگری شد. پس از روشن شدن پمپ‌ها و تنظیم دبی جریان، محلول ردیاب طی آزمون پالس ناگهانی تزریق شد و همزمان با تزریق ردیاب آزمایش شروع شد. غلظت ردیاب در جریان خروجی حوضچه هر ۶۰ s به

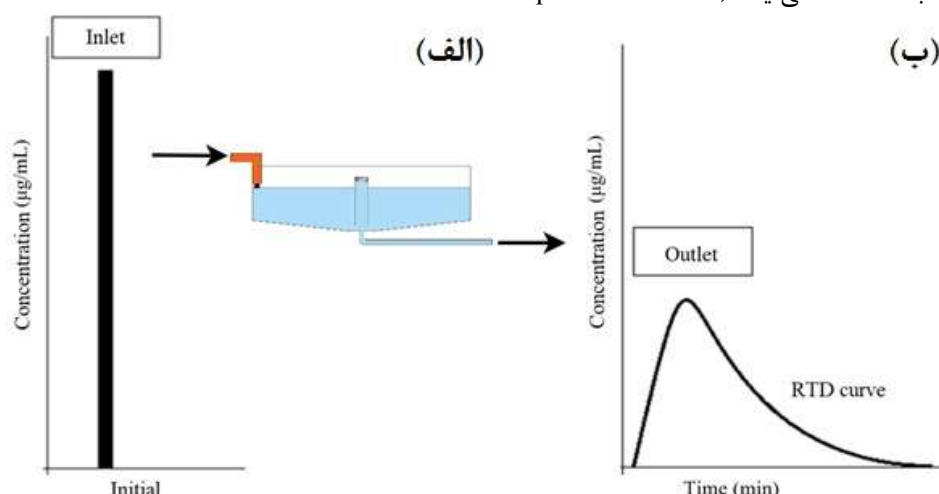
¹Total Dissolved Solid

RTD منحنی (Sheridan 2021). بیانگر رفتار هیدرودینامیکی جریان است و به‌وضوح تشکیل یا عدم تشکیل حجم مرده در حوضچه را نشان می‌دهد (Zhang et al. 2022). بنابراین، از این منحنی می‌توان برای مقایسه ویژگی‌های هیدرولیکی محیط‌های آبی با خصوصیات هندسی مختلف استفاده کرد. طرح شماتیک منحنی RTD طی آزمایش پالس ناگهانی برای جریان ورودی و خروجی در شکل (۳) ارائه شده است.

۰/۵ تا ۲ برابر طول ماهی است (Timmons et al. 1998). با توجه به سرعت‌های جریان استفاده شده در این مطالعه برای ماهی‌های با طول کم‌تر از ۱۶ cm مناسب است.

۴-۲- راندمان هیدرولیکی

زمان ماند هیدرولیکی به‌وسیله بررسی تغییرات غلظت یک ردیاب درون محیط آبی محاسبه می‌شود. ماده ردیاب در یک پالس ناگهانی به جریان ورودی تزریق می‌شود و با اندازه‌گیری غلظت ردیاب در خروجی جریان، منحنی توزیع زمان ماند (RTD) به دست می‌آید (Stephenson and



شکل ۳- منحنی زمان ماند هیدرولیکی حاصل از آزمایش تزریق ردیاب در یک پالس ناگهانی؛ (الف) پالس ناگهانی در ورودی جریان، و (ب) منحنی RTD در خروجی جریان

Fig. 3 The hydraulic retention time curve obtained from the tracer injection test in a sudden pulse; a) sudden pulse in the inlet flow, and b) the RTD curve at outlet flow

مدل حاضر با اعداد فرود شده قابل تعمیم است. همچنین برای تعمیم نتایج حاصل از مطالعه حاضر به نمونه واقعی اگر $L_R = \frac{L_p}{L_m}$ در نظر گرفته شود، می‌توان از روابط $F_{nR} = L_R^{3.5}$, $Q_R = L_R^{2.5}$, $V_R = L_R^{0.5}$, $V_R = L_R^3$, $A_R = L_R^2$, $T_R = L_R^{0.5}$ استفاده کرد. طبق رابطه $T_R = L_R^{0.5}$ مجازی در نمونه واقعی برابر ۳/۱۴ hr به دست می‌آید و بر اساس آن می‌توان زمان ماند هیدرولیکی به دست آمده در هر آزمایش را به نمونه واقعی تعمیم داد.

