



Evaluating the response of winter cultivars of rapeseed (*Brassica napus* L.) to different levels of salinity

Mohammad Azimi Gandomani¹

¹ Corresponding Author, Assistant professor of Agriculture department, Faculty of Technical and Engineering, Payame Noor university, Tehran, Iran. E-mail: Mohammad.Azimi@pnu.ac.ir

ABSTRACT

In order to evaluate the response of winter rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars to different levels of salinity, an experiment was carried out in the form of a split plot experiment with a completely randomized design with three replications in 2022 in the research greenhouse of Payam Noor University of Gandaman Center (Chaharmahal and Bakhtiari Province). The first factor was four levels of salinity including S0 (2), S1 (10), S2 (20), and S3 (30) (dS/m), where S0 was the Hoagland's solution as the control, and other salinity levels were the result of mixing sodium chloride (NaCl) and calcium chloride (CaCl₂) at a ratio of 20 to 1 moles in the Hoagland's solution, respectively. The second factor comprised eight winter rapeseed cultivars, including Licord, Okapi, SLM 046, Modena, Opera, Symbol, Fornax and Elite. During the experiment, seed yield, dry matter traits, thousand-seed weight, oil yield and oil percentage were measured. According to the obtained results, all the investigated traits were affected by salinity treatments; So that the increase in salinity level in all the evaluated cultivars showed a significant decrease in all the investigated traits. The amounts of reduction in the investigated traits were different in each cultivar; so that some cultivars experienced a smaller decrease. SLM 046 cultivar was the most successful cultivar of all which showed the highest averages for yield-related traits including grain yield (10.52 grams per pot) and oil yield (3.26 grams per pot) at the highest salinity level (S3). In contrast, at the S3 salinity level, the Elit cultivar showed the poorest performance and obtained the lowest averages for seed yield (3.76 grams per pot) and oil yield (0.05 grams per pot).

Keywords: Salt stress, Oil percentage, Harvest index, Grain yield, Oil yield

Article Type: Research Article

Article history: Received: 09 May 2024 Revised: 10 July 2024 Accepted: 27 July 2024 ePublished: 22 September 2024

1. Introduction

The effect of salinity stress on plants is very wide, and it can cause a decrease in growth, damage to the roots, decrease in yield and even death of plants by reducing the absorption of water and nutrients, reducing enzyme activity, and disrupting the physiological processes of plants such as photosynthesis and respiration (Gupta and Hong, 2014 and Awaad, 2023). Rapeseed oil, as one of the most important sources of vegetable oils in the world, is very important in various economic, agricultural, industrial, and health sectors. With the ability of growing in different climatic conditions, having low water requirement and good relative resistance to various environmental stresses, rapeseed is known as a suitable plant for crop rotation (Rabonatahiry et al., 2021). The effects of salinity on the characteristics of the rapeseed plant in the stages of germination, vegetative stages and seed ripening have been proven. Considering that different rapeseed cultivars are different from each other in terms of their susceptibility to salinity stress in different stages, a detailed assessment on the effects of salinity stress on rapeseed and the adoption of appropriate strategies to manage and reduce this stress can help in better cultivation and optimal management of rapeseed; Therefore, evaluating the response of different rapeseed cultivars to salinity stress is of particular importance in order to introduce salinity-tolerant cultivars.

2. Methodology

2.1. Experimental model

In order to evaluate the response of winter rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars to different levels of salinity, an experiment was conducted in a greenhouse at the Research Greenhouse of Payame Noor University of Gandaman (Chaharmahal and Bakhtiari province). The experiment was arranged as a split-plot design within a completely randomized design with three replications. The first factor was four levels of salinity, including S0 (2), S1 (10), S2 (20), and S3 (30) (dS/m), where S0 was the Hoagland's solution as the control, and other salinity levels were the result of mixing sodium chloride (NaCl) and calcium chloride (CaCl₂) at a ratio of 20 to 1 moles in the Hoagland's solution, respectively. The second factor comprised eight winter rapeseed cultivars including (Licord, Okapi, SLM 046, Modena, Opera, Symbol, Fornax and Elite). The experimental units included 40 × 40 cm pots, 35 cm in height, containing completely homogenized washed sand. Due to lack of absorption and less the plants' need for a complete nutrient solution, the pots were irrigated every other day with a solution containing half the concentration of nutrients found in the Hoagland's solution (Dehdari et al, 2005). Two weeks after establishment, the plants were thinned from 15 to 8 plants per pot to achieve the desired plant density. From the 20th day after sowing (the four-leaf stage of the plants), salinity levels were gradually applied to acclimate the plants, such that all pots, except for the control level, received incremental salinity levels of 25% of each level in four irrigation shifts, thereby applying the total salinity treatment for each level.

2.2. Collecting and preparing plant samples

The salinity treatment continued at the specified ratios until the end of the growth stage. In this study, the traits of seed yield, dry matter traits, thousand seed weight, oil yield and oil percentage were measured. At the end of the growth stage (90 days after sowing), to measure the seed yield, dry matter traits, thousand seed weight and oil yield, six plants in each pot were randomly selected, harvested, and the above parameters were measured and calculated. Oil percentage was calculated with a Soxhlet apparatus (Joshi et al., 2008).

2.3. Statistical Analysis

Finally, data were analyzed using SAS software (version 9.1). Mean comparisons were conducted using Duncan's multiple range test at a 5% probability level.

3. Results and discussion

In the present study, all the traits under investigation were affected by salinity. An increase in salinity levels across all evaluated cultivars resulted in a significant reduction in all examined traits. Based on the results, it can be inferred that the rapeseed cultivars evaluated in this study can produce an acceptable yield up to a salinity level of S1 (salinity of 10 dS/m). At this salinity level, the cultivar SLM 046, with a seed yield of 22.78 grams per pot and an oil yield of 7.97 grams per pot, was identified as the most successful cultivar. Conversely, the Okapi cultivar, with an average seed yield of 11.99 grams per pot and an oil yield of 3.71 grams per pot, was the most susceptible cultivar. Therefore, according to the findings of this study, the SLM 046 cultivar was determined to be the most tolerant to salinity at all levels tested, while the Elit cultivar was assessed as the most susceptible to salinity. Since the primary goal of producing canola oilseeds is oil production, cultivating the evaluated cultivars under salinity conditions of S3 (salinity of 30 dS/m) and higher is practically ineffective.

4. Conclusions

Exposure to environmental stressors, including salinity and drought stress, directly and indirectly causes a portion of the assimilates produced by the plant to be diverted from growth and production processes towards coping with and mitigating stress conditions (Ahmed & Umar, 2011). It has been stated that with increased salinity stress, the stressed plant experiences reduced activity and degradation of cellular biomolecules, lipid oxidation, protein structure alteration, enzyme deactivation, chlorophyll bleaching, and nucleic acid degradation, resulting in the limitation of the plant's photosynthetic system (Ahmed & Umar, 2011; Al-Sharari et al., 2023). In the present study, increasing the intensity of salinity stress from S0 (control) to S3 (30 dS/m) caused the highest percentage reduction in all evaluated traits, including seed yield and oil yield, across all tested cultivars. The results indicated that the SLM046 cultivar, with the highest harvest index (0.29) and seed yield (10.52 grams per pot) at the highest salinity level (S3), and the lowest percentage reduction in harvest index (25.64%) compared to the control, performed better in mitigating the effects of salinity stress compared to other cultivars. In salinity stress conditions, salinity-tolerant cultivars like SLM046, which can allocate remaining assimilates effectively despite limitations in phloem transport and new physiological demands due to salinity stress, are more successful. By maintaining an appropriate harvest index and directing resources towards economic yield, these cultivars produce satisfactory yields (Ahmed & Umar, 2011; Khalid et al., 2015).

5. References

- Ahmad, P., & Umar, S. (2011). *Oxidative Stress: Role of Antioxidants in Plants*. Studium Press, New Delhi, India.
<https://www.abebooks.fr/Antioxidants-Oxidative-Stress-Management-Plants-Edited/7577938868/bd>
- Alsharari, S.F., Ibrahim, A. A., & Okasha, S.A. (2023). Combining ability for yield, oil content, and physiobiochemical characters of canola (*Brassica napus* L.) Under salt stress conditions. *Sabrao Journal of Breeding and Genetics*, 55 (4), 1003-1024.
<http://doi.org/10.54910/sabrao2023.55.4.1>
- Awaad, H. A. (2023). *Fundamentals of Crop Resistance to Salinity: Plant Characters and Selection Criteria*. In: *Salinity Resilience and Sustainable Crop Production Under Climate Change*. Earth and Environmental Sciences Library. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-48542-8_4
- Dehdari, A., Rezaei, A., & Mirmohammady Maibody, S. A. (2005). Salt tolerance of seedling and plant based on Ion contents and agronomic traits. *Soil Science and Plant Analysis*, 36, 2239-2253. <https://doi.org/10.1080/00103620500196622>
- Gupta, B., & Huang, B. (2014). Mechanism of Salinity Tolerance in Plants: Physiological, Biochemical and Molecular Characterization. *International Journal of Genomics*, 68(3), 1-18. <https://doi.org/10.1155/2014/701596>
- Joshi, N.L., P.C. Mali., & Sexena, A. (2008). Effect of nitrogen and sulphur application on yield and fatty acid composition of mustard (*Brassica juncea* L.) Oil. *Journal Agronomy & Crop Science*, 180, 59-63. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.1998.tb00370.x>
- Khalid, A., Athar, H. U. R., Zafar, Z. U., Akram, A., Hussain, K., Manzour, F., Al-Qurainy., & Ashraf, M. (2015). Photosynthetic capacity of canola (*Brassica napus* L.) plants as affected by glycinebetaine under salt stress. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 88, 78-86.
<https://doi.org/10.5073/JABFQ.2015.088.011>
- Raboanatahiry, Li, N., Yu, H., & Li, M. (2021). Rapeseed (*Brassica napus*): Processing, Utilization, and Genetic Improvement. *Agronomy*, 11(9), 1-37. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091776>

6. Conflict of Interest

The authors have no conflicts of interest to declare.

7. Acknowledgments

The author would like to thank management of Payam Noor Gandaman University for the possibility of using the research greenhouse and laboratory facilities.

Cite this article: Azimi Gandamani, M. (2024). Evaluating the response of winter cultivars of rapeseed (*Brassica napus* L.) to different levels of salinity, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(3), 1-16. DOI: 10.22126/ATWE.2024.10604.1122





ارزیابی پاسخ ارقام پائیزه کلزا (*Brassica napus L.*)، به سطوح مختلف شوری

محمد عظیمی گندمانی^۱

^۱ نویسنده مسئول، استادیار، گروه کشاورزی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. رایانامه: Mohammad.azimi@pnu.ac.ir

چکیده

به منظور ارزیابی پاسخ ارقام پائیزه کلزا (*Brassica napus L.*)، به سطوح مختلف شوری، پژوهشی در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه پیام نور مرکز گندمان (استان چهارمحال و بختیاری) به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در سال ۱۴۰۱، به اجرا درآمد. عامل اول، چهار سطح شوری، شامل S0، S1، S2 و S3، به ترتیب با میزان شوری ۲، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر بود که در واقع S0 محلول هوگلند به عنوان شاهد در نظر گرفته شد و دیگر سطوح شوری حاصل از ترکیب کلرید سدیم (NaCl) و کلرید کلسیم (CaCl₂) به ترتیب با نسبت ۲۰ به ۱ مولی در محلول هوگلند و عامل دوم شامل هشت رقم کلزای پائیزه (Okapi, Licord, Modena, SLM 046) بودند. در طول آزمایش، صفات عملکرد دانه، ماده خشک، وزن هزار دانه، عملکرد روغن و درصد روغن اندازه‌گیری شد. با توجه به نتایج به دست آمده کلیه صفات مورد بررسی تحت تأثیر شوری قرار گرفتند؛ بطوریکه افزایش سطح شوری در کلیه ارقام مورد ارزیابی موجب کاهش معنی‌داری در همه صفات مورد بررسی گردید. میزان کاهش در صفات مورد بررسی در ارقام مختلف متفاوت بود؛ به طوری که برخی از ارقام، کاهش کمتری را تجربه نمودند و در این میان رقم SLM 046 نسبت به سایر ارقام موفق‌تر عمل نمود و در بالاترین سطح شوری (S3) بالاترین میانگین‌های عملکرد دانه (به میزان ۱۰/۵۲ گرم در گلدان) و عملکرد روغن (به میزان ۳/۲۶ گرم در گلدان) را کسب نمود. در مقابل رقم Elit در سطح شوری S3، با نمایش یک عملکرد ضعیف، با به دست آوردن کمترین میانگین‌های عملکرد دانه (به میزان ۳/۷۶ گرم در گلدان) و عملکرد روغن (به میزان ۰/۰۵ گرم در گلدان) در جایگاه آخر قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: تنش شوری، درصد روغن، شاخص برداشت، عملکرد دانه، عملکرد روغن

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۰ اردیبهشت ۱۴۰۳ اصلاح: ۲۰ تیر ۱۴۰۳ پذیرش: ۰۶ مرداد ۱۴۰۳ چاپ الکترونیکی: ۰۱ مهر ۱۴۰۳

استناد: عظیمی گندمانی، م. (۱۴۰۳). ارزیابی پاسخ ارقام پائیزه کلزا (*Brassica napus L.*) به سطوح مختلف شوری، فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۴(۳).

۱-۱۶، شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2024.10604.1122



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

تنش شوری، یکی از چالش‌های اساسی در زمینه کشاورزی است که بر اثر افزایش غلظت نمک‌ها در خاک و منابع آبی، در محیط رشد گیاهان به وجود می‌آید. تنش شوری از عوامل مهم محدودکننده تولید در گیاهان زراعی در سطح جهان قلمداد می‌گردد. اثر تنش شوری بر گیاهان بسیار گسترده است و می‌تواند از طریق کاهش جذب آب و عناصر غذایی، کاهش فعالیت آنزیمی و اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه نظیر فتوسنتز و تنفس، موجب کاهش رشد، آسیب به ریشه‌ها، کاهش عملکرد و حتی مرگ گیاهان گردد (گاپتا و هانگ^۱، ۲۰۱۴، و اوود^۲، ۲۰۲۳).

دانه روغنی کلزا به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع روغن گیاهی در جهان، اهمیت بسیاری در بخش‌های مختلف اقتصادی، کشاورزی، صنعتی و سلامت دارد. کلزا با امکان رشد در شرایط مختلف اقلیمی، نیاز آبی کم و داشتن مقاومت نسبی خوب به تنش‌های مختلف محیطی، به‌عنوان یک گیاه مناسب برای قرارگیری در تناوب محصولات زراعی، شناخته می‌شود (رابوناتاهری و همکاران^۳، ۲۰۲۱). روغن کلزا به دلیل داشتن محتوای مناسبی از اسیدهای چرب اشباع‌نشده و میزان متعادلی از عناصر غذایی، از اهمیت بسزایی در تأمین نیازهای تغذیه‌ای انسان و دام دارا است. با توجه به نیاز روزافزون به روغن‌های نباتی و واردات بسیار بالای روغن به کشور، کشت کلزا می‌تواند منجر به افزایش تنوع محصولات کشاورزی، کاهش وابستگی به واردات روغن خام و افزایش درآمد کشاورزان گردد (رابوناتاهری و همکاران^۴، ۲۰۲۱، و نجفی‌رزینی و همکاران، ۲۰۱۹).

در زمانی که جهان به‌سرعت در حال تغییر و تحول است و نیازمندی‌های انسانی به غذا به‌سرعت افزایش می‌یابد، مفهوم تأمین امنیت غذایی به‌عنوان یک مبحث فلسفی و اجتماعی به طرز فزاینده‌ای اهمیت پیدا می‌کند؛ در این مسیر، تنش شوری می‌تواند به‌عنوان یکی از چالش‌های بنیادین در راستای تأمین این امنیت، قلمداد گردد. افزایش شوری خاک نه‌تنها منجر به کاهش تولید محصولات زراعی می‌شود، بلکه اثرات عمیق‌تری بر نظام‌های غذایی، اقتصادی و اجتماعی در جهان دارد. از این‌رو، درک ژرف‌تر از این چالش و ارائه راهکارهایی برای مقابله با آن، از اهمیت بسیاری برخوردار است. آثار شوری بر خصوصیات گیاه کلزا در مراحل جوانه‌زنی، مراحل رویشی و رسیدگی دانه به اثبات رسیده است. با توجه به اینکه ارقام مختلف کلزا از نظر حساسیت به شوری در مراحل مختلف با یکدیگر متفاوت‌اند، ارزیابی دقیق اثرات تنش شوری بر کلزا و اتخاذ راهکارهای مناسب برای مدیریت و کاهش این تنش، می‌تواند به کشت بهتر و مدیریت بهینه کلزا کمک کند؛ از این‌رو ارزیابی پاسخ ارقام مختلف کلزا به تنش شوری به جهت معرفی ارقام متحمل به شوری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

تنش شوری به‌عنوان یکی از عوامل محیطی مهم، می‌تواند به‌طور چشمگیری بر فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان تأثیر بگذارد. شوری به دلایل مختلفی نظیر شرایط طبیعی خاک، مدیریت نادرست منابع آبی و استفاده بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی برای آبیاری که منجر به افزایش سطح نمک‌های محلول در خاک می‌شود، افزایش یافته است (اوود^۵، ۲۰۲۳، و نوید و همکاران^۶، ۲۰۲۰). بخش‌های وسیعی از ایران مانند کویرها، دشت‌های حاصلخیز دامغان و مغان، گرگان و گنبد، آزادگان، ورامین تا گرمسار، بستان تا فارس و اراضی اطراف زاینده‌رود به نحوی متأثر از شوری هستند؛ این اراضی معمولاً با کاهش عملکرد محصولات کشاورزی و محدودیت‌هایی در تنوع محصولات قابل کشت روبه‌رو هستند.

شوری آب‌و‌خاک در کشاورزی اثرات مخرب گسترده‌ای بر رشد و عملکرد محصولات دارد. افزایش غلظت نمک‌ها در خاک و آب‌های آبیاری، باعث کاهش جذب آب و عناصر غذایی توسط گیاهان می‌گردد. این موضوع باعث اختلال در رشد و نمو، کاهش عملکرد بیولوژیکی و

¹ Gupta & Huang

² Awaad

³ Raboanatahiry et al

⁴ Raboanatahiry et al

⁵ Awaad

⁶ Naveed et al

محدودیت در عملکرد اقتصادی محصول می‌شود (گاپتا و هانگ^۱، ۲۰۱۴ و اوود^۲، ۲۰۲۳). علاوه بر این، افزایش تجمع نمک‌های مضر در بافت‌های گیاهی منجر به سمیت نمکی، کاهش فعالیت آنزیمی و اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه می‌شود. این مشکلات باعث کاهش عملکرد، کاهش کیفیت محصول، افزایش حساسیت به بیماری‌ها و آفات و کاهش سودآوری کشاورزان می‌گردد (گاپتا و هانگ^۳، ۲۰۱۴، و رابوناتاهری و همکاران^۴، ۲۰۲۱).

در شرایط شوری، افزایش غلظت نمک در محیط خارجی باعث افزایش فشار اسمزی می‌شود که توانایی جذب آب توسط ریشه‌ها را کاهش می‌دهد. این کاهش در جذب آب باعث کاهش حجم سلول‌ها و از دست رفتن تراز آبی درون سلولی می‌شود. کاهش فشار آماس بر روی تقسیم سلولی و طولیل شدن و همچنین بسته شدن روزنه‌ها در گیاهان حساس به شوری اثر می‌گذارد. این امر باعث کاهش تبادل گازی و به دنبال آن کاهش در فتوسنتز و تنفس می‌شود (ژانگ و شی^۵، ۲۰۱۳). به علاوه، تنش شوری باعث تخریب ساختارهای زیستی مانند کلروپلاست‌ها به‌عنوان جایگاه اصلی انجام فتوسنتز، می‌شود که این امر منجر به کاهش کارایی فتوسنتزی و در نتیجه کاهش تولید مواد غذایی و انرژی در گیاه می‌گردد. همچنین، تنش شوری باعث افزایش تولید رادیکال‌های آزاد می‌شود که موجب خرابی مولکول‌های زیستی و کاهش فعالیت آنزیم‌های کلیدی در فرآیند فتوسنتزی می‌شود. این عوامل در کنار یکدیگر باعث محدودیت شدید در فعالیت فتوسنتزی گیاه می‌شوند که منجر به کاهش رشد و عملکرد گیاهان می‌گردد (گاپتا و هانگ^۶، ۲۰۱۴، و ناهید و همکاران^۷، ۲۰۲۳). افزایش آگاهی و استفاده از تکنولوژی‌های نوین، استفاده از ارقام تحمل‌پذیر به شوری و بهبود شیوه‌های مدیریت خاک می‌تواند در کاهش اثرات منفی شوری و بهبود بهره‌وری اراضی کمک کند.

کلزا به‌عنوان یک گیاه روغنی ارزشمند، جایگاه مهمی در صنعت کشاورزی دارد که از نظر تغذیه‌ای، فناوری و اقتصادی اهمیت فراوانی دارد. دانه کلزا به‌طور متوسط حاوی ۴۵-۴۰ درصد روغن است. این روغن حاوی اسیدهای چرب اشباع به میزان ۷ درصد و اسیدهای چرب غیراشباع حدوداً به میزان ۳۲ درصد است. به همین جهت روغن کلزا جهت مصارف خوراکی جزء روغن‌های مرغوب به شمار می‌رود (گویال و همکاران^۸، ۲۰۲۱). این گیاه با دارا بودن ویژگی‌هایی همچون قابلیت رشد در شرایط آب و هوایی گوناگون، مقاومت به تنش‌های محیطی از جمله سرما، خشکی، شوری و قابلیت تولید روغن باکیفیت بالا، به‌عنوان یک منبع اصلی روغن نباتی در جهان شناخته می‌شود. کلزا به‌عنوان یک گیاه تناوبی مؤثر در بهبود ساختمان خاک، کنترل علف‌های هرز و حفظ تنوع زیستی اراضی کشاورزی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (گویال و همکاران^۹، ۲۰۲۱). از این رو، توسعه کشت کلزا در سطح جهانی و ایران، از اهمیت زیادی برخوردار است و می‌تواند به تعادل در تأمین نیازهای غذایی، حفظ منابع طبیعی و توسعه اقتصادی کشور کمک کند.

در کلزا نیز شوری خاک، ظهور برگ‌ها و تشکیل اولین میانگره‌ها را به تأخیر می‌اندازد و پوشش سبز را نیز کاهش می‌دهد. ادامه تنش در مراحل بعدی رشد، موجب کاهش ارتفاع گیاه، کاهش تعداد غلاف و کاهش تعداد دانه می‌شود (ناهید و همکاران^{۱۰}، ۲۰۲۳، و اطلسی‌پاک، ۲۰۱۶). مطالعات متعددی به‌منظور بررسی پتانسیل تحمل به تنش شوری در ارقام و لاین‌های جنس *براسیکا* صورت پذیرفته است؛ در این خصوص، عظیمی و همکاران (۲۰۱۱) در بررسی ارقام کلزای بهاره در شرایط تنش شوری بیان نمودند که تنش شوری موجب کاهش معنی‌داری در میزان عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه، عملکرد روغن و شاخص برداشت در ارقام مورد بررسی گردید. آن‌ها این علت کاهش را در اثرات سوء تنش شوری بر اجزاء دستگاه فتوسنتزی گیاه و کاهش توان فتوسنتزی گیاهان تحت شرایط تنش گزارش کردند. همچنین بنا به

¹ Gupta & Huang

² Awaad

³ Gupta & Huang

⁴ Raboanatahiry et al

⁵ Zhang & Shi

⁶ Gupta & Huang

⁷ Naheed et al

⁸ Goyal et al

⁹ Goyal et al

¹⁰ Naheed et al

گزارش‌های بای بوردی و همکاران (۲۰۰۹)، با بررسی اثر تنش شوری بر چهار رقم کلزای پاییزه افزایش شوری اثر منفی معنی‌داری بر عملکرد دانه، وزن هزاردانه، تعداد دانه در غلاف، تعداد غلاف در بوته، سطح برگ و ارتفاع بوته داشت. گزارش شده است که تنش شوری با اثر منفی بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، پایداری کلروفیل و کارایی سیستم فتوسنتزی، میزان کلروفیل و هدایت روزنه‌ای برگ گیاهان سبب کاهش معنی‌دار فتوسنتز می‌شود (چم‌حیدر و همکاران، ۲۰۱۸، و کاینات و سجاد^۱، ۲۰۲۱).

بنابراین، مدیریت مناسب آبیاری، استفاده از روش‌های شوری‌زدایی و انتخاب ارقام مقاوم به شوری از جمله راهکارهایی هستند که می‌تواند از مضرات شوری در کشاورزی پیشگیری کند و به بهبود عملکرد محصولات کشاورزی کمک کند. با توجه به تحقیقات انجام شده، با در نظر گرفتن اینکه ارقام مختلف کلزا از نظر حساسیت به شوری در مراحل فوق با یکدیگر متفاوت می‌باشند؛ لذا مطالعه سطوح شوری بر ارقام کلزا ضروری به نظر می‌رسد. لذا این پژوهش به منظور ارزیابی پاسخ ارقام پاییزه کلزا، به سطوح مختلف تنش شوری صورت گرفت.

روش پژوهش

به منظور ارزیابی پاسخ ارقام پاییزه کلزا، به سطوح مختلف شوری، آزمایشی در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه پیام نور مرکز گندمان (استان چهارمحال و بختیاری) به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار به اجرا درآمد. عامل اول، چهار سطح شوری، شامل، S0 (۲)، S1 (۱۰)، S2 (۲۰) و S3 (۳۰) دسی‌زیمنس بر متر بود که در واقع S0 محلول هوگلند به عنوان شاهد در نظر گرفته شد و دیگر سطوح شوری حاصل از ترکیب کلرید سدیم (NaCl) و کلرید کلسیم (CaCl₂) به ترتیب با نسبت ۲۰ به ۱ مولی در محلول هوگلند (جدول ۱) تهیه شد؛ عامل دوم شامل هشت رقم کلزای پاییزه (Elite و Fornax, Symbol, Opera, Modena, SLM 046, Okapi, Licord) بود. واحدهای آزمایش شامل گلدان‌هایی به ابعاد ۴۰ × ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در گلدان‌ها چهار سوراخ به قطر یک سانتی‌متر در ته هر کدام از آن‌ها جهت ایجاد زه‌کشی مناسب و جلوگیری از تجمع نمک تعبیه گردید؛ سپس کلیه گلدان‌ها با ماسه نرم و کاملاً شسته شده جهت بستر کشت بذور پر شدند. در ۱۵ فروردین‌ماه سال ۱۴۰۱، ۱۵ عدد از بذور هر کدام از ارقام مورد ارزیابی، در عمق دو سانتی‌متری از سطح ماسه، در گلدان‌ها کشت و با آب مقطر آبیاری شدند. از مرحله کاشت تا مرحله جوانه‌زنی (هفت روز پس از کاشت) آبیاری با آب مقطر صورت گرفت. پس از ثبت تاریخ دقیق سبز شدن (زمانی که ۵۰ درصد از بذرها سبز شد)، آبیاری گلدان‌ها با محلول غذایی هوگلند، آغاز گردید؛ اما به جهت عدم جذب و نیاز کمتر گیاهان به نسبت کامل عناصر غذایی، با محلول حاوی نصف غلظت عناصر غذایی محلول هوگلند، آبیاری شدند (دهداری و همکاران^۲، ۲۰۰۵). حدود ۱۴ روز پس از کاشت و حصول اطمینان از استقرار بذور جوانه‌زده، اقدام به تنک کردن بوته‌ها تا رسیدن به تراکم مطلوب هشت بوته در گلدان، گردید. در مرحله چهار برگی گیاهان (۲۰ روز پس از کاشت)، اعمال تیمارهای شوری مربوط به هر سطح آغاز شد. در این خصوص، سطح شاهد (S0)، با محلول هوگلند آبیاری شد؛ در سایر سطوح شوری جهت سازگار شدن گیاهان، اعمال تیمارهای شوری به صورت تدریجی انجام گردید؛ بطوریکه با اضافه کردن تدریجی شوری به میزان ۲۵ درصد هر سطح، در چهار نوبت آبیاری، به سطح نهایی شوری در هر سطح رسید. آبیاری گلدان‌ها هم‌زمان به صورت یک روز در میان و در هر نوبت آبیاری به میزان ۲ لیتر (حاوی محلول هوگلند و میزان شوری مربوط به هر سطح)، برای هر گلدان انجام گردید؛ اعمال تیمارهای شوری تا پایان مرحله رسیدگی (۹۰ روز پس از کاشت) با نسبت‌های ذکر شده ادامه داشت (دهداری و همکاران^۳، ۲۰۰۵).

محلول غذایی هوگلند یک محلول عمومی برای کشت هیدروپونیک است و تاکنون تحقیقات فیزیولوژی گیاهی زیادی بر اساس این محلول غذایی انجام شده است؛ برای تهیه این محلول، از مواد شیمیایی تولیدی شرکت مرک آلمان و طبق جدول (۱) عمل گردید (هوگلند و آرنون^۴، ۱۹۵۰).

¹ Kainat & Sajad

² Dehdari et al

³ Dehdari et al

⁴ Hoagland & Arnon

جدول ۱. فرمول محلول غذایی هوگلند (هوگلند و آرنون^۱، ۱۹۵۰)

میلولیتر در لیتر - میزان کاربرد	جرم مولی به گرم	غلظت	محلول مادر
۱	۱۳۶	یک مولار	فسفات دی هیدروژن آمونیوم
۶	۱۰۱	یک مولار	نیتрат پتاسیم
۴	۲۳۶	یک مولار	نیترات کلسیم
۲	۲۴۶	یک مولار	سولفات منیزیم
میزان کاربرد - گرم در لیتر			عناصر کم مصرف محلول پایه
۲/۸۶	-	-	اسید بوریک
۱/۸۱	-	-	کلرید منگنز
۰/۲۲	-	-	سولفات روی
۰/۰۸	-	-	سولفات مس
۰/۰۲	-	-	اسید مولیبدیک
میزان کاربرد - میلی لیتر در لیتر			آهن
۲		۰/۵ درصد	کلات آهن

برای اندازه‌گیری عملکرد و اجزاء عملکرد دانه کلزا، در مرحله رسیدگی (۹۰ روز پس از کاشت) از هر گلدان شش، بوته از محل طوقه کف برگردید و سپس، عملکرد دانه، ماده خشک، شاخص برداشت، عملکرد زیستی و وزن هزار دانه اندازه‌گیری و جهت اندازه‌گیری درصد روغن دانه از روش جوشی و همکاران^۲ (۲۰۰۸) به‌وسیله دستگاه سوکسله انجام شد. نهایتاً پس از بررسی نرمال بودن داده‌ها، تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۱) صورت گرفت. مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

یافته‌ها

عملکرد دانه

مطابق جدول (۲) با توجه به معنی‌دار شدن برهمکنش رقم و تنش شوری بر عملکرد دانه، مشاهده گردید که ارقام مختلف مورد بررسی تحت تأثیر سطوح مختلف شوری قرار گرفتند؛ در این خصوص رقم SLM 046 در سطوح شوری شاهد، S1، S2، و S3 به ترتیب با میانگین‌های ۲۹/۴۴، ۲۲/۷۸، ۱۳/۱۱ و ۱۰/۵۲ گرم در گلدان، بیشترین مقادیر عملکرد دانه را به خود اختصاص داد. در این خصوص کمترین عملکرد دانه به میزان ۳/۷۶ گرم در گلدان در بالاترین سطح شوری (S3) و در رقم Elit مشاهده گردید که در جدول (۳) ارائه شده است.

نتایج این پژوهش مبنی بر کاهش معنی‌دار عملکرد دانه کلزا در شرایط تنش شوری با نتایج محققان دیگر نظیر عظیمی و همکاران (۲۰۱۱) و احمد و همکاران (۲۰۲۱) تطابق دارد؛ آن‌ها علت کاهش عملکرد دانه در شرایط شور را به کاهش فتوسنتز جاری در اثر کاهش بخش فتوسنتز کننده و نهایتاً کاهش اجزا عملکرد نسبت دادند. با افزایش سطح شوری میزان عملکرد دانه در کلیه ارقام مورد ارزیابی روند کاهشی داشت. افزایش سطح شوری از شاهد (S0) به بالاترین سطح شوری (S3) موجب بیشترین درصد کاهش عملکرد دانه در همه ارقام مورد بررسی گردید؛ مطابق جدول (۲) در این خصوص رقم SLM 046 با ۶۴/۲۷ درصد کاهش در عملکرد دانه دارای بهترین رتبه و رقم Elit با ۸۱/۵۰ درصد

¹ Hoagland & Arnon

² Joshi et al

کاهش در عملکرد دانه، ضعیف‌ترین عملکرد را به نمایش گذاشت. بیان شده است که در کلزا، شوری موجب کاهش رشد ریشه، تأخیر در ظهور برگ‌ها و تأخیر در تشکیل اولین میان‌گره‌ها شده و در صورت تداوم شوری در مراحل بعدی رشد، موجب کاهش ارتفاع گیاه، کاهش تعداد غلاف و کاهش تعداد دانه در غلاف می‌گردد (الشرازی و همکاران^۱، ۲۰۲۳). از این رو می‌توان علت کاهش ۸۱/۵۰ درصدی عملکرد رقم Elit را در کاهش اجزای عملکرد، نظیر تعداد غلاف و تعداد دانه در غلاف جستجو نمود. همچنین بیان شده است که یکی از بارزترین اثرات کاهش رشد و عملکرد گیاه در مواجهه با تنش شوری، کاهش سطح برگ در اثر افزایش شوری است؛ بنابراین حتی در صورتیکه میزان فتوسنتز در واحد سطح برگ تغییر نکند؛ میزان رشد و تولید گیاه، به دلیل کاهش میزان فتوسنتز در کل گیاه خواهد یافت که منجر به کاهش عملکرد می‌گردد (نوید و همکاران^۲، ۲۰۲۰، و کاینا و سجاد^۳، ۲۰۲۰). فاکتورهای بسیاری در اثر تنش شوری منجر به کاهش عملکرد اقتصادی در گیاهان زراعی تحت تنش، می‌گردد؛ یکی از علت‌های کاهش عملکرد کلزا در اثر شوری، افزایش غلظت املاح محلول در خاک، به دنبال آن کاهش جذب آب و مواد غذایی گیاه رشد و توسعه مناسب گیاه عنوان شده است (احمد و همکاران^۴، ۲۰۲۱، و عظیمی و همکاران^۵، ۲۰۱۱). علاوه بر آن، افزایش غلظت املاح سدیم و کلر در گیاه منجر به سمیت گیاه و باعث تخریب ساختار سلولی، کاهش فعالیت‌های فیزیولوژیکی و نهایتاً کاهش فتوسنتز می‌گردد (نجفی‌رزینی و همکاران^۶، ۲۰۱۹، و نوید و همکاران^۷، ۲۰۲۰). طبق یافته‌های پژوهشگران (بابیوردی^۸، ۲۰۱۰)، کاهش ذخایر هیدرات‌کربن گیاه پس از گلدهی در نمو بذر در درون غلاف‌ها مؤثر بوده و موجب سقط دانه‌ها در درون غلاف می‌گردد. بنا به گزارش‌های احمد و همکاران^۹ (۲۰۲۱) و چم‌حیدر و همکاران (۲۰۱۶)، تنش شوری باعث کاهش تعداد دانه در غلاف گیاه کلزا می‌گردد و با افزایش شوری تا سطوح بالا (۲۰۰ میلی‌مول)، این کاهش در نتیجه سقط بیشتر دانه در اثر شوری، شکل جدی‌تری به خود می‌گیرد و از این طریق باعث کاهش معنی‌داری در عملکرد دانه می‌گردد.

ماده خشک

ماده خشک گیاه، یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تأثیرگذار در عملکرد نهایی قلمداد می‌گردد و بررسی وزن خشک بوته یکی از صفات اصلی قابل‌اطمینان جهت بررسی واکنش گیاهان به تنش شوری قلمداد می‌گردد (خالید و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۵). اثر متقابل رقم و شوری برای ماده خشک معنی‌دار شد که در جدول (۲) نشان داده شده است. بیشترین میزان ماده خشک در بوته به میزان ۷/۸۲ گرم در گلدان، در سطح شوری S0 و مربوط به رقم SLM 046 بود و کمترین میزان وزن خشک نیز به میزان ۰/۷۰ گرم در گلدان، در سطح S3 و به رقم Elit، اختصاص یافت (جدول ۳). نتایج پژوهش حاضر با نتایج ارائه شده توسط چم‌حیدر و همکاران (۲۰۱۸) و نجفی‌رزینی (۲۰۱۹) دال بر کاهش ماده خشک در اثر شوری تطابق دارد؛ آن‌ها با بررسی اثر تنش شوری بر ارقام کلزا دریافتند که افزایش سطح شوری موجب کاهش وزن تر و خشک ساقه و ریشه، محتوای کلروفیل و وزن گیاهچه ارقام کلزا شد. به این ترتیب چنین می‌توان بیان نمود که گیاهانی دارای عملکرد بالایی خواهند بود که با توجه به شرایط رشد خود از عوامل تولید، بیشترین استفاده را برده و مواد فتوسنتزی بیشتری را در اندام‌های خود تجمع دهند. کاهش ماده خشک در گیاهان تحت تنش شوری نتیجه‌ای از تأثیرات چندگانه و هماهنگ شده است که ناشی از صرف انرژی متابولیکی برای سازگاری با شرایط تنش همچون، تغییرات در فعالیت آنزیم‌ها، افزایش فعالیت سیستم‌های ضداکسیدانی، کاهش فعالیت فتوسنتزی و نهایتاً کاهش تولید ماده خشک گیاه

¹Asharari et al

² Naveed et al

³ Kainat & Sajad

⁴ Ahamed et al

⁵ Naveed et al

⁶ Bybordi

⁷ Ahmed et al

⁸ Khalid et al

می‌گردد (خالید و همکاران^۱، ۲۰۱۵، و رامه و همکاران^۲، ۲۰۱۲). با توجه به نتایج مشاهده گردید که در سطوح پایین شوری روند کاهشی ماده خشک دارای یک شیب نزولی آهسته است و با افزایش شدت تنش از سطح شاهد (S0) به بالاترین سطح شوری (S3)، این روند کاهش با شیب تندتری ادامه داشت؛ بطوریکه رقم Licord با ۶۶/۶۷ درصد، دارای کمترین میزان کاهش و رقم Elit با ۸۴/۹۹ درصد، بیشترین میزان درصد کاهش ماده خشک را به نام خود ثبت نمود که در جدول (۳) ارائه شده است. اعتقاد بر این است که این کاهش، ممکن است ناشی از کاهش نرخ فتوسنتزی در واحد سطح برگ، کاهش جذب کربن، صدمه به بافت‌ها و رسیدن به حداکثر غلظت نمکی باشد که گیاه آن را تحمل می‌کند. عدم یکنواختی در کاهش ماده خشک در سطوح و ارقام مختلف که در پژوهش حاضر نیز با آن مواجه هستیم، بیانگر آستانه تحمل متفاوت از لحاظ میزان و مدت تنش در ژنوتیپ‌های موردبررسی است (نوید و همکاران^۳، ۲۰۲۰، و اطلسی‌پاک، ۲۰۱۶). در گزارش چم‌حیدر و همکاران (۲۰۱۸)، نیز تنش شوری موجب کاهش ماده خشک در کلزا گردید؛ آن‌ها بیان نمودند که کاهش آب قابل‌دسترس گیاه در شرایط تنش شوری و علاوه بر آن افزایش شدید تجمع سدیم در برگ کلزا و اثر منفی آن بر فتوسنتز دلیل این واکنش بود.

جدول ۲. تجزیه واریانس صفات موردبررسی در آزمایش تأثیر شوری بر ارقام پائیزه کلزا

درجه آزادی	عملکرد دانه	ماده خشک	شاخص برداشت	عملکرد زیستی	وزن هزار دانه	عملکرد روغن	درصد روغن
شوری	۲۸/۲۴۱**	۳/۹۱۲**	۰/۰۵۹۸**	۶۰۳۳/۵۵**	۱۲/۱۳۲**	۲/۶۹**	۷۹۸/۸۸**
خطای a	۰/۰۷۲	۰/۰۱۳	۰/۰۰۰۴	۴۰/۱۱	۰/۱۰۲	۰/۰۰۳	۳/۰۴
رقم	۴/۰۱۰**	۰/۳۱۱**	۰/۰۱۳۶**	۹۹/۸۹**	۱/۰۰۲**	۰/۲۹**	۷۴/۱۱**
شوری*رقم	۰/۸۰۲**	۰/۰۳۹**	۰/۰۰۳۱**	۶۱/۱۸*	۰/۲۵۵**	۰/۰۷**	۱۵/۹۹**
خطای b	۰/۰۴۱	۰/۰۱۱	۰/۰۰۰۶	۳۲/۰۸	۰/۰۹۶	۰/۰۰۴	۲/۰۱
ضریب تغییرات	۶/۱۱	۱۱/۲۲	۹/۱۷	۷/۳۳	۱۱/۳۲	۴/۷۷	۵/۱۷

**، * و ns انظر آماری به ترتیب معنی‌داری در سطوح احتمال یک و پنج درصد و غیر معنی‌داری را نشان می‌دهند.

شاخص برداشت و عملکرد زیستی

با مشاهده جدول (۲)، با توجه به معنی‌دار شدن برهمکنش تنش شوری و رقم برای صفات مذکور، مشاهده گردید که در بالاترین سطح شوری رقم SLM 046 با میانگین ۳۲/۸۳ گرم در گلدان، دارای بیشترین میزان عملکرد زیستی و رقم Elit با میانگین ۱۴/۲۷ گرم در گلدان، کمترین میزان عملکرد زیستی را به خود اختصاص داد که در جدول (۳) آورده شده است. مطابق جدول (۳) شاخص برداشت نیز در سطوح مختلف شوری بین ارقام مورد ارزیابی متفاوت بود؛ و با افزایش شدت شوری در کلیه ارقام موردبررسی یک‌روند کاهشی را دنبال نمود. بیشترین میزان شاخص برداشت (۰/۳۹) در سطح شوری S0 و به رقم SLM 046 تعلق گرفت. در این خصوص در بالاترین سطح شوری (S3) نیز ارقام SLM 046 و Elit به ترتیب با میانگین‌های ۰/۲۹ و ۰/۱۷، به ترتیب بالاترین و کمترین میزان شاخص برداشت را به نام خود ثبت نمودند. عظیمی و همکاران (۲۰۱۱) و کاینا و سجاد^۴ (۲۰۲۱) در کلزا و عظیمی‌گندمانی (۲۰۲۴) در لوبیا، نیز کاهش عملکرد زیستی و شاخص برداشت را در ارقام موردبررسی تحت تنش شوری گزارش دادند؛ که با نتایج این پژوهش تطابق دارد؛ آن‌ها بیان نمودند که کاهش دسترسی به آب و مواد مغذی می‌تواند منجر به کاهش فتوسنتز و متابولیسم گیاهی شود که این پدیده مستقیماً بر رشد گیاه و توانایی گیاه در تولید و تکمیل دانه‌ها

¹ Khalid et al

² Rameeh et al

³ Naveed et al

⁴ Kainat & Sajad

در غلاف تأثیر بگذارد؛ بنابراین، در شرایط شوری بالا، کلزا معمولاً تعداد دانه‌های کمتری در هر غلاف تولید می‌کند که این موضوع می‌تواند تأثیر منفی بر عملکرد زیستی، درصد شاخص برداشت و نهایتاً عملکرد محصول داشته باشد.