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- منحنی توزیع زمان ماند

در مطالعه حاضر تأثیر پارامترهای حالت نصب ورودی در سه سطح و نیروی مومنتم ورودی در چهار سطح، از طریق محاسبه زمان ماند هیدرولیکی به‌وسیله منحنی RTD در حوضچه‌های هشت‌ضلعی بررسی شد. نتایج حاصل از این بررسی در شکل (۴) ارائه شده است. اوج این منحنی هر چه

موقعیت اوج منحنی RTD بیانگر میانگین زمان ماند هیدرولیکی است که با استفاده از آن و رابطه (۲) می‌توان راندمان هیدرولیکی حوضچه را به دست آورد (Zounemat-Kermani 2016).

$$\lambda = \frac{t_m}{t_n} \quad (2)$$

که، t_m میانگین زمان ماند هیدرولیکی و t_n زمان ماند هیدرولیکی مجازی نامیده می‌شود که به‌وسیله رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Zounemat-Kermani 2016).

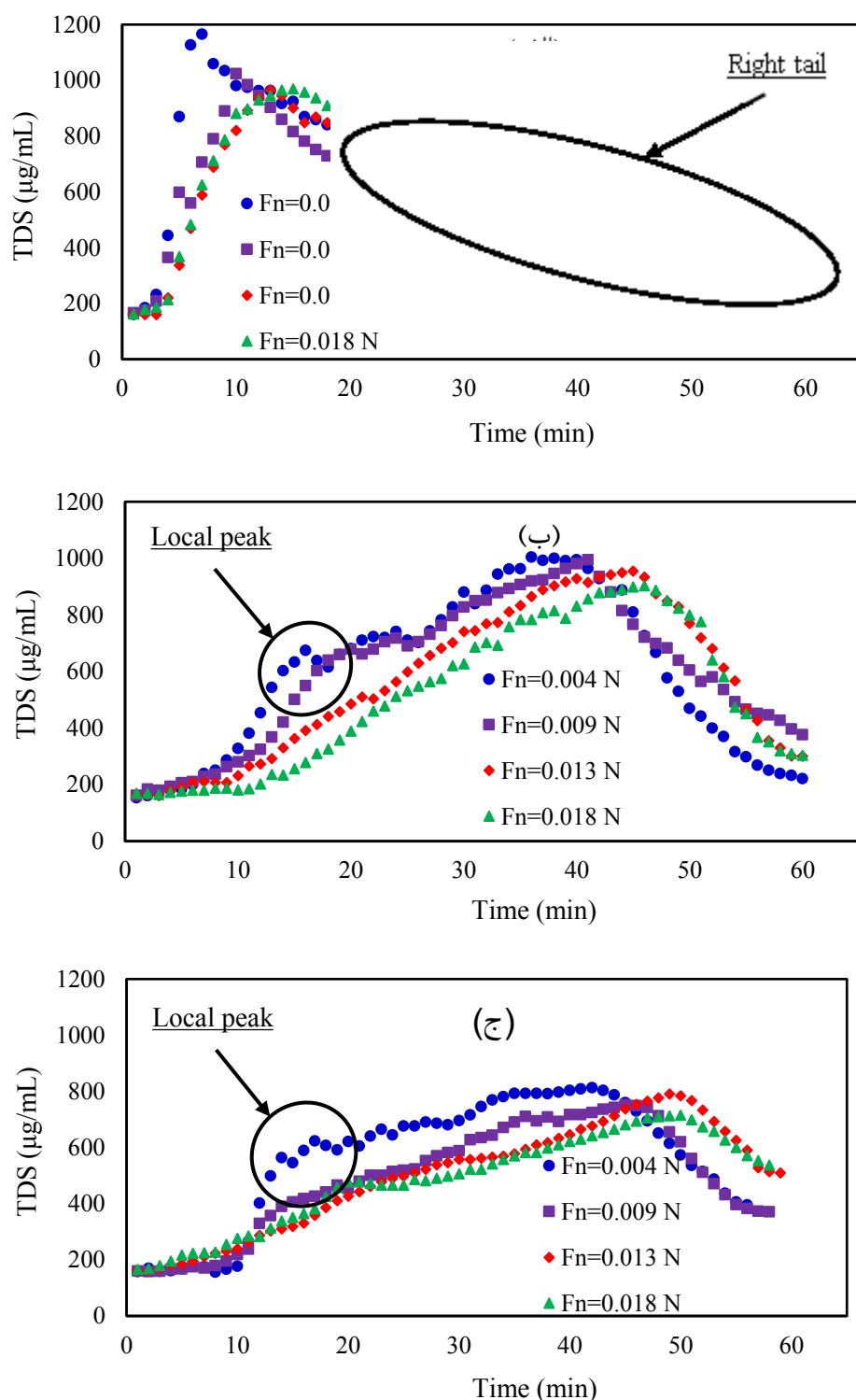
$$t_n = \frac{Ah}{Q} \quad (3)$$

که، A ، h و Q به ترتیب مساحت حوضچه، عمق میانگین و دبی جریان ورودی به حوضچه است.

با توجه به خصوصیات جریان ورودی در مدل آزمایشگاهی حاضر عدد فرود برابر ۰/۱۸، ۰/۴۴، ۰/۷۱ و ۱/۰۵ است. بنابراین نتایج حاصل از این پژوهش فقط در نمونه واقعی از

2000, Zounemat-Kermani 2016, Naserian et al. (2018).