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل رقم و تنش شوری برای صفات اندازه‌گیری شده در کلزای پاییزه*

تیمارهای آزمایش	عملکرد دانه (گرم در گلدان)	ماده خشک کل (گرم در گلدان)	شاخص برداشت	عملکرد زیستی (گرم در گلدان)	وزن هزاردانه (گرم)	عملکرد روغن (گرم در گلدان)	درصد روغن	رقم	
								سطوح شوری	رقم
Licord	S0	۲۵/۵۰b	۷/۲۰a	۰/۳۷b	۶۶/۲۱a	۸/۵۱b	۳۴/۶۸b		
	S1	۱۹/۷۸bc	۶/۷۸ab	۰/۳۵c	۵۶/۵۱ab	۵/۷۹d	۲۹/۲۶cd		
	S2	۹/۷۸ef	۲/۷۶cd	۰/۲۶fg	۳۷/۶۳de	۲/۴۳ef	۲۵/۴۹e		
	S3	۶/۹۶g	۲/۴۰cd	۰/۲۲e	۳۱/۶۲ef	۱/۶۸f	۲۴/۱۵ef		
SLM 046	S0	۲۹/۴۴a	۷/۸۲a	۰/۳۹a	۶۲/۸۲ab	۱۱/۰۵a	۳۷/۵۵a		
	S1	۲۲/۷۸b	۶/۸۴ab	۰/۳۳d	۵۶/۹۰a	۷/۹۷b	۳۵/۳۱ab		
	S2	۱۳/۱۱d	۲/۶۴cd	۰/۳۲de	۴۰/۸۲d	۴/۴۱de	۳۳/۶۲bc		
	S3	۱۰/۵۲ef	۲/۵۱cd	۰/۲۹bc	۳۲/۸۳ef	۳/۲۶e	۳۰/۶۳c		
Farnax	S0	۲۰/۲۱b	۴/۶۶bc	۰/۳۳d	۶۱/۲۲b	۷/۰۵bc	۳۴/۸۲b		
	S1	۱۲/۱۱d	۳/۴۲c	۰/۳۰e	۵۰/۳۱bc	۳/۷۶e	۳۰/۸۵c		
	S2	۶/۰۲g	۲/۳۴cd	۰/۲۰f	۳۶/۱۱de	۱/۵۴fg	۲۵/۴۵e		
	S3	۴/۹۲de	۲/۰۳cd	۰/۱۹fg	۳۱/۱۴f	۱/۴۳fg	۲۴/۲۲ef		
Opera	S0	۲۰/۰۱b	۳/۵۲c	۰/۳۳d	۶۰/۶۴b	۷/۳۰bc	۳۶/۴۶a		
	S1	۱۳/۷۱d	۵/۰۴b	۰/۳۲de	۴۲/۸۳d	۴/۶۴de	۳۳/۸۴bc		
	S2	۶/۲۳g	۲/۸۰cd	۰/۲۱ef	۲۹/۶۶f	۱/۸۶fg	۲۹/۹۳cd		
	S3	۵/۱۰gh	۱/۷۲d	۰/۱۹fg	۲۶/۶۷gh	۱/۲۱fg	۲۳/۶۵f		
Elit	S0	۲۰/۳۲b	۴/۷۳bc	۰/۳۲de	۶۶/۶۳a	۷/۵۲bc	۳۶/۷۱a		
	S1	۱۳/۲۳d	۴/۲۱bc	۰/۲۹ef	۵۲/۵۲bc	۳/۹۶e	۲۹/۱۸cd		
	S2	۶/۱۳g	۱/۷۲d	۰/۲۷f	۳۰/۱۲f	۱/۵۸f	۲۵/۶۶e		
	S3	۳/۷۶i	۰/۷۱e	۰/۱۷g	۲۲/۱۳h	۰/۰۵h	۱۳/۵۴h		
Okapi	S0	۲۳/۷۱b	۶/۵۴a	۰/۳۵c	۶۴/۸۸a	۸/۴۴b	۳۵/۴۳ab		
	S1	۱۱/۹۹de	۵/۴۱bc	۰/۲۶fg	۴۶/۱۲cd	۳/۷۱c	۳۰/۹۶c		
	S2	۷/۳۲g	۲/۸۲cd	۰/۲۲e	۳۳/۲۵ef	۱/۷۲f	۲۳/۵۶f		
	S3	۴/۶۵h	۱/۸۸d	۰/۲۰f	۲۳/۲۵gh	۰/۹۴g	۲۰/۲۷g		
Eboint	S0	۲۰/۲۱b	۵/۶۶b	۰/۳۱de	۶۵/۱۸a	۷/۲۵bc	۳۵/۸۶ab		
	S1	۱۲/۸۳d	۵/۲۸b	۰/۲۵g	۵۱/۳۲bc	۴/۲۹de	۳۳/۴۶bc		
	S2	۶/۱۲g	۲/۵۶cd	۰/۲۱ef	۲۹/۱۲f	۱/۷۳f	۲۸/۲۴d		
	S3	۴/۷۷h	۱/۷۸d	۰/۱۹fg	۲۵/۱۳gh	۰/۹۷g	۲۰/۴۴g		
Modena	S0	۱۷/۹۹c	۴/۸۰bc	۰/۳۰e	۵۶/۶۳bc	۶/۰۲cd	۳۳/۳۶bc		
	S1	۱۳/۲۲d	۳/۵۴c	۰/۲۷f	۴۸/۹۸c	۳/۷۹e	۲۸/۶۵d		
	S2	۶/۹۱g	۱/۸۵d	۰/۲۰f	۳۴/۵۲ef	۱/۸۱f	۲۶/۳۲de		
	S3	۵/۴۲gh	۱/۲۱d	۰/۱۹fg	۲۸/۵۳f	۱/۲۲f	۲۲/۴۴f		

*در هر مقایسه حداقل یک حرف مشترک نشان دهنده عدم تفاوت آماری در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

با توجه به نتایج به دست آمده از جدول (۳) مشاهده می‌گردد که افزایش شدت تنش شوری موجب کاهش مضاعف هر دو صفت شاخص برداشت و عملکرد بیولوژیک در ارقام مورد ارزیابی گردید. بیشترین درصد کاهش عملکرد زیستی و شاخص برداشت در کلیه ارقام مورد ارزیابی در سطح شوری S3 مشاهده شد؛ در این خصوص کمترین درصد کاهش شاخص برداشت (۲۵/۶۴ درصد) در رقم SLM 046 و بیشترین درصد کاهش به میزان ۴۶/۸۷ درصد به رقم Elit اختصاص یافت. کمترین میزان درصد کاهش عملکرد بیولوژیک به میزان ۴۷/۷۴ درصد مربوط به رقم SLM 046 و بیشترین میزان کاهش عملکرد بیولوژیک (۶۶/۷۹ درصد) نیز مربوط به رقم Elit بود. شاخص برداشت به عنوان ضریبی از عملکرد زیستی است که معیار مناسبی از نحوه تسهیم مواد فتوسنتزی به نفع عملکرد اقتصادی قلمداد می‌گردد. در شرایط تنش‌های محیطی نظیر تنش خشکی و شوری گیاهان متحمل به تنش، نظیر رقم SLM 046 که نسبت به سایر ارقام مورد ارزیابی، کاهش کمتری در عملکرد زیستی و شاخص برداشت داشتند؛ با مدیریت بهینه تنش و هدایت بیشتر شیره پرورده به سمت اندام دخیل در عملکرد اقتصادی موجب کاهش کمتر شاخص برداشت و افزایش سهم عملکرد اقتصادی از عملکرد زیستی شدند (کاینا و سجاد^۱، ۲۰۲۱، عظیمی گندمانی، ۲۰۲۴ و عظیمی-گندمانی و همکاران، ۲۰۱۱). در اکثر مطالعات انجام شده شوری که با نتایج این پژوهش نیز همخوانی دارد؛ بیان شده است که اثر منفی و معنی‌دار تنش شوری، بر عملکردهای زیستی و عملکرد دانه به اثبات رسیده است؛ لذا چنین می‌توان بیان نمود که عملکرد زیستی بیشتر، در شرایط تنش محیطی، نشان‌دهنده پتانسیل عملکرد اقتصادی بالاتر و به دنبال آن، حصول عملکرد بیشتر در شرایط تنش است (کاینا و سجاد^۲، ۲۰۲۱، بایوردی و همکاران، ۲۰۰۹، و احامد و همکاران^۳، ۲۰۲۱).

وزن هزار دانه

وزن هزار دانه یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی عملکرد در کلزا قلمداد می‌گردد. با توجه به معنی‌دار شدن برهمکنش رقم و تنش شوری برای صفت وزن هزار دانه در جدول (۲) مشاهده گردید که در بالاترین سطح شوری (S3) رقم SLM 046 در مقایسه با سایر ارقام مورد بررسی موفق‌تر عمل نموده و با میانگین ۳/۱۷ گرم، دارای بالاترین میزان وزن هزار دانه و رقم Farnax نیز با میانگین ۲/۰۹ گرم، کمترین رتبه را به خود اختصاص داد. همچنین مشاهده گردید که رقم Okapi با میانگین ۳/۹۵ گرم، در سطح شوری S0 دارای بیشترین میزان وزن هزار دانه بود. با توجه به نتایج جدول (۳) مشاهده گردید که با افزایش شدت تنش شوری، شیب کاهش وزن هزار دانه در همه ارقام مورد ارزیابی تندتر می‌گردد؛ ولی در این میان با افزایش سطح تنش از شاهد (S0) به بالاترین سطح تنش شوری (S3)، رقم SLM 046 با ثبت عدد ۱۰/۱۹ درصد، دارای کمترین میزان درصد کاهش در میزان وزن هزار دانه بود و رقم Farnax نیز که نسبت به سایر ارقام عملکرد ضعیف‌تری داشت، با میانگین ۴۲/۸۹ درصد، بیشترین درصد کاهش وزن هزار دانه را به نام خود ثبت کرد. از آنجایی که تنش شوری موجب اختلال در لقاح دانه‌ها و نهایتاً کاهش تعداد دانه در غلاف می‌گردد؛ انتظار می‌رود که سهم دانه‌های باقیمانده از آسیمیلانتهای تولیدی بیشتر گردد و به دنبال آن وزن هزار دانه افزایش یابد؛ اما با توجه به نتایج پژوهش حاضر و نتایج احامد و همکاران^۴ (۲۰۲۱) و عظیمی و همکاران (۲۰۱۱) در کلزا، تنش شوری موجب کاهش وزن هزار دانه گردید. لذا چنین بیان شده است که کاهش سطح فتوسنتزی گیاه از یک سو و اختلال در انتقال کربوهیدرات‌ها به دانه در شرایط تنش شوری که ناشی از تجمع املاح مضر در گیاه و همچنین بر هم خوردن تعادل یونی است از سوی دیگر، مهم‌ترین دلایل کاهش وزن دانه در ارقام حساس به شوری کلزا نظیر Farnax قلمداد می‌گردد. همچنین وزن دانه به مقدار زیادی به وسیله دوره پر شدن دانه

¹ Kainat & Sajad

² Kainat & Sajad

³ Ahamed et al

⁴ Ahamed et al

تعیین می‌شود، بنابراین تنش‌های محیطی که تمایل به کوتاه کردن دوره پر شدن دانه دارند به‌طور معنی‌داری وزن دانه را کاهش می‌دهند (احمد و همکاران^۱، ۲۰۲۱، و عظیمی و همکاران، ۲۰۱۱).

عملکرد روغن و درصد روغن

اثر متقابل رقم و شوری برای صفات عملکرد روغن و درصد روغن مطابق جدول (۲) معنی‌دار گردید. با توجه به نتایج جدول (۳)، مشاهده گردید که بیشترین میزان درصد روغن به میزان ۳۷/۵۵ درصد، در رقم SLM 046 و مربوط به سطح شوری S0 بود. در این خصوص رقم Elit نیز با میانگین ۱۳/۵۴ درصد، کمترین میزان درصد روغن را در بالاترین سطح شوری (S3) به خود اختصاص داد. در سطح شوری S3 رقم SLM 046 واکنش بهتری را در کاهش اثرات سوء تنش شوری نشان داد؛ بطوریکه این رقم با میانگین ۳۰/۶۳ درصد، بیشترین میزان درصد روغن را داشت. تأثیر شوری خاک بر میزان روغن دانه کلزا بستگی به میزان شوری و همچنین ویژگی‌های ژنتیکی و محیطی گیاه دارد؛ محتوای روغن دانه در دانه‌های روغنی خانواده براسیکا بسیار متفاوت بوده و دارای دامنه‌ای بین ۳۴-۳۵ درصد است (رابوناتاهری و همکاران^۲، ۲۰۲۱). نتایج تحقیقات الشراری و همکاران^۳، (۲۰۲۳) نیز در مطالعه تنش شوری بر چند رقم کلزا با نتایج تحقیق حاضر تطابق دارد؛ آن‌ها بیان نمودند که محتوای روغن دانه و درصد روغن در گیاهان مورد آزمایش تحت شرایط شوری به‌طور معنی‌داری کاهش پیدا کرد. ارقام مورد ارزیابی در خصوص صفت عملکرد روغن، در سطوح مختلف شوری پاسخ متفاوت و معنی‌داری داشتند؛ بطوریکه در بالاترین سطح شوری رقم SLM 046 با میانگین ۳/۲۶ گرم روغن و رقم Elit با میانگین ۰/۰۵ گرم روغن، به ترتیب بالاترین و کمترین رتبه را به خود اختصاص دادند. افزایش سطح شوری در همه ارقام مورد ارزیابی، موجب کاهش معنی‌داری در عملکرد روغن و درصد روغن گردید؛ اما با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از جدول (۳) مشاهده گردید که ارقام مورد بررسی بیشترین میزان کاهش صفات مذکور را در بالاترین سطح شوری (S3) تجربه کردند؛ در این خصوص، افزایش سطح شوری از S0 به بالاترین سطح شوری (S3)، موجب کاهش قابل توجه عملکرد روغن در تمام ارقام مورد ارزیابی گردید؛ بطوریکه رقم SLM 046 با ۷۰/۵۰ درصد کاهش عملکرد روغن، دارای بهترین عملکرد روغن و رقم Elit با ۹۹/۳۴ درصد کاهش، بیشترین میزان درصد کاهش عملکرد روغن را تجربه نمود. در خصوص درصد روغن نیز مشاهده گردید که افزایش سطح شوری از S0 به S3، درصد روغن را به‌طور معنی‌داری کاهش داد؛ بطوریکه بیشترین میزان درصد کاهش در روغن (۶۳/۱۲ درصد) در رقم Elit و کمترین میزان کاهش درصد روغن (۱۸/۴۳ درصد) به رقم SLM 046 اختصاص یافت. دلیل این امر احتمالاً مربوط به مشارکت برخی اسیدهای چرب نظیر اسید لینولئیک در تنظیم درجه سفتی دیواره‌های سلولی مربوط بوده و از طرفی نیز اسیدهای چرب در شرایط شور در تولید برخی آنزیم‌ها نظیر لیپواکسیژناز جهت افزایش تحمل به شوری در گیاهان خانواده براسیکا نقش دارد و وجود اختلاف معنی‌دار واکنش ارقام نسبت به عملکرد روغن در شرایط تنش شوری را به اختلافات ژنتیکی در سنتز روغن می‌توان نسبت داد (رابوناتاهری و همکاران^۴، ۲۰۲۱، و الشراری و همکاران^۵، ۲۰۲۳).

بحث

با توجه به نتایج پژوهش حاضر که به جنبه‌ها و اجزای مرتبط با عملکرد کلزا در سطوح مختلف شوری پرداخته است؛ با توجه به جدول (۳) مشاهده گردید که تنش شوری موجب کاهش معنی‌داری، در همه صفات مورد بررسی در ارقام مورد ارزیابی گردید. با توجه به نتایج مشاهده گردید که با افزایش هر سطح تنش شوری، میزان بالایی از عملکرد دانه و عملکرد روغن کاهش یافت. قرار گرفتن گیاه در شرایط تنش‌های محیطی از جمله تنش شوری و خشکی، به‌طور مستقیم و غیرمستقیم، موجب می‌گردد که بخشی از آسیمیلات تولیدی گیاه، بجای مصرف در فرایند رشد و تولید گیاه، جهت مقابله و تعدیل شرایط تنش مصرف گردد؛ از آن جمله می‌توان به تغییر مسیرهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه

¹ Ahamed et al

² Raboanatahiry et al

³ Asharari et al

⁴ Raboanatahiry et al

⁵ Asharari et al

جهت تولید مواد و متابولیت‌های سازگار به شرایط تنش همچون تولید قندهای محلول، پرولین، انواع پروتئین‌های درگیر در شرایط تنش‌زا اشاره نمود (احمد و امر^۱، ۲۰۱۱). بیان شده است که با افزایش شدت تنش شوری، گیاه تحت تنش با کاهش فعالیت و تخریب مولکول‌های زیستی سلول، اکسید شدن چربی‌ها، تغییر ساختمان پروتئین‌ها، غیرفعال شدن آنزیم‌ها، بی‌رنگ شدن کلروفیل و تخریب اسیدهای نوکلئیک مواجه می‌گردد که نتیجه آن محدود کردن سیستم فتوسنتزی گیاه است (احمد و امر^۲، ۲۰۱۱، و الشراری و همکاران^۳، ۲۰۲۳). در پژوهش حاضر نیز افزایش شدت تنش شوری، از سطح شوری S0 (شاهد) تا S3 (۳۰ دسی‌زیمنس بر متر)، موجب وقوع بیشترین درصد کاهش در همه صفات مورد ارزیابی از جمله عملکرد دانه و عملکرد روغن در همه ارقام مورد بررسی گردید.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد محدودیت تولید شیره پرورده ناشی از کاهش فعالیت سیستم فتوسنتزی از یک‌سو و مصرف بخشی از آسمیلات‌های تولیدی جهت تعدیل شرایط تنش از سوی دیگر موجب کاهش در رشد، نمو و نهایتاً کاهش عملکرد اقتصادی گیاه تحت تنش شوری می‌گردد (احمد و امر^۴، ۲۰۱۱، و خلید و همکاران^۵، ۲۰۱۵). در این پژوهش، ارقام مورد ارزیابی پاسخ‌های متفاوتی نسبت به شرایط تنش داشتند؛ بطوریکه رقم SLM 046 در بالاترین سطح شوری (S3)، بیشترین میانگین‌ها را در کلیه صفات مورد بررسی به نام خود ثبت نمود؛ با توجه به نتایج جدول (۳) مشاهده گردید که رقم فوق‌الذکر با کسب بیشترین میزان شاخص برداشت (۲۹/۰) و عملکرد دانه (۱۰/۵۲ گرم در گلدان)، در بالاترین سطح شوری (S3) و ثبت کمترین میزان درصد کاهش (۶۴/۲۵ درصد) در شاخص برداشت نسبت به شاهد، در مقایسه با سایر ارقام، در تعدیل اثرات تنش شوری موفق‌تر عمل نموده است. در شرایط تنش شوری ارقام متحمل به شوری نظیر SLM 046 که بتوانند علیرغم محدودیت تولید در شیره پرورده و مصارف فیزیولوژیکی جدید ناشی از تنش شوری، تسهیم مناسبی از آسمیلات‌های باقیمانده داشته باشند؛ موفق‌تر بوده و با حفظ شاخص برداشت مناسب با هدایت منابع به نفع عملکرد اقتصادی عملکرد مناسبی را تولید خواهد نمود (احمد و امر^۶، ۲۰۱۱، و خلید و همکاران^۷، ۲۰۱۵).

موضوع پرداختن به تنش شوری، به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی در زمینه کشاورزی و فناوری‌های زراعی، همچنان یکی از مسائل مهم در جهان کشاورزی قلمداد می‌گردد. با توجه به تحولات آب و هوایی نامطلوب، افزایش شور شدن اراضی و وجود دامنه متفاوت در تحمل ارقام و ژنوتیپ‌های گیاهان به تنش شوری، اهمیت پرداختن به تنش شوری را دو چندان می‌کند. با توجه به این موضوع و اهمیت اقتصادی و غذایی دانه‌های روغنی نظیر کلزا، پژوهش‌های بیشتر در زمینه شناسایی ژنوتیپ‌ها و ارقام مقاوم به شوری، توسعه روش‌های مدیریتی برای کاهش تأثیرات منفی تنش شوری و بهبود تحمل گیاهان به شرایط تنش‌های محیطی از اهمیت بالایی برخوردار است.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر کلیه صفات مورد بررسی تحت تأثیر شوری قرار گرفت؛ بطوریکه افزایش سطح شوری در کلیه ارقام مورد ارزیابی موجب کاهش معنی‌داری در همه صفات مورد بررسی گردید. با توجه به نتایج چنین می‌توان استنباط نمود که ارقام مورد ارزیابی کلزا در این تحقیق تا سطح شوری S1 (شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر)، می‌توانند عملکرد قابل قبولی را تولید کنند؛ که در این سطح شوری رقم SLM 046 با عملکرد دانه ۲۲/۷۸ گرم در گلدان و عملکرد روغن ۷/۹۷ گرم در گلدان به‌عنوان مناسب‌ترین رقم و رقم Okapi نیز با میانگین عملکرد دانه ۱۱/۹۹ گرم در گلدان و عملکرد روغن ۳/۷۱ گرم در گلدان حساس‌ترین رقم بود. با افزایش سطح شوری تا سطح شوری S3، میزان کاهش صفات مورد بررسی نیز شیب تندتری به خود گرفتند؛ با نگاهی به نتایج ارائه‌شده چنین می‌توان بیان نمود که در بالاترین سطح شوری (S3)، رقم

¹ Ahmad & Umar

² Ahmad & Umar

³ Asharari et al

⁴ Ahmad & Umar

⁵ Khalid et al

⁶ Ahmad & Umar

⁷ Khalid et al

SLM 046 در مقایسه با سایر ارقام مورد ارزیابی به ترتیب با ۶۴/۲۷ و ۷۰/۵۰ درصد کاهش در عملکرد دانه و عملکرد روغن، دارای بهترین شرایط و رقم Elit نیز به ترتیب با ۸۱/۵۰ و ۹۹/۳۴ درصد کاهش، در خصوص صفات عملکرد دانه و عملکرد روغن عملکرد ضعیفی را به نمایش گذاشت. لذا با توجه به نتایج این پژوهش، رقم SLM 046 در همه سطوح شوری مورد بررسی به عنوان متحمل ترین رقم به شوری و رقم Elit نیز به عنوان حساس ترین رقم به شوری ارزیابی گردید. حال از آنجایی که هدف از تولید دانه روغنی کلزا، تولید روغن است؛ کشت ارقام مورد ارزیابی در این تحقیق در شرایط شوری S3 (شوری ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر) و بالاتر عملاً بی‌فایده است.

ارتقاء دانش و درک ما در توسعه ارقام مقاوم به شوری و استفاده از روش‌های مدیریتی بهینه می‌تواند در بهبود تحمل گیاهان به انواع تنش‌های محیطی مؤثر باشد. به‌طور کلی، تمرکز بر پژوهش‌های گسترده و متنوع در این زمینه می‌تواند به کشاورزان کمک کند تا بهترین راهکارها را برای مدیریت و کنترل تنش شوری در محیط‌های کشاورزی خود اتخاذ کنند. لذا با توجه به واکنش متفاوت ارقام کلزا نسبت به تنش شوری از یک سو و حساسیت کلزا به شرایط شوری و همچنین جهت معرفی ارقام متحمل به شوری جهت استفاده در سایر تحقیقات به‌نژادی و به‌زراعی لازم است تحقیقات بیشتر در شرایط متنوع آب و هوایی ایران صورت گیرد.

تقدیر و تشکر

در پایان از مدیریت دانشگاه پیام نور گندمان به جهت در اختیار گذاشتن گلخانه و آزمایشگاه تحقیقاتی دانشگاه، کمال تشکر را دارم.

منابع

- اطلسی‌پاک، وحید. (۱۳۹۵). تأثیر تنش شوری بر رشد و توزیع یونی در ارقام متحمل و حساس گیاه کلزا (*Brassica napus* L.). نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی. ۶ (۲۰)، ۷۱-۸۵. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.6.20.71>
- چم‌حیدر، هادی، و فرهودی، روزبه. (۱۳۹۷). بررسی اثر تنش شوری بر فتوسنتز و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان ارقام کلزا در مرحله رشد رویشی. فصلنامه علمی پژوهشی فیزیولوژی گیاهان زراعی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز. ۱۰ (۳۹)، ۴۲-۲۳. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.2008403.1397.10.39.2.6>
- عظیمی‌گندمانی، محمد. (۱۴۰۳). اثرات سطوح مختلف شوری بر عملکرد و برخی خصوصیات فیزیولوژیک ارقام مختلف لوبیا چیتی. مجله فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب. ۴ (۲)، ۷۷-۹۲. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10549.1120>
- عظیمی‌گندمانی، محمد، فرجی، هوشنگ، دهداری، اشکبوس، موحدی دهنوی، محسن، و علی‌نقی‌زاده، مصطفی. (۱۳۹۱). تأثیر تنش شوری بر برخی خصوصیات کمی و کیفی ارقام کلزای بهاره. مجله الکترونیک تولید گیاهان زراعی. ۵ (۱)، ۷۰-۵۳. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.2008739.1391.5.1.4.3>
- نجفی‌زرینی، حمید، منصوری، ایراندخت، بابائیان، نادعلی و پاکدین، علی. (۱۳۹۸). ارزیابی تحمل به شوری برخی از ژنوتیپ‌های کلزا در شرایط نرمال و تنش شوری (*Brassica Napus* L.). پژوهشنامه اصلاح گیاهان زراعی. ۱۱ (۳۰)، ۳۶-۲۳. <https://dx.doi.org/10.29252/jcb.11.30.23>

References

- Ahamed, F., Ahmed, I. M., Shamim Ahsan, A. F., Ahmed, M. B., & Begum, F. (2021). Physiological and yield responses of some selected rapeseed/mustard genotypes to salinity stress. *Bangladesh Agronomy Journal*, 24(1), 43-55. <https://doi.org/10.3329/baj.v24i1.55545>
- Ahmad, P., & Umar, S. (2011). *Oxidative Stress: Role of Antioxidants in Plants*. Studium Press, New Delhi, India. <https://www.abebooks.fr/Antioxidants-Oxidative-Stress-Management-Plants-Edited/7577938868/bd>

- Alsharari, S.F., Ibrahim, A. A., & Okasha, S.A. (2023). Combining ability for yield, oil content, and physiobiochemical characters of canola (*Brassica napus* L.) Under salt stress conditions. *Sabrao Journal of Breeding and Genetics*, 55 (4), 1003-1024. <http://doi.org/10.54910/sabrao2023.55.4.1>
- Atlasi Pak, V. (2015). Effect of salinity stress on growth and ion distribution in tolerant and sensitive cultivars of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Journal of production and processing of agricultural and horticultural products*, 6 (20), 85-71. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.6.20.71> [In Persian]
- Awaad, H. A. (2023). Fundamentals of Crop Resistance to Salinity: Plant Characters and Selection Criteria. In: *Salinity Resilience and Sustainable Crop Production Under Climate Change*. Earth and Environmental Sciences Library. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48542-8_4
- Azimi Gandomani., M. (2024). The effects of different levels of salinity on the yield and some physiological characteristics of different pinto bean cultivars, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(2), 77-92. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10549.1120>
- Azimi Gandomani, M., Dehdari, A., Faraji, H. Movahhedi Dehnavi, M., & Alinaghizadeh, M. (2012). Effects of salinity on some quantitative and qualitative characteristics of spring Rapeseed cultivars. *Electronical Journal of Crop Production*, 5, 53-70. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.2008739.1391.5.1.4.3>[In Persian]
- Bybordi, A. (2010). Effects of salinity on yield and component characters in canola (*Brassica napus* L.) cultivars. *Notulae Scientia Biologicae*, 2(1), 81-83. <https://doi.org/10.15835/nsb.2.1.3560>
- Cham Haider, H., & Farhoudi, R. (2017). Investigating the effect of salinity stress on photosynthesis and the activity of antioxidant enzymes of rapeseed cultivars in the vegetative growth stage. *Scientific Research Quarterly Journal of Plant Physiology - Islamic Azad University, Ahvaz Branch*, 10 (39), 23-42. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.2008403.1397.10.39.2.6> [In Persian]
- Dehdari, A., Rezai, A., & Mirmohammady Maibody, S. A. (2005). Salt tolerance of seedling and plant based on Ion contents and agronomic traits. *Soil Science and Plant Analysis*, 36, 2239-2253. <https://doi.org/10.1080/00103620500196622>
- Goyal, A., Tanwar, B., Sihag, M. K., Kumar, V., Sharma, V., & Soni, S. (2021). Rapeseed/Canola (*Brassica napus*) Seed. In: Tanwar, B., Goyal, A. (eds) *Oilseeds: Health Attributes and Food Applications*. Springer, Singapore, 47-71. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4194-0_2
- Gupta, B., & Huang, B. (2014). Mechanism of Salinity Tolerance in Plants: Physiological, Biochemical and Molecular Characterization. *International Journal of Genomics*, 68(3), 1-18. <https://doi.org/10.1155/2014/701596>
- Joshi, N.L., P.C. Mali., & Sexena, A. (2008). Effect of nitrogen and sulphur application on yield and fatty acid composition of mustard (*Brassica juncea* L.) Oil. *Journal Agronomy & Crop Science*, 180, 59-63. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.1998.tb00370.x>
- Kainat, K., & Sajad, M. (2021). Effect of sodium chloride on the growth parameters of canola plant. *Pure and Applied Biology*, 10(2), 492-502. <http://dx.doi.org/10.19045/bspab.2021.100052>
- Khalid, A., Athar, H. U. R., Zafar, Z. U., Akram, A., Hussain, K., Manzour, F., Al-Qurainy., & Ashraf, M. (2015). Photosynthetic capacity of canola (*Brassica napus* L.) plants as affected by glycinebetaine under salt stress. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 88, 78-86. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2015.088.011>
- Naheed, R., Aslam, H., Kanwal, H., Farhat, F., Gamar, M., Amina, A. M., Al-Mushhin, A., Jabborova, D., Ansari, M. J., Shaheen, S., Aqeel, M., Noman, A., & Hessini, K. (2021). Growth attributes, biochemical modulations, antioxidant enzymatic metabolism and yield in *Brassica napus* varieties for

- salinity tolerance. Saudi Journal of Biological Sciences, 28(10), 5469-5479.
<https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.08.021>
- Najafi Zarini, H., Mansouri, I., Babaian, N., & Pakdin, A. (2018). Evaluation of salinity tolerance of some rapeseed genotypes under normal conditions and salinity stress (*Brassica Napus* L.). Crop breeding research paper, 11 (30), 23-36 (In Persian). <http://dx.doi.org/10.29252/jcb.11.30.23>
- Naveed, M., Sajid, H., Mustafa, A., Niamat, B., Ahmad, Z., Yaseen, M., Kamran, M., Rafique, M., Ahmar, S., & Chen, J. (2020). Alleviation of Salinity-Induced Oxidative Stress, Improvement in Growth, Physiology and Mineral Nutrition of Canola (*Brassica napus* L.) through Calcium-Fortified Composted Animal Manure. Sustainability, 12, 1-17. <https://doi.org/10.3390/su12030846>
- Rabonatahiry, Li, N., Yu, H., & Li, M. (2021). Rapeseed (*Brassica napus*): Processing, Utilization, and Genetic Improvement. Agronomy, 11(9), 1-37. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091776>
- Rameeh, V. (2012). Ions uptake, yield and yield attributes of rapeseed exposed to salinity stress. Journal of Soil Science Plant Nutral, 12(1), 851-861. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162012005000037>
- Zhang, J. L., & Shi, H. (2013). Physiological and molecular mechanisms of plant salt tolerance. Photosynthesis Research, 115, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s11120-013-9813-6>



Simulation of total dissolved solids removal from domestic wastewater in vertical and horizontal subsurface constructed wetland

Zahra Karimi¹ , Maryam Navabian² 

¹ M.Sc. student of water engineering, Department of water engineering, Faculty of Agriculture Science, University of Guilan, Rasht, Iran. Email: karimi_tannaz@yahoo.com

² Corresponding Author, Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture Science, and a research member of the Water and Environmental Engineering Department of the Caspian Sea Water Basin Research Institute, University of Guilan, Rasht, Iran. Email: Navabian@guilan.ac.ir

ABSTRACT

The ever-increasing population and expansion of development activities regardless of the quantitative and qualitative management of water resources in most of the countries located in the dry belt areas have led to the aggravation of the water crisis, especially in Iran. Wastewater is one of the types of non-conventional water that can be put back into the consumption cycle if its pollutants and impurities are removed. In this research, the performance of the artificial wetland systems with vertical and horizontal subsurface flows under the cultivation of reed and typha plants for the treatment of the wastewater of Rasht city were simulated by the HYDRUS-2D model. The values of the statistical index of the normalized root-mean-square error (NRMSE) in wetlands without plants, under Reed and Typha cultivation were 6.5, 9.8 and 14.8%, respectively, which in comparison with the classification of Jaminson et al. (1991). The HYDRUS model has excellent (less than 10%) and good (10 and 20%) accuracy in simulating total dissolved solids in artificial wetlands. Therefore, the HYDRUS model recommends for the design of reducing the total dissolved solids of artificial wetlands.

Keywords: Constructed Wetland, Phytoremediation, Reed, Typha, Wastewater Treatment

Article Type: Research Article

Article history: Received: 08 April 2024 Revised: 10 July 2024 Accepted: 27 July 2024 ePublished: 22 September 2024

1. Introduction

Population growth and changes in the pattern of needs in accordance with economic growth and lifestyle changes have increased the need for suitable water sources. Treatment and reuse of wastewater is very important in order to reduce the water crisis and prevent the pollution of surface and underground water sources and ecological destruction caused by the discharge of sewage and preserv human health. Conventional wastewater treatment methods have many implementation limitations, including high cost, complex operations and maintenance, etc. For this reason, it is not possible to implement conventional and high-tech methods everywhere. While natural wastewater treatment systems have lower technology and less need for trained labor and at the same time have high efficiency. Among the solutions for green wastewater treatment, we can mention phytoremediation and artificial wetland system. An artificial terrestrial wetland that removes pollutants by creating a saturated porous environment and providing the conditions for the occurrence of physical, chemical and biological processes. Phytoremediation is a biological treatment method in which a plant reduces the pollutants by selective absorption of pollutants and accumulation of them in its tissues. In this method, various factors such as retention time, pollutant concentration, environmental factors (acidity, temperature) and plant characteristics (species, root system, etc.) are important. Since the artificial wetland is similar to a black box whose processes cannot be predicted, simulation models are used to design them with the aim of achieving the highest pollutant removal efficiency. The HYDRUS-2D model is an advanced two-dimensional model related to the simulation of water movement and solute and heat transfer in saturated and unsaturated porous media. In this model, Richards and dispersivity-diffusion equations have been used respectively to simulate water movement and solute transport, as well as features such as spatial distribution of plant roots, water absorption by plant roots, various equations of hydraulic properties of porous media and various initial and boundary conditions, the possibility to provide the simulation of an artificial wetland with plants.

2. Methodology

2.1. Experimental site and Measuring TDS

To collect the information from the model, six artificial wetland systems, including three vertical subsurface flow systems and three horizontal subsurface flow systems were constructed at the sewage treatment plant located in Fakhb, Rasht. From the three systems that were constructed, one system was considered without plants and the other two systems contained Reed and Typha plants. The wetlands were filled with Gravel in diameter of 5 to 25 mm. To adapt Plants with the cultivation environment and wastewater quality, the plants were irrigated by wastewater about three months. After the three months, the main data collection was done by sampling and checking the performance of the systems. Collecting data was for 9 months. During experiment, the raw wastewater sample was entered into the wetland systems and after the hydraulic retention time (about one month in winter and one week in spring and summer), were sampled from the outlet of the wetlands and the parameter of total dissolved solids measured.

2.2. Calibration and Validation HYDRUS-2D

In this research, the HYDRUS-2D model was used to simulate the processes governing the movement of water and transport of solutes and its

absorption by plants. S-ship model was used to estimate water absorption by Reed and Typha plants. The effective parameters of water movement and transport of solutes, including saturated hydraulic conductivity, longitudinal and transverse dispersivity, and diffusion of the wetland bed, were estimated using the inverse solution method, respectively, using the output flow data and the total dissolved solids of the output wastewater. Statistical indices were used to evaluate the accuracy of the model in the simulation of the purification process in the wetland. The data of days 112, 125, 131, 140, 146 and 152 from the start of the experiment were used for calibration and the data of days 187, 208, 215 and 222 from the start of the experiment were used to validate the wetlands.

3. Results and discussion

Comparison of the saturated water conductivity value estimated by the HYDRUS-2D model with Sheykhan et al.'s research (2019) showed that the model was able to estimate the hydraulic properties of the bed properly. The longitudinal and transverse dispersivity coefficients in the horizontal wetland were found to be almost half of the vertical wetlands, which is in line with the lower saturated water conductivity and as a result, the lower velocity of the wastewater in the pores in these wetlands compared to the vertical wetland. Dispersion coefficient was a more important factor in solute transport than dispersivity coefficients. On average, in vertical wetlands, the model was able to estimate the amount of reduction of total dissolved solids with about 2% less than the values measured in wetlands under plant cultivation, while in the horizontal wetland, this amount was between 3 and 5 percent.

4. Conclusions

According to the results of statistical indices, the estimated values of the total dissolved solids of the artificial wetland system under Reed cultivation were more consistent with the measured values than other wetlands. The results showed that the model has a suitable ability to simulate the movement of solutes and total dissolved solids, which means that it can be used in the design process of treatment in the wetland.

5. References

Pálffy, T. G., Molle, P., Langergraber, G., Troesch S., Gourdon R., & Meyer, D. (2016). Simulation of constructed wetlands treating combined sewer overflow using HYDRUS/CW2D. *Ecological Engineering*, 87, 340-347. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.11.048>

6. Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

7. Acknowledgments

The authors would like to thank Guilan Water and Wastewater Company and University of Guilan for providing the facilities to carry out the lysimetric and laboratory experiments of this study.

Cite this article: Karimi, Z., & Navabian, M. (2024). Simulation of total dissolved solids removal from domestic wastewater in vertical and horizontal subsurface constructed wetland, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(3), 17-39. DOI: 10.22126/ATWE.2024.10688.1124

Publisher: Razi University

© The Author(s).





شبیه‌سازی حذف کل جامدات محلول از فاضلاب شهری در تالاب مصنوعی با جریان‌های

زیرسطحی عمودی و افقی

زهرا کریمی^۱، مریم نوابیان^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: karimi_tannaz@yahoo.com

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، و عضو وابسته پژوهشی گروه مهندسی آب و محیط زیست پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: Navabian@guilan.ac.ir

چکیده

افزایش روزافزون جمعیت و گسترش فعالیت‌های توسعه‌ای بدون توجه به مدیریت کمی و کیفی منابع آب در بیشتر کشورهای واقع در کمربند مناطق خشک منجر به تشدید بحران آب به‌ویژه در ایران شده است. فاضلاب یکی از انواع آب‌های نامتعارف محسوب می‌شود که در صورت حذف آلاینده‌ها و ناخالصی‌های آن، می‌تواند دوباره در چرخه مصرف قرار گیرد. تالاب‌های مصنوعی در ترکیب با گیاه‌پالایی به‌عنوان راهکار سبز قابلیت بهبود و استفاده مجدد از فاضلاب را فراهم می‌آورد. در این پژوهش، در راستای توسعه ابزارهای طراحی و مدیریت تالاب‌های مصنوعی، شبیه‌سازی عملکرد سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی عمودی و افقی تحت کشت دو گیاه نی و تیفا در تصفیه فاضلاب شهر رشت توسط مدل HYDRUS-2D بررسی شد. پس از ساخت تالاب‌های زیرسطحی عمودی و افقی، گیاهان نی و تیفا کشت و طی دوره آذر ۱۳۹۹ تا شهریور ۱۴۰۰، اقدام به نمونه‌برداری و اندازه‌گیری کل جامدات محلول از فاضلاب خام و تصفیه‌شده توسط تالاب‌ها شد. ارزیابی دقت مدل در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی با استفاده از شاخص‌های آماری انجام شد. مقادیر شاخص آماری ریشه میانگین مجذور خطای نرمال شده (NRMSE) در مرحله اعتبارسنجی در تالاب‌های عمودی بدون گیاه، تحت کشت نی و تحت کشت تیفا به ترتیب ۶/۵، ۹/۸ و ۱۴/۸ درصد و در تالاب‌های افقی به ترتیب ۱۴/۸، ۶/۴ و ۱۷ درصد به دست آمد که در مقایسه با طبقه‌بندی جاسینسون و همکاران نشان از دقت عالی (کمتر از ۱۰ درصد) و خوب (بین ۱۰ تا ۲۰ درصد) مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی کل جامدات محلول در تالاب‌های مصنوعی دارد. از این‌رو استفاده از مدل HYDRUS-2D برای برآورد کل جامدات محلول در تالاب مصنوعی توصیه می‌شود هرچند دقت شبیه‌سازی در تالاب عمودی بیشتر از تالاب افقی بود.