به زمان ماند مجازی نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده اختلاط بهتر جریان است. زمان ماند مجازی (تئوری) مطالعه حاضر برای تمامی آزمایش‌ها برابر ۶۰ min است (Watten et al.).



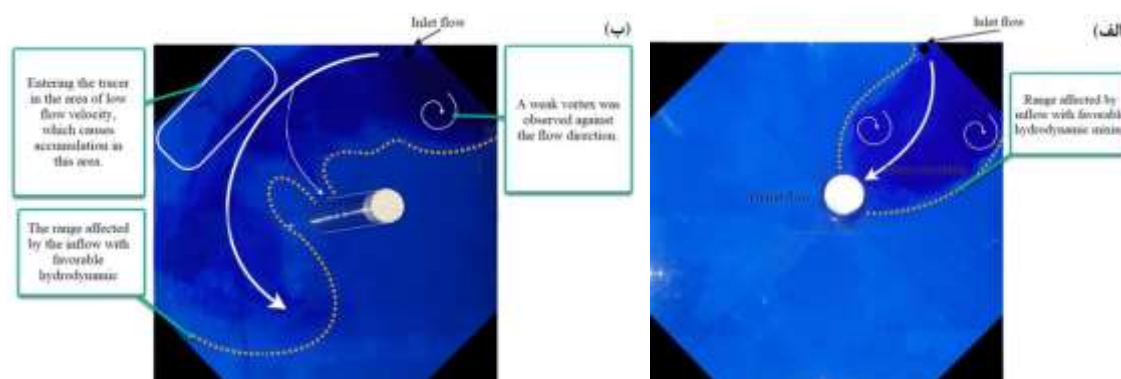
شکل ۴- نمودار TDS-Time حاصل از بررسی توأم حالت ورود جریان و نیروی مومنتم جریان ورودی در زوایای مختلف: الف- ۹۰، ب- ۶۰، ج- ۳۰°.

Fig. 4 The TDS-time diagram is the result of the combined investigation of the inlet flow mode and the momentum force of the inlet flow at different angels: a) 90, b) 60, and c) 30°

مرده در صورت وجود تقابل میان حجم مرده و جریان اصلی یک دنباله در بازوی سمت راست منحنی ایجاد می‌کند.

اوج منحنی RTD به ازای نصب ورودی با زاویه‌های ۶۰ و ۳۰° به سمت راست نمودار TDS-Time منتقل می‌شود و شکل‌های (۴-ب) و (۴-ج) بیانگر نزدیک شدن زمان ماند واقعی به زمان ماند مجازی می‌باشند. طبق مشاهده‌های آزمایشگاهی ارائه شده در شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب)، هنگام نصب ورودی در حالت ۹۰° درجه جریان ورودی بدون چرخش در حوضچه به طرف خروجی حرکت می‌کند و در حالت ۳۰° جریان گردابی در حوضچه هشت‌ضلعی ایجاد می‌شود. جریان ورودی به‌صورت چرخشی از تمام قسمت‌های حوضچه عبور می‌کند و در نهایت از خروجی مرکزی تحتانی تخلیه می‌شود. همراه با چرخش جریان در حوضچه اتصال کوتاه‌های موقت مشاهده شد که دلیل مشاهده اوج‌های موضعی در منحنی RTD می‌شود که در شکل‌های (۴-ب) و (۴-ج) نشان داده شدند.

همانطور که در شکل (۴-الف) مشاهده می‌شود، اوج منحنی RTD در حالت ۹۰° برای هر چهار سطح نیروی مومنتم بررسی شده در سمت چپ نمودار TDS-Time واقع شده که بیانگر اختلاف زیاد زمان ماند مجازی و زمان ماند واقعی یا هیدرولیکی است. طبق مشاهده‌های آزمایشگاهی ارائه شده در شکل (۵-الف)، نصب ورودی در حالت ۹۰° موجب عدم تشکیل جریان گردابی و اتصال کوتاه میان جریان ورودی و خروجی رخ داد. به‌طور مشابه Timmons et al. (1998) و Oca and Masalo (2013) در حوضچه‌های دایره‌ای در صورت نصب ورودی قائم اتصال کوتاه رخ می‌دهد که باعث تشکیل مناطق مرده می‌شود. Papáček et al. (2020) و Diken and Koknaroglu (2022) عدم توزیع یکنواخت اکسیژن محلول در حجم حوضچه، ته‌نشینی ضایعات جامد را از پیامدهای تشکیل مناطق مرده در حوضچه‌های پرورش ماهی بیان کردند. همچنین ردیاب به دام افتاده در نواحی



شکل ۵- حرکت ماده ردیاب مرئی شده در حوضچه هشت‌ضلعی: الف- نصب حالت ورودی جریان در زاویه ۹۰° و نیروی مومنتم برابر $N/0.018$ و ب- نصب حالت ورودی جریان در زاویه ۳۰° و نیروی مومنتم برابر $N/0.009$

Fig. 5 Visible tracer material movement in the octagonal pond: a) Installation of inlet flow mode at 90° angle and momentum force of the inlet flow 0.018 N and b) Installation of inlet flow mode at 30° angle and momentum force of the inlet flow 0.009 N

۳-۲- راندمان هیدرولیکی

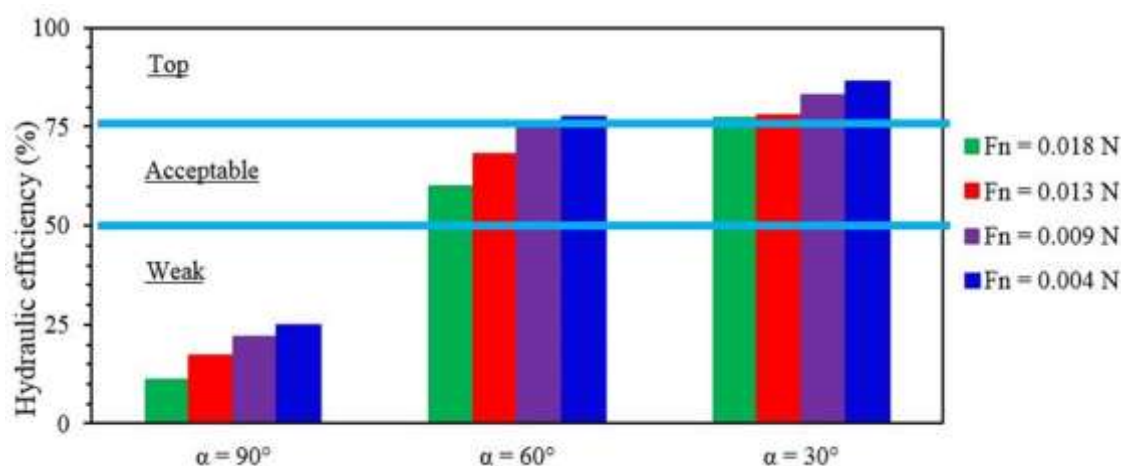
قابل قبول در $0.75 < \lambda < 0.5$ قرار می‌گیرد. همچنین برای راندمان‌های کمتر از ۰/۷۵، اختلاط هیدرودینامیکی جریان درون حوضچه به‌خوبی انجام نشده و حوضچه دارای حجم مرده است (Zounemat-Kermani 2016).

اگر جریان ورودی بدون چرخش در حوضچه‌های حاوی جریان گردابی مستقیم به خروجی حوضچه برسد، اتصال کوتاه اتفاق می‌افتد. در حالت نصب ورودی جریان با زاویه ۹۰° به ازای هر چهار نیروی مومنتم بررسی شده، اتصال کوتاه مشاهده شد. همانطور که در شکل (۶) قابل مشاهده است برای حالت نصب ورودی جریان با زاویه ۹۰° که حالت

راندمان هیدرولیکی مبین نحوه اختلاط مناسب آب از نقطه‌نظر هیدرودینامیک جریان درون محیط آبی است که مقدار آن طبق رابطه (۲) برای هر آزمایش محاسبه شد. راندمان هیدرولیکی برابر یک نشان‌دهنده عدم تشکیل حجم مرده در حوضچه است. بنابراین هرچه راندمان هیدرولیکی به یک نزدیک‌تر باشد، اختلاط هیدرودینامیکی جریان در حوضچه بهتر انجام می‌شود. راندمان هیدرولیکی حوضچه‌ها در سه حالت قابل دسته‌بندی است. آستانه طراحی بهینه در پژوهش حاضر $\lambda > 0.75$ فرض می‌شود. راندمان هیدرولیکی

نیروی مومنتم جریان ورودی دارد. به‌طور مشابه Oca and Masalo (2013) بیان کردند سرعت متوسط در یک سلول گردابی از حوضچه‌های مستطیلی چندگردابی باریشه‌ی دوم نیروی تکانه متناسب است. بنابراین افزایش نیروی تکانه باعث افزایش سرعت متوسط در سلول گردابی و خروج سریع‌تر ردیاب می‌شود. خروج سریع‌تر محلول ردیاب نیز زمان ماند هیدرولیکی محیط آبی را کاهش می‌دهد که نشان‌دهنده ضعیف شدن اختلاط هیدرودینامیکی جریان است.