واژه‌های کلیدی: تالاب افقی و عمودی، تصفیه فاضلاب، تیفا، گیاه‌پالایی، نی

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۰ فروردین ۱۴۰۳ اصلاح: ۲۰ تیر ۱۴۰۳ پذیرش: ۰۶ مرداد ۱۴۰۳ چاپ الکترونیکی: ۰۱ مهر ۱۴۰۳

استناد: کریمی، زهرا، و نوابیان، مریم. (۱۴۰۳). شبیه‌سازی حذف کل جامدات محلول از فاضلاب شهری در تالاب مصنوعی با جریان‌های زیرسطحی عمودی و افقی،

فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۴(۳)، ۱۷-۳۹. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2024.10688.1124



مقدمه

رشد جمعیت و نیازهای بشری (مسکن، غذا و ...) از یک سو و تغییر الگوی نیازها با رشد اقتصادی و تغییر شیوه زندگی از دیگر سو، نیاز به منابع آب مناسب را افزایش داده است. پیش‌بینی‌های اخیر نیز حاکی از افزایش جمعیت به حدود ۹/۱ میلیارد نفر تا سال ۲۰۵۰ میلادی است. این به معنی این است که بخش کشاورزی بایستی نسبت به سال ۲۰۰۵ میلادی ۶۰ درصد محصول بیشتری را تولید نماید (الکساندراتوس و برانسمان، ۲۰۱۲). از این رو با توجه به نیاز به تولید غذای بیشتر، نیاز به مصرف آب نیز افزایش می‌یابد. تصفیه و استفاده مجدد از فاضلاب موجب کاهش میزان برداشت آب از منابع سطحی و زیرزمینی شده و می‌تواند بحران کمبود آب را کاهش دهد. در کنار کاهش کمیت منابع آب، انتشار پساب‌های صنعتی، کشاورزی و شهری نیز از عوامل دیگر تهدیدکننده منابع محدود آب در ایران و جهان محسوب می‌شود. تخلیه فاضلاب به محیط‌زیست منجر به آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی، تخریب اکولوژیکی و بروز بیماری‌های حاد و مزمن می‌شود (حسینی و قدسیان^۲، ۲۰۱۱). از این رو می‌بایست قبل از تخلیه فاضلاب به منابع آب، راهکارهایی برای حذف آلاینده‌ها و بهبود وضعیت کیفی آن اندیشید.

روش‌های متداول تصفیه فاضلاب محدودیت‌های اجرایی زیادی از جمله هزینه بالا، بهره‌برداری و نگهداری پیچیده و ... دارند، به همین دلیل امکان اجرای روش‌های متداول و با تکنولوژی بالا در همه‌جا وجود ندارد. درحالی‌که سامانه‌های طبیعی تصفیه فاضلاب از تکنولوژی پایین‌تر و نیاز کمتر به نیروی کار آموزش‌دیده برخوردار هستند و درعین‌حال کارایی بالایی دارند (اسپرلینگ^۳، ۱۹۹۶). از جمله انواع سامانه‌های طبیعی تصفیه فاضلاب می‌توان به سامانه طبیعی خاک (سامانه نفوذ موضعی^۴، سامانه با سرعت کند^۵، سامانه با سرعت تند^۶ و سامانه با جریان سطحی^۷)، سامانه‌های آبی (برکه‌های طبیعی^۸، برکه‌های هواده‌ای^۹ و سامانه‌های گیاهی آبی شناور^{۱۰})، گیاه‌پالایی و سامانه تالاب مصنوعی اشاره کرد (مارتین و مارتین^{۱۱}، ۲۰۰۹). از سامانه‌های طبیعی تصفیه فاضلاب می‌توان به‌عنوان روش‌های سبز (دوست‌دار محیط‌زیست) نیز یاد کرد. تالاب‌های مصنوعی^{۱۲} یکی از روش‌های پرکاربرد در زمینه تصفیه فاضلاب است. از جمله مزایای روش تالاب مصنوعی نسبت به سایر روش‌های تصفیه فاضلاب، می‌توان به اجرا و کاربری ساده، هزینه پایین ساخت، عدم تجمع حشرات و عدم تولید بوی نامطبوع اشاره نمود. تالاب عبارت است از پهنه خاکی که در تمام یا بخشی از سال مرطوب است (کادلز و والاس^{۱۳}، ۲۰۰۹) در کشورهای توسعه‌یافته برای تصفیه فاضلاب خانگی، رواناب‌های کشاورزی، فاضلاب صنایع، شیرابه محل دفن زباله، سیلاب و رواناب شهری، تصفیه پیشرفته پساب و آب‌های آلوده به نیترات و فسفات از تالاب‌های مصنوعی استفاده می‌شود. محیط‌زیست تالاب‌ها می‌تواند به‌عنوان منبع مصرف‌کننده یا تغییردهنده مواد مغذی و کربن عمل کند. در یک تالاب تعداد زیادی از فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی به‌طور هم‌زمان فعال هستند و بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند. تالاب‌های مصنوعی با در نظر گرفتن ویژگی‌هایی مانند نوع جریان هیدرولیکی، نوع بستر و نوع گیاه تقسیم‌بندی می‌شوند (ویمازال و کروپفلوا^{۱۴}، ۲۰۰۸). متداول‌ترین تقسیم‌بندی تالاب‌های مصنوعی بر اساس نوع جریان است که شامل جریان آزاد و زیرسطحی است (سعید و

¹ Alexandratos and Bruinsma

² Hosseini and Ghodsian

³ Sperling

⁴ Local Infiltration System

⁵ Slow-rate System

⁶ Rapid Infiltration System

⁷ Surface Flow System

⁸ Natural Lagoon

⁹ Aerated pond

¹⁰ Floating plant System

¹¹ Martin and Martin

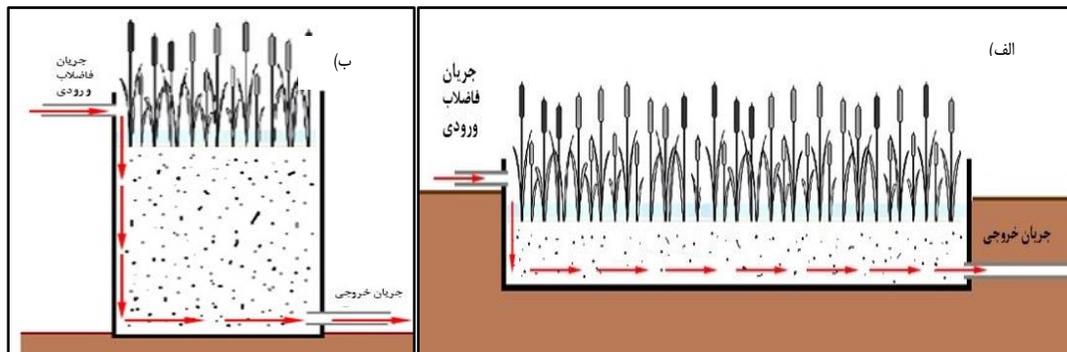
¹² Constructed Wetland

¹³ Kadlec and Wallace

¹⁴ Vymazal and Kropfelova

سان^۱، ۲۰۱۲). تالاب مصنوعی با جریان زیرسطحی عمودی توسط سیدل^۲ در سال ۱۹۶۷ طراحی شد (بخشوده^۳، ۲۰۲۰). در تالاب‌های مصنوعی با جریان زیرسطحی عمودی که در شکل (ب-۱) نشان داده شده است، تالاب به‌طور متناوب تغذیه می‌شود و این امر باعث می‌شود که زمانی که آب در بستر نفوذ کرده و بستر خالی است، اکسیژن فرصت بیشتری برای انتشار در بستر تالاب داشته باشد.

تکنولوژی تصفیه‌ی فاضلاب به کمک تالاب‌های مصنوعی با جریان زیرسطحی افقی در ابتدا در آلمان و بر اساس تحقیقات Seidel در دهه ۱۹۶۰ آغاز شد (سیدل^۴، ۱۹۶۱، سیدل، ۱۹۶۴، و سیدل، ۱۹۶۶). در تالاب مصنوعی با جریان زیرسطحی افقی که مطابق شکل (الف-۱) است، پساب از طریق لوله ورودی به سامانه تغذیه‌شده و به آرامی از درون محیط متخلخل عبور کرده تا به محل خروجی برسد. در این گذار، پساب با شبکه‌هایی از محیط‌های هوازی و بی‌هوازی برخورد می‌کند. محیط هوازی در لایه سطحی تالاب، نزدیک اتمسفر و در نزدیکی ریشه گیاهان به دلیل انتقال اکسیژن از ریزوم‌های گیاهان به محیط داخلی قرار دارد. به همین دلیل پساب هنگام عبور از منطقه هوازی، توسط فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی و تجزیه بیولوژیکی مورد تصفیه قرار می‌گیرد (اخروی و همکاران، ۱۳۹۴). این نوع سامانه‌های تالابی دارای توانایی بسیار بالایی برای حذف مواد آلی هستند. از جمله مزایای این نوع سامانه نیز می‌توان به تصفیه بالای ۹۰ درصد (همانند تصفیه پیشرفته در صورت طراحی دقیق)، عدم تولید بو و پشه، مدیریت بهتر و اطمینان‌پذیری بیشتر در سیال خروجی، عدم تولید لجن، بدون نیاز به انرژی به‌استثنای انرژی موردنیاز برای سستشوی بستر و تبخیر و نفوذ کم اشاره نمود. راندمان کم در حذف فسفر، گرفتگی بستر و نیاز به فضای زیاد از جمله معایب این سامانه است.



شکل ۱. شمایی از تالاب مصنوعی با جریان زیرسطحی افقی (الف) و عمودی (ب)

گیاه‌پالایی^۵ یک روش تصفیه‌ی بیولوژیک است که در آن با استفاده از گیاهان سبز شامل گونه‌های چوبی و علفی برای حذف آلاینده‌ها از آب‌و‌خاک کمک گرفته می‌شود. در این روش گیاه با جذب انتخابی آلاینده و تجمع آلاینده در بافت‌های خود موجب کاهش آن آلاینده در محیط خاک و ریشه می‌شود. این روش برای حذف مواد آلاینده از آب‌و‌خاک یا کاهش خطرات آلاینده‌های محیط‌زیست نظیر فلزات سنگین، عناصر کمیاب، ترکیبات آلی و مواد رادیواکتیو به‌کاربرده می‌شود. گیاه‌پالایی روشی ارزشمند، سازگار با محیط‌زیست و از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است. در این روش عوامل مختلفی مثل زمان ماند، غلظت آلاینده‌ها، فاکتورهای محیطی (اسیدیته، دما) و خصوصیات گیاه (گونه، سامانه ریشه و...)

¹ Saeed and Sun

² Seidel

³ Bakhshoodeha et al

⁴ Seidel

⁵ Phytoremediation

تأثیرگذار است (آناد و همکاران^۱، ۲۰۱۷). ترکیب روش‌های تصفیه گیاه‌پالایی و تالاب مصنوعی می‌تواند در بهبود عملکرد حذف آلاینده‌ها مؤثر باشد.

از آنجایی که تالاب مصنوعی را به جعبه سیاهی تشبیه می‌کنند که فرآیندهای آن قابل پیش‌بینی نیست، طی سه دهه‌ی اخیر استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی برای طراحی آن‌ها باهدف دستیابی به بالاترین راندمان حذف آلاینده‌ها رایج شد. مدل‌های شبیه‌ساز محدودیت مدل‌های فیزیکی در مقیاس آزمایشگاهی و واقعی را از جمله نیاز به زمان و صرف هزینه زیاد ندارند؛ بنابراین دستیابی به روند شبیه‌سازی به‌عنوان یک ابزار مناسب برای ارزیابی فرآیندهای مختلف تالاب‌های مصنوعی بخصوص در ترکیب با گیاه‌پالایی اهمیت زیادی دارد. مدل HYDRUS-2D یک مدل پیشرفته دویعدی در ارتباط با شبیه‌سازی حرکت آب و انتقال املاح و حرارت در محیط متخلخل اشباع و غیراشباع است که توسط سیمونک و همکاران (۱۹۹۹) در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا ارائه شده است. در این مدل از معادلات ریچاردز^۲ و انتقال-انتشار^۳ به ترتیب برای شبیه‌سازی حرکت آب و انتقال املاح استفاده شده است. همچنین قابلیت‌هایی مانند توزیع فضایی ریشه گیاه، جذب آب توسط ریشه گیاه، معادلات مختلف خصوصیات هیدرولیکی محیط متخلخل و شرایط متنوع مرزی و اولیه، امکان شبیه‌سازی انتقال املاح در حضور گیاه برای شرایط اشباع و غیراشباع را فراهم آورده است.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

اولین آزمایش‌ها و پژوهش‌های صورت گرفته مبنی بر احتمال تصفیه‌ی فاضلاب با گیاهان تالابی در اوایل سال ۱۹۵۰ در آلمان توسط سیدل انجام شد (سیدل^۴، ۱۹۵۵). حسین و اسکولز^۵ (۲۰۱۷) به‌منظور تصفیه فاضلاب یک کارخانه نساجی از تالاب مصنوعی با جریان زیرسطحی عمودی در انگلستان استفاده کردند. در این پژوهش از ۲۲ تالاب مصنوعی تحت کشت گیاه نی استفاده شد. عملکرد ثبت‌شده در این تالاب‌ها برای حذف اکسیژن موردنیاز شیمیایی بین ۵۰ تا ۹۰ درصد با توجه به غلظت اولیه ورودی، متفاوت بود. قلی‌پور و همکاران^۶ (۲۰۲۰)، در پژوهشی پژوهشی عملکرد یک سامانه تالاب مصنوعی با جریان زیرسطحی افقی را برای بازه زمانی چهار ماه موردبررسی قرار دادند. در این تحقیق عملکرد حذف تالاب مصنوعی برای پارامترهای نیاز بیولوژیکی اکسیژن، نیاز شیمیایی اکسیژن، کل جامدات معلق، نیتروژن کل و فسفر کل به ترتیب ۸۹/۹، ۸۵/۹، ۹۹/۶، ۹۰/۹ و ۸۷/۲ درصد به دست آمد.

در خلال سال‌های گذشته مدل‌هایی با پیچیدگی‌های مختلف برای توصیف فرآیند تصفیه در تالاب‌های مصنوعی توسعه پیدا کرده‌اند. هدف اصلی این مدل‌سازی‌ها درک بهتر از فرآیندهای بیولوژیکی و شیمیایی است که در تالاب‌ها اتفاق می‌افتد تا بتوان با استفاده از مدل‌سازی شرایط طراحی را به‌منظور حذف بیشتر آلاینده‌ها بهبود بخشید. از میان مدل‌های موجود، مدل HYDRUS-2D یک مدل پیشرفته در ارتباط با حرکت آب و انتقال املاح در محیط متخلخل و ناحیه‌ی توسعه ریشه است که قابلیت برآورد جذب املاح توسط گیاه را نیز دارد.

توسکانو و همکاران^۷ (۲۰۰۸)، به شبیه‌سازی حذف آلاینده‌ها در یک طرح آزمایشی سامانه‌ی تالاب مصنوعی زیرسطحی در ایتالیا پرداختند. بدین منظور از داده‌های هشت تالاب مصنوعی که گیاه نی در آن‌ها کشت شده بود، استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی جریان و انتقال املاح بیانگر

¹ Anand et al

² Richards

³ Advection–dispersion Equation

⁴ Seidel

⁵ Hussein and Schols

⁶ Gholipour et al

⁷ Toscano et al

این موضوع بود که برای یک شبیه‌سازی نزدیک به واقعیت باید پارامترهای هیدرولیکی را به‌طور صحیح و دقیق برای مدل تعریف نمود. نتایج نشان داد که مدل قادر است مقدار نیاز شیمیایی اکسیژن را نزدیک به مقدار اندازه‌گیری شده، تخمین بزند.

ریزو و همکاران^۱ (۲۰۱۴)، به شبیه‌سازی حذف نیاز شیمیایی اکسیژن و آمونیوم در سامانه تالاب مصنوعی افقی با استفاده از مدل HYDRUS-CWM در یک طرح آزمایشگاهی در پرتغال پرداختند. در این پژوهش شش تالاب مصنوعی افقی به دو گروه سه‌تایی A و B تقسیم شدند و هر کدام از گروه‌ها تحت کشت گیاه نی و پیژر مرداب بود. میزان درصد حذف مشاهداتی COD در تالاب گروه A و B به ترتیب برابر ۶۹ و ۶۶ درصد و میزان درصد حذف تخمینی مدل به ترتیب برای گروه A و B ۶۸ و ۶۹ درصد بود. مقدار درصد خطای میانگین نیز در گروه A و B به ترتیب ۲۲ و ۱۷/۵ درصد گزارش شد. مقدار درصد خطای میانگین آمونیوم برای گروه A و B به ترتیب ۳۷ و ۲۴/۳ درصد به دست آمد. آپایاد و همکاران^۲ (۲۰۱۷) گزارش کردند که تالاب‌های مصنوعی افقی توانستند به ترتیب ۶۱/۹ و ۷۲/۱۲ درصد کل جامدات محلول و معلق را تحت کشت تیفا و ۵۳/۴۷ و ۵۵/۴۶ درصد را تحت کشت نی حذف نمایند.

راعود و همکاران^۳ (۲۰۱۸)، با استفاده از مدل CW2D به شبیه‌سازی تصفیه فاضلاب یک مدرسه در کنیا در تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی پرداختند. بدین منظور تالابی به طول، عرض و عمق ۲، ۱ و ۰/۸۶ متر ساخته شد و تحت کشت گیاه علف وتیور^۴ قرار گرفت. مدت‌زمان نمونه‌برداری ۱۶ هفته بود. جنس بستر تالاب شنی و زمان ماند هیدرولیکی در آن ۴۸ ساعت بود. در این پژوهش دقت شبیه‌سازی پارامترهای نیاز بیولوژیکی اکسیژن، فسفر کل، آمونیوم، نیترات و نیتريت موردبررسی قرار گرفتند. ضریب همبستگی^۵ (r) به ترتیب برای پارامترهای ذکر شده برابر ۰/۹۵۶، ۰/۸۷۶، ۰/۹۳۵، ۰/۹۶۹ و ۰/۸۲۵ به دست آمد. نتایج ارزیابی آماری نشان داد که در مجموع مدل در پیش‌بینی مقادیر، عملکرد خوبی داشته است. راهی و همکاران^۶ (۲۰۲۰) با استفاده از مدل COMSOL، مقادیر نیاز شیمیایی اکسیژن و آمونیوم خروجی از تالاب مصنوعی حاوی گیاه را شبیه‌سازی و نتایج مدل را قابل قبول گزارش کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول و سولفات از پارامترهای کیفی بودند که در خروجی تالاب نسبت به فاضلاب خاک افزایش محسوس داشتند.

با توجه به بحران‌های آبی و نیاز به بازچرخانی^۷ ارزان، آسان و درعین‌حال با بازدهی بالا، همچنین رویکرد استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده برای کشاورزی بخصوص گیاهان حساس به شوری، هدف از این پژوهش ارزیابی شبیه‌سازی کل جامدات محلول در روند تصفیه فاضلاب در تالاب‌های مصنوعی عمودی و افقی در نظر گرفته شد.

روش پژوهش

ساخت مدل فیزیکی تالاب مصنوعی

برای جمع‌آوری اطلاعات موردنیاز در شبیه‌سازی شش سامانه تالاب مصنوعی شامل سه سامانه جریان زیرسطحی عمودی و سه سامانه جریان زیرسطحی افقی مطابق شکل (۲) در تصفیه‌خانه فاضلاب واقع در فخر رشت (عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۳۲ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۵۵ دقیقه شرقی) ساخته شد. دو سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی عمودی و افقی احداث شد که هر یک شامل سه تیمار گیاهی یعنی کاشت نی، کاشت تیفا و بدون کشت بودند. برای ساخت سامانه‌های تالاب مصنوعی زیرسطحی عمودی از مخازن پلی‌وینیل کلراید

¹ Rizzo et al

² Upadhyaya et al

³ Raude et al

⁴ Vetiver (Scientific name: *Chrysopogon zizanioides*)

⁵ Correlation Coefficient

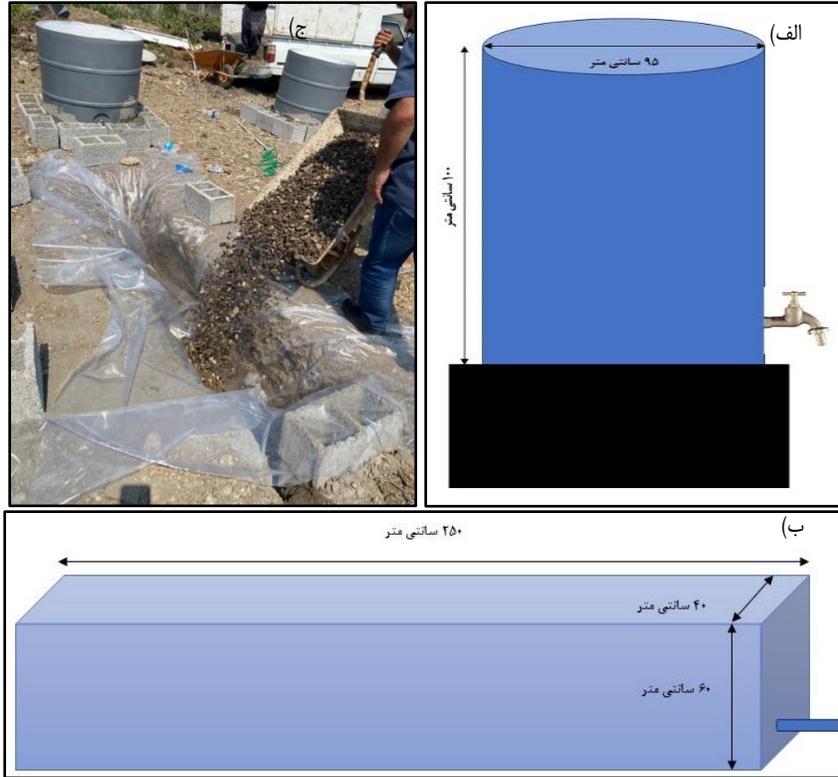
⁶ Rahi et al

⁷ Recycling

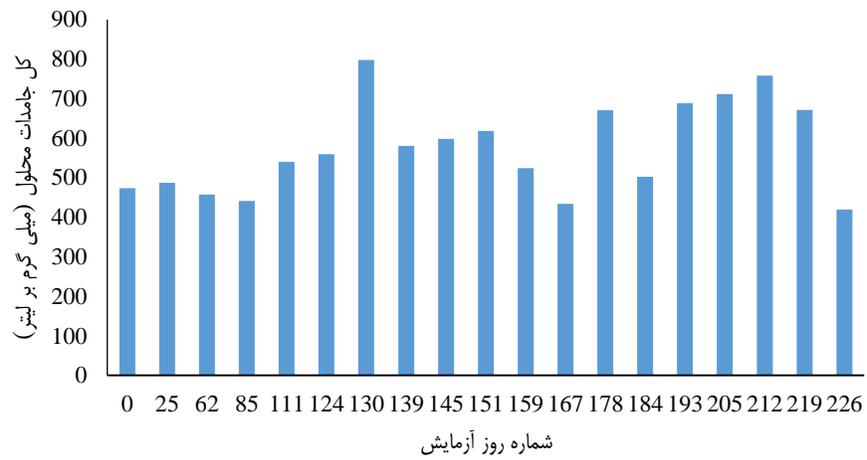
(PVC) با ارتفاع ۱۰۰ و قطر ۹۵ سانتی‌متر استفاده شد. برای ساخت سامانه‌های تالاب مصنوعی افقی، سه حوضچه به عرض ۴۰، طول ۲۵۰ و عمق ۶۰ سانتی‌متر و با شیب یک درصد در زمین تسطیح شده احداث شد. کف و دیواره‌های حوضچه‌های احداثی با یک‌لایه سیمان صاف و یکدست و سپس جهت اطمینان از جلوگیری از نشت فاضلاب، از یک‌لایه پلاستیک ضخیم برای آب‌بندی حوضچه‌ها استفاده شد. برای بستر تالاب از سنگ‌ریزه‌های مناسب موجود در بازار با قطر ۵ تا ۲۵ میلی‌متر استفاده شد. تالاب‌های افقی تا عمق ۴۰ سانتی‌متر و تالاب‌های عمودی تا عمق ۶۵ سانتی‌متر از سنگ‌ریزه پر شدند (بخشی از تالاب‌ها برای اعمال ارتفاع فاضلاب روی بستر و سرریز نشدن در زمان بارندگی خالی نگه‌داشته شد). بعد از بسترسازی مناسب تالاب‌ها، در مرحله‌ی کاشت گیاه برای اطمینان از سازگاری گیاهان با فاضلاب تصفیه‌خانه از گیاهان نی و تیقای خودرو موجود در محوطه تصفیه‌خانه استفاده شد. برای انتخاب گیاه سعی شد از گیاهانی استفاده شود که از نظر ابعاد و گستردگی ریشه در شرایط یکسانی قرار داشته باشند. در ازای حدود ۴۰۰ تا ۴۵۰ سانتی‌متر مربع از سطح، یک بوته در تالاب‌ها کاشته شد (۱۶ بوته در تالاب‌های عمودی و ۲۰ بوته در تالاب‌های افقی). در مهر ماه گیاهان به تالاب‌ها منتقل و برای سازگاری گیاهان با محیط کشت و فاضلاب و همچنین ترمیم آسیب رسیده به ریشه گیاهان در زمان انتقال، مدت‌زمان سه ماه بعد از کشت به گیاهان فرصت داده شد. در این بازه زمانی فاضلاب تصفیه‌شده به‌صورت دوره‌ای (دو هفته یک‌بار) از تالاب‌ها تخلیه و مجدداً فاضلاب خام تا ایجاد شرایط غرقاب به عمق ۱۰ سانتی‌متر به سامانه‌ها تزریق شد. بعد از طی مدت‌زمان سه ماه، داده‌برداری اصلی با نمونه‌برداری و بررسی عملکرد سامانه‌ها انجام شد. در ۲۵ آذرماه سال ۱۳۹۹ به مدت ۹ ماه، نمونه فاضلاب خام به داخل سامانه‌های تالاب وارد و پس از گذشت زمان‌مانند هیدرولیکی (حدود یک ماه در زمستان و یک هفته در فصل بهار و تابستان)، از خروجی تالاب‌ها نمونه‌برداری و پارامتر کل جامدات محلول^۱ نمونه‌ها با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج^۲ با دقت یک‌صدم میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شد. مقادیر کل جامدات محلول فاضلاب خام تصفیه‌خانه در شکل (۳) نشان داده‌شده است. بر اساس نتایج، بیشترین و کمترین مقدار کل جامدات محلول به ترتیب در اواخر فصل بهار و زمستان روی داده است.

^۱ Total Dissolved Solids (TDS)

^۲ Multi Conductivity Meter (Jenway- England)



شکل ۲. شمایی از تالاب مصنوعی با جریان عمودی (الف) و افقی (ب) ساخته‌شده در پژوهش و نحوه آب‌بندی تالاب افقی (ج)



شکل ۳. مقادیر کل جامدات محلول فاضلاب خام در طول دوره آزمایش

واسنجی^۱ و اعتبارسنجی^۲ مدل HYDRUS-2D

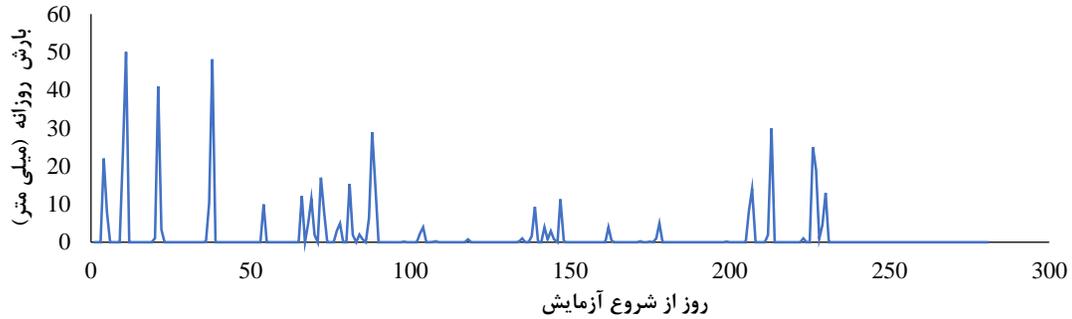
با توجه به نیاز مدل HYDRUS-2D به اطلاعات هواشناسی و مقادیر تبخیر-تعرق گیاه نی و تیفا، پارامترهای دمای کمینه، دمای بیشینه، درصد رطوبت، ساعات آفتابی، سرعت باد و بارش روزانه از ایستگاه سینوپتیک فرودگاه بین‌المللی سردار جنگل شهر رشت (کد ۴۰۷۱۹) دریافت شد. در جدول (۱) میانگین ماهانه داده‌های هواشناسی و در شکل (۴) میزان بارش روزانه در طول دوره آزمایش آورده شده است. با توجه به مقادیر جدول (۱)، بیشترین دما در مردادماه روی داده است اما بیشترین دمای میانگین ماهانه متعلق به تیر ماه بود، بنابراین انتظار می‌رود در این ماه‌ها فعالیت گیاه بیشتر باشد و تأثیر بیشتری بر جذب املاح توسط گیاه بگذارد. همان‌طور که در شکل (۴) مشخص است بیشترین میزان بارش روزانه در فصل زمستان بود و همچنین مقادیر قابل توجه بارش در اوایل فصل بهار و اواخر تابستان روی داد که می‌تواند بر غلظت فاضلاب و تبخیر از سطح تالاب تأثیرگذار باشد.

جدول ۱. میانگین ماهانه داده‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه در دوره آزمایش

سال	ماه	بارش (میلی‌متر)	دمای بیشینه (درجه سلسیوس)	دمای کمینه (درجه سلسیوس)	دمای میانگین (درجه سلسیوس)
۱۳۹۹	آذر	۲۴۱/۲	۱۳/۴	۲/۶	۹
۱۳۹۹	دی	۱۲۱/۷	۲۵/۴	-۱	۸
۱۳۹۹	بهمن	۸۲/۶۲	۲۷/۲	-۱/۸	۹
۱۳۹۹	اسفند	۱۲۱/۷۴	۱۹/۲	۰/۲	۷/۵
۱۴۰۰	فروردین	۷/۷۴	۳۴	۶	۱۴/۴
۱۴۰۰	اردیبهشت	۳۲/۲۶	۳۰/۸	۱۱/۸	۱۸/۷
۱۴۰۰	خرداد	۱۰۹/۱	۳۲/۲	۱۷/۲	۲۴/۳
۱۴۰۰	تیر	۴۲/۵۴	۳۵/۲	۲۰/۶	۲۷/۴
۱۴۰۰	مرداد	۱۷۴/۸۶	۳۶	۱۷/۴	۲۵/۹
۱۴۰۰	شهریور	۹۸/۹	۳۱	۱۸	۲۳/۵

¹ Calibration

² Validation

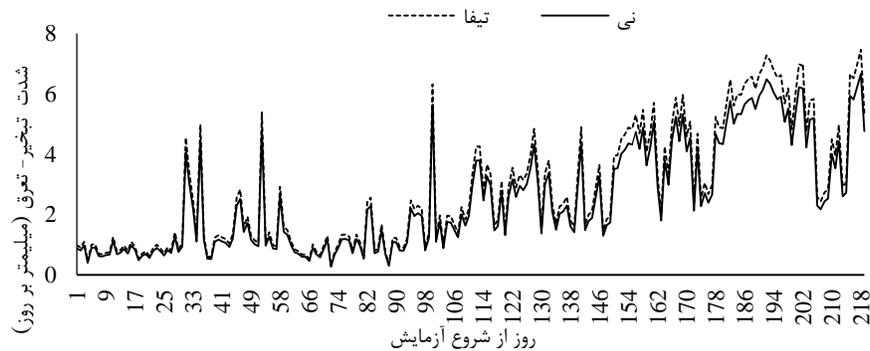


شکل ۴. بارش روزانه رخ داده در مدت انجام آزمایش

برای محاسبه تبخیر-تعرق واقعی گیاهان نی و تیفا، تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از رابطه پنمن-مانتیث و بر اساس اطلاعات هواشناسی طول دوره رشد محاسبه و در ضرایب گیاهی نی و تیفا ضرب شد (رابطه ۱). ضرایب گیاهی نی به میزان ۱، ۱/۲ و ۱ برای گیاه تیفا به میزان ۱/۱، ۱/۴ و ۱/۱ به ترتیب برای مراحل اولیه، میانی و انتهایی دوره رشد گیاه در نظر گرفته شدند (آلن و همکاران^۱، ۱۹۹۸). شکل (۵) تبخیر-تعرق گیاه نی و تیفا را طی دوره رشد نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است مقدار تبخیر-تعرق گیاه تیفا از نی بیشتر است.

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (1)$$

که در آن ET_c ، ET_0 و K_c به ترتیب تبخیر-تعرق استاندارد گیاه (LT^{-1})، تبخیر-تعرق گیاه مرجع (LT^{-1}) و ضریب گیاهی هستند.



شکل ۵. میزان شدت تبخیر-تعرق گیاه نی و تیفا در مدت انجام آزمایش

در این پژوهش از مدل S-Shape مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی جذب آب توسط گیاه استفاده شد. در این مدل پارامتر P_{50} (بار آبی در زمانی که ۵۰ درصد جذب آب کاهش یابد) به روش سعی و خطا در مرحله واسنجی و پارامتر P_3 و P_w (به ترتیب بیانگر توان معادله عکس‌العمل جذب آب توسط ریشه در شرایط تنش آبی و بار آبی در نقطه پژمردگی گیاه که در کمتر از آن تعرق متوقف می‌شود) بر اساس پیشنهاد مدل HYDRUS-2D برابر با ۳ و 1×10^{15} - سانتی‌متر انتخاب شدند. در شبیه‌سازی تالاب‌های حاوی گیاه، تفاوت در لحاظ نمودن اثر حضور گیاه بر جذب آب و املاح است. از آنجاکه شرایط فیزیکی و هیدرولیکی تالاب مصنوعی حاوی نی و تیفا با تالاب مصنوعی

¹ Allen et al

شاهد (بدون گیاه) یکسان بود، از ضرایب بهینه شده در مرحله واسنجی تالاب شاهد استفاده شد. بنابراین برای تعیین پارامترهای جذب آب توسط ریشه گیاهان، در مرحله واسنجی تالاب های عمودی، با استفاده از داده های این دو تالاب و به روش سعی و خطا و مقایسه مقدار تخمینی و مشاهداتی کل جامدات محلول، پارامتر جذب آب توسط ریشه (P₅₀ در مدل جذب آب S-Shape) برای دو گیاه نی و تیفا، ۵۰- سانتی متر برآورد شد. به همین ترتیب در تالاب افقی حاوی گیاه نی و تیفا، پارامتر جذب آب توسط ریشه (P₅₀)، ۳۰- سانتی متر به دست آمد. اطلاعات توزیع ریشه شامل حداکثر عمق توسعه ریشه و عمق حداکثر تمرکز ریشه^۱ برای گیاه نی به ترتیب ۶۵ و ۳۵ سانتی متر در تالاب عمودی و به ترتیب ۴۰ و ۳۵ سانتی متر در تالاب افقی و برای گیاه تیفا به ترتیب ۲۵ و ۱۵ سانتی متر (لیپمن^۲، ۲۰۲۳) در نظر گرفته شدند. همچنین غلظت کل جامدات محلول قابل جذب توسط گیاهان نی و تیفا به ترتیب ۰/۰۴۵ و ۰/۰۳۳ میلی گرم بر سانتی متر مکعب لحاظ شدند (چن و همکاران^۳، ۲۰۱۵).

محیط مورد مطالعه شامل ابعاد و لایه بندی برای مدل تعریف و سپس مش بندی آن انجام شد. در این پژوهش با توجه به استفاده از سنگریزه در تالابها، یک لایه مواد متخلخل برای مدل تعریف شد. پارامترهای ضروری شامل زیر بخش های فرآیندهای اصلی، حل معکوس، اطلاعات زمانی، اطلاعات خروجی، مدل هیدرولیکی خاک و پارامترهای مربوط به آن، انتقال املاح، مدل های جذب آب و املاح توسط ریشه و اطلاعات مربوط به آن، دریافت داده های شرایط مرزی و داده های حل عددی معکوس در مدل HYDRUS-2D اعمال شد. در این آزمایش فرآیندهای حرکت آب، انتقال املاح و حل معکوس فعال شدند. برای شبیه سازی رفتار هیدرولیکی محیط متخلخل از مدل ون گنوختن^۴ (رابطه ۲، ۳، ۴ و ۵) برای منحنی رطوبتی خاک با در نظر گرفتن نقطه ورود هوا به خاک در مکش ۲- سانتی متر^۵ استفاده شد. در شبیه سازی فرآیند حرکت فاضلاب در تالاب به دلیل اهمیت پارامتر هدایت آبی اشباع (K_s) به روش حل معکوس موجود در مدل HYDRUS و سایر پارامترهای L، Alpha.n و θ_r که به ترتیب پارامترهای شکل مدل ون گنوختن و رطوبت باقی مانده در محیط متخلخل هستند، با استفاده از مدل Rosetta موجود در مدل HYDRUS و بر اساس محیط^۶ شنی به دست آمدند.

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |ah|]^n]^m} \quad h < 0 \quad (2)$$

$$\theta(h) = \theta_s \quad h \geq 0 \quad (3)$$

$$K(h) = K_s S_e^L [1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})]^m \quad (4)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad n > 1 \quad (5)$$

که در آن ها h مکش (L)، رطوبت اشباع، θ_r رطوبت باقیمانده، n توزیع اندازه منافذ، α معکوس مقدار هوای ورودی (L⁻¹)، S_e رطوبت مؤثر، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع (L.T-1) و L شاخص شکل منحنی رطوبتی (L) هستند.

برای شبیه سازی جریان فاضلاب در تالاب، شرط مرزی جانبی به صورت بدون جریان، شرط مرزی بالادست به صورت تماس جریان با اتمسفر و مرز پایین دست به صورت بدون جریان (غیر از گره هایی که نشان دهنده خروج فاضلاب هستند) در نظر گرفته شدند. در محل خروج فاضلاب از تالابها شرط مرزی به صورت فلاکس جریان انتخاب شد. شرط اولیه شبیه سازی جریان فاضلاب نیز به صورت بار آبی در نظر گرفته شد.

¹ Depth of Maximum Intensity

² Lippmann et al

³ Chen et al

⁴ Van Genuchten

⁵ Air Entry Value of -2 cm

⁶ Material

اطلاعات مربوط به پارامترهای انتقال املاح شامل جرم مخصوص ظاهری، ضرایب انتشار پذیری، ضریب پخشیدگی مولکولی در آب، توانایی ریشه در جذب املاح و ضرایب تبدیل و زوال^۱ درجه صفر و یک هستند. جرم مخصوص ظاهری با محاسبه تخلخل محیط بر اساس حجم فاضلاب ورودی به تالابها و حجم سنگریزه و با لحاظ نمودن جرم مخصوص حقیقی ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب، ۲/۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب محاسبه (رابطه ۶) و در مدل به کار گرفته شد. از آنجاکه کل جامدات محلول مورد شبیه‌سازی قرار گرفت و تبدیل و تخریب بر روی کل جامدات محلول روی نمی‌دهد، ضرایب این پارامترها صفر اعمال شدند. بنابراین واسنجی مدل در بخش انتقال املاح و پارامترهای ضریب پخشیدگی مولکولی (DIFW) و ضرایب انتشار پذیری طولی و عرضی (DISPL و DISPT) به‌عنوان ضریب واسنجی انتخاب و به روش حل معکوس و مقادیر اندازه‌گیری شده کل جامدات محلول تعیین شدند. در فصل گرم که آزو^۲ بر روی سطح فاضلاب در تالابها مشاهده شد، ضریب جذب درجه یک (Sink water1) برای لحاظ نمودن میزان جذب املاح توسط آزولا فعال شد که طی فرآیند حل معکوس به دست آمد.

$$\frac{V_f}{V_t} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (6)$$

که در آن V_t ، V_f ، ρ_b و ρ_s به ترتیب حجم خلل و فرج (L^3)، حجم کل (L^3)، جرم مخصوص ظاهری (ML^{-3}) و جرم مخصوص حقیقی (ML^{-3}) هستند. برای محاسبه جرم مخصوص ظاهری، V_f برابر با حجم فاضلاب لازم برای پر شدن بستر متخلخل تالاب و V_t بر اساس ابعاد تالاب در نظر گرفته شدند.