قائم نیز گفته می‌شود، راندمان هیدرولیکی در دسته ضعیف قرار می‌گیرد. با تغییر حالت نصب ورودی جریان از قائم یا ۹۰° به حالت مماس با زاویه‌های بررسی شده ۶۰° و ۳۰° راندمان هیدرولیکی افزایش یافته و در دامنه راندمان‌های قابل قبول و بالا قرار می‌گیرد که با نتایج حاصل از تحقیق‌های Watten et al. (2000) و Naserian et al. (2018) مبنی بر افزایش کارایی یا میانگین زمان ماند هیدرولیکی در حوضچه‌های دایره‌ای و هشت‌ضلعی کاملاً مطابقت دارد. طبق نتایج ارائه شده در شکل (۶) برای هر سه حالت نصب ورودی جریان ۹۰°، ۶۰° و ۳۰°، راندمان هیدرولیکی رابطه عکس با



شکل ۶- روند تغییر راندمان هیدرولیکی به ازای تغییر پارامترهای حالت ورودی جریان و نیروی مومنتم جریان ورودی
Fig. 6 Changes in the hydraulic efficiency due to modifying the inlet flow mode and the momentum force of the inlet flow

مناطق راکد حوضچه کمتر می‌شوند. بنابراین اکسیژن و خوراک به‌طور یکنواخت‌تری در تمام حجم حوضچه توزیع می‌شود. بنابراین همچنین صحت این یافته در نتایج Papáček et al. (2020) قابل مشاهده است. بنابراین، در صورتی که بتوان تشکیل نواحی مرده و وقوع اتصال کوتاه در حوضچه را کاهش داد، راندمان هیدرولیکی افزایش می‌یابد (Zounemat-Kermani 2016).

$$SR = 1 - \frac{t_m}{t_n} \quad (4)$$

پسماندهای جامد باید سریع‌تر از میانگین زمان ماند هیدرولیکی حوضچه تخلیه شوند، در غیر این صورت بر کیفیت آب و سلامت ماهی تأثیر منفی می‌گذارند. طبق نتایج Labatut et al. (2015) به دست آمده از پژوهش‌های نواحی مرده باعث تجمع پسماندهای جامد و در نتیجه

۳-۳- مناطق راکد

هدف از بررسی پارامترهای حالت نصب ورودی و نیروی مومنتم جریان ورودی جلوگیری از تشکیل مناطق راکد و فضای ته‌نشینی پسماندهای جامد هنگام بهره‌برداری از حوضچه‌های هشت‌ضلعی پرورش ماهی است. در نتیجه، برای استفاده بهینه از آب در حوضچه‌های پرورش ماهی لازم است که جریان ورودی قبل از رسیدن به خروجی از تمام قسمت‌های حوضچه عبور کند که موجب عدم تشکیل مناطق راکد می‌شود. Watten et al. (2000) رابطه (۴) را برای محاسبه مناطق راکد (SR) در حوضچه ارائه کردند که رابطه عکس با راندمان هیدرولیکی دارد. از این رابطه می‌توان نتیجه گرفت هر چه مناطق راکد حوضچه کمتر باشد، زمان ماند هیدرولیکی آن بیشتر می‌شود. طبق نتایج ارائه شده در جدول (۳) همراه با کاهش نیروی مومنتم جریان ورودی

گسترش بیماری‌ها در بدترین حالت تلفات آبزیان می‌شوند. ثابت است به‌طوری‌که کم‌ترین تغییر در میانگین سرعت راهکارهای ارائه شده در تحقیق حاضر نصب ورودی در حالت ۳۰° و تنظیم جریان ورودی با نیروی مومنتم کمتر با دبی جدول ۳- نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی در برآورد راندمان هیدرولیکی حوضچه‌های هشت‌ضلعی مزارع مدار بسته پرورش ماهی تحت تأثیر سامانه ورودی جریان و نیروی مومنتم جریان ورودی

Table 3 The laboratory modeling results regarding the estimation of the hydraulic efficiency of octagonal ponds in recirculating aquaculture systems under the influence of the inlet flow system and the momentum force of the inlet flow

Test	Hydraulic residence time (t_m) (min)	Hydraulic efficiency (%)	Stagnant region (dimensionless)
Ta1	7	12	0.88
Ta2	10	17	0.83
Ta3	13	22	0.78
Ta4	15	25	0.75
Tb1	36	60	0.40
Tb2	41	68	0.32
Tb3	45	75	0.25
Tb4	46	77	0.23
Tc1	46	77	0.23
Tc2	47	78	0.22
Tc3	50	83	0.17
Tc4	52	86	0.13

ورودی از بیشتر قسمت‌های حوضچه عبور می‌کند و سپس تخلیه می‌شود.

۳- به ازای هر سه زاویه نصب ورودی، کاهش نیروی مومنتم ورودی سبب بهبود عملکرد حوضچه می‌شود. در حالت نصب ورودی $\alpha_2=60^\circ$ برای F_{n1} و F_{n2} راندمان هیدرولیکی کمتر از ۷۵٪ است. حال آنکه در شرایط بهره‌برداری یکسان تنها با کاهش نیروی مومنتم ورودی راندمان هیدرولیکی بیشتر از ۷۵٪ می‌شود.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های برداشت شده در آزمایش‌های پژوهش به‌صورت نمودار TDS-Time ارائه شده است. علاوه به این، داده‌های خام حسب درخواست از طریق نویسنده مسئول قابل ارسال است.