برای ارزیابی دقت مدل در شبیه‌سازی فرآیند تصفیه در تالاب، داده‌های آزمایش به دو بخش تقسیم شدند (۶۰ درصد داده‌ها برای واسنجی و ۴۰ درصد آن‌ها برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شد). داده‌های روزهای ۱۱۲، ۱۲۵، ۱۳۱، ۱۴۰، ۱۴۶ و ۱۵۲ از شروع آزمایش برای واسنجی و داده‌های روزهای ۱۸۷، ۲۰۸، ۲۱۵ و ۲۲۲ از شروع آزمایش برای اعتبارسنجی تالابها استفاده شدند. به‌منظور ارزیابی دقت مدل HYDRUS-2D، از تطبیق مقادیر مشاهده‌ای با مقادیر تخمینی مدل، پارامترهای ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مجذور خطا (RMSE)، ریشه میانگین مجذور خطای نرمال شده (nRMSE)، شاخص توافق ویلموت (D-index) و میانگین خطای مطلق (MAE) به دست آمدند. روابط (۷ تا ۱۱) نحوه محاسبه هر کدام از آماره‌ها را نشان می‌دهند.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

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

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (9)$$

$$D\text{-index} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (10)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (11)$$

که در این روابط P_i مقادیر تخمین زده‌شده، O_i مقادیر مشاهده‌ای، \bar{O} میانگین مقادیر مشاهده‌ای و n تعداد کل مشاهدات است. آماره R^2 نسبت پراکندگی را بین مقادیر تخمین زده‌شده و مشاهداتی نشان می‌دهد. به‌منظور بیان میزان تفاوت بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی از RMSE استفاده می‌شود که هر چه این شاخص کم‌تر باشد به معنی شبیه‌سازی بهتر مدل است. جامیسون و همکاران^۳ (۱۹۹۱)، nRMSE را

¹ Decay

² Azolla

³ Jaemison et al

برای برآورد خطا پیشنهاد دادند که زمانی که این پارامتر در محدوده کمتر از ۱۰، ۱۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۳۰ و بیش از ۳۰ درصد باشد به ترتیب نشان‌دهنده کار آبی عالی، بسیار خوب، متوسط و ضعیف مدل در شبیه‌سازی است. این محدوده‌ها در بررسی‌هایی که بنایان و هوگنboom^۱ (۲۰۰۸) انجام دادند نیز مورد تأیید قرار گرفت. شاخص آماری توافق ویلموت (D-index) بر اساس اندازه پراکندگی بین داده‌ها است. محدوده این شاخص بین صفر و یک است که مقدار یک بیانگر بهترین برازش و مقدار صفر نشان‌دهنده عدم تطابق بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی است (ویلموت^۲، ۱۹۸۲). MAE میانگین مطلق خطا را نشان می‌دهد که هر چه مقدار این آماره به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است.

یافته‌ها

سامانه تالاب مصنوعی عمودی

از آنجاکه در تالاب شاهد، فرآیند جذب آب و املاح توسط گیاه وجود نداشت، از داده‌های آن برای تعیین پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح به روش حل معکوس استفاده شد. جدول (۲) مقادیر ضریب واسنجی را نشان می‌دهد. مقایسه مقدار هدایت آبی اشباع (۳/۳۶۵۸۲۳ سانتی‌متر بر روز) با هدایت آبی اشباع گزارش شده توسط پلفی و همکاران^۳ (۲۰۱۴)، توسکانو و همکاران^۴ (۲۰۰۹)، شیخیان و همکاران (۱۳۹۸) و پلفی و همکاران (۲۰۱۶) که به ترتیب ۱۷۲۸۰۰ سانتی‌متر بر روز (قطر ۱/۳-۰/۳ میلی‌متر)، ۱۲۰۰۰۰۰ سانتی‌متر بر روز (قطر ۳۲-۱۶ میلی‌متر)، ۳۰۳۹۵۵/۲ تا ۴۲۳۹۶۴/۸ سانتی‌متر بر روز (قطر ۵/۵ تا ۱۵/۵ میلی‌متر) و ۲۴۹۶۰۰ سانتی‌متر بر روز (قطر ۲/۸ میلی‌متر) نشان داد که مدل توانسته است، مقادیر منطقی برای هدایت آبی اشباع در محیط متخلخل مورد استفاده در تالاب تعیین نماید. تفاوت هدایت آبی گزارش شده در پژوهش‌های ذکر شده با این پژوهش می‌تواند به دلیل قطر متفاوت سنگریزه‌های مورد استفاده باشد. توسکانو و همکاران (۲۰۰۹) مقادیر ضریب انتشار پذیری طولی و عرضی را برای قطر سنگریزه ۰/۰۶ تا ۴ میلی‌متر به ترتیب ۵۰ و ۱۵ سانتی‌متر گزارش کردند که بزرگ‌تر بودن مقدار ضرایب انتشار پذیری در این پژوهش (به ترتیب ۱۱۰/۲ و ۲۸/۷۶ سانتی‌متر) را می‌توان به قطر بزرگ‌تر سنگریزه و در نتیجه اختلاف منافذ خلل و فرج نسبت داد. به دلیل ساکن بودن فاضلاب در تالاب در طول دوره آزمایش، ضریب پخشیدگی عامل مهم‌تری در انتقال املاح به سمت پایین تالاب بود که مقدار بزرگ‌تر به دست آمده در این پژوهش (۳/۸۹ سانتی‌متر مربع بر روز) در مقایسه با گزارش پلفی و همکاران (۲۰۱۴) که این پارامتر را ۱/۷۳ سانتی‌متر مربع بر روز اعلام کرده بودند، این فرضیه را تأیید می‌نماید.

جدول ۲. نتایج بهینه یابی پارامترهای هیدرولیکی و انتقال و جذب املاح توسط ریشه گیاه آزولا در تالاب عمودی

تالاب	هدایت آبی اشباع (cm/day)	ضریب انتشار پذیری طولی (cm)	ضریب انتشار پذیری عرضی (cm)	ضریب پخشیدگی (cm ² /day)	جذب املاح توسط آزولا (mg/cm ³ day)
بدون گیاه	۳۶۵۸۲۳/۳	۱۱۰/۲	۲۸/۷۶۲	۳/۸۹	۰/۰۳۷
تیفا	۳۶۵۸۲۳/۳	۱۱۰/۲	۲۸/۷۶۲	۳/۸۹	۰/۰۳۰
نی	۳۶۵۸۲۳/۳	۱۱۰/۲	۲۸/۷۶۲	۳/۸۹	۰/۰۱۷

¹ Bennayan and Hoogenboom

² Willmott

³ Palfy et al

⁴ Toscano et al

مقادیر شاخص‌های آماری ارزیابی مدل در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی در جدول (۳) آورده شده است. نتایج نشان داد که دقت مدل در تالاب‌های شاهد و حاوی گیاه نی، با توجه به ضریب تعیین بالا، مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین مطلق خطای نسبتاً کم و همچنین میانگین مربعات خطای نرمال شده عالی بر اساس طبقه‌بندی جامیسون و همکاران (۱۹۹۱)، نتایج مدل از اعتبار خوبی برخوردار است؛ اما نتایج شاخص‌های آماری در تالاب حاوی گیاه تیفا، با توجه به ضریب تعیین بالا، میانگین مطلق خطای نسبتاً کم، مجذور میانگین مربعات خطا و همچنین میانگین مربعات خطای نرمال شده بسیار خوب با توجه به طبقه‌بندی جامیسون و همکاران (۱۹۹۱)، قابل قبول برآورد می‌شود که دقت کمتری نسبت به دو تالاب دیگر داشت.

جدول ۳. شاخص‌های آماری و ارزیابی مدل در واسنجی و اعتبارسنجی برای کل جامدات محلول در تالاب‌های عمودی

تالاب	D-index (-)	MAE (mg/cm ³)	RMSE (mg/cm ³)	nRMSE (%)	R ² (-)
بدون گیاه	۰/۷۲۷	۰/۰۲۹	۰/۰۳۸	۸/۹۷	۰/۹۹۳
مرحله اعتبارسنجی	۰/۸۷۶	۰/۰۲۷	۰/۰۳۴	۶/۵۵۱	۰/۹۹۶
گیاه نی	۰/۸۳۲	۰/۰۰۷	۰/۰۱۱	۲/۱۳۸	۰/۹۹۹
مرحله اعتبارسنجی	۰/۵۲۵	۰/۰۵۶	۰/۰۶	۹/۸۷	۰/۹۹۱
گیاه تیفا	۰/۹۸۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۸	۱/۵۸۲	۰/۹۹۹
مرحله اعتبارسنجی	۰/۷۲۵	۰/۰۶۹	۰/۰۸۲	۱۴/۸۳	۰/۹۸۰

سامانه تالاب مصنوعی افقی

جدول (۴) مقادیر ضرایب واسنجی را در تالاب افقی شاهد نشان می‌دهد. مقادیر به دست آمده برای هدایت آبی اشباع در تالاب عمودی و افقی نشان می‌دهد مدل توانسته است برآورد خوبی از رفتار هیدرولیکی و جریان فاضلاب در تالاب را شبیه‌سازی نماید. تفاوت مشاهده شده بین هدایت آبی اشباع در دو تالاب، به دلیل تفاوت خلل و فرج بستر در جهات افقی و عمودی می‌تواند باشد. ضرایب انتشار پذیری طولی و عرضی در تالاب افقی تقریباً نصف تالاب عمودی به دست آمد که در راستای کمتر به دست آمدن هدایت آبی اشباع و در نتیجه سرعت کمتر فاضلاب در خلل و فرج در این تالاب‌ها نسبت به تالاب عمودی است؛ اما همچنان مقادیر ضریب انتشار پذیری طولی و عرضی در مقاله توسکانو و همکاران در دامنه (۱۰ تا ۵۰ سانتی‌متر) بود.

جدول ۴. نتایج بهینه یابی پارامترهای واسنجی هیدرولیکی، انتقال املاح و جذب املاح توسط ریشه گیاه آزولا در تالاب افقی

تالاب	هدایت آبی اشباع (cm/day)	ضریب انتشار پذیری طولی (cm)	ضریب انتشار پذیری عرضی (cm)	پخشیدگی (cm ² /day)	جذب املاح توسط آزولا (mg/cm ³ day)
بدون گیاه	۳۵۴۹۰۰	۵۵	۱۴	۳/۸۹	۰/۰۳۰۰۷۷
تیفا	۳۵۴۹۰۰	۵۵	۱۴	۳/۸۹	۰/۰۳۳۴۵۰
نی	۳۵۴۹۰۰	۵۵	۱۴	۳/۸۹	۰/۰۳۱۲۰۰

مقادیر شاخص‌های آماری ارزیابی مدل در تالاب افقی در جدول (۵) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که به شبیه‌سازی مدل در هر دو حالت بدون گیاه و با گیاهان نی و تیفا با توجه ضریب تعیین بالا، میانگین مطلق خطای نسبتاً کم، مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین

مربعات خطای نرمال شده عالی و یا بسیار خوب بر طبق دسته‌بندی جامیسون و همکاران (۱۹۹۱) می‌توان اعتماد نمود. اگرچه دقت مدل در شبیه‌سازی تالاب افقی تحت کشت نی از دو تالاب دیگر بهتر به دست آمد.

جدول ۵. نتایج شاخص‌های آماری ارزیابی مدل در واسنجی و اعتبارسنجی کل جامدات محلول در تالاب‌های افقی

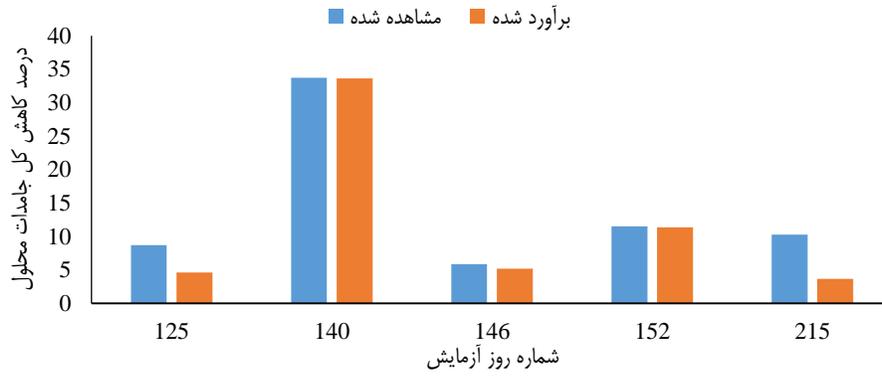
تالاب	D-index (-)	MAE (mg/cm3)	RMSE (mg/cm3)	nRMSE (%)	R2 (-)
بدون گیاه	۰/۹۰۹	۰/۰۲	۰/۰۲۴	۸/۰۷۹	۰/۹۹۴
مرحله واسنجی	۰/۷۲۵	۰/۰۶۹	۰/۰۸۲	۱۴/۸۳۱	۰/۹۹۰
گیاه نی	۰/۷۵۶	۰/۰۳۷	۰/۰۴۰	۹/۷۹۵	۰/۹۹۱
مرحله اعتبارسنجی	۰/۷۳۰	۰/۰۲۹	۰/۰۳۴	۶/۴۲۷	۰/۹۹۷
گیاه تیفا	۰/۸۷۸	۰/۰۳۶	۰/۰۴۰	۹/۶۴۷	۰/۹۹۴
مرحله اعتبارسنجی	۰/۶۸۷	۰/۰۷۷	۰/۰۹۱	۱۷/۰۱	۰/۹۷۲

شبیه‌سازی درصد کاهش کل جامدات محلول در تالاب‌های عمودی و افقی

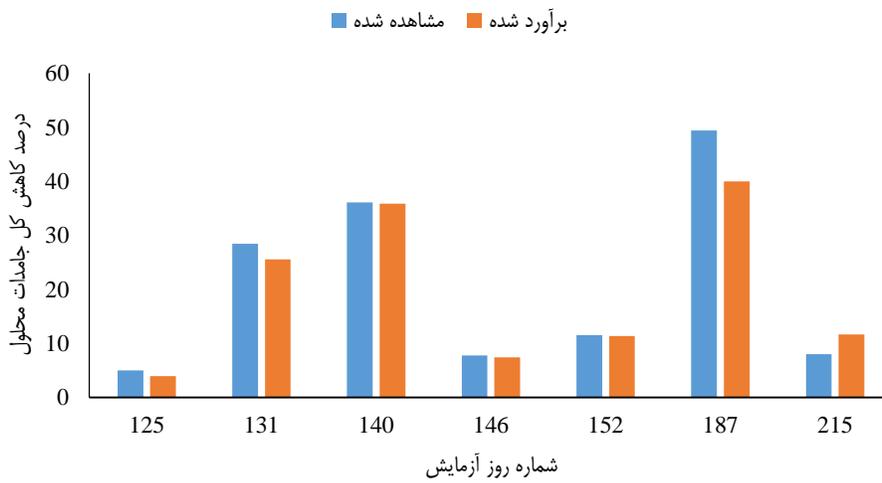
پس از اعتبارسنجی مدل، درصد کاهش کل جامدات محلول در تالاب‌های افقی و عمودی نسبت به کل جامدات محلول فاضلاب ورودی به تالاب در روزهای نمونه‌برداری برآورد و با مقادیر محاسبه‌شده بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه شدند. شکل‌های (۶) تا (۸) درصد کاهش کل جامدات محلول را در تالاب‌های عمودی به ترتیب حاوی گیاه نی، گیاه تیفا و بدون گیاه نشان می‌دهند. همچنین در جدول (۶) به‌طور میانگین درصد کاهش کل جامدات محلول در تالاب عمودی و افقی ارائه شده است. نتایج نشان داد که به‌طور میانگین مدل درصد کاهش کل جامدات محلول را ۲ تا ۳ درصد کمتر نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده در تالاب‌های افقی یا عمودی دارای گیاه برآورد نمود که دقت قابل قبولی است. این در حالی است که میان مقادیر برآورد و اندازه‌گیری شده میانگین درصد کاهش کل جامدات محلول در تالاب بدون گیاه، مشابهت بیشتری دیده شد. روند برآورد درصد کاهش کل جامدات محلول در تالاب‌های دارای گیاه نشان می‌دهد که دقت برآورد در اواسط دوره (اواسط اردیبهشت تا اواسط خردادماه) بیشتر از ابتدا (فروردین‌ماه) و انتهای دوره (مردادماه) بود که می‌تواند ناشی از وضعیت گیاه در شروع فصل گرما در فروردین و یا افزایش سایه‌اندازی گیاه و تأثیر آن بر برآورد تبخیر و تعرق در مردادماه باشد.

جدول ۶- مقادیر میانگین درصد کاهش کل جامدات محلول مشاهده و برآورد شده توسط مدل HYDRUS-2D

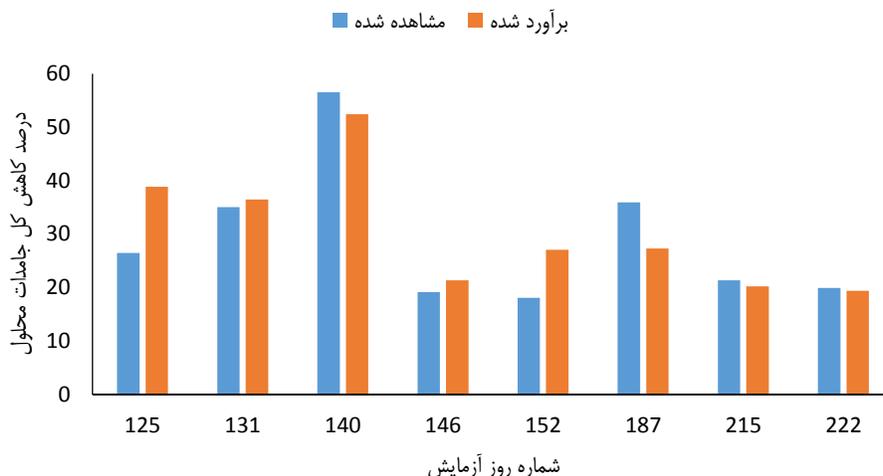
تالاب	درصد کاهش	گیاه نی	گیاه تیفا	بدون گیاه
عمودی	بر اساس مقادیر مشاهده‌شده	۱۴/۰۲	۲۰/۳۴	۲۴/۷۱
	بر اساس مقادیر برآورد شده مدل	۱۱/۷	۱۸/۳۴	۲۵/۸۷
افقی	بر اساس مقادیر مشاهده‌شده	۱۵/۴۵	۱۹/۴۹	۱۴/۱۸
	بر اساس مقادیر برآورد شده مدل	۱۸/۵۲	۲۵/۱۷	۱۹/۰۵



شکل ۶- مقایسه درصد کاهش در مقادیر مشاهده و برآورد شده کل جامدات محلول در تالاب عمودی حاوی گیاه نی

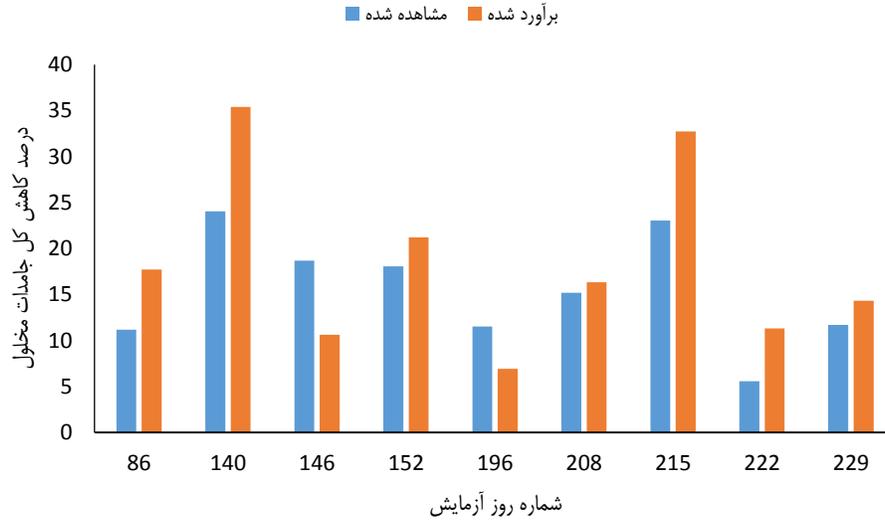


شکل ۷. مقایسه درصد کاهش مشاهده و برآورد شده کل جامدات محلول در تالاب عمودی حاوی گیاه تیفا

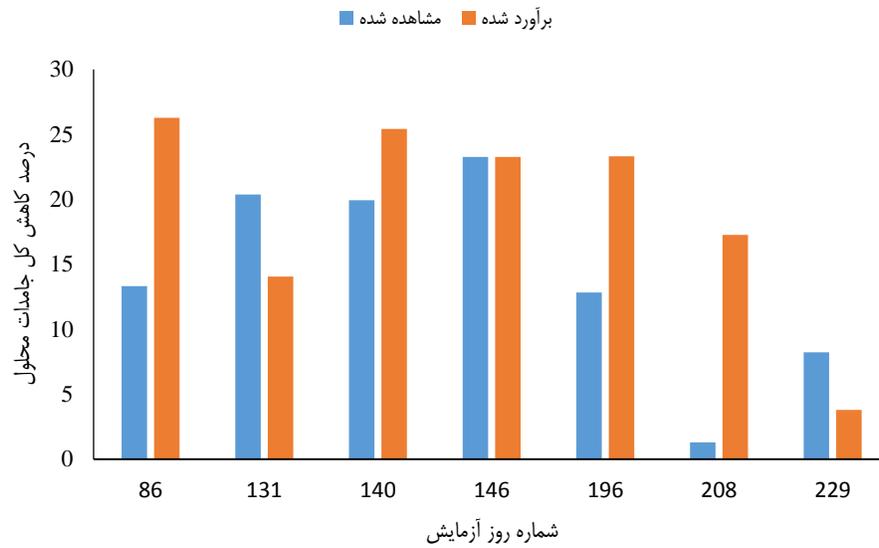


شکل ۸ مقایسه درصد کاهش مشاهده و برآورد شده کل جامدات محلول در تالاب عمودی بدون گیاه

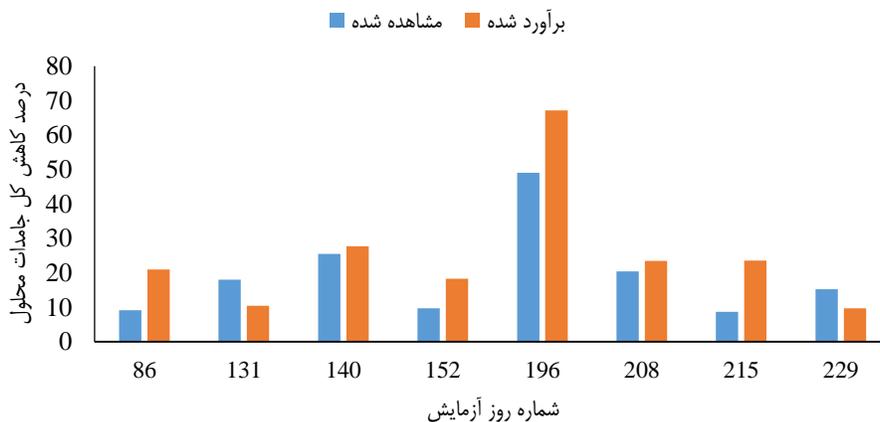
در شکل‌های (۹) تا (۱۱) درصد کاهش کل جامدات محلول در تالاب‌های افقی به ترتیب حاوی گیاه نی، گیاه تیفا و بدون گیاه در برخی از روزهای نمونه‌برداری ارائه شده است. میانگین درصد کاهش کل جامدات محلول بر اساس مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی (جدول ۶) نشان می‌دهد که مدل بین ۳ تا ۵ درصد نسبت به محاسبه بر اساس مقادیر مشاهده‌شده، بیش برآورد داشت. مقایسه میانگین درصد کاهش کل جامدات محلول بین تالاب‌های عمودی و افقی نشان داد که شبیه‌سازی در تالاب‌های عمودی با دقت بیشتری نسبت به تالاب‌های افقی انجام شد که می‌تواند تحت تأثیر برآورد تبخیر-تعرق و توزیع ریشه گیاهان نی و تیفا باشد به طوری که در تالاب‌های افقی به دلیل سطح تماس بیشتر با اتمسفر نقش تبخیر-تعرق در شبیه‌سازی بیشتر بود. همچنین به دلیل عمق کمتر تالاب‌های افقی نسبت به عمودی، توزیع عمودی ریشه می‌تواند تحت تأثیر قرار گرفته و رشد افقی ریشه اتفاق افتاده باشد.



شکل ۹. مقایسه درصد کاهش مشاهده و برآورد شده کل جامدات محلول در تالاب افقی حاوی گیاه نی



شکل ۱۰. مقایسه درصد کاهش مشاهده و برآورد شده کل جامدات محلول در تالاب افقی حاوی گیاه نیفا



شکل ۱۱. مقایسه درصد کاهش مشاهده و برآورد شده کل جامدات محلول در تالاب افقی بدون گیاه

بحث

تالاب‌های مصنوعی در ترکیب با گیاه‌پالایی به‌عنوان راهکار سبز قابلیت بهبود و استفاده مجدد از فاضلاب را فراهم می‌آورد. در این پژوهش، در راستای توسعه ابزارهای طراحی و مدیریت تالاب‌های مصنوعی، شبیه‌سازی عملکرد سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی عمودی و افقی تحت کشت دو گیاه نی و تیفا در تصفیه فاضلاب شهر رشت توسط مدل HYDRUS-2D بررسی شد. پس از ساخت تالاب‌های زیرسطحی عمودی و افقی، گیاهان نی و تیفا کشت و طی دوره آذر ۱۳۹۹ تا شهریور ۱۴۰۰، اقدام به نمونه‌برداری و اندازه‌گیری کل جامدات محلول از فاضلاب خام و تصفیه‌شده توسط تالاب‌ها شد. ارزیابی دقت مدل در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی با استفاده از شاخص‌های آماری انجام شد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای بستر تالاب‌ها از سنگ‌ریزه‌هایی با قطر ۵ تا ۲۵ میلی‌متر استفاده شد و مقایسه مقدار هدایت آبی اشباع برآورد شده توسط مدل HYDRUS-2D با پژوهش‌های پیشین نشان داد که مدل توانسته است برآورد مناسبی از خصوصیات هیدرولیکی بستر داشته باشد. نتایج نشان داد که هندسه سنگ‌ریزه و خلل و فرج و نوع جریان عمودی یا افقی در تالاب بر روی پارامترهای انتقال املاح تأثیرگذار است. با توجه به نتایج ارزیابی‌های آماری، مقادیر تخمینی کل جامدات محلول در تالاب مصنوعی تحت کشت نی نسبت به سایر تالاب‌ها تطابق بیشتری با مقادیر اندازه‌گیری شده داشت. شاخص‌های آماری در مراحل اعتبارسنجی مدل در هریک از سه تالاب موردبررسی نشان داد که مدل قابلیت مناسبی برای شبیه‌سازی حرکت املاح و کل جامدات محلول دارد که به معنای قابلیت استفاده از آن در فرآیند طراحی تصفیه در تالاب است.

تقدیر و تشکر

در پایان از شرکت آب و فاضلاب استان گیلان و تصفیه‌خانه فاضلاب فخب رشت برای فراهم آوردن امکان اجرای آزمایش در تصفیه‌خانه فخب، سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- اخروی، سید سعید، و اسلامیان، سید سعید. (۱۳۹۹). تالاب مصنوعی، چالش - راهکار - طراحی. نشریه علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب، (۳)۵، ۲۱-۵. <https://doi.org/10.22112/JWWSE.2020.214377.1180.5-21>
- شیخان، امیر، شایان‌نژاد، محمد، و عرب نصرآبادی، وحید. (۱۳۹۸). بررسی کارایی تالاب مصنوعی زیرسطحی هیبریدی در تصفیه تکمیلی پساب شهری. علوم آب و خاک، (۲)۳۳، ۱۲۶-۱۱۵. <https://doi.org/10.292.52/Jstnar.23.2.115/115-126>

References

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome 300, D05109. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3084-0_13
- Anand, S., Bharti, S. K., Dviwedi, N., Barman, S. C., & Kumar, N. (2017). Macrophytes for the reclamation of degraded waterbodies with potential for bioenergy production. *Phytoremediation Potential of Bioenergy Plants*, 333-351. <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/4M8qjLb7/>
- Bakhshoodeh, R., Alavi, N., Oldham, C., Santos, R. M., Babaei, A. A., Vymazal, J., & Paydary, P. (2020). Constructed wetlands for landfill leachate treatment: A review. *Ecological Engineering*, 146, 105725. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105725>
- Bannayan, M., & Hoogenboom, G. (2009). Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. *Field Crop Research*, 11(3), 299-302. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.01.007>
- Chen, Y. Y., Sun, P., Chen, G. L., & Wang, N. N. (2015). A contrastive study on salt-alkaline resistance and removal efficiency of nitrogen and phosphorus by *Phragmites australis* and *Typha angustifolia* in coastal estuary area. *Huan Jing ke Xue= Huanjing Kexue*, 36(4), 1489-1496. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26164931/>
- Alexandratos, N.; & Bruinsma, J. (2012). World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://doi.org/10.22004/ag.econ.288998>
- Jamieson, P. D., Porter, J. R., & Wilsin, D. R. (1991). A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crop grown in New Zealand. *Field Crop Research*, 27, 337-350. [https://doi.org/10.1016/0378.4290\(91\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0378.4290(91)90040-3)
- Gholipour, A., Zahabi, H., & Stefanakis, A. I. (2020). A novel pilot and full-scale constructed wetland study for glass industry wastewater treatment. *Chemosphere*, 247, 125966. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125966>
- Hosseini, H.R., & Ghodsian M. (2011). Wetlands their benefits and disadvantages, Proceedings of the 2th Public Conference of Application Usage Researches, May 18-19, Zanjan, Iran.
- Hussein, A., & Scholz, M. (2017). Dye wastewater treatment by vertical-flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 101, 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.01.016>
- Kadlec, R.H., & Wallace, S.D. (2009). *Treatment Wetlands*, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, FL. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/KADLEC%20WALLACE%202009%20Treatment%20Wetlands%202nd%20Edition_0.pdf
- Lippmann, T. J., Heijmans, M. M., Van der velde, Y., Dolman, H., Hendriks, D. M., & Van huissteden, K. (2023). Peatland-VU-NUCOM (PVN 1.0): Using dynamic PFTs to model peatland vegetation, CH4 and CO2 emissions. *Geoscientific Model Development Discussions*, 16(22): 6773-6804. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-6773-2023>

- Martin, E. J., & Martin, E. T. (1991). *Technologies for small water and wastewater systems*. 1th ed, John Wiley and Sons, Inc, New York. 366.
https://books.google.com/books/about/Technologies_for_Small_Water_and_Wastewa.html?id=PVR4QgAACA-AJ
- Okhravi, S., & Eslamian, S. (2020). Constructed Wetland, Challenge-Approach-Design. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, 5(3), 5-21. <http://doi.org/10.22112/jwwse.2020.214377.1180>. [In Persian]
- Pálffy, T.G. & Langergraber, G. (2014). The verification of the Constructed Wetland Model No. 1 implementation in HYDRUS using column experiment data. *Ecological Engineering*, 68, 105-115. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.016>
- Pálffy, T. G., Molle, P., Langergraber, G., Troesch S., Gourdon R., & Meyer, D. (2016). Simulation of constructed wetlands treating combined sewer overflow using HYDRUS/CW2D. *Ecological Engineering*, 87: 340-347. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.11.048>
- Rahi, M.A., Faisal, A. A.H., Naji, L.A., Almuktar, S. A., Abed, S.N., & Scholz, M. (2020). Biochemical performance modelling of non-vegetated and vegetated vertical subsurface-flow constructed wetlands treating municipal wastewater in hot and dry climate. *Journal of Water Process Engineering*, 33, 101003. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101003>
- Raude, J. M., Mutua, B. M., & Kamau, D. N. (2018). Simulation of the hydraulics and treatment performance of horizontal subsurface flow constructed wetland treating greywater. *International of Ecotoxicology and Eco biology*, 3 (2), 40-55. <https://doi.org/10.11648/j.ijee.20180302.12>
- Rizzo, A. G., Langergraber, A., Galvão, F. Boano, R., & Revelli, L. (2014). Modelling the response of laboratory horizontal flow constructed wetlands to unsteady organic loads with HYDRUS-CWM1. *Ecology Engineering*, 68, 209-213. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.073>
- Saeed, T., & Sun, G. (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. *Journal of environmental management*, 112, 429-448. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.011>
- Seidel, K., (1955). *Die Flechtbinde: Ökologie, Morphologie und Entwicklung, ihre Stellung bei den Völkern und ihre wirtschaftliche Bedeutung*. Schweizerbart, Stuttgart, Germany. <https://doi.org/10.1002/JPLN.19560720110>
- Seidel, K. (1961). Zur Problematik der Keim-und Pflanzgewässer. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 14 (2), 1035-1043. <https://doi.org/10.1080/03680770.1959.11899410>
- Seidel, K. (1964). Abbau von bacterium coli durch höhere wasserpflanzen. *Naturwissenschaften*, 51. <https://doi.org/10.1007/BF00637265>
- Seidel, K. (1966). Reinigung von Gewässern durch höhere Pflanzen. *Naturwissenschaften*, 53 (12), 289-297. <https://doi.org/10.1007/BF00712211>
- Simunek, J., Sejna, M., & Van Genuchten, M. (1999). The HYDRUS-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media. Version 2.0. International Ground Water Modeling Center, Colorado School. Colorado. <https://www.researchgate.net/publication/236901785>.
- Sheykhani, A., Shayannejad, M., & Arab-Nasrabadi, V. (2019). Performance Review of Hybrid Subsurface Constructed Wetlands in Urban Wastewater Supplementary Treatment. *Journal of Water and Soil Science*; 23 (2):115-126. <http://doi.org/10.29252/jstnar.23.2.115> [In Persian]

- Sperling, M. V. (1996). Comparison among the most frequently used systems for wastewater treatment in developing countries. *Water Science and Technology*, 33(3), 59-72. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(96\)00301-0](https://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00301-0)
- Toscano, A., Langergraber, G., Consoli, S., & Cirelli, G. L. (2009). Modelling pollutant removal in a pilot-scale two-stage subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 35 (2), 281-289. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.07.011>
- Vymazal, J., & Kropfelova, L. (2008). Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow. Springer science & business media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8580-2>
- Upadhyaya, A. K., Singh, N. K., Bankotib, N. S., & Rai, U. N. (2017). Designing and construction of simulated constructed wetland for treatment of sewage containing metals. *Environmental Technology*, 38 (21), 2691-2699. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8580-2>
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63 (11), 1309-1313. <http://doi.org/10.1175/1520-0477>



Numerical hydraulic and hydrodynamic investigation of flow passing through multiple elliptic lopac gates with Flow 3D software

Tuba Taheri Talavari¹ , Seyed Mohsen Sajjadi² , Javad Ahadiyan³ , Hossein Azizi Nadian⁴ 

¹ M.Sc. Student of Water and Hydraulic Structures, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran . E-mail: Toobataheri78220@gmail.com

² Corresponding Author, Associate Professor of Department of Water Structures, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: m.sajjadi@scu.ac.ir

³ Professor of Department of Water Structures, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: j.ahadiyan@scu.ac.ir

⁴ Ph.D Student, Department of Civil Environmental Architectural Engineering and Mathematics, University of Brescia, Bre-scia, Italy. E-mail: hossein.aziznadian@unibs.it

ABSTRACT

Measuring and controlling flow in conduits is one of the most important issues in the management and operation of irrigation and drainage systems. Investigations on this issue are of great importance for cost-effectiveness and ease of operation, construction, as well as increasing the accuracy of flow measurement and control. In this research, the hydraulic parameters of the flow on multiple elliptic lopac gates in submerged flow conditions have been investigated. This study was done using Flow3D fluid dynamics simulation software. The simulations are performed in three flow rates 20, 40, and 60 liters per second, three opening rates 30, 45, and 60 degrees and three absorption rates 70, 80, and 90 percent. The maximum flow velocity, discharge coefficient and flow vortices are investigated, and their analysis is described. Regarding the maximum velocity, the results showed that when using lopac elliptic gates in submerged conditions compared to free flow conditions, the maximum velocity in the flow rates (20, 40 and 60) liters per second in the opening of 30 degrees on average for the amount of absorption (70, 80, and 90) percent will decrease by 9, 30, and 54 percent, respectively, at 45-degree opening, by 8, 22, and 38 percent, and at 60-degree opening, by 12, 22, and 44 percent, respectively. The results regarding the Discharge coefficient showed that when multiple lopac elliptic gates are used in submerged conditions compared to free flow conditions, the Discharge coefficient in the flow rates of (20, 40, and 60) liters per second in the opening of 30 degrees on average For the extraction rate (70, 80 and 90) percent, 8, 26 and 45%, respectively, at 45 degree opening, 16, 34 and 49%, respectively, and at 60 degree opening, 17, 36 and 54%, respectively will find Finally, the observations showed that when multiple elliptic lopac gates are used in free flow conditions, high-strength vortices are formed compared to multiple elliptic lopac gates in submerged flow conditions. However by examining the flow pattern of multiple elliptic lopac gates in submerged flow conditions, the size of the eddies has decreased, and as a result, its strength has decreased.

Keywords: Elliptic lopac gate, Velocity, Discharge coefficient, Vortex, Flow3D

Article Type: Research Article

Article history: Received: 17 April 2024 Revised: 29 June 2024 Accepted: 27 July 2024 ePublished: 22 September 2024

1. Introduction

One of the water level control and regulation structures is lopac gates, which is known as a dam or flow depth control structure. lopac gates are in the form of two rectangular sheets that are connected to the channel wall. This structure has the ability to adjust the water level upstream of the valve and regulate the distribution of passing water downstream of the valve in different flow rates and openings. lopac gates are divided into rectangular and elliptic categories.

2. Methodology

2.1. Experimental model

The experiments conducted by (Pilbala et al, 2021) were conducted on an open rectangular channel with a length of 10 meters, width and height of the laboratory channel equal to 0.8 meters, with a horizontal rectangular channel bed slope and at Shahid Chamran University of Ahvaz. In total, the laboratory model in 45 tests considering three flow rates (25, 35, and 45 liters per second), five opening angles (35, 40, 45, 50, and 52.5 degrees), and three intake ratios (70, 80 and 90 percent) by (Peel Bala et al., 2021).

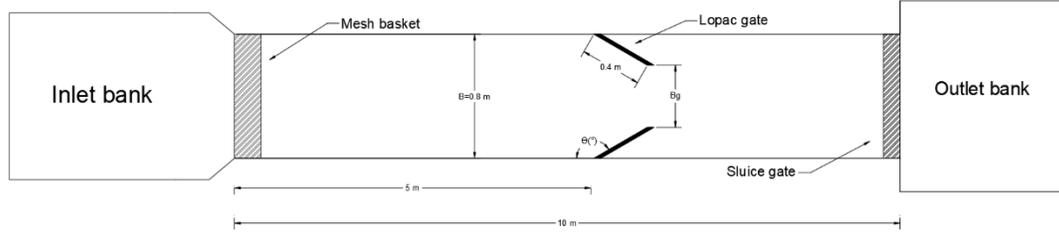


Figure 1: Overview of the laboratory flume (Peel Bala et al., 2021)

2.2. Verification of the physical model

In this research, in order to validate and increase accuracy in numerical simulation results of a rectangular Lopac gate (Pilbala et al., 2021) with a flow rate of 25 liters per second, an opening of 35 degrees and an extraction rate of 70% in the number of mesh cells and different turbulence models were simulated in Flow3D and compared with laboratory data. The results show that among the simulations regarding the selection of the number of meshing cells and different disturbance models, the best performance, compared to the measured laboratory data, is by RNG models, and the number of meshing cells is 1000000. The RNG disturbance model and the number of meshing cells used for all simulations were used in the results of this research. Also, according to the convergence diagram, 40 seconds of time was used for the purpose of simulation.

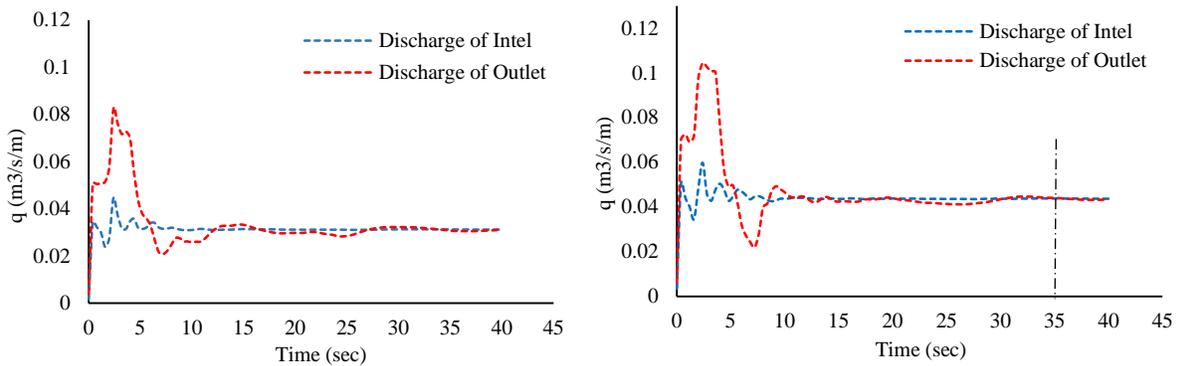


Figure 2. Time changes with flow rate per unit width (q) at the entrance and exit of the simulation area for 45 degree opening, 70% absorption and flow rate a) 25 liters/second b) 35 liters/second

3. Results and discussion

3.1. The effect of changes in Froude number (Fr) on maximum velocity (V_{max})

When using multiple elliptic lopac gates in submerged flow mode, the range of velocity distribution and numerical values of velocity are reduced compared to multiple elliptic lopac gates in free flow conditions. It can be seen that with the increase of the Froude number in fixed openings, the maximum velocity value has increased, and also with the increase of the opening angle of the valve (reduction of narrowness), this parameter has been continuously increased. It can be seen that the maximum velocity value has an inverse relationship with the absorption percentage. In such a way that with the increase in the absorption percentage of the current, the maximum velocity decreases continuously. Investigations show that the maximum flow velocity created on multiple elliptic lopac gates in submerged flow conditions is far lower than when multiple elliptic lopac gates are used in free flow conditions.

3.2. Effect of dimensionless opening (bg/B) on discharge coefficient (C_d)

It can be seen that the value of the flow coefficient during the operation of multiple elliptic lopac gates in submerged flow conditions was lower than that of multiple elliptic lopac gates in free flow conditions. Evaluations show that when multiple elliptic lopac gates are used in submerged flow conditions, compared to multiple elliptic lopac gates in free flow conditions, the flow coefficient at the opening of 30 degrees, on average, in flow rates of (20, 40, and 60) liters per second for the absorption rate of (70, 80 and 90) percent, respectively 8, 26 and 45 percent, in the opening of 45 degrees, in the flow rates of (20, 40 and 60) liters per second for the absorption rate of (70, 80 and 90) percentages are 16, 34 and 49%, respectively, and at 60-degree opening, at flow rates of (20, 40 and 60) liters per second, for the amount of absorption (70, 80 and 90)%, respectively, 17, 36 and 54% will be reduced.

3.3. Flow pattern in multiple elliptic lopac gates

It was found that when multiple elliptic lopac gates are used in free flow conditions, high-strength vortices are formed compared to multiple elliptic lopac gates in submerged flow conditions. This phenomenon can cause problems such as increased energy loss, reduced water absorption rate, reduced efficiency of hydraulic machines, and their improper performance. However by examining the flow pattern of multiple elliptic lopac gates in submerged flow conditions, the size of the vortices has decreased and as a result, its strength has decreased.

4. Conclusions

In this research, using laboratory data and Flow3D software, the effect of using multiple elliptic lopac gates in submerged flow conditions compared to multiple elliptic lopac gates in free flow conditions, maximum flow velocity, flow coefficient, and flow vortices were evaluated. The results showed that the maximum velocity have a direct relationship with the Froude number and the opening angle. Investigations showed that the flow coefficient (Cd) has a direct relationship with the flow rate and gate opening value. The results showed that the flow is diverted to the center or around the channel when passing through multiple elliptic lopac gates, which creates large vortices with high longitudinal elongation near the flume wall.

5. References

Pilbala, A., Shafai Bejestan, M., Sajjadi, S. M., & Fraccarollo, L. (2023). Investigation of the Different Models of Elliptical-Lopac Gate Performance under Submerged Flow Conditions. *Water Resources Management*, 37(9), 3527-3542. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03512-1>

6. Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Cite this article: Taheri Talavari, T., Sajjadi, S.M., Ahadiyan, J., & Azizi Nadian, H. (2024). Numerical hydraulic and hydrodynamic investigation of flow passing through multiple elliptic lopac gates with Flow 3D software, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(3), 40-60. DOI: 10.22126/ATWE.2024.10747.1127

Publisher: Razi University

© The Author(s).





فناوری های پیشرفته در بهره وری آب



شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۹۶۴

وبگاه نشریه: <https://atwe.razi.ac.ir>

بررسی عددی هیدرولیکی جریان عبوری از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق

طوبی طاهری طلاوری^۱، سید محسن سجادی^۲ ✉، جواد احدیان^۳، حسین عزیزی نادیان^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه:

Toobataheri78220@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: m.sadjadi@scu.ac.ir

^۳ استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: j.ahadiyan@scu.ac.ir

^۴ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی معماری و ریاضیات محیط‌زیست عمران، دانشگاه برشیا، برشیا، ایتالیا. رایانامه: hossein.azizinadian@unibs.it

چکیده

اندازه‌گیری و کنترل جریان در مجراها یکی از مهم‌ترین مسائل در مدیریت و بهره‌برداری از سیستم‌های آبیاری و زهکشی است. بررسی‌ها بر روی این موضوع جهت به‌صرفه نمودن و سهولت در بهره‌برداری، ساخت و همچنین افزایش دقت اندازه‌گیری و کنترل جریان از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش به بررسی اثر پارامترهای هیدرولیکی جریان بر روی دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق پرداخته شده است. این بررسی با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی دینامیک سیالات Flow3D انجام شده است. شبیه‌سازی‌ها در سه دبی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ لیتر بر ثانیه، سه میزان بازشدگی ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و سه میزان استغراق ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد انجام شده است. سرعت حداکثر جریان، ضریب دبی و گردابه‌های جریان بررسی شده و تجزیه و تحلیل آن تشریح شده است. در بررسی نتایج سرعت حداکثر جریان یافت شد که استفاده از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط مستغرق در مقایسه با شرایط جریان آزاد، سرعت حداکثر در دبی‌های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه، در بازشدگی ۳۰ درجه، به‌طور متوسط برای میزان استغراق‌های (۷۰، ۸۰ و ۹۰) درصد به ترتیب ۹، ۳۰ و ۵۴ درصد، در بازشدگی ۴۵ درجه، به ترتیب ۸، ۲۲ و ۳۸ درصد و در بازشدگی ۶۰ درجه، به ترتیب ۱۲، ۲۲ و ۴۴ درصد، کاهش یافت. نتایج در خصوص ضریب دبی نشان داد که در زمان استفاده از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط مستغرق در مقایسه با شرایط جریان آزاد، ضریب دبی در دبی‌های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه، در بازشدگی ۳۰ درجه، به‌طور متوسط برای میزان استغراق‌های (۷۰، ۸۰ و ۹۰) درصد به ترتیب ۸، ۲۶ و ۴۵ درصد، در بازشدگی ۴۵ درجه، به ترتیب ۱۶، ۳۴ و ۴۹ درصد و در بازشدگی ۶۰ درجه، به ترتیب ۱۷، ۳۶ و ۵۴ درصد، کاهش خواهد یافت. در نهایت مشاهدات نشان داد که در هنگام استفاده از دریچه سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان آزاد گردابه‌هایی با قدرت بالا نسبت به دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق به وجود می‌آید؛ اما با بررسی الگوی جریان دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق، وسعت گردابه‌ها کاهش یافته و در نتیجه از قدرت آن کاسته شده است.

واژه‌های کلیدی: دریچه سالونی بیضوی، سرعت، ضریب دبی، گردابه، Flow3D

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۹ فروردین ۱۴۰۳ اصلاح: ۰۹ تیر ۱۴۰۳ پذیرش: ۰۶ مرداد ۱۴۰۳ چاپ الکترونیکی: ۰۱ مهر ۱۴۰۳

استناد: طاهری طلاوری، ط، سجادی، س.م، احدیان، ج، و عزیزی نادیان، ح. (۱۴۰۳). بررسی عددی هیدرولیکی جریان عبوری از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق، فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۴(۳)، ۴۰-۶۰. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2024.10747.1127



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

اندازه‌گیری و کنترل جریان در مجراها یکی از مهم‌ترین مسائل در مدیریت و بهره‌برداری از سیستم‌های آبیاری و زهکشی است. بررسی‌ها بر روی این موضوع جهت به‌صرفه نمودن و سهولت در بهره‌برداری، ساخت و همچنین افزایش دقت اندازه‌گیری و کنترل جریان ادامه دارد. (عباسی و ولیزادگان، ۱۴۰۲) انواع دریاچه‌ها و سرریزها به‌طور عمده در اندازه‌گیری جریان عبوری و کنترل سطح آب در کانال‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. از طرفی باتوجه‌به اینکه عملکرد این سازه‌های در افزایش راندمان و بهبود عملکرد سیستم‌های آبرسانی و شبکه‌های توزیع جریان اثر مستقیمی دارند، انجام پژوهش‌ها در زمینه دریاچه‌ها و سرریزها موردتوجه قرار گرفته است (نجم و همکاران^۱، ۲۰۰۲، و کارولو و همکاران^۲، ۲۰۱۳).

دریاچه‌های سالونی یکی از انواع سازه‌های کنترل و تنظیم سطح آب بوده که به‌عنوان آب‌بند یا سازه کنترل عمق جریان مطرح است. دریاچه‌های سالونی به‌صورت دو ورق مستطیلی شکل بوده که به دیواره کانال متصل می‌شود و قابلیت تنظیم سطح آب در بالادست دریاچه و تنظیم توزیع آب عبوری در پایین‌دست دریاچه را در دبی‌ها و بازشدگی‌های مختلف دارا است (اود و کینزلی^۳، ۲۰۰۶). دریاچه‌های سالونی به دو دسته مستطیلی و بیضوی تقسیم شده که دریاچه‌های سالونی مستطیلی اولین بار توسط (لانگمن و همکاران^۴، ۱۹۸۰) و دریاچه‌های سالونی بیضوی اولین بار توسط (کاکس و همکاران^۵، ۲۰۱۴) بررسی شده‌اند.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در این بخش به مروری بر پژوهش‌های مرتبط با دریاچه‌ها و به‌ویژه دریاچه سالونی پرداخته می‌گردد. آکوا سیستم^۶ (۲۰۰۰) برای ارائه یک راه‌حل کارآمد و به‌صرفه باهدف کنترل جریان در کانال‌هایی با ابعاد متفاوت دریاچه سالونی، روابطی را به جهت محاسبه و تخمین دبی و ضریب آبگذری در شرایط جریان آزاد و مستغرق با آستانه درجه استغراق ۰/۳ ارائه دادند. نگم و همکاران^۷ (۲۰۰۶) به مطالعه اثر عملکرد چند دریاچه بر روی الگوی سرعت در پایین‌دست در شرایط جریان مستغرق پرداختند. نتایج نشان داد که الگوی سرعت بر عملکرد دریاچه‌ها، به نوع آن (اصلی یا اضطراری)، نسبت استغراق و عدد فرود در ناحیه انقباض بستگی دارد. کاکس و همکاران^۸ (۲۰۱۴) به‌منظور بهبود راندمان، اندازه‌گیری دقیق دبی جریان، عبور آسان آلودگی و زباله و همچنین کاهش هزینه‌های نگهداری دریاچه‌های سالونی مستطیلی، یک سرریز نوک‌تیز بیضوی شکل را با نام دریاچه‌های سالونی بیضوی معرفی نمودند. آن‌ها همچنین برخی ضرایب و توان برای معادله دبی - اشل پیشنهادی ارائه کردند. شادهی و همکاران^۹ (۲۰۲۰) به مطالعه تجربی بر روی جت‌های آزاد و مستغرق پرداخته و با استفاده از تحلیل باکینگهام، مرتبط با پرش هیدرولیکی آزاد یک فرمول کلی برای تخمین ضریب تصحیح حرکت در مکان‌های مختلف اندازه‌گیری پایین‌دست پیشنهاد دادند. نتایج نشان داد که فرمول به‌دست‌آمده در دریاچه‌های نصب‌شده به‌صورت موازی تمایز بین شرایط جریان آزاد و مستغرق را افزایش می‌دهد. پیل بالا و همکاران^{۱۰} (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی به بررسی دریاچه سالونی بیضوی در شرایط مستغرق پرداخته شد. در این تحقیق تعداد ۹۰ آزمایش در شرایط مختلف دبی و بازشدگی دریاچه و استغراق انجام شد. در تمامی آزمایش‌ها، ضریب دبی و افت انرژی محاسبه شد و نتایج نشان داد که حداکثر کاهش افت انرژی نسبی زمانی رخ خواهد داد که استغراق دریاچه به میزان ۲۰ درصد افزایش یابد. خیبر و همکاران^{۱۱} (۲۰۲۱) به بررسی اثر تأثیر تنگ‌شدگی ناگهانی مقطع بر روی عملکرد هیدرولیکی دریاچه‌های سالونی بیضوی در دبی‌ها و استغراق‌های مختلف پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که ضریب آبگذری با میزان استغراق دریاچه و انقباض کانال رابطه غیرمستقیم داشته و با بازشدگی دریاچه رابطه مستقیم دارد. پیل بالا و همکاران^{۱۲} (۲۰۲۳) به بررسی مدل‌های مختلف عملکرد دریاچه سالونی بیضوی تحت شرایط جریان مستغرق پرداختند. آنان مقادیر استهلاک انرژی، ضریب آبگذری و ضریب اتلاف انرژی را در دبی‌ها، بازشدگی‌ها و نسبت‌های بیضوی مختلف موردبررسی قرار دادند.

¹ negm et al

² Carollo et al

³ oad and kinzli

⁴ Langeman et al

⁵ Cox et al

⁶ Aqua Systems

⁷ Negm et al

⁸ Cox et al

⁹ Shaddehi et al

¹⁰ Pilbala et al

¹¹ Kheybar et

¹² Pilbala et al

یوسف‌وند و همکاران (۱۳۹۳) به مطالعه آزمایشگاهی و ارائه روابطی مناسب برای محاسبه و تخمین ضریب آبگذری دریچه‌های سالونی مستطیلی در شرایط جریان مستغرق و تحلیل مقادیر آن پرداختند. شفاعی بجستان و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی ضریب دبی دریچه سالونی بیضوی همراه با تبدیل تدریجی در شرایط مستغرق پرداختند. نتایج نشان داد که با قرارگیری تبدیل تدریجی در بالادست دریچه سالونی بیضوی، ضریب دبی افزایش می‌یابد. مبارک و همکاران (۱۴۰۰) به مطالعه عددی تأثیر نسبت‌های کشیدگی بیضوی مختلف بر عملکرد هیدرولیکی دریچه سالونی بیضوی پرداختند. بررسی‌ها نشان داد که نسبت بیضوی با میزان استهلاک انرژی، سرعت و تنش برشی رابطه معکوس داشته است. همچنین در نسبت‌های بیضوی بزرگ‌تر از یک گردابه‌ها و انحراف جریان از مسیر کاهش خواهد یافت.

شفاعی بجستان و همکاران (۱۴۰۱)، به بررسی اثر تبدیل تدریجی سهموی در بالادست دریچه سالونی بیضوی بر روی پارامترهای هیدرولیکی (ضریب دبی و افت انرژی) پرداختند. نتایج نشان داد پس از قرارگیری تبدیل تدریجی سهموی در بالادست دریچه سالونی بیضوی، میزان افت انرژی نسبی جریان عبوری از دریچه به میزان $27/7\%$ درصد کاهش می‌یابد. کرم دخت بهبهانی و همکاران (۱۴۰۲)، به بررسی عددی هیدرولیکی و هیدرودینامیکی جریان عبوری از دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه با نرم‌افزار Flow3D شده است. در بررسی کیفی گردابه‌های جریان نیز بررسی‌ها نشان داد، در زمان استفاده از دو دریچه، وسعت گردابه، کشیدگی و قدرت آن نسبت به حالت تک دریچه کاهش یافته و تعداد گردابه‌ها در مقایسه با زمانی که از تک دریچه استفاده می‌شود، افزایش می‌یابد.

فتحی و همکاران (۱۴۰۲)، به بررسی تأثیر استغراق‌های مختلف بر پارامترهای هیدرولیکی جریان در دریچه سالونی مستطیلی چندگانه پرداخته شده است. بررسی پیشینه سرعت نتایج نشان داد که این پارامتر با میزان استغراق رابطه‌ی عکس دارد به‌گونه‌ای که با افزایش استغراق، پیشینه سرعت کاهش پیدا می‌کند که این میزان کاهش در حالت دو دریچه $7/87\%$ درصد نسبت به حالت تک دریچه هست. کرم دخت بهبهانی و همکاران (۱۴۰۳)، به بررسی پارامترهای مؤثر هیدرولیکی نظیر (سرعت و استهلاک انرژی) دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه در حالت مستغرق با میزان استغراق 70% پرداختند. نتایج نشان داد که در حالت مستغرق سرعت پیشینه و استهلاک نسبت به حالت آزاد در تمامی آزمایش‌ها به‌طور متوسط به ترتیب $31/55\%$ و $61/04\%$ کاهش می‌یابد.

باتوجه به موارد فوق، مشخص است که تاکنون مطالعات مرتبط با دریچه‌های سالونی به‌طور عمده در حالت تک دریچه انجام شده است، از این رو نیاز به بررسی اثر استفاده از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق بر پارامترهای هیدرولیکی جریان مانند (سرعت، استهلاک انرژی، ضریب دبی و گردابه‌های جریان) احساس گردید؛ بنابراین، مطالعه حاضر باهدف بررسی اثر پارامترهای هیدرولیکی بر روی دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق انجام می‌گردد، به‌طوری‌که دو سناریو به‌صورت عددی توسط نرم‌افزار FLOW3D مدل‌سازی شد. سناریوی اول، دریچه سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان آزاد بوده و سناریوی دوم، دریچه سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق است که در میزان بازشدگی‌های یکسان (۳۰، ۴۵ و ۶۰) درجه طراحی شده و با مشخصات و شرایط هیدرولیکی برابر مدل‌سازی شده‌اند. با انجام این پژوهش هدف افزایش کارایی و همچنین ارتقا و صرفه‌جویی در هزینه‌های طراحی و ساخت، در شبکه انتقال آب دنبال می‌شود تا بتواند بیش‌تری نسبت به عملکرد و رفتار هیدرولیکی در زمینه دریچه‌های سالونی به دست آید. همچنین عملکرد دریچه سالونی بیضوی چندگانه در دو حالت آزاد و مستغرق در مقایسه با سایر تحقیقات گذشته ارزیابی و امکان استفاده از آن در شبکه‌های انتقال آب برای کنترل سطح آب بررسی می‌گردد. در نهایت این یافته‌ها اهمیت استفاده از CFD را به‌عنوان ابزاری برای حمایت از تصمیم‌گیری و طراحی سازه‌های هیدرولیکی برجسته می‌کنند.

روش پژوهش

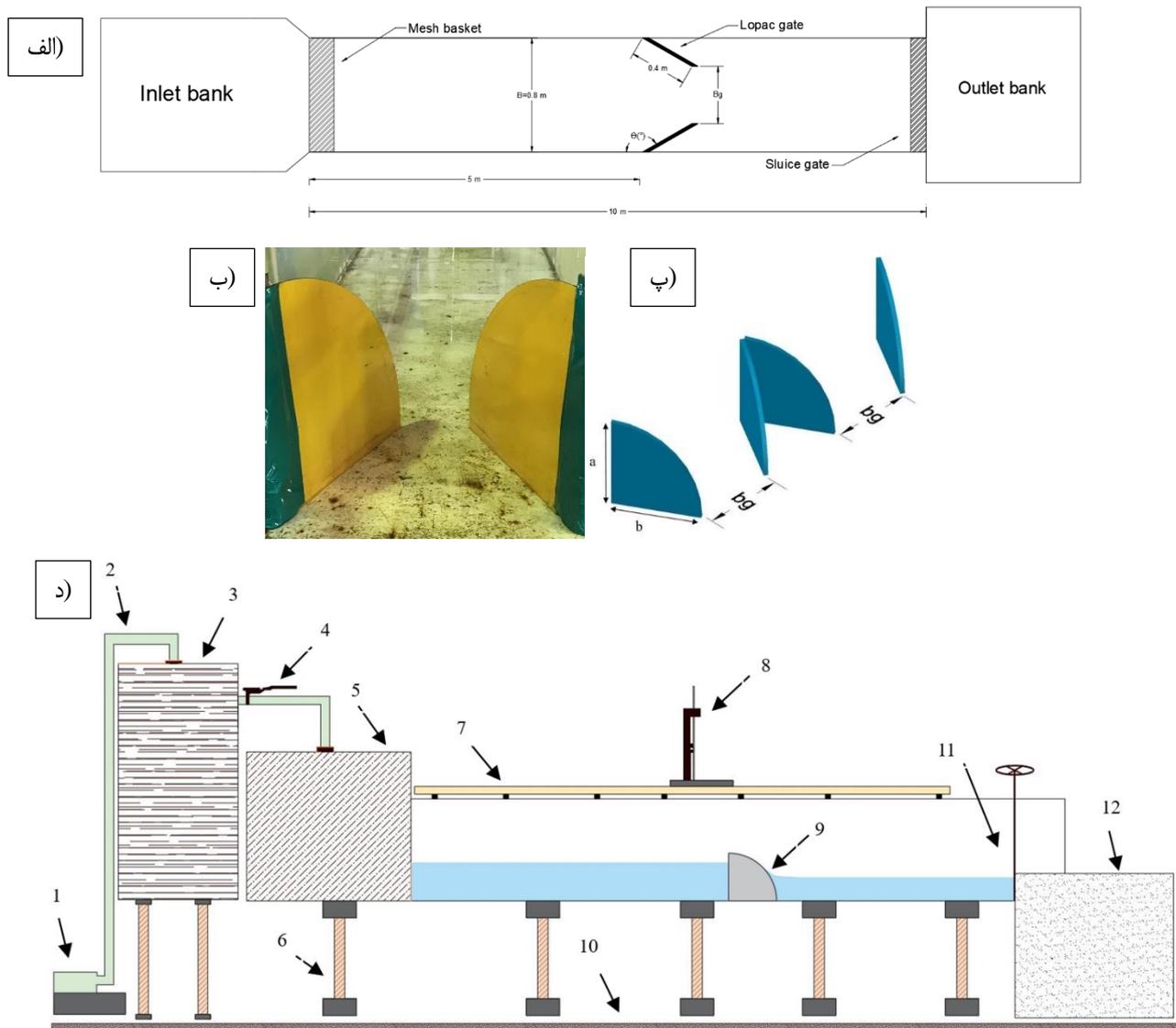
مشخصات مدل آزمایشگاهی

به‌منظور دستیابی به اهداف پژوهش حاضر، در گام اول به‌منظور جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی موردنیاز از آزمایش‌های صورت‌گرفته بر روی یک کانال مستطیلی باز به طول ۱۰ متر، عرض و ارتفاع کانال آزمایشگاهی برابر $0/8$ متر، دارای شیب بستر کانال مستطیلی افقی و در دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شده توسط (پیل بالا و همکاران^۱، ۲۰۲۱) استفاده شد که در شکل (۱-الف) قابل مشاهده است. در جدول (۱) به معرفی جزئیات فلوم آزمایشگاهی موردبررسی پرداخته شده است. سازه دریچه از ورق گالوانیزه به ضخامت ۲ میلی‌متر ساخته شده و در فاصله $4/1$ متری از انتهای بالادست نصب می‌شود.

¹ Pilbala et al

جدول ۱. مشخصات فلوم آزمایشگاهی

شماره	نام	شماره	نام
۱	واحد پمپاژ	۷	ریل
۲	لوله انتقال آب	۸	عمق سنج
۳	مخزن ذخیره بالادست	۹	دریچه سالونی بیضوی
۴	شیر کنترل تخلیه	۱۰	سطح زمین
۵	مخزن ورودی	۱۱	دریچه کشویی
۶	ستون فلوم	۱۲	مخزن خروجی



شکل ۱: الف: نمای کلی فلوم آزمایشگاهی ب: نمای دریچه سالونی بیضوی آزمایشگاهی ب: نمای سه بعدی مدل سه بعدی دریچه سالونی بیضوی چندگانه د: نمای جانبی فلوم آزمایشگاهی و جزئیات آن

شکل (۱-الف) نمای پلان فلوم آزمایشگاهی موردبررسی در این پژوهش را نشان می‌دهد. یک مخزن متصل به فلوم جهت تأمین آب موردنیاز قرار دارد. در ابتدای فلوم از یک آرام‌کننده به جهت کنترل نوسانات جریان استفاده شده و در انتهای آن از یک دریچه کشویی برای تنظیم استغراق جریان استفاده شده است. شکل‌های (۱-ب) دریچه‌های سالونی شبیه‌سازی شده در آزمایشگاه را در مدل بیضوی نشان می‌دهد. شکل (۱-پ) نمای سه‌بعدی دریچه سالونی بیضوی چندگانه را نشان می‌دهد. در این پژوهش نسبت بیضوی به صورت (a/b) نشان داده شده است. در شکل (۱-د) نمای جانبی فلوم آزمایشگاه به همراه جزئیات آن مانند عمق سنج، مخزن ورودی، مخزن خروجی، پمپ انتقال جریان و ... که در جدول (۱) آورده شده، معرفی گردیده است. در آزمایش‌های صورت گرفته دبی ورودی توسط دستگاه اولتراسونیک اندازه‌گیری شد. همچنین قابل مشاهده است که دریچه سالونی در فاصله ۵ متری نسبت به نقطه شروع فلوم نصب شده تا علاوه بر ایجاد جریان توسعه‌یافته در فلوم فضای کافی برای ایجاد جریان ماندگار در پایین دست دریچه فراهم گردد. در مجموع مدل آزمایشگاهی در ۴۵ آزمایش با در نظر گرفتن ۳ دبی (۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه)، ۵ زاویه بازشدگی (۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۲/۵ درجه) و ۳ نسبت استغراق (۰.۷۰، ۰.۸۰ و ۰.۹۰ درصد) توسط پیل بالا و همکاران (۲۰۲۱) انجام شده است.

آنالیز ابعادی

ضریب دبی در شرایط جریان آزاد تابعی از متغیرهای نشان داده شده در معادله (۱) است.

$$f(Q, y_u, y_t, b_g, B, g, \rho, \mu) \quad (1)$$

عمق آب در بالادست دریچه (y_u) ، عمق آب در پایین دست دریچه (y_t) ، عرض کانال (B) ، عرض دریچه (b) ، میزان عرض بازشدگی تحت تأثیر زاویه (b_g) ، دبی جریان (Q) ، جرم مخصوص (ρ) ، لزجت دینامیکی سیال (μ) و شتاب جاذبه (g) می‌باشد. با کمک تئوری باکینگهام، به رابطه (۲) می‌رسیم:

$$C_d = f\left(\frac{y_t}{y_u}, \frac{b_g}{y_u}, \frac{b}{y_u}, \frac{B}{y_u}, Fr, Re_u\right) \quad (2)$$

رینولدز که برابر است با نسبت نیروی اینرسی به نیروی لزجت و همچنین عدد فرود نسبت نیروی اینرسی به نیروی ثقل است. به دلیل تلاطم جریان و بالا بودن اعداد رینولدز می‌توان از تأثیر نیروی لزجت صرف نظر کرد. در نهایت رابطه (۳) حاصل می‌گردد.

$$C_d = f\left(\frac{b_g}{B}, \frac{b}{B}, \frac{y_t}{y_u}, Fr\right) \quad (3)$$

در معادله (۳)، عدد فرود (Fr) ، عمق بالادست به عمق پایین دست دریچه $(\frac{y_t}{y_u})$ ، نسبت عرض دریچه به عرض کانال $k(\frac{b}{B})$ ، نسبت عرض بازشدگی به عرض کانال $(\frac{b_g}{B})$ است. در ادامه ضرایب دبی با کمک پارامترهای بدون بعد در تعداد ۳ دبی ارائه می‌شود. مؤثرترین پارامتر بدون بعد نسبت بازشدگی است؛ چراکه هر سه پارامتر بدون بعد دیگر $(\frac{y_t}{y_u}, \frac{b}{B}, Fr)$ هر سه تابعی از نسبت بازشدگی هستند.

مبانی نظری

معادله ضریب دبی

ضریب دبی، (C_d) ، بیان شده در معادله (۱) نشان‌دهنده ضریب مشخصی از دبی عبوری جریان از دریچه‌های سالونی می‌باشد. معادله (۱) در واقع شامل یک فرمول مشخصه برای ارزیابی دبی است و نقش برجسته‌ای در طبقه‌بندی عملکرد هیدرولیکی دریچه‌های سالونی دارد. این معادله جهت محاسبه ضریب آبگذری عبوری از دریچه سالونی بیضوی، با به‌کارگیری رابطه‌ی برنولی بین دو مقطع ۱ و ۲ و استفاده از شکل کانال و با توجه به رفتار هیدرولیکی دریچه سالونی و اعمال کردن رابطه پیوستگی و ترکیب روابط، توسط خیر و همکاران^۱ (۲۰۲۱) ارائه شد.

$$Q = C_d \times B \times Y_{up}^{1.5} \times \sqrt{\frac{2gS^2}{S+1}} \quad (1)$$

¹ Kheybar et al

در این معادله Q همان دبی ورودی درون کانال، B عرض کانال، C_d ضریب دبی، Y_{up} ارتفاع آب بالادست دریچه و S نسبت استغراق بوده که از نسبت عمق پایین دست ب عمق بالادست $(\frac{Y_t}{Y_u})$ به دست آمده و پس از جایگذاری مقادیر ضریب آبگذری برای دبی و بازشدگی های مختلف محاسبه و بررسی شده است.

معرفی نرم افزار Flow3D

در این پژوهش به منظور مدل سازی و بررسی تأثیر دریچه سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق، از نرم افزار Flow3D که یک مدل بسیار قوی در زمینه CFD است استفاده شده است. در این نرم افزار از دو تکنیک عددی برای مدل سازی استفاده خواهد شد. روش حجم سیال (VOF) که از طریق سعی و خطا و تحلیل هم زمان معادلات ناور-استوکس جریان متلاطم با انواع روش های CFD به محاسبه پارامترهای نظیر سرعت و فشار می پردازد و روش کسر مساحت-حجم مانع (FAVOR) که در شبیه سازی سطوح و اجسام صلب نظیر مرزهای هندسی کاربرد دارد، استفاده می شود.

شبیه سازی عددی

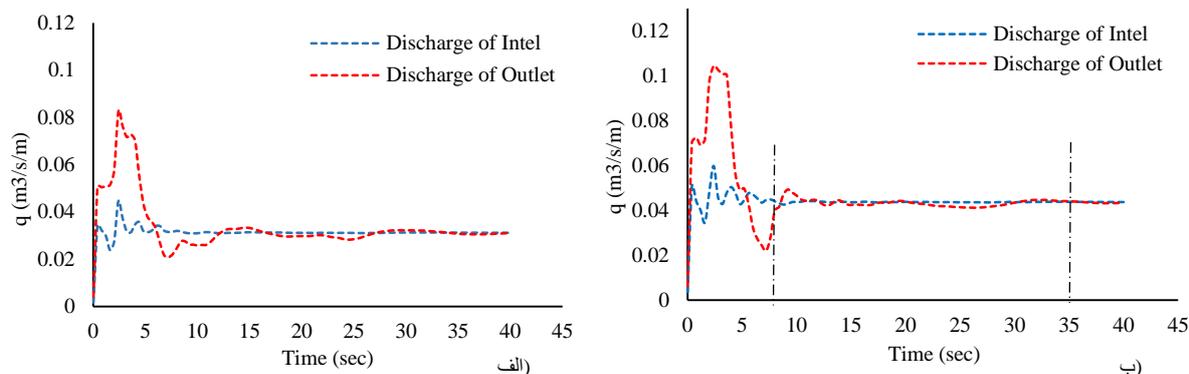
نتایج داده های آزمایشگاهی به دست آمده توسط پیل بالا و همکاران (۲۰۲۱) ابتدا برای کالیبراسیون و اعتبار سنجی مدل Flow3D استفاده شد. سپس مشخصات شبیه سازی تأیید شده برای دیگر شبیه سازی ها به منظور به دست آوردن داده های نهایی مورد نیاز استفاده شد. برای مرحله کالیبراسیون، دریچه سالونی مستطیلی با مقدار دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۳۵ درجه و نسبت استغراق ۷۰ درصد شبیه سازی شد. با تغییر تعداد سلول مش و با انتخاب مدل آشفتگی، مدل عددی به گونه ای کالیبره شد که نتایج شبیه سازی مستقل از تعداد سلول مش بوده و به خوبی با مقادیر اندازه گیری شده سطح آب در آزمایشگاه مطابقت داشته باشد. در این پژوهش به منظور بررسی عملکرد دریچه های سالونی بیضوی چندگانه در دو شرایط جریان آزاد و مستغرق و مقایسه این دو نسبت به یکدیگر در مجموع از ۳۶ شبیه سازی استفاده گردید. جدول (۲)، ۹ شبیه سازی از دریچه های سالونی بیضوی چندگانه با دبی های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ لیتر بر ثانیه و بازشدگی های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه در شرایط جریان آزاد شبیه سازی گردید. همچنین ۲۷ مدل از دریچه های سالونی بیضوی چندگانه با دبی های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ لیتر بر ثانیه و بازشدگی های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و در شرایط جریان مستغرق با استغراق های ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد شبیه سازی شد.

مدل های آشفتگی

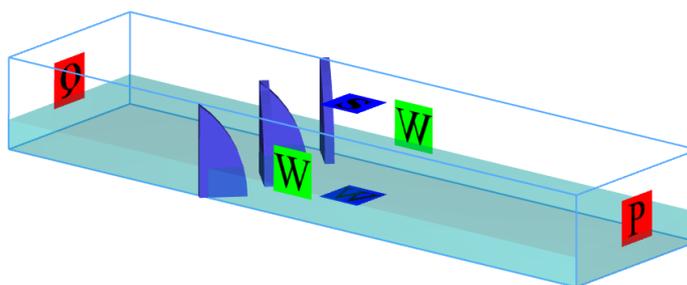
مدل های آشفتگی شامل، مدل های صفر معادله ای، مدل های تک معادله ای، مدل های $(k-\epsilon)$ ، مدل های (RNG)، مدل های (LES) که متداول ترین آن ها در بحث سازه های هیدرولیکی مدل های $(k-\epsilon)$ ، (RNG) و (LES) است. مدل RNG برای توصیف آشفتگی با شدت کم و جریان هایی که دارای مناطق برشی قوی هستند با دقت بیشتری نسبت به مدل استاندارد $K-\omega$ شناخته می شود، بنابراین مدل RNG کاربرد وسیع تری نسبت به $K-\omega$ دارد. همچنین مدل آشفتگی $K-\epsilon$ به ویژه برای توصیف حوزه های جریان در نزدیکی مرزهای دیوار و فواصل با گرادبان های فشار جریانی، مانند جت ها تلقی می شود. علاوه بر این گردابه هایی که در اطراف دریچه تشکیل می شوند توسط مدل RNG با دقت بیشتری شبیه سازی می شوند. همچنین مدل آشفتگی $K-\epsilon$ به دلیل این که دارای تحلیل های دو معادله ای بوده و ضرایب تقریباً ثابتی دارد نسبت به RNG از دقت کمتری برخوردار است.

مش بندی و شرایط مرزی

در این پژوهش از یک بلوک مش بندی استفاده شده که تمامی فضای شبیه سازی و سازه را شامل می شود. در این پژوهش برای بلوک مش بندی، تعداد مش های ۵۰۰۰۰۰، ۱۰۰۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج انتخاب تعداد سلول مش بندی مناسب در جدول (۲) آمده است. در طول فرآیند اعتبار سنجی، همگرایی حل عددی حالت پایدار با نظارت بر دبی در واحد عرض (Q) و با تغییرات در ورودی و خروجی حوزه شبیه سازی بررسی شد. شکل (۲) تغییرات زمانی را با دبی در واحد عرض در دو سری از آزمایش های پیل بالا و همکاران (۲۰۲۱) با میزان بازشدگی ۴۵ درجه، میزان استغراق ۷۰ درصد و در دبی های ۲۵ و ۳۵ لیتر بر ثانیه نشان می دهد. شکل (۲) نشان می دهد که زمان ۳۵ ثانیه برای دستیابی به یک وضعیت پایدار برای دو تخلیه اتخاذ شده مناسب بود؛ بنابراین و برای احتیاط بیشتر، زمان اجرای شبیه سازی روی ۴۰ ثانیه تنظیم شد. شرایط مختلف مرز بندی در شبکه سلول محاسباتی به شکل مرز ورودی به صورت دبی ورودی، مرز خروجی نیز به علت ایجاد استغراق جریان به صورت فشار انتخاب گردید. دیوارهای جانبی شبکه سلول های محاسباتی و همچنین کف بلوک مش بندی در حالت دیوار تنظیم شده و سقف این بلوک نیز به علت وجود هوا به صورت شرط مرزی متقارن در نظر گرفته شده است که در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۲. تغییرات زمانی با دبی در واحد عرض (q) در ورودی و خروجی حوزه شبیه‌سازی برای بازشدگی ۴۵ درجه، استغراق ۷۰ درصد و دبی الف) ۲۵ لیتر بر ثانیه ب) ۳۵ لیتر بر ثانیه



شکل ۳. شرایط مرزی اعمال‌شده در شبیه‌سازی

انتخاب مش بندی، مدل آشفتگی و کالیبراسیون

نتایج شبیه‌سازی عددی دریچه سالونی مستطیلی پیل بالا و همکاران (۲۰۲۱) با دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۳۵ درجه و میزان استغراق ۷۰ درصد در تعداد سلول مش بندی و مدل‌های آشفتگی مختلف در جدول (۲) آورده شده و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. جدول (۲) میزان خطا را برای معیارهای مختلف RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا)، MAPE (میانگین درصد مطلق خطا) و MSE (میانگین مربعات خطا) مربوط به مقایسه عمق بالادست برداشت‌شده بر روی دریچه سالونی مستطیلی نسبت به عمق بالادست شبیه‌سازی‌شده را در تعداد سلول مش و مدل‌های آشفتگی مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در بین ۹ شبیه‌سازی صورت گرفته و انتخاب تعداد سلول‌های مش بندی و مدل‌های آشفتگی مختلف، بهترین عملکرد، در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده، توسط مدل‌های RNG و تعداد سلول‌های مش بندی ۱۰۰۰۰۰۰ به دست آمد. برای صحت سنجی مدل آشفتگی و تعداد سلول مش بندی از معیارهای محاسباتی نام‌برده استفاده شد. بررسی‌ها نشان داد نتایج در محدوده قابل‌قبولی از خطاها قرار دارد. در نتیجه در این پژوهش برای تمامی شبیه‌سازی‌ها از مدل آشفتگی RNG و تعداد سلول مش بندی ۱۰۰۰۰۰۰ استفاده شد.