تضاد منافع نویسندگان

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

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تأثیر توأم پارامترهای حالت نصب ورودی جریان مستقیم و نیروی مومنتم جریان ورودی بر رفتار هیدرودینامیکی حوضچه‌های هشت‌ضلعی پرورش ماهی سامانه‌های مدار بسته بررسی شد. در مجموع ۱۲ آزمایش هرکدام با سه مرتبه تکرار در یک مدل آزمایشگاهی با مقیاس ۱:۱۰ که بر مبنای تشابه فرودی ساخته شد، انجام شد. مهمترین نتایج حاصل از این مطالعه آزمایشگاهی در زیر خلاصه شده است.

۱- طبق نتایج حاصل از آنالیز منحنی RTD، حالت نصب ورودی جریان مستقیم با زاویه 90° موجب عدم تشکیل جریان چرخشی در حوضچه می‌شود. در بهترین حالت بیش از ۷۵٪ از حجم حوضچه شامل نواحی مرده می‌شود.

۲- الگوی جریان چرخشی در تمامی آزمایش‌های مربوط به نصب ورودی جریان در حالت‌های $\alpha_2=60^\circ$ و $\alpha_3=30^\circ$ به کمک محلول ردیاب رنگی شده، مشاهده شد. بنابراین جریان

References

Davidson, J., & Summerfelt, S. (2004). Solids flushing, mixing, and water velocity profiles

within large (10 and 150 m3) circular 'Cornell-type' dual-drain tanks. *Aquac. Eng.*,

- 32(1), 245-271. DOI: [10.1016/j.aquaeng.2004.03.009](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.03.009)
- Diken, G., & Koknaroglu, H. (2022). Projected annual production capacity affects sustainability of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum, 1792) reared in concrete ponds in terms of energy use efficiency. *Aquacul.*, 551, 737958. DOI: [10.1016/j.aquaculture.2022.737958](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.737958)
- Gorle, J. M. R., Terjesen, B. F., Mota, V. C., & Summerfelt, S. (2018). Water velocity in commercial RAS culture tanks for Atlantic salmon smolt production. *Aquac. Eng.*, 81, 89-100. DOI: [10.1016/j.aquaeng.2018.03.001](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.03.001)
- Gorle, J. M. R., Terjesen, B. F., & Summerfelt, S. T. (2019). Hydrodynamics of Atlantic salmon culture tank: Effect of inlet nozzle angle on the velocity field. *Comput. Electron. Agric.*, 158, 79-91. DOI: [10.1016/j.compag.2019.01.046](https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.046)
- Gorle, J. M. R., Terjesen, B. F., & Summerfelt, S. T. (2020). Influence of inlet and outlet placement on the hydrodynamics of culture tanks for Atlantic salmon. *Int. J. Mech. Sci.*, 188, 105944. DOI: [10.1016/j.ijmecsci.2020.105944](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105944)
- Khater, ES., Ali, S., Abbas, W., Morsy, O., (2022). Flow patterns in circular fish tanks and its relations with flow rate and nozzle features, *Sci. Rep.*, 12, 12883. DOI: [10.1038/s41598-022-17186-z](https://doi.org/10.1038/s41598-022-17186-z)
- Labatut, R. A., Ebeling, J. M., Bhaskaran, R., & Timmons, M. B. (2007). Effects of inlet and outlet flow characteristics on mixed-cell raceway (MCR) hydrodynamics. *Aquac. Eng.*, 37(2), 158-170. DOI: [10.1016/j.aquaeng.2007.04.002](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2007.04.002)
- Labatut, R. A., Ebeling, J. M., Bhaskaran, R., & Timmons, M. B. (2015). Modeling hydrodynamics and path/residence time of aquaculture-like particles in a mixed-cell raceway (MCR) using 3D computational fluid dynamics (CFD). *Aquac. Eng.*, 67, 39-52. DOI: [10.1016/j.aquaeng.2015.05.006](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.05.006)
- Lekang O.I. (2013). *Aquaculture Engineering*. Blackwell Publishing Ltd. Press. pp: 224-237. DOI: [10.1002/9781118496077](https://doi.org/10.1002/9781118496077)
- Li, W., Cheng, X., Xie, J., Wang, Z., & Yu, D. (2019). Hydrodynamics of an in-pond raceway system with an aeration plug-flow device for application in aquaculture: an experimental study. *R. Soc. Open Sci.*, 6(7), 182061. DOI: [10.1098/rsos.182061](https://doi.org/10.1098/rsos.182061)
- Naserian. R., Harsij. M., Jafariyan. H., & Seyedian. S. M. (2018). Effect of different inlet on some Hydraulic characteristic of octagonal and circular reservoirs. *Adv. Aquacul. Sci. J.*, 2(3), 45-58. [In Persian]
- Oca, J., & Masalo, I. (2013). Flow pattern in aquaculture circular tanks: Influence of flow rate, water depth, and water inlet & outlet features. *Aquac. Eng.*, 52, 65-72. DOI: [10.1016/j.aquaeng.2012.09.002](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.09.002)
- Papáček, Š., Petera, K., Císař, P., Stejskal, V., & Saberioon, M. (2020). Experimental & computational fluid dynamics study of the suitability of different solid feed pellets for aquaculture systems. *Appl. Sci.*, 10(19), 6954. DOI: [10.3390/app10196954](https://doi.org/10.3390/app10196954)
- Stephenson, R., & Sheridan, C. (2021). Review of experimental procedures and modelling techniques for flow behaviour and their relation to residence time in constructed wetlands. *J. Water. Process. Eng.*, 41, 102044. DOI: [10.1016/j.jwpe.2021.102044](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102044)
- Summerfelt, R. C., & Penne, C. R. (2005). Solids removal in a recirculating aquaculture system where the majority of flow bypasses the microscreen filter. *Aquac. Eng.*, 33(3), 214-224. DOI: [10.1016/j.aquaeng.2005.02.003](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.02.003)
- Stockton, K. A., Moffitt, C. M., Watten, B. J., & Vinci, B. J. (2016). Comparison of hydraulics and particle removal efficiencies in a mixed cell raceway and Burrows Pond rearing system. *Aquac. Eng.*, 74, 52-61. DOI: [10.1016/j.aquaeng.2016.04.005](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.04.005)
- Timmons, M. B., Summerfelt, S. T., & Vinci, B. J. (1998). Review of circular tank technology and management. *Aquac. Eng.*, 18(1), 51-69. DOI: [10.1016/S0144-8609\(98\)00023-5](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(98)00023-5)
- Watten, B. J., Honeyfield, D. C., & Schwartz, M. F. (2000). Hydraulic characteristics of a rectangular mixed-cell rearing unit. *Aquac. Eng.*, 24(1), 59-73. DOI: [10.1016/S0144-8609\(00\)00064-9](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(00)00064-9)
- Yu, G., Liu, C., Zheng, Y., Chen, Y., Li, D., & Qin, W. (2021). Meta-analysis in the production chain of aquaculture: A review. *Inform. Process. Agricul.*, 9(4), 586-598. DOI: [10.1016/j.inpa.2021.04.002](https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.04.002)