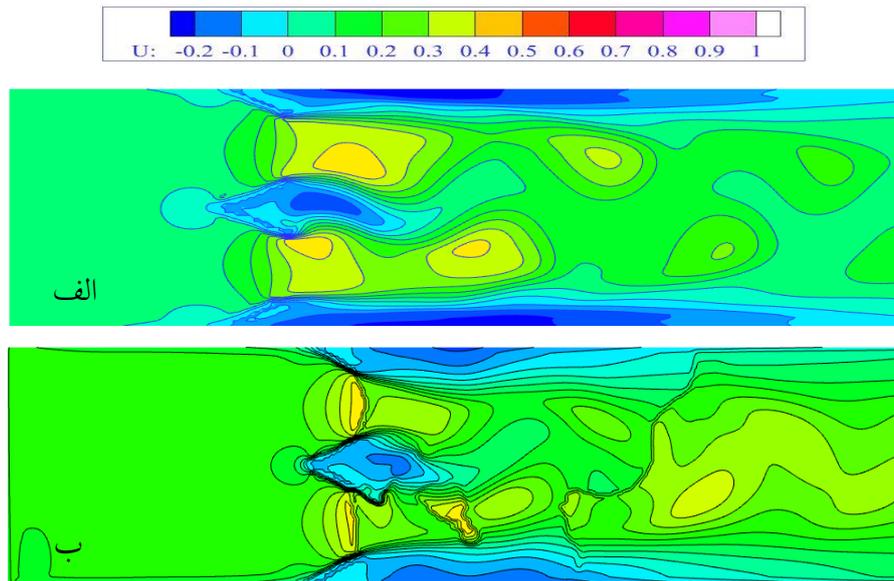
جدول (۲) نتایج آماری مش بندی، مدل آشفتهگی و کالیبراسیون با مدل آزمایشگاهی در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۳۵ درجه و استغراق ۷۰ درصد

شماره	زاویه (°)	دبی (l/s)	استغراق (%)	مش بندی	مدل های آشفتهگی	عمق آب بالادست		MAPE (%)	RMSE (m)	MSE (%)	انتخاب
						مدل آزمایشگاهی	مدل عددی (m)				
۱	۳۵	۲۵	۷۰		RNG	۰/۲۲۵	۰/۲۱۲	۵/۷۸	۰/۰۱۳	۰/۰۰۰۱۷	
۲				۵۰۰۰۰۰۰	K-ε		۰/۲۰۹	۷/۱۱	۰/۲۰۹	۰/۰۴۳۶	
۳					K-ω		۰/۲۱	۶/۶۷	۰/۲۱	۰/۰۴۴۱	
۴					RNG		۰/۲۱۵	۴/۱۴	۰/۲۱۵۷	۰/۰۴۶۵	↓
۵				۱۰۰۰۰۰۰	K-ε		۰/۲۱	۶/۶۷	۰/۲۱	۰/۰۴۴۱	
۶					K-ω		۰/۱۹۵	۱۲/۳	۰/۱۹۵	۰/۰۳۰۲	
۷					RNG		۰/۱۹۷	۱۲/۴	۰/۱۹۷	۰/۰۳۸۸۸	
۸				۲۰۰۰۰۰۰	K-ε		۰/۲۱۱	۶/۲۳	۰/۲۱۱	۰/۰۴۴۵۲	
۹					K-ω		۰/۲۰۵	۸/۹	۰/۲۰۵	۰/۰۴۲۰۲	

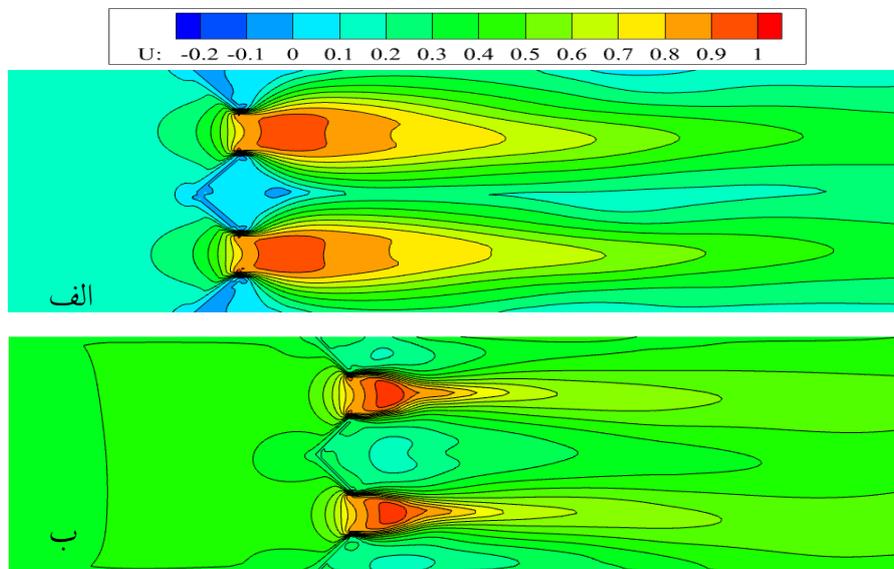
یافته‌ها

اثر تغییرات عدد فرود (Fr) بر سرعت حداکثر (V_{max})

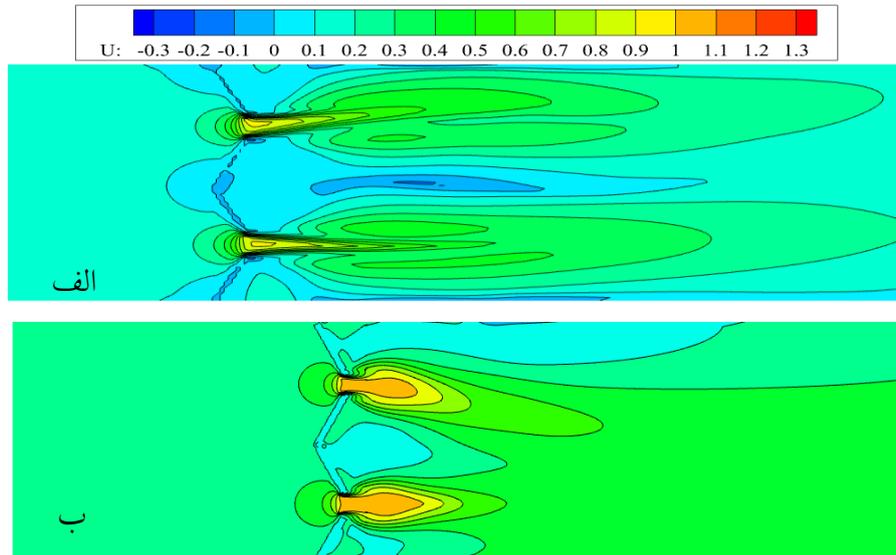
شکل‌های (۴ تا ۶) میدان توزیع سرعت جریان را در اطراف دریچه، در دبی 20 l/s و بازشدگی‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه دو دو حالت آزاد و مستغرق با میزان استغراق ۷۰٪ نشان می‌دهد. در تمامی شکل‌های نشان داده شده تفاوت مقادیر سرعت جریان در نزدیکی بستر باحالت شاهد در بازشدگی‌های مختلف به وضوح دیده می‌شود. هدف از ارزیابی انجام شده رسیدن به سازه‌ای با بهترین عملکرد هیدرولیکی است. طبق راهنمای رنگ‌بندی در شکل‌های به دست آمده، تغییر رنگ از سبز و زرد به قرمز و نارنجی نشان دهنده افزایش سرعت در قسمت‌های میانی و اطراف دریچه است. شکل‌های (۴ تا ۶) و بررسی‌های کیفی صورت گرفته در خصوص میدان توزیع سرعت در اطراف دریچه نشان می‌دهند که محدوده توزیع سرعت با زاویه بازشدگی دریچه رابطه معکوس دارد. میدان سرعت با افزایش زاویه بازشدگی دریچه کاهش می‌یابد. قابل مشاهده است که در شکل‌های (۴-الف و ۴-ب) در دبی 20 l/s و بازشدگی ۳۰ درجه در هر دو حالت آزاد و مستغرق، به دلیل تشکیل گردابه‌های جریان در نزدیکی دیواره‌ها و در شکل (۶-ب) با دبی 20 l/s و بازشدگی ۶۰ درجه، در حالت جریان مستغرق به دلیل تشکیل گردابه‌ها در یک طرف دیواره فلوم جریان آب از مسیر خود منحرف شده و به مرکز فلوم و یا به طرف دیواره فلوم منحرف می‌گردد. با توجه به شکل‌های (۴ تا ۶) مشاهده می‌گردد که در زمان استفاده از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در حالت جریان مستغرق، محدوده توزیع سرعت و مقادیر عددی سرعت در مقایسه با دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان آزاد کاهش می‌یابد؛ زیرا وجود جریان آب در پایین دست دریچه در شرایط جریان مستغرق باعث کاهش سرعت جریان آب در اطراف دریچه می‌شود. این امر سبب کاهش احتمال وقوع آب شستگی و فرسایش کمتر در نزدیکی دهانه دریچه و در نقاط قرمز رنگ می‌شود. می‌توان از این امر به عنوان یکی از مزایای استفاده از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط نام برد. تحلیل و بررسی میدان سرعت در این ارزیابی برای دبی‌های دیگر نیز صدق می‌کند.



شکل ۴. توزیع سرعت در دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و بازشدگی ۳۰ درجه الف) جریان آزاد ب) جریان مستغرق با استغراق ۷۰٪

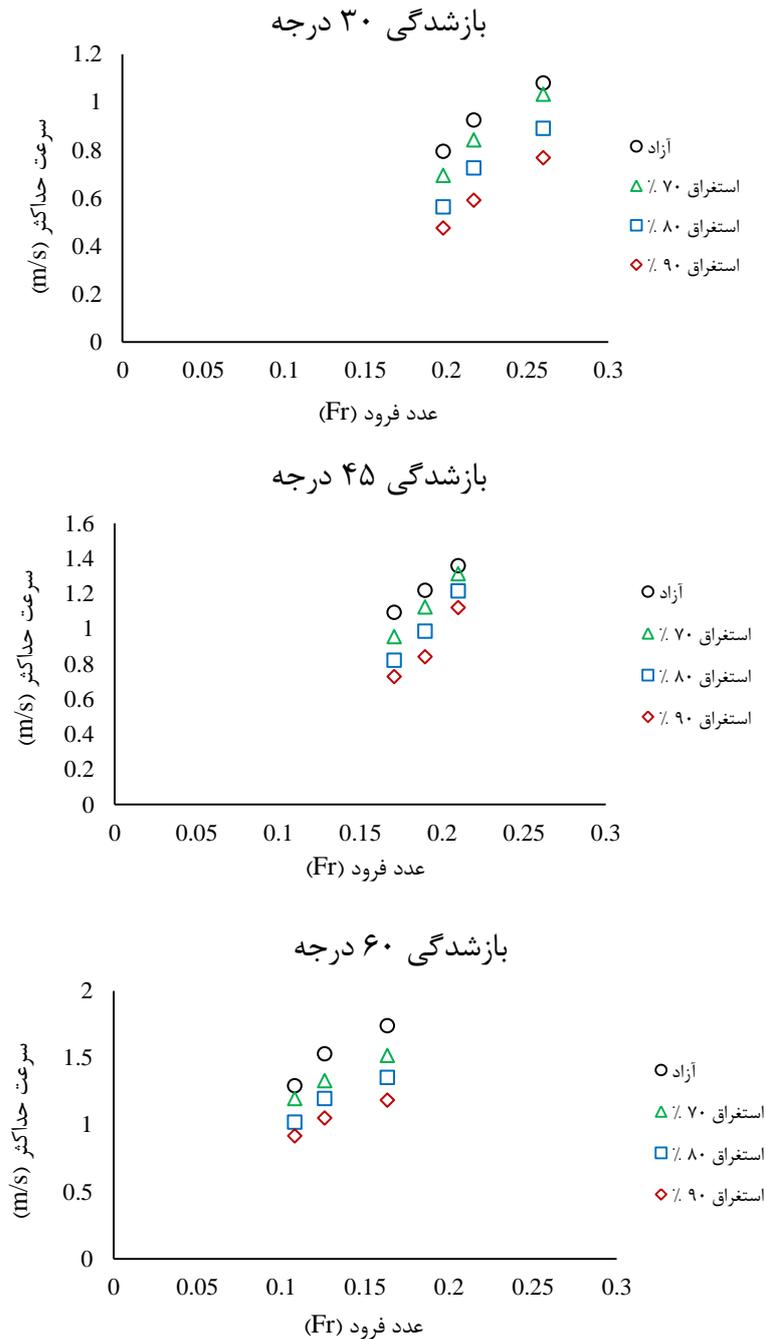


شکل ۵. توزیع سرعت در دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و بازشدگی ۴۵ درجه الف) جریان آزاد ب) جریان مستغرق با استغراق ۷۰٪



شکل ۶. توزیع سرعت در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه و بازشدگی ۶۰ درجه الف) جریان آزاد ب) جریان مستغرق با استغراق ۷۰٪.

شکل‌های (۷) تغییرات سرعت حداکثر را در زاویه‌های بازشدگی (۳، ۴۵ و ۶۰ درجه را نسبت به تغییرات عدد فرود نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۷) مشاهده می‌گردد که سرعت حداکثر با عدد فرود و همچنین زاویه بازشدگی رابطه مستقیم دارد. به طوری که مشاهده می‌گردد که با افزایش عدد فرود در بازشدگی‌های ثابت مقدار v_{max} افزایش یافته و همچنین با افزایش زاویه بازشدگی دریچه (کاهش تنگ‌شدگی) این پارامتر مرتباً افزایش یافته است. از طرفی با توجه به شکل‌های (۷) مشاهده می‌گردد که مقدار سرعت حداکثر با درصد استغراق رابطه‌ای معکوس دارد. به شکلی که با افزایش درصد استغراق جریان، سرعت حداکثر مرتباً کاهش می‌یابد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که حداکثر سرعت جریان ایجادشده بر روی دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق به مراتب کمتر از زمانی است که از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان آزاد استفاده می‌گردد. ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که در زمان استفاده از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط مستغرق جریان در مقایسه با دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط آزاد، سرعت حداکثر در بازشدگی ۳۰ درجه، به طور متوسط در دبی‌های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه برای میزان استغراق‌های (۷۰، ۸۰ و ۹۰) درصد به ترتیب ۹، ۳۰ و ۵۴ درصد، در بازشدگی ۴۵ درجه، در دبی‌های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه برای میزان استغراق‌های (۷۰، ۸۰ و ۹۰) درصد به ترتیب ۸، ۲۲ و ۳۸ درصد و در بازشدگی ۶۰ درجه، در دبی‌های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه برای میزان استغراق‌های (۷۰، ۸۰ و ۹۰) درصد به ترتیب ۱۲، ۲۲ و ۴۴ درصد، کاهش خواهد یافت. بیشترین میزان کاهش سرعت دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق مربوط به دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۳۰ درجه و استغراق ۹۰٪ به مقدار ۶۷ درصد و کمترین میزان کاهش آن مربوط به دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۶۰ درجه و استغراق ۷۰٪ با مقدار ۷ درصد است. پس از بررسی‌های صورت گرفته، در نهایت توصیه می‌گردد که در دبی‌های کم و میزان استغراق‌های بالا به دلیل ایجاد سرعت حداکثر کمتر نسبت به دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان آزاد و کاهش میزان فرسایش و آب شستگی در کف کانال از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق استفاده گردد.



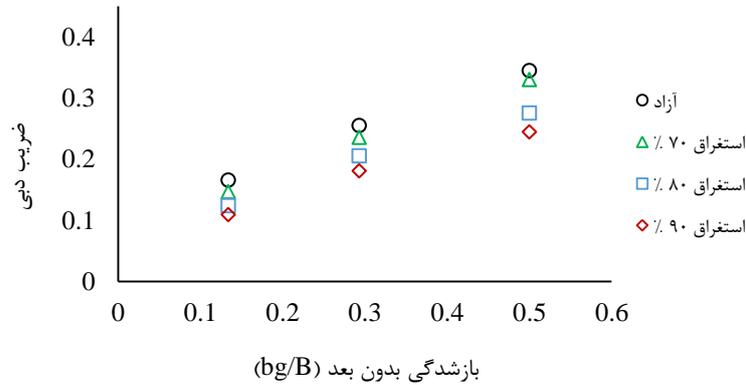
شکل ۷. بررسی تغییرات سرعت دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در دو حالت جریان آزاد و مستغرق

اثر بازشدگی بدون بعد (bg/B) بر ضریب دبی (Cd)

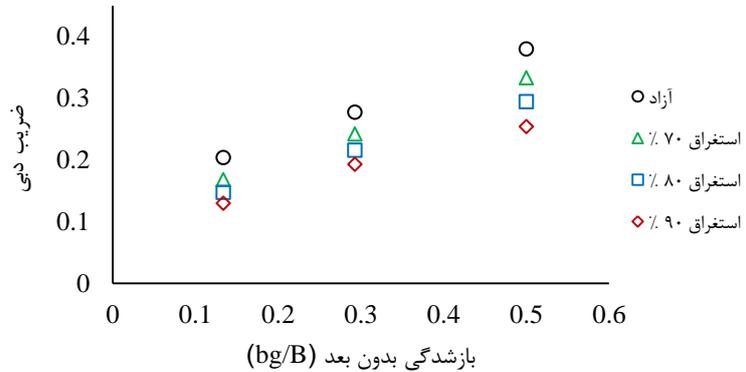
این بخش باهدف بررسی تأثیر نسبت‌های بازشدگی بدون بعد (bg/B) و دبی عبوری (Q) بر ضریب دبی Cd است. شکل‌های (۱) تغییرات ضریب دبی (Cd) دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار Flow3D را در مقابل تغییرات بازشدگی بدون بعد (bg/B) نشان می‌دهد. بررسی‌ها نشان داد ضریب دبی (Cd) با میزان دبی عبوری و مقدار بازشدگی دریچه رابطه‌ی مستقیم دارد. مشاهده می‌شود که با افزایش بازشدگی دریچه (bg/B) و دبی عبوری جریان مقدار ضریب دبی مرتباً افزایش می‌یابد. با توجه به شکل‌های (۸) مشاهده می‌گردد که مقدار ضریب دبی با درصد استغراق رابطه‌ی معکوس دارد. به شکلی که با افزایش درصد استغراق جریان، ضریب دبی مرتباً کاهش می‌یابد. با توجه به روند تغییرات ضریب دبی نسبت به بازشدگی‌های مختلف مشاهده می‌گردد که مقدار ضریب دبی در زمان بهره‌برداری از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق نسبت به دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط

جریان آزاد کمتر بوده است. ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که در زمان استفاده از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط مستغرق جریان در مقایسه با دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان آزاد، ضریب دبی در بازشدگی ۳۰ درجه، به‌طور متوسط در دبی‌های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه برای میزان استغراق‌های (۷۰، ۸۰ و ۹۰) درصد به ترتیب ۸، ۲۶ و ۴۵ درصد، در بازشدگی ۴۵ درجه، در دبی‌های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه برای میزان استغراق‌های (۷۰، ۸۰ و ۹۰) درصد به ترتیب ۱۶، ۳۴ و ۴۹ درصد و در بازشدگی ۶۰ درجه، در دبی‌های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه برای میزان استغراق‌های (۷۰، ۸۰ و ۹۰) درصد به ترتیب ۱۷، ۳۶ و ۵۴ درصد، کاهش می‌یابد. بیشترین میزان کاهش سرعت دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق مربوط به دبی ۶۰ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۴۵ درجه و استغراق ۹۰٪ به مقدار ۶۳ درصد و کمترین میزان کاهش آن مربوط به دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۳۰ درجه و استغراق ۷۰٪ با مقدار ۴ درصد است.

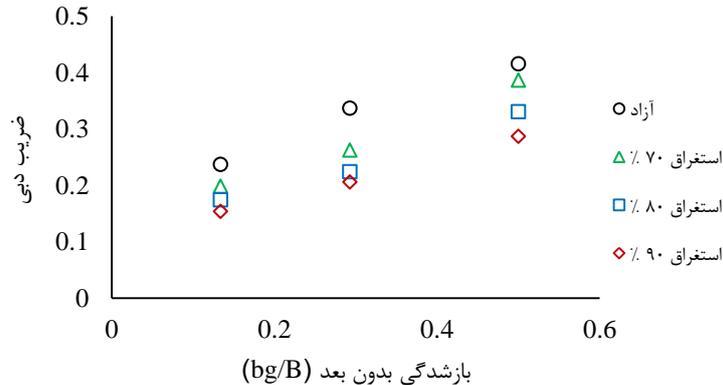
دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه



دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه



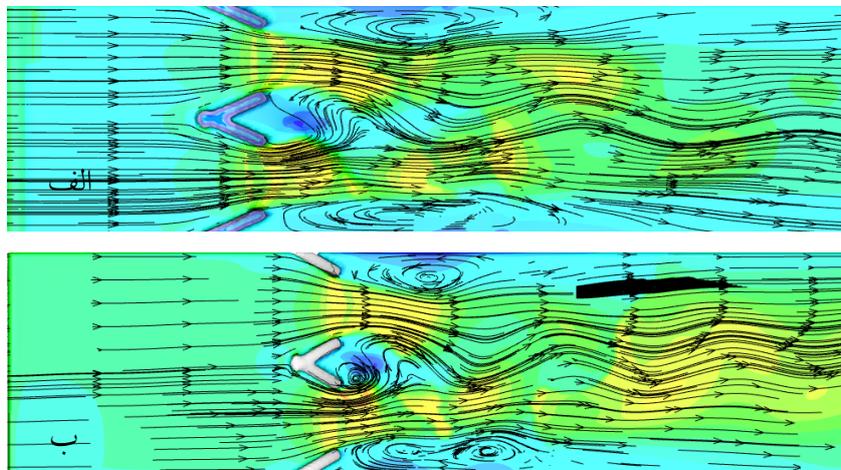
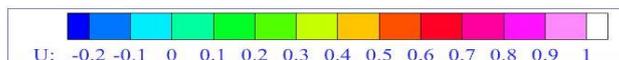
دبی ۶۰ لیتر بر ثانیه



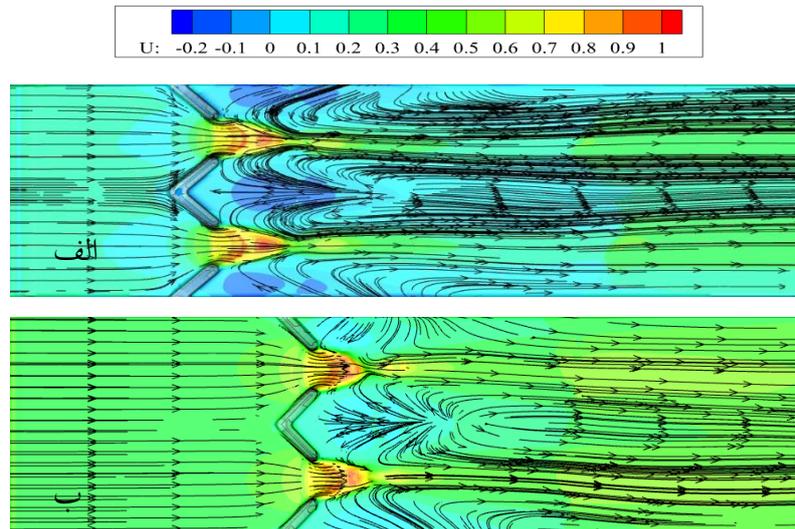
شکل ۸ تغییرات ضریب دبی (CD) نسبت به تغییرات بازشدگی بدون بعد (bg/B)

الگوی جریان در محدوده دریچه‌های سالونی

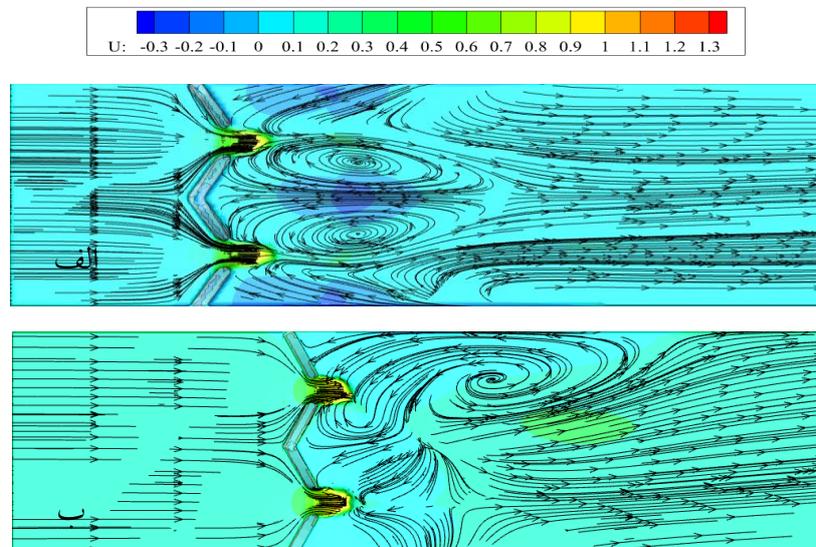
جریان گردابی مشکلات زیادی برای تأسیسات هیدرومکانیکی آبیگرها ایجاد می‌کند. از جمله این مشکلات می‌توان به ورود هوا به مجرای آبیگر و عملکرد نامناسب ماشین‌های هیدرولیکی و مکش اجسام به دهانه آبیگر اشاره کرد. در این پژوهش به بررسی الگوی جریان بر روی دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در دو حالت آزاد و مستغرق و مقایسه آنان با یکدیگر پرداخته شده است. باتوجه به شکل-های (۹ تا ۱۱) خطوط جریان در دبی ثابت ۲۰ لیتر بر ثانیه، بازشدگی‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و در دو حالت جریان آزاد و مستغرق با میزان استغراق ۷۰٪ برای دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه ترسیم شده است. راهنمای آبی، سبز و زرد در شکل‌های (۹ تا ۱۱) نشان‌دهنده تغییرات سرعت در بخش‌های مختلف کانال است. به توجه به راهنمای تغییرات سرعت و بررسی‌های صورت گرفته، مشخص شد که در هنگام استفاده از دریچه سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان آزاد گردابه‌هایی با قدرت بالا نسبت به دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق به وجود می‌آید؛ زیرا وجود جریان آب در پایین دست دریچه در شرایط جریان مستغرق باعث کاهش سرعت جریان آب در اطراف دریچه می‌شود. این پدیده باعث کاهش وسعت گردابه‌های ایجاد شده در پایین دست و اطراف دریچه سالونی بیضوی می‌گردد. این پدیده می‌تواند باعث بروز مشکلاتی نظیر افزایش افت انرژی، کاهش نرخ آبیگری، کاهش راندمان ماشین‌های هیدرولیکی و عملکرد نامناسب آن‌ها شود؛ اما با بررسی الگوی جریان دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق، وسعت گردابه‌ها کاهش یافته و در نتیجه از قدرت آن کاسته شده است. شکل‌های (۹-الف و ۹-ب) در میزان بازشدگی ۳۰ درجه و شکل (۱۱-ب) در بازشدگی ۶۰ درجه نشان می‌دهد که جریان در هنگام عبور از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه به مرکز و یا اطراف کانال منحرف شده که این امر باعث ایجاد گردابه‌هایی بزرگ با کشیدگی طولی زیاد در نزدیکی جداره فلوم می‌شود. گردابه‌های تشکیل شده در اطراف و پایین دست دریچه‌های نصب شده، موجب ایجاد ارتعاش و خوردگی در بدنه این دریچه‌ها، سبب کاهش عمر و افزایش هزینه‌های بهره‌برداری این سازه‌ها می‌شود. این گردابه‌ها رشد لایه مرزی را مختل کرده و در نهایت باعث افزایش انتقال حرارت بین سیال و سطح مجاور آن می‌شوند. همچنین باتوجه به شکل (۱۰-الف و ۱۰-ب) مشاهده می‌گردد که در میزان دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و زاویه بازشدگی (۴۵) درجه تأثیر گردابه در اطراف دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق در مقایسه با دریچه سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان آزاد به حداقل رسیده است. این گردابه‌ها برای دبی‌های دیگر (۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه کاملاً مشابه هستند، اما یکسان نیستند. در نهایت با بررسی‌های صورت گرفته بر روی دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط مستغرق در مقایسه با دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان آزاد مشخص گردید که گردابه‌های برگشتی در پایین دست دریچه نامنظم‌تر می‌شوند و تغییرات گردابه‌ها شدیدتر است که به نوبه خود بر کارایی و عملکرد پایدار دروازه تأثیر می‌گذارد.



شکل ۹. خطوط جریان بر روی دریچه سالونی بیضوی چندگانه در بازشدگی ۳۰ درجه، دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و در دو حالت (الف) آزاد (ب) مستغرق با استغراق ۷۰٪



شکل ۱۰. خطوط جریان بر روی دریچه سالونی بیضوی چندگانه در بازشدگی ۴۵ درجه، دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و در دو حالت الف) آزاد (ب) مستغرق با استغراق ۷۰٪.



شکل ۱۱. خطوط جریان بر روی دریچه سالونی بیضوی چندگانه در بازشدگی ۶۰ درجه، دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و در دو حالت الف) آزاد (ب) مستغرق با استغراق ۷۰٪.

بحث

دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه، می‌تواند به‌عنوان نسل جدیدی از دریچه‌ها با ویژگی‌های عملکردی خاص برای مدیریت کانال‌های آبیاری مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی و نرم‌افزار Flow3D، تأثیر استفاده از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق را در مقایسه با دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان آزاد، سرعت حداکثر جریان، ضریب دبی و گردابه‌های جریان مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتیجه‌گیری

موارد زیر را می‌توان به‌عنوان نتایج کلیدی تحقیق ذکر کرد:

نتایج نشان داد که سرعت حداکثر با عدد فرود و همچنین زاویه بازشدگی رابطه مستقیم خواهد داشت. به این ترتیب مشاهده می‌گردد که با افزایش عدد فرود در بازشدگی‌های ثابت مقدار V_{max} افزایش یافته و همچنین با افزایش زاویه بازشدگی دریچه (کاهش تنگ‌شدگی) این

پارامتر مرتباً افزایش یافته است. همچنین مشخص گردید که حداکثر سرعت جریان ایجادشده بر روی دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق به مراتب کمتر از زمانی است که از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان آزاد استفاده می‌گردد.

بررسی‌ها نشان داد ضریب دبی (Cd) با میزان دبی عبوری و مقدار بازشدگی دریچه رابطه مستقیم دارد. به نحوی که با افزایش بازشدگی دریچه و دبی عبوری جریان مقدار ضریب دبی مرتباً افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده گردید که مقدار ضریب دبی با درصد استغراق رابطه‌ای معکوس دارد. به شکلی که با افزایش درصد استغراق جریان، ضریب دبی مرتباً کاهش می‌یابد.

نتایج نشان داد که جریان در هنگام عبور از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه به مرکز و یا اطراف کانال منحرف شده که این امر باعث ایجاد گردابه‌هایی بزرگ با کشیدگی طولی زیاد در نزدیکی جداره فلوم می‌شود. همچنین مشاهده شد که در میزان دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و زاویه بازشدگی (۴۵) درجه تأثیر گردابه در اطراف دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق در مقایسه با دریچه سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان آزاد به حداقل رسیده است.

بر اساس نتایج مدل‌سازی عددی و تحلیلی پژوهش حاضر، کاربرد دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق موردبررسی به دلیل بهبود در عملکرد پارامترهای هیدرولیکی در مقایسه با دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه، به‌عنوان یک ابزار اندازه‌گیری و کنترل جریان قابل‌اطمینان و حمل آسان در شرایط جریان آزاد در کانال‌های روباز پیشنهاد می‌گردد. لذا این سازه دارای محدودیت‌هایی از جمله تشکیل گردابه‌های بزرگ و انحراف جریان به یک‌طرف کانال را دارا بوده و این امر نیازمند بررسی‌ها و ارائه راه‌حلی به جهت بهبود هرچه بهتر عملکرد این سازه در مقایسه با سازه‌های مشابه است.

منابع

- شفاعی بجستان، محمود، زینی وند، مهدی، و طهماسبی پور، محسن. (۱۳۹۹). ضریب دبی دریچه سالونی بیضوی همراه با تبدیل تدریجی در شرایط مستغرق. نشریه هیدرولیک، ۱۵(۲)، ۸۰-۶۷. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2020.225028.1449>
- شفاعی بجستان، محمود، کاظمی حسونند، کیوان، و زینی وند، مهدی. (۱۴۰۱). مطالعه عددی تأثیر تبدیل تدریجی سهموی در بالادست دریچه سالونی بیضوی بر شرایط هیدرولیکی جریان. علوم و مهندسی آبیاری، مقاله آماده انتشار. <https://doi.org/10.22055/jise.2022.38726.1993>
- فتحی، ستاره، سجادی، سید محسن، احدیان، جواد، و پارسائی، عباس. (۱۴۰۲). بررسی تأثیر استغراق‌های مختلف بر پارامترهای هیدرولیکی جریان در دریچه سالونی مستطیلی چندگانه. مدیریت آب و آبیاری، مقاله آماده انتشار. <https://doi.org/10.22059/JWIM.2023.365670.1106>
- کرم دخت بهبهانی، محمد، سجادی، سید محسن، احدیان، جواد، و پارسایی، عباس. (۱۴۰۲). بررسی عددی هیدرولیکی و هیدرودینامیکی جریان عبوری از دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه با نرم‌افزار Flow3D. علوم آب و خاک (Isfahan University of Technology)، ۲۸(۱)، ۶۴-۵۱. <http://dx.doi.org/10.47176/jwss.28.1.19852>
- مبارک، فرانک، سجادی، سید محسن، احدیان، جواد، و زینی وند، مهدی. (۱۴۰۱). مدل‌سازی عددی اثر کشیدگی بیضوی بر عملکرد هیدرولیکی دریچه سالونی بیضوی. مدیریت آب و آبیاری، ۱۲(۲)، ۲۷۵-۲۶۳. <https://doi.org/10.22059/jwim.2022.335817.952.263-275>
- یوسفوند، فاطمه، منعم، محمد جواد، و کاویانپور، محمدرضا. (۱۳۹۴). ارزیابی آزمایشگاهی و تحلیلی ضریب دبی دریچه سالونی در شرایط جریان مستغرق. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۹(۵)، ۸۱۹-۸۱۱. https://idj.aid.ir/article_55126.html

References

- Aqua Systems 2000 Incorporation (AS21). (2013). Leaders in Water Management and Control. <http://www.as2i.net/products/control-gates/hydra-lopac-gate>
- Carollo, F. G., Ferro, V., & Pampalone, V. (2012). Experimental investigation of the outflow process over a triangular labyrinth-weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(1), 73-79. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000366](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000366)
- Cox, A. L., Kullberg, E. G., MacKenzie, K. A., & Thornton, C. I. (2014). Stage-discharge rating equation for an elliptical sharp-crested weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(6), 04014018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000730](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000730)
- Cox, A. L., Saadat, S., MacKenzie, K. A., & Thornton, C. I. (2015). Effect of urban debris on hydraulic efficiency of an elliptical sharp-crested weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(6), 06014006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000837](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000837)
- Fathi, S., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., & Parsaie, A. (2023). Numerical investigation of the effect of different plunges on the flow hydraulic parameters in multiple rectangular lopac gates by using Flow3D. *Water and Irrigation Management*, Ready for publication paper. <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.365670.1106> [In Persian]
- karamdokht Behbahani, M., Sajjadi, S. M., & Ahadiyan, J. (2024). Hydraulic investigation of the flow through multiple rectangular Lopac gate in free flow and submerged mode by Flow 3D software. *Irrigation and Water Engineering*, 28(1), 51-64. <http://dx.doi.org/10.47176/jwss.28.1.19852> [In Persian]

- Kheybar, H., Sajjadi, S. M., & Ahadiyan, J. (2021). Effect of sudden canal contraction on the discharge coefficient and the energy dissipation coefficient of the elliptical LOPAC gate. *Irrigation and Drainage*, 70(5), 1145-1154. <https://doi.org/10.1002/ird.2622>
- Mubarak, F., Sajjadi, S. M., Ahdian, J., & Zainiwand, M. (1401). Numerical modeling of the effect of elliptic elongation on the hydraulic performance of the elliptical salon valve. *Water management and irrigation*. 12(2), 263-275. <https://doi.org/10.22059/jwim.2022.335817.952> [In Persian]
- Negm, A. A. M., Al-Brahim, A. M., & Alhamid, A. A. (2002). Combined-free flow over weirs and below gates. *Journal of Hydraulic research*, 40(3), 359-365. <https://doi.org/10.1080/00221680209499950>
- Negm, A. M., Abdelaal, G. M., Elfiky, M. M., Abdalla, Y. M., & Afifi, M. (2006). Effects of Multi-Gates Operations on Bottom Velocity Pattern Under Submerged Flow Conditions. *Proc. IWTC10*, 1, 217-280.
https://www.academia.edu/7712892/EFFECT_OF_MULTI_GATES_REGULATORS_OPERATIONS_ON_DOWNSTREAM_SCOUR_PATTERN_UNDER_SUBMERGED_FLOW_CONDITIONS
- Pilbala, A., Sajjadi, S., & Bejestan, M. S. (2021). Hydraulic performance of elliptical-LOPAC gate under submerged flow conditions. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 317-326. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.007>
- Pilbala, A., Shafai Bejestan, M., Sajjadi, S. M., & Fraccarollo, L. (2023). Investigation of the Different Models of Elliptical-Lopac Gate Performance under Submerged Flow Conditions. *Water Resources Management*, 37(9), 3527-3542. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03512-1>
- Shaddehi, F. R., & Bijankhan, M. (2020). Experimental study on free and submerged multi-jets. *Flow Measurement and Instrumentation*, 75, 101805. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101805>
- Shafai Bajestan, M., Kazemi Hasanvand, K., & Zeinivand, M. (2022). Numerical Study of the Effect of Gradual Parabolic Inlet Transition of the Elliptical LOPAC Gate on the Hydraulic Conditions of the Flow. *Irrigation Sciences and Engineering*, Ready for publication paper . <https://doi.org/10.22055/jise.2022.38726.1993> [In Persian]
- Shafa'i Bajestan, M., Zainivand, M., & Tahmasabipour, M. (2019). Elliptical salon valve discharge coefficient with gradual conversion in submerged conditions. *Journal of Hydraulics*. 15(2), 67-80. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2020.225028.1449> [In Persian]
- Yousafund, F., Manem, M.J., & Kavianpour, M.R. (2014). Laboratory and analytical evaluation of the discharge coefficient of the salon valve in submerged flow conditions. *Iran Irrigation and Drainage Journal*, 9(5), 811-819. https://idj.iaid.ir/article_55126.html [In Persian]



Daily estimation of solar radiation in some climatic samples of Iran using meteorological data

Rojin Fasihi¹ , Maryam Bayatvarkeshi² , Abdollah Taheri Tizro³  

¹ Ph.D graduated of Water Science and Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

E-mail: rojin.fasihi@yahoo.com

² Assistant Professor, Soil Science Department, Malayer University, Malayer, Iran. E-mail: m.bayat.v@gmail.com

³ Corresponding Author, Associate Professor, Water Science and Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: ttizro@basu.ac.ir

ABSTRACT

The importance of the amount of radiation in the application of solar energy is well known. Many problems exist in recording this parameter, especially the areas lacking meteorological stations. It is necessary to properly estimate the solar radiation in different regions of the country. In this study, by using the meteorological parameters Viz. wind speed, temperature (maximum, minimum and average), relative humidity, daily sunshine and precipitation, the experimental relations, the amount of solar radiation in five different climates of the country were proposed. Empirical relationships were extracted using multivariate regressions between solar radiation as a dependent variable and other daily meteorological variables (as independent variables) and these were classified according to statistical criteria. The investigation showed that the hot and cold semi-arid climate has the highest accuracy based on nRMSE=0.085 index among the rest of the climates and the hot and cold dry climate has the MBE value of -1.15 (MJ.cm⁻².day⁻¹) and nRMSE equal to 0.11 have the highest error between meteorological parameters and the weakest estimate among the 5 investigated climates. In the hot and cold semi-arid climate where the best estimation of solar radiation was made, parameters such as temperature (maximum, minimum and average), precipitation, sunshine hours and wind speed were used. The influence of the mentioned parameters in the estimation of solar radiation remains the same.

Keywords: Climate, Radiation, Regression, Meteorological parameter

Article Type: Research Article

Article history: Received: 15 May 2024 Revised: 02 July 2024 Accepted: 30 July 2024 ePublished: 22 September 2024

1. Introduction

Global solar radiation (GSR) is an important parameter for designing and developing different solar energy systems (Tris et al., 1997). The concept of solar radiation means that during a certain period of time, how much solar energy is absorbed by a horizontal surface in an area (Almoroux and Hontoria, 2004; Wang et al., 2011). Iran is a sunny country, and, the optimal utilization of solar energy can be necessary for future energy development (Jafarkazemi and Mardi, 2019).

2. Methodology

In the present study, solar radiation was investigated in five climates. In this way, the two stations of Ramsar and Rasht represent the very humid cool warm climate, the three stations of Kermanshah, Mashhad and Shiraz represent the very hot semi-arid climate, the three stations of Tabriz, Zanjan and Urmia represent the semi-arid climate. Cold-warm, Birjand, Kerman and Isfahan stations were investigated as representatives of warm dry climate and Ahvaz, Booshehr and Bandar Abbas stations as representatives of warm dry temperate climate.

Daily measured data of wind speed (U), maximum temperature (Tmax), minimum temperature (Tmin), average air temperature (Tave), average relative humidity (RH), sunshine hour (N) and precipitation (R) As independent variables and the amount of solar radiation (RS) as a dependent variable, for each of the mentioned stations, it was prepared from the National Meteorological Organization during the years 1986 to 2010.

After preparing the data and their quality control, solar radiation was estimated using multivariate linear regression fitting under SPSS software. Empirical relationships were calculated for each climate separately. In order to determine the correlation between solar radiation and other meteorological parameters, the following multivariate linear correlation equation was considered between the dependent variable (Y) and independent variables (x):

$$Y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (1)$$

where Y is the predictor variable, x1, x2 and xn are predictor variables and a1, a2 and an are constant correlation coefficients. After determining the coefficients of each model, the coefficients of the equations were optimized in order to improve the results. For this purpose, by applying the ranges, restrictions and characteristics of radiation, regression analysis was performed in the Solver environment of Excel software.

In order to evaluate the research, the results were measured based on the error measurement indices of the mean squared normal error (nRMSE) and mean bias (MBE).

3. Results and discussion

According to Table (2), the meteorological parameters of maximum, minimum and average temperatures, hours of sunshine and wind have a positive correlation with solar radiation, that is, with the increase of each parameter, the amount of radiation also has an increasing trend, except precipitation and relative humidity, which have a negative correlation with radiation. It shows the reverse relationship between these two parameters with solar radiation. The highest correlation between relative humidity and solar radiation (-0.485) and the lowest correlation between precipitation and radiation with a value of -0.048 is in the hot dry climate. The best regression equations obtained from meteorological parameters using SPSS software for different climates are given in Table (3). in which the amount of error between the available parameters has been calculated for each of the stations.

The relationships presented for five climates show that the maximum amount of error based on nRMSE and MBE index in hot dry climate is 11% and -1.15 megajoules per square centimeter per day, respectively. On the other hand, the lowest amount of error based on the two mentioned indicators is in the hot and cold semi-arid climate, which is 8.5% and 0.50 megajoules per square centimeter per day, respectively. To estimate the regression equation in hot and cold semi-arid climates, as the results show, the variables included in the best regression equation in hot and cold semi-arid climates were: maximum temperature, precipitation, minimum temperature, sunshine hour, wind speed and average temperature. In hot dry cool climate, the maximum, minimum and average temperature, relative humidity, sunshine hour and wind speed were used. Precipitation, minimum temperature, wind speed and solar hour are used in very hot semi-arid climate, in hot dry climate, maximum and minimum and average temperature, relative humidity, wind speed and solar hour are used, finally in moderately hot dry climate. Precipitation, maximum and average temperature along with wind speed, sunshine hour and relative humidity were used. In very humid, cool, hot, semi-dry, very hot, and dry, moderately hot climates, it is observed that the accuracy of radiation estimation between meteorological parameters is almost within the same interval of change (about 9%). From the MBE index provided between the meteorological parameters, we find that the minimum overestimation value is 0.02 megajoules per square centimeter per day in very humid, cool, hot climates, and the maximum value is (0.50) in the semi-arid, cold, hot climates. Figure (3) shows the time series graphs of the investigated stations during the relevant statistical period. In general, the estimation of solar radiation using regression equations based on the investigated error measurement indices, which has the least amount of error and, conversely, the highest amount of accuracy, is in the semi-arid, cold, hot climate, because the accuracy is 8.5% based on the nRMSE index. The high accuracy of the equation is used to estimate the radiation, and its MBE value is 0.50, which proves the overestimation of the presented equation.

Meteorological parameters were examined on a daily basis to obtain the regression equation in the years 1986 to 2010 in a very humid cool hot climate as mentioned in Table (4), and in the time series graph, the observed radiation values are more than Radiation values are estimates from regression relationships. The very hot semi-arid climate shows that the estimated radiation values have almost a constant range of changes and its maximum value is approximately 2000 megajoules per square centimeter per day, but the observed radiation value is more than this value. According to the diagram and table (4), the semi-arid, cold and hot climate has MBE value of -0.501 MJ/cm²/day among the parameters, and the estimated amount of radiation has not exceeded 2000 MJ/cm². In some statistical years, the observed value is more than the estimated value. The time series of the hot and cold semi-arid climate is the same as the rest of the climates and it is higher than the mentioned value, and in the cool and hot dry climate, which has MBE with a value of -1.15 MJ/cm²/day, it is among the meteorological parameters. It is also mentioned in Table (4), and in some of the investigated periods, the amount of observations is more than the estimate, and there is a large fluctuation between the amount of radiation estimated and observations, and the estimated amount is up to about 4000 megajoules per square centimeter per day. Finally, the hot temperate dry climate with MBE, -0.558 megajoules per square centimeter per day indicates the underestimation of solar radiation in this climate.

4. Conclusions

It is necessary to investigate the energy of solar radiation as it is important and influential parameter on the processes on earth, including water resources. In this research, using the equations obtained from the regression model, the amount of solar radiation reaching the earth's surface was estimated in five different climates in the country, which includes 14 meteorological stations. It was seen that the amount of observed radiation in three climates, semi-arid, very hot, dry, cool, hot, and dry, moderately hot, is lower than the observed amount, and in two climates, very humid, cool, hot, and semi-arid, cold, hot, it is higher than the estimated amount of radiation. According to the regression equations, the amount of error obtained in the hot and cold semi-arid climate has the lowest amount of error and the warm and dry climate has the highest amount of error. The changes in the error percentage of the solar radiation estimation of the other three climates are not large and are about 9%. The meteorological parameters used in the semi-arid, cold, hot climate were temperature, precipitation, sunshine hours, and wind speed. Considering the limitation of measuring solar radiation in the country, the importance of estimating this meteorological parameter is essential in order to use it in the management of water resources by managers.

5. References

- Alizadeh, A., & Khalili, N. (2009). Estimation of Angstrom Coefficient and Developing a Regression Equation for Solar Radiation Estimation (Case study: Mashhad). *Journal of Water and Soil*, 23(1), 229-238. <http://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.1554> [In Persian]
- Almorox, J. Y., & Hontoria, C. J. E. C. (2004). Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. *Energy Conversion and Management*, 45(9-10), 1529-1535. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2003.08.022>
- Bloch, S. C. (2000). Analysis Toolpak: Fourier Analysis. *Excel for Engineers and Scientists*. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1-11. <https://www.wiley.com/en-au/Fourier+Analysis-p-9781118165515>
- Bristow, K. L., & Campbell, G. S. (1984). On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and forest meteorology*, 31(2), 159-166. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(84\)90017-0](https://doi.org/10.1016/0168-1923(84)90017-0)
- Ebrahimipour, A., Marefat, M., & Nayeri, H. (2009). Presenting a new relationship for estimating the amount of total radiation in different climates of Iran. *Scientific-research journal of geographical space*, 9(27), 1-22. <https://ensani.ir/fa/article/124821/> [In Persian]
- Ehnberg, J. S., & Bollen, M. H. (2005). Simulation of global solar radiation based on cloud observations. *Solar Energy*, 78(2), 157-162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2004.08.016>
- Hejazizadeh, Z., Karbalaee, A., & Karbalaee, M. R. (2018). Estimating the Received Solar Radiation by Bird and Hulstrom Model in Isfahan Province. *Geography and Development*, 16(51), 159-174. <https://doi.org/10.22111/gdj.2018.3851> [In Persian]
- Irajpoor, A.A., & Esmeili, H. (2021). Estimation of spatio-temporal changes of net radiation received in Darab city using remote sensing and geographic information system. *Geography and human relations*, 4(3), 184-204. <http://dx.doi.org/10.22034/gahr.2021.305704.1612> [In Persian]
-

-
- Kazemi, J., & Mardi, H. (2012). An Investigation of Solar Radiation Data in Islamic Azad University, South Tehran Branch Weather Station. *Mechanical Engineering*, 20(80), 68-75. <https://www.researchgate.net/publication/234056107> [In Persian]
- Khalili, A. & Rezaei Sadr, H. (1997). Estimation of global solar radiation over Iran based on climatological data, *Geographical Research Journal*, 35-15. <https://www.researchgate.net/publication/330350308> [In Persian]
- Khosravi, M., Jahanbakhshasl, S., & Derakhshi, J. (2013). Estimating and Classification Solar Radiation On Horizontal Surfaces Using Climatic Parameters in GIS (Case Study: East Azarbaijan province). *Journal of geographic space*, 43(13), 39-63. <http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-657-en.html> [In Persian]
- Liengme, B. V. (1997). A guide to Microsoft Excel for scientists and engineers. <https://bayanbox.ir/view/8346939337370487254/Liengme-2015>
- Mishra, T., Rabha, A., Kumar, U., Arunachalam, K., & Sridhar, V. (2020). Assessment of solar power potential in a hill state of India using remote sensing and Geographic Information System. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19, 100370. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100370>
- Moieni, S., Javadi, S., Kokabi, M., & Nanshadi, M. (2010). Estimating the Solar Radiation in Iran by Using the Optimal Model. *IJE*, 13 (2), 1-10. <http://necjournals.ir/article33-1fa.html> [In Persian]
- Moradi, A. (2006). Preparation of solar radiation atlas of Iran using Meteosat satellite images, Ph.D thesis, Tarbiat Moalem University (Kharazmi), Tehran. [In Persian]
- Sabziparvar, A. A., & Shetaee, H. (2007). Estimation of global solar radiation in arid and semi-arid climates of East and West Iran. *Energy*, 32(5), 649-655. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.05.005>
- Safaii, B., Khalajiasadi, M., Taghizadeh, H., Jilavi, A., Taleghani, G., & Danesh, M. (2005). Estimating Solar Energy Potential in Iran and Related Radiation Atlas. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 33, 27-34. https://jonsat.nstri.ir/article_723.html?lang=en [In Persian]
- Safaripour, M. H., & Mehrabian, M. A. (2011). Predicting the direct, diffuse, and global solar radiation on a horizontal surface and comparing with real data. *Heat and mass transfer*, 47(12), 1537-1551. <http://doi.org/10.1007/s00231-011-0814-8>
- Tazik, E., Rezaei, A. A., Abkar, A., Alavipanah, S. K., Jahantab, Z., & Rahmati, A. (2015). Estimation of the instantaneous short wavelength solar radiation using satellite images of MODIS (Case study: Central regions of Iran). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 6(1), 17-30. <https://sanad.iau.ir/en/Article/903043?FullText=FullText>
- Tiris, M., Tiris, C., & Erdalli, Y. (1997). Water heating systems by solar energy. Marmara Research Centre, Institute of Energy Systems and Environmental Research, NATO TU-COATING, Gebze, Kocaeli, Turkey.
- Wang, J., Xie, Y., Zhu, C., & Xu, X. (2011). Daily Solar Radiation Prediction Based on Genetic Algorithm Optimization of Wavelet Neural Network. *International Conference on Electrical and Control Engineering*, September, Yichang, China, 16-18. <https://doi.org/10.1109/ICECENG.2011.6057583>
- Zhang, Y., Ren, J., Pu, Y., & Wang, P. (2020). Solar energy potential assessment: A framework to integrate geographic, technological, and economic indices for a potential analysis. *Renewable Energy*, 149, 577-586. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.071>

6. Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Cite this article: Fasihi, R., Bayatvarkeshi, M., & Taheri Tizro, A. (2024). Daily estimation of solar radiation in some climatic samples of Iran using meteorological data, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(3), 61-75. DOI: 10.22126/ATWE.2024.10737.1126

Publisher: Razi University

© The Author(s).





برآورد روزانه تابش خورشیدی در چند نمونه اقلیمی ایران با استفاده از داده‌های هواشناسی

روژین فصیحی^۱، مریم بیات ورکشی^۲، عبدالله طاهری تیزرو^۳

^۱ دانش آموخته دکتری علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: rojin.fasihi@yahoo.com

^۲ استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: m.bayat.v@gmail.com

^۳ نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران. رایانامه: ttizro@Basu.ac.ir

چکیده

با توجه به اهمیت مقدار تابش در کاربرد انرژی خورشیدی و وجود مشکلات فراوان در ثبت این پارامتر، لزوم برآورد مناسب تابش خورشیدی در مناطق مختلف کشور به‌ویژه نقاط فاقد اندازه‌گیری ضروری می‌باشد. در این مطالعه با استفاده از پارامترهای هواشناسی سرعت باد، دما (حداکثر، حداقل و میانگین)، رطوبت نسبی، ساعت آفتابی و بارندگی، روابط تجربی برآورد مقدار تابش خورشیدی در پنج اقلیم مختلف کشور پیشنهاد شد. روابط تجربی با استفاده از رگرسیون‌های چند متغیره بین تابش خورشیدی به‌عنوان متغیر وابسته و بقیه متغیرهای روزانه هواشناسی (به‌عنوان متغیرهای مستقل) استخراج و بر حسب معیارهای آماری دسته‌بندی شدند. بررسی انجام شده نشان داد که اقلیم نیمه خشک سرد گرم دارای بالاترین دقت بر اساس شاخص $nRMSE = 0/085$ در بین دیگر اقلیم‌ها می‌باشد و اقلیم خشک خنک گرم با مقدار $MBE = -1/15$ مگاژول بر سانتی‌متر مربع بر روز و $nRMSE$ معادل $0/11$ دارای بیش‌ترین خطا بین پارامترهای هواشناسی و ضعیف‌ترین برآورد در بین ۵ اقلیم مورد بررسی می‌باشد. در اقلیم نیمه خشک سرد گرم که بهترین برآورد تابش خورشیدی صورت گرفت از پارامترهایی از جمله دما (حداکثر، حداقل و میانگین)، بارش، ساعت آفتابی و سرعت باد استفاده شد. تاثیر پارامترهای مذکور در برآورد تابش خورشیدی یکسان می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اقلیم، تابش، رگرسیون، پارامتر هواشناسی

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۶ اردیبهشت ۱۴۰۳ اصلاح: ۱۲ تیر ۱۴۰۳ پذیرش: ۰۹ مرداد ۱۴۰۳ چاپ الکترونیکی: ۰۱ مهر ۱۴۰۳

استناد: فصیحی، ر.، بیات ورکشی، م. و طاهری تیزرو، ع. (۱۴۰۳). برآورد روزانه تابش خورشیدی در چند نمونه اقلیمی ایران با استفاده از داده‌های هواشناسی، فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، (۳)۴، ۶۱-۷۵، شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2024.10737.1126



مقدمه

تابش خورشیدی کل^۱ (GSR) پارامتری مهم به منظور طراحی و توسعه سیستم‌های مختلف انرژی خورشیدی می‌باشد (تریس و همکاران^۲، ۱۹۹۷). مفهوم تابش خورشیدی به این معناست که در طول یک دوره زمانی خاص، چه مقدار از انرژی خورشید در برخورد با یک سطح افقی در یک منطقه جذب می‌شود (آلموروکس و هونتوریا^۳، ۲۰۰۴، و وانگ و همکاران^۴، ۲۰۱۱). ایران کشوری آفتابی است و با توجه به کمبود منابع فسیلی، بهره‌برداری بهینه انرژی خورشیدی امری ضروری به نظر می‌رسد (جعفر کاظمی و مردی، ۱۳۹۰). در حال حاضر بیش از ۸۱ درصد از کل انرژی مصرفی جهان و بیش از ۹۵ درصد انرژی مصرفی در ایران را سوخت‌های فسیلی تامین می‌کنند. ادامه استفاده از سوخت‌های فسیلی موجب تشدید آلودگی هوا، آب و زمین و موجب تشدید گرمایش جهانی خواهد شد (مرادی، ۱۳۸۵). مطالعه وسیع و کاربردی درباره انرژی خورشید از دهه ۱۹۷۰ در اکثر نقاط آغاز و با توجه به شرایط اقلیمی و جغرافیایی مناطق مختلف، مدل‌های مناسبی ارائه گردید (صفایی و همکاران، ۱۳۸۴). به دلیل کمبود دستگاه‌های اندازه‌گیری و هزینه بالای دستگاه‌های تابش‌سنج، اطلاعات زیادی از میزان انرژی خورشیدی در دسترس نمی‌باشد. بنابراین، ارائه روش‌های آماری و تجربی که قادر به ارائه نتایج قابل قبول در برآورد تابش خورشیدی باشد، می‌تواند راه حل مناسبی برای برآورد این متغیر در نقاط فاقد اندازه‌گیری باشد (معینی و همکاران، ۱۳۸۹). در حالت کلی مدل‌های تجربی برآورد تابش خورشیدی در سه دسته مبتنی بر ساعات آفتابی (علیزاده و خلیلی، ۱۳۸۸)، مبتنی بر دمای هوا (بريستو و کمپیل^۵، ۱۹۸۴) و مبتنی بر ابرناکی (انبرگ و بولن^۶، ۲۰۰۵) قرار می‌گیرند.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

تحقیقات بسیاری در داخل و خارج از کشور جهت محاسبه تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین انجام گرفته است. از جمله این تحقیقات ایرج پور و اسمعیلی (۱۴۰۰)، تغییرات مکانی و زمانی تابش شهرستان داراب استان فارس را با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی برآورد نمودند. نتایج گواه آن بود که بیشترین تابش دریافتی متعلق به ماه فروردین می‌باشد. حجاری‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از دو مدل برد و هول استروم تابش خورشیدی دریافتی استان اصفهان را برآورد نمودند. نتایج نشان داد که این مدل توانایی خوبی در برآورد تابش دارد همچنین ماه جولای بیشترین تابش مستقیم را داشته است. تازیک و همکاران (۱۳۹۴) تابش لحظه‌ای طول موج کوتاه تابش خورشید را با استفاده از سنجنده مودیس برای استان‌های قم، اصفهان، تهران و سمنان برآورد نمودند. نتایج دقت مدل با شاخص خطاسنجی بررسی گردید و دقت بالای روش به کار برده شده را نشان داد. از دیگر مطالعات صورت گرفته در ایران می‌توان به پژوهش خسروی و همکاران (۱۳۹۲) در برآورد میزان تابش کل رسیده به سطح افقی در گستره استان آذربایجان شرقی با یک مدل رگرسیونی با به‌کارگیری عناصر اقلیمی شامل دماهای کمینه، بیشینه و میانگین، رطوبت کمینه، ابرناکی آسمان و ساعات آفتابی اشاره کرد. نتایج مطالعه نشان داد توزیع تابش سالانه استان آذربایجان شرقی از جنوب غرب به شمال و شمال شرق روند کاهشی دارد. ابراهیم‌پور و همکاران (۱۳۸۸)، با بررسی شدت تابش کل بر روی صفحه افقی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده سازمان هواشناسی کشور در یک دوره ۱۴ ساله (۲۰۰۵-۱۹۹۲) برای برخی از شهرهای کشور، یک روش جدید برای برآورد میزان تابش کل خورشیدی ارائه دادند. علیزاده و خلیلی (۱۳۸۸)، رابطه‌ای برای برآورد شدت تابش کل خورشید بر روی سطح افقی برای شهر مشهد معرفی نمودند. میثرا و همکاران^۷ (۲۰۲۰) پتانسیل دریافت انرژی تابشی خورشید کشور هلند را با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل، بررسی نمودند. آن‌ها علاوه تهیه نقشه کاربری اراضی مورد مطالعه، میزان تابش خورشیدی دریافت شده توسط هریک از طبقات کاربری را مشخص کردند. در پژوهش ژانگ و همکاران^۸ (۲۰۲۰) که در کشور چین انجام شد پتانسیل دریافت مقدار انرژی تابشی خورشید را از سه جنبه جغرافیایی، اقتصادی و فناوری مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد قسمت‌های غربی چین پتانسیل بیشتر جهت دریافت انرژی تابشی خورشید دارد. صفاری پور و مهرابیان (۲۰۱۱) با استفاده از مدل رگرسیون خطی و تاثیر ۷ پارامتر هواشناسی تابش خورشیدی روزانه را برآورد نمودند. سبزی پرور و شتایی (۲۰۰۷) با استفاده از پارامترهای هواشناسی، ساعت آفتابی، ابرناکی، رطوبت نسبی و میانگین حداکثر دما و قرار دادن پارامترها در مدل‌های تجربی متفاوت، مقدار میانگین روزانه انرژی خورشیدی را برای شهرهای مختلف ایران بدست آوردند. حق پرست و همکاران

¹ Global Solar Radiation

² Tiris et al

³ Almorox and Hontoria

⁴ Wang et al

⁵ Bristow and Campbell

⁶ Ehnberg and Bollen

⁷ Mishra

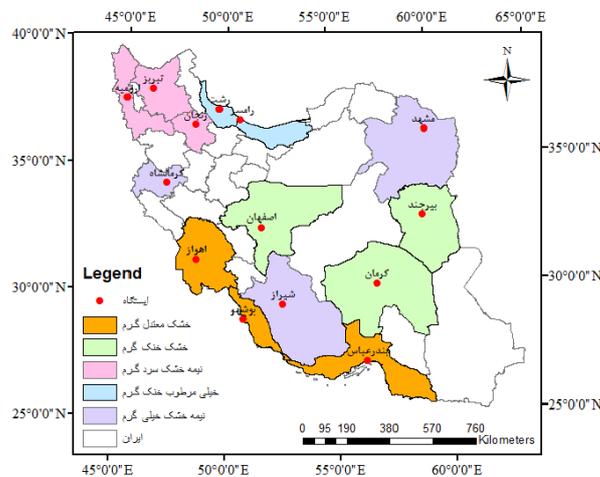
⁸ Zhang et al

(۲۰۰۷) با استفاده از اطلاعات هواشناسی ۲۲ ایستگاه سینوپتیک کشور مدلی بهینه جهت محاسبه میزان تابش کلی دریافتی از خورشید را ارائه نمودند

با توجه به این که تابش خورشیدی فقط در برخی ایستگاه‌های سینوپتیک کشور اندازه‌گیری می‌گردد و در پاره‌ای از موارد نیز دارای خلاهای آماری است، تعیین آن در نقاط فاقد ایستگاه در بسیاری از مطالعات از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. در این تحقیق، بر اساس داده‌های روزانه موجود در ۱۴ ایستگاه در یک دوره ۲۴ ساله، معادله رگرسیونی برآورد تابش خورشیدی در پنج اقلیم خیلی مرطوب خنک گرم، نیمه خشک خیلی گرم، نیمه خشک سرد گرم، خشک خنک گرم و خشک معتدل گرم ارائه گردید. در این مقاله تلاش شد تا ضمن کسب اطلاع از وضعیت تابش خورشیدی اقلیم‌های مختلف، با تکنیک بهینه‌سازی به‌توان با دقت بالا به مقدار تابش خورشیدی مناطق مختلف دست یافت.

روش پژوهش

در مطالعه حاضر، تابش خورشیدی در پنج اقلیم مورد بررسی قرار گرفت. تمامی ایستگاه‌ها طبق اقلیم نمای یونسکو دسته‌بندی شدند. بدین صورت که دو ایستگاه رامسر و رشت به‌عنوان نماینده اقلیم خیلی مرطوب خنک گرم، سه ایستگاه کرمانشاه، مشهد و شیراز به‌عنوان نماینده اقلیم نیمه خشک خیلی گرم، سه ایستگاه تبریز، زنجان و ارومیه به‌عنوان نماینده اقلیم نیمه خشک سرد گرم، ایستگاه‌های بیرجند، کرمان و اصفهان به‌عنوان نماینده اقلیم خشک خنک گرم و ایستگاه‌های اهواز، بوشهر و بندرعباس به‌عنوان نماینده اقلیم خشک معتدل گرم مورد بررسی قرار گرفتند. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی

داده‌های روزانه اندازه‌گیری شده سرعت باد (U)، دمای حداکثر (T_{max})، دمای حداقل (T_{min})، میانگین دمای هوا (T_{ave})، میانگین رطوبت نسبی (RH)، ساعت آفتابی (N) و بارش (R) به‌عنوان متغیرهای مستقل و مقدار تابش خورشیدی (RS) به‌عنوان متغیر وابسته، برای هریک از ایستگاه‌های ذکر شده از سازمان هواشناسی کل کشور طی سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۰ تهیه گردید. جدول (۱) مشخصات پارامترهای هواشناسی ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات میانگین پارامترهای هواشناسی ایستگاه‌های مورد مطالعه طی سال‌های ۱۹۸۶-۲۰۱۰

اقلیم	ایستگاه	دمای حداکثر (°C)	دمای حداقل (°C)	دمای میانگین (°C)	رطوبت نسبی (%)	ساعت آفتابی (hr)	بارش (mm)	باد (m/s)	تابش خورشیدی (MJ.cm ⁻² .day ⁻¹)
خیلی مرطوب	رامسر	۱۹/۹۷	۱۳/۸۸	۱۶/۹۲	۹۷/۸۳	۴/۴۰۷	۳/۳۹	۱/۶۷	۱۵۲۰/۸۶
خنک گرم	رشت	۲۰/۷۹	۱۲/۰۶	۱۶/۴۲	۸۳/۴۳	۴/۷۰	۴/۱۹	۱/۷۲	۱۶۶۲/۵۲
نیمه خشک	کرمانشاه	۲۳/۷۹	۷/۰۳	۱۵/۳۹	۴۴/۰۸	۸/۰۸	۱/۱۴	۳/۰۶	۱۲۹۶/۱۶
خیلی گرم	مشهد	۲۱/۷۲	۸/۸۰	۱۵/۲۶	۵۲/۱۶	۸/۰۳	۰/۶۷۴	۲/۳۵	۱۴۲۰/۳۸
	شیراز	۲۵/۹۳	۱۰/۴۶	۱۸/۱۹	۴۰/۱۸	۹/۱۵	۰/۸۲۰	۱/۸۲	۱۴۲۲/۶۲
نیمه خشک	تبریز	۱۹/۵۷	۸/۳۰	۱۳/۹۱	۵۰/۳۴	۷/۹۸	۰/۶۵۶	۴/۲۷	۱۳۴۶/۸۶
سرد گرم	زنجان	۱۷/۷۶	۳/۷۶	۱۰/۷۶	۵۴/۰۳	۷/۹۴	۰/۷۷۲	۲/۷۲	۶۴۱/۵۵
	ارومیه	۱۷/۷۵	۵/۳۱	۱۱/۵۳	۵۸/۹۶	۷/۹۹	۰/۸۰۸	۲/۱۹	۵۸۳/۲۷
خشک خنک	بیرجند	۲۴/۵۳	۸/۴۵	۱۳/۵۷	۳۵/۵۴	۹/۰۰۱	۰/۴۷۷	۲/۸۳	۱۹۳۷/۰۳
گرم	کرمان	۲۵/۴۲	۷/۴۱	۱۶/۴۲	۳۱/۹۶	۹/۱۳	۰/۳۳۸	۳/۲۷	۱۷۲۲/۵۶
	اصفهان	۲۴/۲۸	۹/۹۷	۳۵/۶۲	۳۵/۶۲	۹/۱۰	۰/۳۲۷	۱/۷۲	۱۰۶۸/۴۲
خشک معتدل	اهواز	۳۲/۷۰	۱۸/۸۴	۲۵/۵۸	۴۲/۷۴	۸/۶۳	۰/۶۷۳	۳/۱۹	۱۸۴۱/۷۴
گرم	بوشهر	۳۰/۰۲	۲۰/۰۷	۲۵/۰۵	۶۳/۸۵	۸/۲۵	۰/۵۸۶	۳/۰۷	۴۶۱/۴۶
	بندرعباس	۳۲/۲۲	۲۱/۸۱	۲۷/۰۱	۶۵/۰۱	۸/۷۹	۰/۷۱۹	۲/۸۹	۸۲۴/۸۰

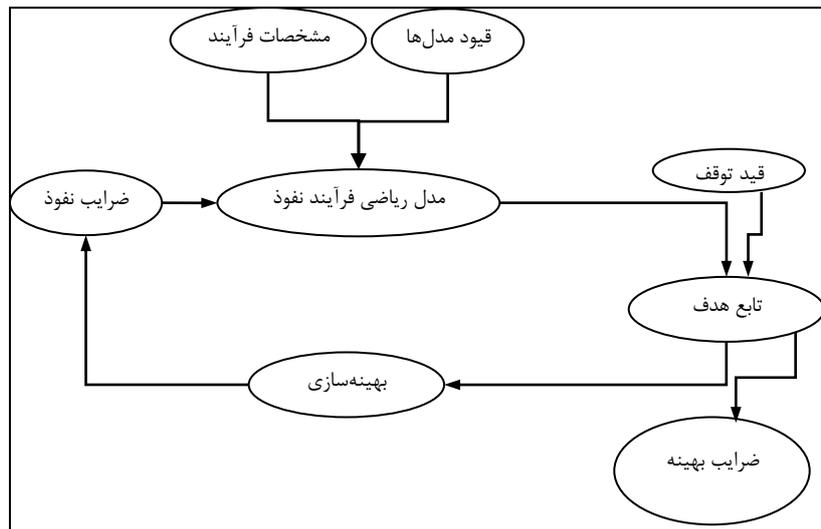
پس از تهیه اطلاعات و کنترل کیفی آن‌ها، با استفاده از برازش رگرسیون خطی چند متغیره تحت نرم‌افزار SPSS اقدام به برآورد تابش خورشیدی گردید. روابط تجربی برای هر اقلیم جداگانه محاسبه شد. جهت تعیین همبستگی بین تابش خورشیدی و دیگر پارامترهای هواشناسی، معادله همبستگی خطی چند متغیره زیر، بین متغیر وابسته (Y) و متغیرهای مستقل (X) در نظر گرفته شد:

$$Y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (1)$$

که در آن، Y متغیر پیش‌بینی شونده، x_1 ، x_2 و x_n متغیرهای پیش‌بینی کننده و a_1 ، a_2 و a_n ضرایب ثابت همبستگی‌اند. پس از تعیین ضرایب هر یک از مدل‌ها، به‌مطور بهبود نتایج اقدام به بهینه‌سازی ضرایب معادلات شد. بدین منظور با اعمال محدوده‌ها، قیود و ویژگی‌های تابش به‌روش تحلیل رگرسیونی در محیط Solver نرم‌افزار Excel انجام شد. Micro Soft Excel همراه با Visual Basic یک نرم‌افزار چند منظوره با ابزار مربوط به کارهای ریاضی و آماری است (بلاچ^۱، ۲۰۰۰، و لانگمی^۲، ۱۹۹۷). بهینه‌سازی تابش برآوردی مطابق شکل (۲)، در سه بخش مدل ریاضی تابش، تابع هدف و روش بهینه‌سازی انجام شد.

¹ Bloch

² Liengme



شکل ۲. ساختار روش بهینه‌سازی مورد استفاده

در بخش مدل ریاضی، سلول هدف هر یک از پنج مدل به همراه قیدهایی محدود کننده در یک صفحه کاری تعریف شد. به طوریکه پارامتر دما می‌تواند مقدار منفی داشته باشد اما سایر پارامترهای مورد بررسی باید مثبت باشند و مقدار منفی ندارند. نتایج اجرای اول برنامه به عنوان مقادیر ضرایب اولیه غیر بهینه‌سازی لحاظ شد که Solver Excel از آن‌ها در ادامه فرآیند بهینه‌سازی بهره گرفت. فرآیند بهینه‌سازی، در واقع سلول‌های تغییر یافته هستند که با تغییر ضرایب معادلات جدول (۱)، سلول هدف بهینه می‌گردد. در نهایت نتایج به صورت جداول برای کاربر آماده‌سازی می‌شود. با بروز هر گونه تغییر در متغیرهای ورودی، حل مساله بر اساس تابع هدف (سلول هدف) و ارضاء، شرط توقف الگوریتم است. شرط توقف برای خاتمه فرآیند بهینه‌سازی ضرایب در Solver Excel حداقل‌سازی اختلاف تابش خورشیدی تجمعی مشاهداتی با برآوردی به روش حداقل مربعات خطا مطابق رابطه (۱)، بود.

$$f = \min [\text{SUM}(I_a - I_p)^2] \quad (2)$$

که f نشان‌دهنده اختلاف بین مقادیر مشاهداتی (I_a) و برآوردی تابش (I_p) است.

در صورت عدم ارضاء شرط توقف در رابطه (۱)، الگوریتم با ایجاد یک حلقه تکرار مناسب نسبت به بهینه‌سازی خودکار بر روی همان صفحه کاری عمل می‌نماید. تکرار عملیات تا زمان عدم بهبود و تغییر در ضرایب پیشنهادی ادامه می‌یابد.

به منظور ارزیابی پژوهش انجام شده مقایسه نتایج بر مبنای شاخص‌های خطاستجی مجذور میانگین مربعات خطای نرمال (nRMSE) و میانگین سوگیری (MBE) طبق روابط (۳) و (۴) انجام شد. در این پژوهش از شاخص ضریب همستگی (r) طبق رابطه (۵) نیز استفاده شد.

$$nRMSE = \frac{1}{\bar{y}} \sqrt{\text{mean}(e_i^2)}, i = 1, n; \text{ and}$$

$$e_i = (Y_i - X_i) \quad \dots \quad (3)$$

$$MBE = \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - Y_i)}{n} \quad (4)$$

$$r = \frac{(\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})(Y - \bar{Y}))^2}{(\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2)(\sum_{i=1}^n (Y - \bar{Y})^2)} \quad (5)$$

که در این روابط: \bar{y} : ضریب نرمال‌سازی، که معمولاً برابر با حداکثر مقدار مشاهداتی در افق پیش‌بینی یا تفاوت بین مقادیر حداکثر و حداقل است. ضریب نرمال‌سازی را می‌توان در کل بازه زمانی یا افق زمانی یا بازه کوتاه مدت مشاهده محاسبه کرد. X مقدار مشاهداتی در زمان i مقدار برآوردی در زمان i است. \bar{X} و \bar{Y} میانگین X و Y و n تعداد کل داده‌ها است.

یافته‌ها

مقادیر حداکثر، حداقل و میانگین پارامترهای هواشناسی در پنج اقلیم مورد بررسی در جدول (۲) آورده شده است. میانگین تابش خورشیدی بیرجند با ۱۹۳۷/۰۳ مگاژول بر سانتی‌متر مربع بر روز و بوشهر با ۴۶۱/۴۶ مگاژول بر سانتی‌متر مربع بر روز بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار را در بین ایستگاه‌های موجود ثبت کرده‌اند. رامسر با ۴/۴۰۷ ساعت کمترین و شیراز با ۹/۱۵ ساعت بیش‌ترین میانگین ساعت آفتابی را دارد. حداقل میانگین رطوبت نسبی به کرمان با ۳۱/۹۶ درصد و حداکثر آن به رامسر با ۸۳/۹۷ درصد تعلق دارد. بندر عباس با ۲۱/۸۱

درجه سانتی گراد بیشترین میانگین حداقل دما و کمترین آن را زنجان با $3/76$ درجه سانتی گراد داراست. بیشترین دمای حداکثر در اهواز ($32/70$ درجه سانتی گراد) و ارومیه با $17/75$ درجه سانتی گراد کمترین حداکثر دما را دارد. در جدول (۲) همبستگی بین پارامترهای هواشناسی (دمای حداکثر، حداقل و میانگین، رطوبت نسبی، ساعت آفتابی، بارش و باد) اقلیم‌های مورد بررسی با تابش خورشیدی آورده شده است. تمامی پارامترهای ذکر شده در سطح ۹۹ درصد با تابش خورشیدی همبستگی معنی‌دار داشتند.

جدول ۲. ضریب همبستگی بین پارامترهای هواشناسی و تابش خورشیدی اقلیم‌های مورد بررسی

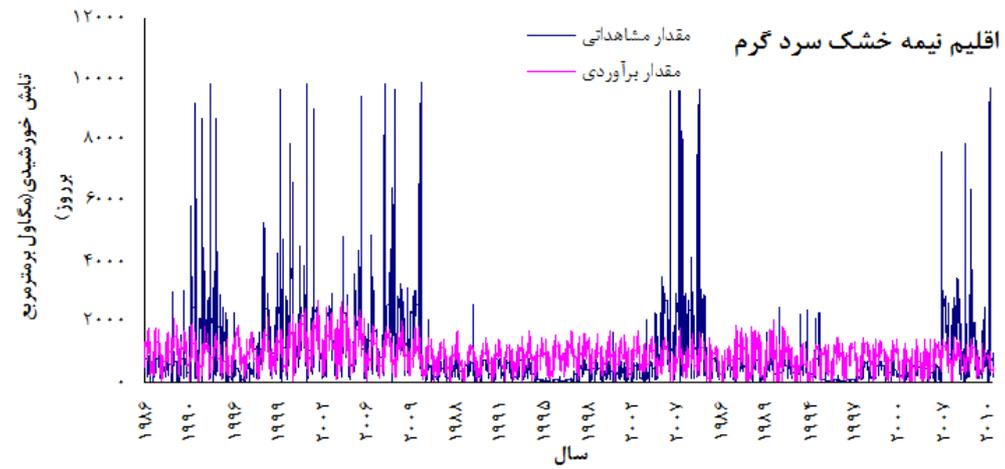
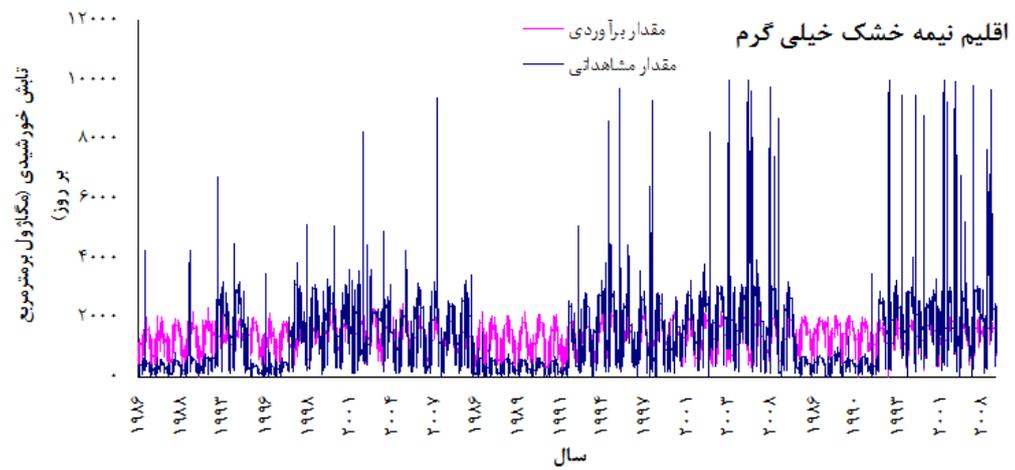
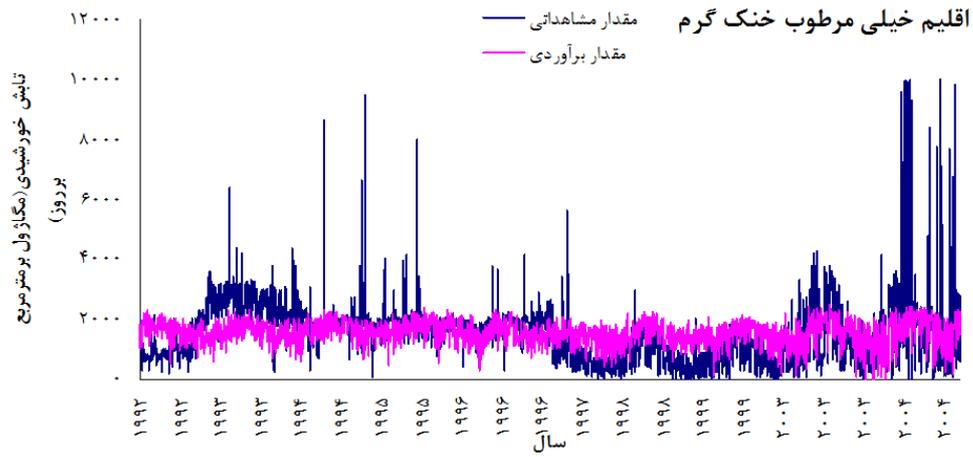
تابش خورشیدی (مگاژول بر سانتی‌متر مربع بر روز)					
پارامتر هواشناسی	اقلیم خیلی مرطوب	اقلیم نیمه خشک	اقلیم نیمه خشک	اقلیم خشک	اقلیم خشک
دمای حداکثر ($^{\circ}C$)	خنک گرم	خیلی گرم	سرد گرم	خنک گرم	معتدل گرم
دمای حداقل ($^{\circ}C$)	۰/۱۷۶	۰/۳۵۷	۰/۳۲۲	۰/۲۹۶	۰/۳۴۱
دمای میانگین ($^{\circ}C$)	۰/۰۹۵	۰/۳۲۳	۰/۳۲۴	۰/۲۱۹	۰/۱۷۳
رطوبت نسبی (%)	۰/۱۴۱	۰/۳۵۲	۰/۳۲۹	۰/۱۳۴	۰/۲۶۹
ساعت آفتابی (hr)	-۰/۰۷۴	-۰/۳۳۱	-۰/۲۹۴	-۰/۲۶۸	-۰/۴۸۵
بارش (mm)	۰/۲۷۳	۰/۳۵۱	۰/۲۸۰	۰/۲۶۸	۰/۲۲۸
باد (m/s)	-۰/۱۰۹	-۰/۱۳۶	-۰/۰۹۰	-۰/۰۹۱	-۰/۰۴۸
	-۰/۲۳۱	۰/۱۴۹	۰/۲۹۲	۰/۰۸۳	۰/۲۱۵

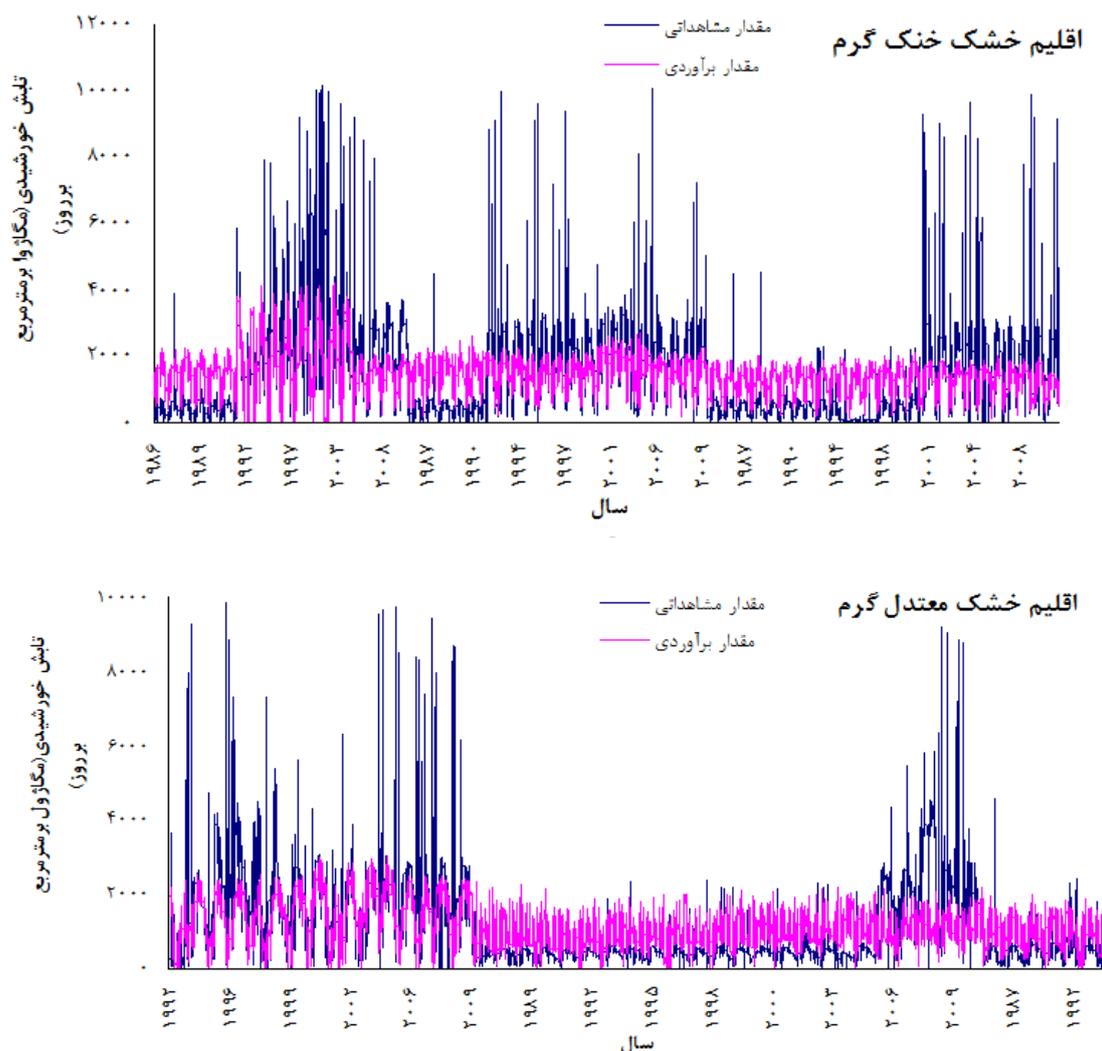
بهترین معادلات رگرسیونی به‌دست آمده از پارامترهای هواشناسی با استفاده از نرم‌افزار SPSS برای اقلیم‌های مختلف در جدول (۳) آورده شده است. که در آن برای هر یک از ایستگاه‌ها میزان خطا بین پارامترهای موجود محاسبه شده است.