- Zhang, J., Jia, G., Wang, M., Cao, S., & Mkumbuzi, S. G. (2022). Hydrodynamics of recirculating aquaculture tanks with different spatial utilization. *Aquac. Eng.*, 96, 102217. DOI: [10.1016/j.aquaeng.2021.102217](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2021.102217)
- Zhou, W., Dong, B., Yang, J., & Wang, J. (2021). Correction of residence time distributions and hydraulic indexes affected by tracer release duration in surface flow constructed wetlands. *J. Hydrol.*, 603, 127106. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2021.127106](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127106)
- Zounemat-Kermani, M. (2016). Numerical modeling of hydrodynamic flow for optimizing design of cold-water fish rearing ponds. *J. Aquacul. Develop.*, 10(2), 63-76. [In Persian]



Esteemed peer reviewers of Vol. 10, Issue 10 of "Environment and Water Engineering" journal

Name	Last Name	Researcher ID (ORCID)
Hedieh	Ahmadpari	0000-0002-3639-1651
Frank	Ranjbar	0000-0002-2648-4969
Jafar	Azmat	0000-0003-3939-6455
Mehdi	Dasht Bozorg	-
Elham	Danaei	ID0000000324942011
Houshang	Ghomernia	0000-0003-2106-1075
Omid	Bahmani	-
Hassan	Ojaghlu	-
Rauf	Mostafizadeh	0000-0002-0401-0260
Reza	Norouzi	0000-0002-3756-8746
Majid	Pasbani	-
Rasoul	Daneshfaraz	0000-0003-1012-8342
Hosseini	Khazimanezhad	-
Seyed Mohammad	Ashrafi	0000-0001-7884-9029
Rasoul	Zamani Ahmadm Mahmoudi	-
Soheil	Sabhan Ardekan	0000-0002-6038-0514
Naser	Aria Azar	0000-0002-6132-7707
Mehdi	Karami Moghadam	-
Sami	Gourdooyi Milan	0000-0001-8404-6679
Samira	Sadri	0000-0003-0246-205X



List of the papers

Papers	Pages
Evaluation of Bioadsorption Process of Lead Heavy Metal from Aqueous Media Using Two Species of brown Nizimuddiniana zanardini algae and Ulva rigida Green Algae Samineh Gholami; Arash Shakouri; Jasem Raesi	1-17
Effect of pH and Ionic Strength on the Removal Phosphorus Efficiency from Aqueous Solution Using Modified Mineral Adsorbents Somayeh Moharami	18-36
Molecular Dynamics Simulation of Water Treatment Using Thermal Driving Force and Carbon Nanotube Membrane Arash Rajabi-Vahid; Mahdi Sahebi	37-48
Effect of Different Levels of Irrigation Water and Vermicompost on Yield and Water Productivity of Quinoa Crop in Dehgolan Plain Diba Shekhi; Gholamreza Heydari; Parviz Fathi; Habib Khodaverdiloo; Zahed Sharifi	49-62
Assessing Zayandeh-Rud Coasts Pollution with Plastic Wastes Based on Clean-Coast Index Mokarrameh Behmanesh; Atefeh Chamani; Elham Chavoshi	63-78
Flood Potential Zonation Using Analytic Hierarchy Process in Kurdistan Province Bahar Akrami Moghadam; Rasool Ilkhanipour Zeynali; Saman Nikmehr	79-93
Performance Evaluation of LS-SVR Model in Predicting Scour Depth in Bridge Piers Bijan Sanaati	94-108
Evaluating Effect of Planting Densities on Some Morphophysiological and Biochemical Characteristics of Sport Turfgrass under Low Water Stress Mehdi Rahmani Fard; Elham Danaee; Ahmad Khalighi	109-120
Numerical Investigation of the Performance of Blade Groynes on Scouring and its Effect on Hydraulic Parameters of Sediment and Flow Kiyomars Roushangar; Sepehr Goodarzi; Hamidreza Abbaszadeh	121-136
Effect of Inflow on the Hydrodynamic Behavior of Ponds in Recirculating Aquaculture Systems Atefeh Moghbeli; Mohammad Bagher Rahnema; Nasrin sayari; Mahdi Naghizadeh; Mohammad Zounemat-Kermani	137-150





About the journal

The “**Environment and Water Engineering**” (EWE) journal is a quarterly publication with open access to full-text articles. It employs a double-blind peer review policy for evaluating articles and focuses on important and fundamental topics in environment and water engineering. The journal adheres to the principles and standards of the Committee on Publication Ethics (COPE) in reviewing and publishing scientific papers. All submitted articles are checked for originality using the Similarity Check software to ensure their authenticity. Subsequently, all articles are carefully evaluated by reputable and experienced reviewers. The journal publishes research paper, case studies, review papers, and short papers.

The objectives of EWE journal include:

Creating and enhancing knowledge in the field of environment and water engineering

- Providing a platform for the exchange of knowledge and opinions on environmental issues and concerns related to water resource management
- Facilitating knowledge interaction in the specialized areas of environmental studies and water engineering
- Evaluating water resource management and creating a suitable platform for leveraging past experiences to improve current management practices
- Striving to elucidate the principles of sustainable development by introducing environmental components and principles of integrated water resource management

The thematic areas covered by this journal include, but are not limited to:

- Novel research focusing on providing scientific and practical solutions to improve environmental management and water resources
- Fundamental and applied research in all scientific and technical fields related to environmental management, water quality, and watershed management
- Innovative and traditional water management methods in agriculture under drought conditions
- Analysis of water consumption, pollution, and environmental hazards related to water pollution
- Integrated water resource management and watershed management
- Water management in agriculture and methods to enhance water efficiency
- Analysis of water-energy-food-environment interdependencies
- Climate change, water and environmental engineering, social hydrology, and river engineering
- Wastewater recycling, water harvesting, and water/wastewater treatment
- Waste management
- Application of new technologies and knowledge in solving environmental and water resource management issues



Environment and Water Engineering



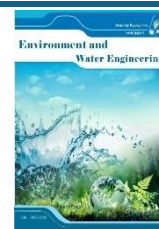
Environ. Water Eng., 10 (1), Spring, 2024

ISSN: 2476-3683



Environment and Water Engineering

Homepage: www.jewe.ir



E-ISSN: 2476-3683

Volume 10, Issue 1, Spring 2024, pages: 1-150

Publisher:

[Iranian Rainwater Catchment Systems Association](#)

Director-in-Charge:

[Behzad Shahmoradi \(Journal Founder\)](#)

Editor-in-Chief:

[Ata Amini \(Journal Founder\)](#)

Chief of Editorial Board:

[Meghdad Pirsaeheb \(PhD\)](#)

Frequency:

Quarterly

Email:

infojewe@gmail.com

Homepage:

www.jewe.ir

Indexing and Abstracting



This journal follows the [Committee on Publication Ethics \(COPE\)](#) and complies with the highest ethical standards in accordance with ethical laws. All submitted manuscripts are checked for similarity through [Samim Noor](#) software to ensure their authenticity to be assured about its originality.

Quarterly Publications

www.jewe.ir



Environment and Water Engineering



ISSN 2476-3683