جدول ۳. مدل رگرسیونی تابش و پارامترهای هواشناسی در اقلیم‌های مورد مطالعه

اقلیم	معادلات مدل رگرسیونی	MBE ($MJ.cm^{-2}.day^{-1}$)	nRMSE (-)
خیلی مرطوب خنک گرم	$RS = -7/551 RH + 11/053 Tmax - 169/063 U + 54/583 N + 1918/268$	۰/۰۲	۰/۰۹۹
نیمه خشک خیلی گرم	$RS = -8/219 R + 21/495 Tmin + 71/222 U + 72/044 N + 417/452$	-۰/۰۶	۰/۰۹۳
نیمه خشک سرد گرم	$RS = 29/066 Tmax - 8/336 R + 54/562 Tmin + 41/76 N + 97/293 U - 63/869 Tmean + 152/962$	۰/۵۰	۰/۰۸۵
خشک خنک گرم	$RS = 9/37 Tmin + 3/88 RH + 37/829 U + 53/966 N - 79/720 Tmean + 88/951 Tmax - 197/056$	-۱/۱۵	۰/۱۱
خشک معتدل گرم	$RS = 3/456 R - 53/259 Tmean + 61/718 Tmax + 70/30 U + 17/94 N - 19/018 RH + 1233/79$	-۰/۸۴	۰/۰۹۱

بررسی دقت معادلات رگرسیونی به‌دست آمده با استفاده از دو شاخص MBE و nRMSE مورد ارزیابی قرار گرفت، تا به‌توان بهترین معادله رگرسیونی جهت برآورد تابش خورشیدی را در بین ۵ اقلیم مورد بررسی تخمین زد. نمودار سری زمانی مقادیر مشاهداتی و برآوردی تابش خورشیدی ۵ اقلیم طی دوره آماری مورد بررسی در شکل (۳) ارائه شده است.





شکل ۳. نمودارهای سری زمانی اقلیم‌های مورد بررسی

پارامترهای هواشناسی به صورت روزانه برای به دست آوردن معادله رگرسیونی در سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۰ مورد بررسی قرار گرفت در اقلیم خیلی مرطوب خنک گرم همان گونه که در جدول (۴) نیز ذکر شد و در نمودار سری زمانی آن مقادیر تابش مشاهداتی بیش از مقادیر تابش برآوردی از روابط رگرسیونی می‌باشد.

بحث

طبق اطلاعات به دست آمده از جدول (۲) پارامترهای هواشناسی دماهای بیشینه، کمینه و میانگین، ساعت آفتابی و باد با تابش خورشیدی همبستگی مثبت داشته یعنی با افزایش هر پارامتر مقدار تابش نیز روند افزایشی را دارا بوده به جز بارش و رطوبت نسبی که همبستگی آن‌ها با تابش منفی بوده که نشان از رابطه عکس بین این دو پارامتر با تابش خورشیدی می‌باشد. بیشترین همبستگی بین رطوبت نسبی و تابش خورشیدی ($-0/485$) و کمترین همبستگی بین بارش و تابش با مقدار $-0/048$ در اقلیم خشک معتدل گرم است. رابطه‌های ارائه شده در جدول (۳) برای پنج اقلیم نشان می‌دهد بیشترین میزان خطا بر اساس شاخص $nRMSE$ و MBE در اقلیم خشک خنک گرم به ترتیب ۱۱ درصد و $-1/15$ مگاوات بر سانتی‌متر مربع بر روز می‌باشد. نتایج خطاسنجی این اقلیم همسو با نتایج پژوهش جهانتیغ و پیری (۱۴۰۲) می‌باشد که ایستگاه کرمان در این اقلیم را بررسی کردند و نشان دادند مقدار شاخص $NRMSE$ (معادل ۱۵ درصد) نزدیک به ارزیابی این پژوهش می‌باشد. در مقابل کمترین میزان خطا بر اساس دو شاخص مذکور در اقلیم نیمه خشک سرد گرم است که به ترتیب $8/5$ درصد و $0/50$ مگاوات بر سانتی‌متر مربع بر روز است. برای برآورد معادله رگرسیونی در اقلیم نیمه خشک سرد گرم همانطور که نتایج نشان می‌دهد متغیرهای وارد شده در بهترین معادله رگرسیون در اقلیم نیمه خشک سرد گرم به ترتیب عبارت بودند از: دمای حداکثر،

بارش، دمای حداقل، ساعت آفتابی، سرعت باد و دمای میانگین. کاربرد معادلات رگرسیونی در پژوهش فصیحی و بیات ورکشی (۱۳۹۵) برای ایستگاه تبریز واقع در اقلیم ذکر شده ارائه گردید و از پارامترهای مشابه استفاده نمودند که همسو با نتایج این پژوهش است. همچنین خسروی و همکاران (۱۳۹۲) برای ایستگاه تبریز در اقلیم نیمه خشک سرد گرم استفاده از معادله رگرسیونی را برای برآورد تابش روش مناسبی معرفی نمودند. در اقلیم خشک خنک گرم از دمای حداکثر و حداقل و میانگین، رطوبت نسبی، ساعت آفتابی و سرعت باد استفاده گردید. بارش، دمای حداقل، سرعت باد و ساعت آفتابی در اقلیم نیمه خشک خیلی گرم کاربرد داشته، در اقلیم خشک خنک گرم دمای حداکثر و حداقل و میانگین، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعت آفتابی مورد استفاده قرار گرفته در نهایت در اقلیم خشک معتدل گرم بارش، از دمای حداکثر و میانگین همراه سرعت باد، ساعت آفتابی و رطوبت نسبی استفاده شد. در اقلیم خیلی مرطوب خنک گرم، نیمه خشک خیلی گرم و خشک معتدل گرم ملاحظه می‌شود که میزان دقت برآورد تابش بین پارامترهای هواشناسی تقریباً در یک بازه تغییر می‌باشد (حدود ۹ درصد). از شاخص MBE ارائه شده بین پارامترهای هواشناسی می‌توان دریافت که حداقل مقدار بیش برآورد با مقدار 0.2 مگاژول بر سانتی‌متر مربع بر روز در اقلیم خیلی مرطوب خنک گرم و حداکثر آن در اقلیم نیمه خشک سرد گرم (0.5) می‌باشد. شکل (۳) نمودارهای سری زمانی ایستگاه‌های بررسی شده را در طول دوره آماری مربوطه نشان می‌دهد. در کل برآورد تابش خورشیدی با استفاده از معادلات رگرسیونی بر اساس شاخص‌های خطاسنجی مورد بررسی که کم‌ترین میزان خطا و متقابلاً بیشترین مقدار دقت را داشته باشد در اقلیم نیمه خشک سرد گرم است زیرا دقت $8/5$ درصد بر اساس شاخص nRMSE نشان دهنده دقت بالای معادله جهت برآورد تابش است و مقدار MBE آن نیز 0.5 می‌باشد و بیش برآورد معادله ارائه شده را اثبات می‌کند.

اقلیم نیمه خشک خیلی گرم طبق نتایج شکل (۳) نشان می‌دهد که مقادیر تابش برآوردی تقریباً دارای بازه تغییرات ثابتی بوده و حداکثر مقدار آن تقریباً 2000 مگاژول بر سانتی‌متر مربع بر روز می‌باشد اما مقدار تابش مشاهداتی بیشتر از این مقدار می‌باشد. اقلیم نیمه خشک سرد گرم طبق نمودار و جدول (۴) میزان MBE، 0.501 - مگاژول بر سانتی‌متر مربع بر روز را بین پارامترها داراست و مقدار و مقدار تابش برآوردی از 2000 مگاژول بر سانتی‌متر مربع فراتر نرفته است. در برخی از سال‌های آماری مقدار مشاهداتی بیش از مقدار برآوردی است. اقلیم نیمه خشک سرد گرم نیز سری زمانی آن مانند باقی اقلیم‌ها بوده و از مقدار ذکر شده بالاتر نرفته و در اقلیم خشک خنک گرم که دارای MBE با مقدار $1/15$ - مگاژول بر سانتی‌متر مربع بر روز بین پارامترهای هواشناسی می‌باشد که در جدول (۴) نیز ذکر گردیده و در برخی از دوره‌های بررسی شده مقدار مشاهداتی از برآوردی بیش‌تر است و نوسان زیادی بین مقدار تابش برآوردی و مشاهداتی نمایان است و مقدار برآوردی آن تا حدود 4000 مگاژول بر سانتی‌متر مربع بر روز می‌باشد. در نهایت اقلیم خشک معتدل گرم نیز با MBE، 0.558 - مگاژول بر سانتی‌متر مربع بر روز نشان دهنده کم برآورد تابش خورشیدی در این اقلیم است.

نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه انرژی تابش خورشیدی به‌عنوان پارامتری مهم و تاثیرگذار بر فرآیندهای روی زمین از جمله منابع آب است، بررسی آن ضروری می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از معادلات به دست آمده از مدل رگرسیونی مقدار تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین در پنج اقلیم مختلف در سطح کشور که شامل ۱۴ ایستگاه می‌باشد، برآورد گردید. رویت شد که مقدار تابش مشاهداتی در ۳ اقلیم نیمه خشک خیلی گرم، خشک خنک گرم و خشک معتدل گرم کمتر از مقدار مشاهداتی و در دو اقلیم خیلی مرطوب خنک گرم و نیمه خشک سرد گرم بیشتر از مقدار تابش برآوردی است. طبق معادلات رگرسیونی میزان خطای به دست آمده در اقلیم نیمه خشک سرد گرم کمترین میزان خطا و اقلیم خشک خنک گرم بیشترین مقدار خطا را دارد. تغییرات درصد خطای برآورد تابش خورشیدی سه اقلیم دیگر نسبت به یکدیگر زیاد نیست و حدود ۹ درصد است. پارامترهای هواشناسی مورد استفاده در اقلیم نیمه خشک سرد گرم دما، بارش، ساعت آفتابی و سرعت باد بود. با توجه به محدودیت اندازه‌گیری تابش خورشیدی در سطح کشور، اهمیت برآورد این پارامتر هواشناسی به‌منظور استفاده از آن در مدیریت منابع آبی توسط مدیران ضروری می‌باشد.

منابع

- ابراهیم پور، عبدالسلام، معرفت، مهدی، و نیری، هادی. (۱۳۸۸). ارائه یک رابطه جدید برای تخمین میزان تابش کل در اقلیم های مختلف ایران. فصلنامه فضای جغرافیایی، ۹(۲۷)، ۲۲-۱. <https://ensani.ir/fa/article/124821>
- جهانتیغ، نبی، و پیری، جمشید. (۱۴۰۲). تخمین میزان تابش خورشیدی در اقلیم های مختلف ایران با استفاده از روش های هیبریدی یادگیری ماشین. علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، ۳۵(۲)، ۳۷-۵۴. <https://doi.org/10.22067/jacsm.2022.79378.1144>
- حجازی زاده، زهرا، کربلائی درئی، علیرضا، و کربلائی، محمد رضا. (۱۳۹۷). برآورد تابش خورشیدی دریافتی سطح زمین در استان اصفهان با مدل برد و هول استورم. نشریه جغرافیا و توسعه، ۱۶(۵۱)، ۱۷۴-۱۵۹. <http://dx.doi.org/10.22111/gdij.2018.3851>
- خسروی، محمود، جهانبخش اصل، سعید، و درخشی، جعفر. (۱۳۹۲). برآورد و پهنه بندی تابش خورشیدی دریافتی در سطح افقی با استفاده از پارامترهای اقلیمی در محیط GIS مطالعه موردی: استان آذربایجان شرقی. فضای جغرافیایی، ۴۳(۱۳)، ۶۳-۳۹. <http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-657fa.html>
- خلیلی، علی، و رضایی صدر، حسن. (۱۳۷۶). برآورد تابش کلی خورشید در گستره ایران بر مبنای داده های اقلیمی، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۴۶، ۳۵-۱۵. <https://www.researchgate.net/publication/330350308>
- صفایی، بتول، خلجی اسدی، مرتضی، تقی زاده، حبیب، جیلاوی، افسانه، طالقانی، گیتی، و دانش، ماندانا. (۱۳۸۴). برآورد پتانسیل تابش خورشیدی در ایران و تهیه اطلس تابشی آن. مجله علوم و فنون هسته ای، ۲۵(۱)، ۳۴-۲۷. https://jonsat.nstri.ir/article_723.html?lang=en
- علیزاده، امین، و خلیلی، نجمه. (۱۳۸۸). تعیین ضرایب مدل آنگستروم و توسعه یک مدل رگرسیونی برآورد تابش خورشیدی (مطالعه موردی: منطقه، مشهد). مجله علوم و صنایع کشاورزی (آب و خاک)، ۲۳(۱)، ۲۸۳-۲۲۹. <http://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.1554>
- فصیحی، روزین، و بیات ورکشی، مریم. (۱۳۹۵). برآورد تابش خورشیدی با مدل های رگرسیونی در دواقلیم مختلف. اولین کنفرانس بین المللی آب، محیط زیست و توسعه پایدار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. ۸-۱. <http://www.icwesd.ir>
- مرادی، اسحق. (۱۳۸۵). تهیه اطلس تابش خورشیدی ایران با استفاده از تصاویر ماهواره Meteosat، رساله دکتری، دانشگاه تربیت معلم (خوارزمی) تهران، تهران، ایران.
- معینی، سام، جوادی، شهرام، کوبی، محسن، و دهقان منشادی، محسن. (۱۳۸۹). برآورد تابش خورشیدی در ایران با استفاده از یک مدل پهنه. نشریه انرژی ایران، ۱۳(۲)، ۱۰-۱. <http://necjournals.ir/article33-1fa.html>

References

- Alizadeh, A., & khalili, N. (2009). Estimation of Angstrom Coefficient and Developing a Regression Equation for Solar Radiation Estimation (Case study: Mashhad). Journal of Water and Soil, 23(1), 229-238. <http://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.1554> [In Persian]
- Almorox, J. Y., & Hontoria, C. J. E. C. (2004). Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. Energy Conversion and Management, 45(9-10), 1529-1535. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2003.08.022>
- Bloch, S. C. (2000). Analysis Toolpak: Fourier Analysis. Excel for Engineers and Scientists. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1-11. <https://www.wiley.com/en-au/Fourier+Analysis-p-9781118165151>
- Bristow, K. L., & Campbell, G. S. (1984). On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. Agricultural and forest meteorology, 31(2), 159-166. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(84\)90017-0](https://doi.org/10.1016/0168-1923(84)90017-0)

- Ebrahimpour, A., Marefat, M., & Nayeri, H. (2009). Presenting a new relationship for estimating the amount of total radiation in different climates of Iran. *Scientific-research journal of geographical space*; 9(27), 1-22. <https://ensani.ir/fa/article/124821/> [In Persian]
- Ehnberg, J. S., & Bollen, M. H. (2005). Simulation of global solar radiation based on cloud observations. *Solar Energy*, 78(2), 157-162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2004.08.016>
- Fasihi, R., & Bayatvarkeshi, M. (2016). Estimation of solar radiation with regression models in two different climates. 1st international conference on water, environment and sustainable development, Department, Technical Faculty of Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran. 1-8. <http://www.icwesd.ir> [In Persian]
- Hejazizadeh, Z., Karbalaee, A., & karbalaee, M. R. (2018). Estimating the Received Solar Radiation by Bird and Hulstrom Model in Isfahan Province. *Geography and Development*, 16(51), 159-174. <https://doi.org/10.22111/gdij.2018.3851> [In Persian]
- Irajpoor, A.A., & Esmeili, H. (2021). Estimation of spatio-temporal changes of net radiation received in Darab city using remote sensing and geographic information system. *Geography and human relations*. 4(3), 184-204. <http://dx.doi.org/10.22034/gahr.2021.305704.1612> [In Persian]
- Jahantigh, N., & Piri, J. (2023). Estimation of solar radiation in different climates of Iran using hybrid machine learning methods. *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, 35(2), 37-54. <https://doi.org/10.22067/jacsm.2022.79378.1144> [In Persian]
- Kazemi, J., & Mardi, H. (2012). An Investigation of Solar Radiation Data in Islamic Azad University, South Tehran Branch Weather Station. *Mechanical Engineering*, 20(80), 68-75. <https://www.researchgate.net/publication/234056107>
- Khalili, A. & Rezaei Sadr, H. (1997). Estimation of global solar radiation over Iran based on climatological data, *Geographical Research journal*, 46, 35-15. <https://www.researchgate.net/publication/330350308> [In Persian]
- Khosravi, M., Jahanbakhshasl, S., & Derakhshi, J. (2013). Estimating and Classification Solar Radiation On Horizontal Surfaces Using Climatic Parameters in GIS (Case Study: East Azarbaijan province). *Journal of geographic space*, 43(13), 39-63. <http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-657-en.html> [In Persian]
- Liengme, B. V. (1997). A guide to Microsoft Excel for scientists and engineers. <https://bayanbox.ir/view/8346939337370487254/Liengme-2015>
- Mishra, T., Rabha, A., Kumar, U., Arunachalam, K., & Sridhar, V. (2020). Assessment of solar power potential in a hill state of India using remote sensing and Geographic Information System. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19, 100370. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100370>
- Moieni, S., Javadi, S., Kokabi, M., & Nanshadi, M. (2010). Estimating the Solar Radiotion in Iran by Using the Optimal Model. *IJE*, 13(2), 1-10. <http://necjournals.ir/article33-1fa.html> [In Persian]
- Moradi, A. (2006). Preparation of solar radiation atlas of Iran using Meteosat satellite images, Ph.D thesis, Tarbiat Moalem University (Kharazmi), Tehran, Tehran, Iran. [In Persian]
- Sabziparvar, A. A., & Shetaee, H. (2007). Estimation of global solar radiation in arid and semi-arid climates of East and West Iran. *Energy*, 32(5), 649-655. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.05.005>
- Safaii, B., Khalajiasadi, M., Taghizadeh, H., Jilavi, A., Taleghani, G., & Danesh, M. (2005). Estimating Solar Energy Potential in Iran and Related Radiation Atlas. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 25(1), 27-34. https://jonsat.nstri.ir/article_723.html?lang=en [In Persian]

- Safaripour, M. H., & Mehrabian, M. A. (2011). Predicting the direct, diffuse, and global solar radiation on a horizontal surface and comparing with real data. *Heat and mass transfer*, 47(12), 1537-1551. <http://doi./ 10.1007/s00231-011-0814-8>
- Tazik, E., Rezaei, A. A., Abkar, A., Alavipanah, S. K., Jahantab, Z., & Rahmati, A. (2015). Estimation of the instantaneous short wavelength solar radiation using satellite images of MODIS (Case study: Central regions of Iran). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 6(1), 17-30. <https://sanad.iau.ir/en/Article/903043?FullText=FullText>
- Tiris, M., Tiris, C., & Erdalli, Y. (1997). Water heating systems by solar energy. Marmara Research Centre, Institute of Energy Systems and Environmental Research, NATO TU-COATING, Gebze, Kocaeli, Turkey. <https://books.akademisyen.net/index.php/akya/catalog/download/1431/1464/33193?inline=1>
- Wang, J., Xie, Y., Zhu, C., & Xu, X. (2011). Daily Solar Radiation Prediction Based on Genetic Algorithm Optimization of Wavelet Neural Network. *International Conference on Electrical and Control Engineering*, September, Yichang, China. 16–18. <https://doi.org/10.1109/ICECENG.2011.6057583>
- Zhang, Y., Ren, J., Pu, Y., & Wang, P. (2020). Solar energy potential assessment: A framework to integrate geographic, technological, and economic indices for a potential analysis. *Renewable Energy*, 149, 577-586. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.071>



Identifying challenges in water quality measurement and proposing IoT-based solution

Seyed Hashem Mirbahari¹ , Asadollah Shahbahrami² , Soodabeh Poorzaker Arabani³ 

¹ Ph.D. Student of Software Engineering, Department of Computer, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran. E-mail: mirbahari@gmail.com

² Corresponding Author, Professor, Computer Engineering Department, University of Guilan, Rasht, Iran., and Department of Computer, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran. E-mail: shahbahrami@guilan.ac.ir

³ Assistant Professor, Department of Computer Engineering and Information Technology, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran. E-mail: soodabeharabani@gmail.com

ABSTRACT

Rivers serve as vital resources for human communities and ecosystems, necessitating precise and continuous monitoring to ensure their health. Rivers are subjected to contamination by numerous chemical, physical and biological pollutants. Water quality assessment is a process wherein experts and researchers from organizations such as environmental agencies and universities traditionally measure parameters affecting water quality, such as water temperature, pH, transparency, turbidity, dissolved oxygen, nitrate levels, among others. Subsequently, the Water Quality Index (WQI) is calculated according to specific standards, such as IRWQIsc and NSFWQI. The objective of this paper encompasses two sections. In the first section, using the Delphi-Fuzzy method, we identify parameters critical to water quality assessment, the existing challenges in traditional methods, and new requirements based on artificial intelligence and IoT technologies. This was accomplished with the assistance of selected experts using the snowball sampling method from relevant organizations such as the Environmental Protection Agency and the Water and Sewerage Department. The data analysis results, processed by appropriate softwares, indicated that the measurement of heavy metals and chlorophyll-a ranked the highest and the lowest in priority, respectively. Additionally, challenges such as outdated water quality assessment practices, high assessment costs, significant errors, and a shortage of expert professionals in organizations were identified. Furthermore, all experts agreed that the current traditional methods are inadequate for meeting new requirements, such as automated pattern extraction and parameter prediction, which can be achieved with an intelligent assistant. In the second section of the paper, an IoT-based method for measuring the critical and prioritized parameters in river water quality assessment is proposed, designed, and implemented. The proposed system consists of four layers: perception, network, platform, and application. This system was installed and operated in a real-world river environment. The proposed system not only addresses the issues present in traditional methods used by organizations but also meets the new requirements.

Keywords: Water Quality Measurement, Snowball method, Delphi-fuzzy, Internet of Things, Artificial Intelligence

Article Type: Research Article

Article history: Received: 24 April 2024 Revised: 22 July 2024 Accepted: 07 August 2024 ePublished: 22 September 2024

1. Introduction

Water, as one of the vital and fundamental resources in human life and ecosystem survival, is directly and indirectly affected by pollutants such as heavy metals, pesticides, agricultural toxins, soil erosion, animal waste, and human sewage. This issue has raised significant concerns regarding public health and environmental safety. Rivers, as one of the most important sources of freshwater, are heavily impacted by these changes, emphasizing the necessity of protecting their quality. This text examines methods for assessing water quality and demonstrates how the use of new technologies such as artificial intelligence and the Internet of Things can aid in improving the water quality assessment process. For example, calculating parameter values and converting them into qualitative values can be enhanced using artificial intelligence. According to Zhi et al.'s (2024) research, the determination of all water quality is characterized by traditional measurement methods, which may be time-consuming, expensive, and sometimes in the later stages of evaluation due to the large volume of non-constructible data. It is not reusable. Additionally, this text categorizes challenges and new requirements in this field, indicating that intelligently integrating the water quality assessment process through the use of new technologies leads to significant improvements in this area.

2. Methodology

The methodology of this study consists of several important stages. Initially, by reviewing relevant literature and existing standards in the field of water quality assessment, the necessary foundations for the study were established. Subsequently, through the formation of a Delphi panel and using the snowball sampling method, the opinions of experts and specialists on issues related to water quality assessment were collected and analyzed. In the following steps, by creating a suitable portal for data collection and questionnaire, the required data were gathered from experts and specialists. Then, using the Delphi-fuzzy analysis method, the results obtained from interviews and questionnaires were analyzed by suitable softwares to gain a more precise understanding of the challenges and requirements in water quality assessment. This methodology employs a combined approach, which integrates literature review, expert and specialist participation, questionnaire data collection, and detailed result

analysis. After that, we have proposed an IoT-based method for measuring some parameters in river for water quality assessment. The proposed system has been tested in a real environment.

3. Results and discussion

Results of the research indicated that heavy metal measurement emerged as the most important parameter in water quality assessment, while chlorophyll-a measurement was deemed as the least significant of all. Challenges associated with traditional assessment methods, including the need for expert personnel, costly and time-consuming task, and potential outdatedness of results, were identified. Furthermore, the inadequacy of water sampling conditions underscored the necessity for more online assessment methods. Experts recommended using new technologies such as artificial intelligence and the Internet of Things (IoT) for data collection, storage, processing, and pattern extraction. Based on these findings, a proposed IoT-based system for river water quality assessment was designed, comprising hardware and software components across four layers: perception, network, platform, and application. This system aims to address the limitations of traditional methods while meeting the emerging requirements driven by artificial intelligence.

4. Conclusions

Water quality assessment, especially the quality of river water, is a highly important process that is traditionally and often manually conducted by some organizations, such as environmental agencies, water and wastewater authorities, and fisheries departments. In this process, experienced experts are dispatched to predetermined locations along the rivers at specific time periods, where some parameters are measured on-site while others are sampled by water and analyzed in laboratories, ultimately resulting in water quality assessment. This paper employed the Delphi-Fuzzy methodology to prioritize influential parameters in water quality and identify existing challenges in the manual water quality assessment process through the assistance of selected experts and professionals via questionnaires and interviews. The analysis of the gathered data revealed that heavy metal assessment parameter holds the highest importance, while chlorophyll-a parameter, holds the least significance in water quality assessment. Furthermore, the challenges in traditional water quality methods, which require sending expert water specialists with suitable equipment to relevant locations at the right time, incurring high costs and time-consuming procedures, were highlighted. Additionally, the results obtained from assessments may become outdated in some cases and lack necessary valuable data. Moreover, water sampling in certain circumstances occurs under unsuitable conditions, necessitating a greater emphasis on online monitoring. Furthermore, experts believed that, considering the aforementioned needs, new technologies such as artificial intelligence and the IoT should be utilized for data collection, storage, processing, and pattern extraction. Based on the conducted research and its outcomes, an IoT-based system for river water quality assessment was proposed. This system comprises a collection of hardware and software in four layers: perception, network, platform, and application. Various sensors in the perception layer are utilized to measure priority parameters. The collected data in the platform layer are processed by different algorithms, and suitable patterns can be extracted using artificial intelligence algorithms and data mining techniques. This proposed system, besides addressing the challenges of traditional methods, possesses the capability to meet the new requirements based on the utilization of artificial intelligence.

5. References

Zhi, W., Appling, A. P., Golden, H. E., Podgorski, J., & Li, L. (2024). Deep learning for water quality. *Nature Water*, 1-14. <https://doi.org/10.1038/s44221-024-00202-z>

6. Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

7. Acknowledgments

We would like to express our gratitude and appreciation to Dr. Mahmoud Moradi, the faculty member of the Knowledge Management Department at the University of Guilan, Rasht, Iran who collaborated with us in designing the questionnaire, selecting the research methodology, and supervising the research process. We also extend our thanks to all the esteemed experts from the Environmental Protection Agency of the Guilan province, the laboratory experts from the Water and Wastewater Department, and the Caspian Sea Studies Institute, including the honorable Dr. Kalantari, Dr. Hajari, Dr. Moosavi, and Dr. Mahmoud Mohseni, who supported us throughout the research process from beginning to end with their invaluable comments. We are deeply grateful for their help and support.

Cite this article: Mirbahari, S.H., Shahbahrami, A., & Poorzaker Arabani, S. (2024). Identifying challenges in water quality measurement and proposing IoT-based solution. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(3), 76-98. DOI: 10.22126/ATWE.2024.10730.1125

Publisher: Razi University





فناوری های پیشرفته در بهره وری آب



شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۹۶۴

وبگاه نشریه: <https://atwe.razi.ac.ir>

شناسایی چالش های سنجش کیفیت آب و ارائه راهکار مبتنی بر اینترنت اشیا

سید هاشم میربهراری^۱ ID، اسدالله شاه بهرامی^۲ ID✉، سودابه پورذاکر عربانی^۳ ID

^۱ دانشجوی دکتری تخصصی نرم افزار، گروه کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رشت، رشت، ایران. رایانامه: mirbahari@gmail.com
^۲ نویسنده مسئول، استاد گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، و گروه کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رشت، رشت، ایران. رایانامه: shahbahrami@guilan.ac.ir
^۳ استادیار، گروه کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران. رایانامه: soodabeharabani@gmail.com

چکیده

آب رودخانه‌ها به‌عنوان منابع حیاتی برای جوامع انسانی و اکوسیستم‌ها، نیازمند پایش دقیق و مستمری است تا از سلامت آنها اطمینان حاصل شود. چراکه رودخانه‌ها توسط آلوده‌کننده‌های متعدد شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی آلوده می‌شوند. سنجش کیفیت آب فرآیندی است که در آن کارشناسان و پژوهشگران برخی از سازمان‌ها از قبیل محیط‌زیست و دانشگاه‌ها در یک‌روند سنتی و مرسوم، پارامترهای مؤثر در کیفیت آب مانند دما، pH، شفافیت، کدری، اکسیژن محلول، نیترات و غیره را اندازه‌گیری و درنهایت شاخص کیفیت آب را با توجه به استانداردهای مورد استفاده را طبق شاخص‌های IRWQI_{sc} و NSFQI محاسبه می‌کنند. هدف این پژوهش شامل دو بخش است. در بخش اول ابتدا پارامترهای مؤثر در سنجش کیفیت آب، شناسایی مشکلات موجود در روش سنتی و مرسوم، شناسایی نیازمندی‌های جدید مبتنی بر فناوری‌های هوش مصنوعی و اینترنت اشیا، با کمک کارشناسان و خبرگان انتخاب‌شده به روش گلوله برفی در سازمان‌های مربوطه از قبیل سازمان محیط‌زیست و اداره آب و فاضلاب با استفاده از روش دلفی-فازی، انجام شد. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌ها در وب‌سایت مربوط به مصاحبه، جمع‌آوری شد و تحلیل‌ها بعد از دانلود نتایج به فرمت اکسل و بارگذاری و محاسبه در محیط پایتون نشان داد که پارامترهای اندازه‌گیری فلزات سنگین و کلروفیل a به ترتیب دارای بیشترین و کمترین اولویت در سنجش کیفیت آب هستند. همچنین چالش‌های بروز نبودن سنجش کیفیت آب، هزینه بالای سنجش، خطای زیاد، کمبود کارشناسان خبره در سازمان و غیره شناسایی شد. علاوه بر این همه کارشناسان بر این عقیده بودند که روش سنتی و مرسوم جاری توانایی پاسخگویی به نیازهای جدید از قبیل استخراج خودکار الگوها، پیش‌بینی پارامترها و غیره که توسط یک دستیار هوشمند قابل حصول هستند را ندارد. در بخش دوم مقاله روشی مبتنی بر اینترنت اشیا برای سنجش پارامترهای مؤثر و اولویت‌دار در سنجش کیفیت آب رودخانه‌ها، ارائه، طراحی و پیاده‌سازی گردید. سیستم پیشنهادی چهار لایه‌ای دارای لایه‌های، ادراک، شبکه، پلتفرم ابری و کاربردی است. سیستم پیشنهادی در یک رودخانه نصب و راه‌اندازی گردید که این سیستم علاوه بر برطرف کردن مشکلات روش سنتی موجود در سازمان‌ها، قابلیت برآورده سازی نیازمندی‌های جدید را دارد.

واژه‌های کلیدی: سنجش کیفیت آب، روش گلوله برفی، دلفی-فازی، اینترنت اشیا، هوش مصنوعی

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۰۵ اردیبهشت ۱۴۰۳ اصلاح: ۰۱ مرداد ۱۴۰۳ پذیرش: ۱۷ مرداد ۱۴۰۳ چاپ الکترونیکی: ۰۱ مهر ۱۴۰۳

استناد: میربهراری، س. ه.، شاه بهرامی، ا.، و پورذاکر عربانی، س. (۱۴۰۳). شناسایی چالش‌های سنجش کیفیت آب و ارائه راهکار مبتنی بر اینترنت اشیا، فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۴(۳)، ۹۸-۷۶. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2024.10730.1125



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

آب به‌عنوان مایه حیات و یکی از اساسی‌ترین منابع طبیعی، نقش بی‌بدیلی در زندگی انسان‌ها و بقای اکوسیستم دارد. با گسترش شهرنشینی، صنعتی شدن و تغییرات اقلیمی، کیفیت آب به‌شدت تحت تأثیر عواملی همچون آلاینده شیمیایی، فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها، سموم کشاورزی، عوامل فیزیکی مانند فرسایش خاک و ریز جامدات و عوامل بیولوژیکی مانند فضولات دامی و فاضلاب انسانی قرار گرفته است. نگرانی‌های فراوانی در رابطه با سلامت عمومی و محیط‌زیست ایجاد شده است. رودخانه‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آب شیرین، بیشترین تأثیر را از این تغییرات می‌پذیرند و حفاظت از کیفیت آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد. تحقیقات متعددی در زمینه پایش کیفیت آب انجام شده است، برای نمونه دوک^۱ (۲۰۲۰) در پژوهش و ارزیابی خود فقط به برخی از پارامترهای شیمیایی مانند یون نیترات، اسیدیته یا بازیت و سختی آب و پارامترهای فیزیکی مانند دما و شفافیت آب و پارامترهای بیولوژیکی مانند کلیریم مدفوعی تمرکز داشته است. روش‌های ارزیابی کیفیت آب در سازمان‌های مختلف مانند سازمان محیط‌زیست، طبق دستورالعمل معاونت محیط‌زیست انسانی (۱۳۹۲) و در اداره آب و فاضلاب، طبق دستورالعمل مشترک معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور (۱۳۸۸) و در سازمان شیلات ایران، طبق دستورالعمل سازمان شیلات ایران (۱۳۹۷) است. همچنین دانشگاه‌ها مطابق با پژوهش‌های انجام‌شده همچون پژوهش قمرنیا و همکاران (۱۴۰۲، الف) و همچنین استانداردهای جهانی^۲ برای تعیین کیفیت آب و پساب اقدام می‌نمایند. طبق تحقیقات ژی و همکاران^۳ (۲۰۲۴) تقریباً تعیین همه پارامترهای کیفی آب به روش‌های سنتی سنجش می‌شود که فرآیند آن معمولاً طولانی، هزینه‌بر و گاهی در مراحل بعدی فرآیند سنجش به دلیل حجم بالای داده‌های غیر ساخت‌یافته، قابلیت استفاده مجدد را ندارد.

هدف این پژوهش اولویت‌دهی به پارامترهای مختلف مؤثر در سنجش آب رودخانه‌ها و شناسایی مشکلات روش‌های سنتی مرسوم موجود در سازمان‌ها است. این اولویت‌دهی پارامترها و شناخت دقیق چالش‌های موجود، به متخصصین و طراحان کمک می‌کند که چگونه از تکنولوژی‌های جدیدی مانند هوش مصنوعی^۴، اینترنت اشیا^۵، رایانش ابری^۶ و غیره در جهت برطرف کردن مشکلات موجود و افزایش کارایی در محاسبه، پیش‌بینی، دسترسی و عملکرد سریع استفاده کنند. برای مثال، محاسبه مقادیر پارامترها و تبدیل آن‌ها به مقدار کیفی، کاری که تاکنون همواره به‌صورت دستی انجام می‌گیرد را می‌توان به هوش مصنوعی واگذار نمود تا با سرعت و ابتکار خاص خود به این فرآیند کمک کند. برای تبدیل پارامترهای آلودگی آب به مقادیر کیفی، از استاندارد NSFQI^۷ که دارای ۹ پارامتر است، در کشورهایی همچون آمریکا، پرتغال، برزیل و ایران استفاده می‌گردد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۰، و کارجکود و همکاران^۸، ۲۰۱۹). لازم به ذکر است که علاوه بر این پارامترها، پارامترهای دیگری نیز وجود دارد که هر سازمان مبتنی بر شرح وظایف خودش یک سری شاخص‌ها را مدنظر قرار می‌دهد. برای مثال سازمان محیط‌زیست معمولاً برای سنجش کیفیت آب از استاندارد NSFQI با ۹ پارامتر و استاندارد IRWQI^{Sc} با ۱۱ پارامتر استفاده می‌کند در حالیکه اداره آب علاوه بر ۹ پارامتر، پارامترهای هیدرولوژیکی یا کمی آب، مانند فشار آب لوله‌ها، حجم عبوری، ارتفاع آب در کانال‌ها و غیره را نیز مورد استفاده قرار می‌دهد. طراحی و ساخت دستگاهی مبتنی بر اینترنت اشیا و یادگیری عمیق^۹ برای جمع‌آوری، ذخیره‌سازی، پردازش و استخراج الگوهای مناسب از داده‌ها

¹ Dhok

² Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

³ Zhi et al

⁴ Artificial Intelligent

⁵ Internet of Things

⁶ Cloud Computing

⁷ National Sanitation Foundation Water Quality Index

⁸ Kachroud et al

⁹ Deep Learning

برای ۹ پارامتر در مقایسه با چند پارامتر با اولویت بالاتر بسیار از نظر طراحی، نصب، راه اندازی و هزینه تفاوت دارد. در کاربردهایی همچون صنعت فولاد، سنجش چند پارامتر با اولویت بالاتر در امر تصمیم گیری کفایت می کند (صفاییان و همکاران، ۱۳۹۵).

برای دستیابی به این اهداف، ابتدا با مطالعه ادبیات موضوعی و استانداردهای موجود، به بررسی اسناد بالادستی پرداخته شد. سپس با تشکیل یک پنل دلفی^۱ و استفاده از روش نمونه گیری گلوله برفی^۲، نظرات کارشناسان و متخصصان با مصاحبه و پرسشنامه محقق^۳ ساخته از طریق یک پرتال جمع آوری و با روش دلفی- فازی^۴ تجزیه و تحلیل شد. نتایج تحلیل شده، نشان داد که سنجش فلزات سنگین بیشترین و سنجش کلروفیل a کمترین اهمیت را در سنجش کیفیت آب داشت. مشکلاتی مانند هزینه بر بودن، اعزام و کمبود کارشناسان زنده به منطقه مورد نظر، سختی و خطرات نمونه برداری، تنوع ظروف نمونه برداری و آلودگی ظروف، خطر ابتلا کارشناسان به بیماری های ناشی از آب های بسیار آلوده و کمبود تجهیزات سنجش و اندازه گیری شناسایی شد. همچنین نیازمندی های جدیدی مانند جمع آوری برخط^۵، استفاده از داده های جمع آوری شده قبلی در جهت پیش بینی و استخراج الگوهای مناسب و مقایسه پارامترهای پیش بینی شده با داده های واقعی و طبقه بندی داده ها و نمایش بصری آن ها شناسایی گردید. لازم به ذکر است که برآورده کردن این نیازمندی ها مستلزم هوشمند سازی فرآیند سنجش کیفیت آب با استفاده از فناوری های جدید است و روش های مرسوم توانایی پاسخ به این نیازها، چالش ها و مشکلات را ندارند. مجموعه این تحلیل ها و نتایج منجر به طراحی و پیاده سازی دستگاهی مبتنی بر اینترنت اشیا برای سنجش چند پارامتر اساسی سنجش کیفیت آب شد. سیستم پیشنهادی در این پژوهش، بعد از طراحی و پیاده سازی در مکانی در رودخانه پسیخان رشت نصب و راه اندازی گردید. سیستم پیشنهادی مبتنی بر اینترنت اشیا، برخی از چالش های فوق را برطرف و برخی از نیازمندی های مطرح شده را برآورده می کند.

در این پژوهش مراحل انجام کار به ترتیب زیر است: ابتدا مرور ادبیات و تحقیقات پیشین مورد بحث و بررسی قرار گرفته، سپس متدولوژی استفاده شده در پژوهش و در نهایت نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده های جمع آوری شده و سیستم پیشنهادی مبتنی بر اینترنت اشیا برای سنجش چند پارامتر کیفیت آب ارائه و نتیجه گیری مطرح می گردد.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مک کاب و همکاران^۶ (۲۰۱۷) بر این باورند که اندازه گیری ها و جمع آوری داده ها اساس اکتشافات علمی است. این فرآیند امکان فرموله کردن فرضیه ها و توسعه مدل های مفهومی و عددی را فراهم می کند. با این حال، داده های پارامترهای کیفیت آب در مقایسه با پارامترهای هیدرولوژیکی آب، به دلیل پیچیدگی، اغلب پراکنده تر، ناسازگارتر و از نظر زمان، مکان و فرکانس محدودتر هستند. این دیدگاه با یافته های زی و همکاران (۲۰۲۴) و سعید و همکاران^۷ (۲۰۲۴) نیز همخوانی دارد. سعید و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که در برخی تحقیقات، تمرکز پژوهشگر بر پاره ای از پارامترهای آب است که شامل برخی از موارد مانند دما، کل جامدات معلق^۸، اکسیژن محلول در آب^۹، نیاز اکسیژن بیولوژیکی^{۱۰} و نیاز اکسیژن

¹ Delphi Panel

² SnowBall Sampling

⁴ Delphi-fuzzy

⁵ On Line

⁶ McCabe et al

⁷ Saeed et al

⁸ TSS (Total Suspended Solids)

⁹ DO (Dissolved Oxygen)

¹⁰ BOD (Biological Oxygen Demand)

^۳ پرسشنامه محقق ساخته: نوعی از پرسشنامه است که پژوهشگر در راستای اهداف تحقیق خود آن را طراحی می کند.

شیمیایی^۱، رسانایی الکتریکی^۲، کدورت^۳، اسیدیته یا قلیائیت^۴، نیترات^۵، نیترژن کل^۶، فسفر کل^۷ و فلزات سنگین، به‌عنوان مثال آرسنیک^۸ و سرب^۹ است. این نتایج با پژوهش‌های قمرنیا و همکاران (۲۰۲۰) (ب)، شکوهی و همکاران (۲۰۱۹) و ژی و همکاران (۲۰۲۴) همخوانی دارد.

آشوری و همکاران (۱۴۰۲) و رانگزان و همکاران^{۱۰} (۲۰۲۰) اشاره کرده‌اند که برخلاف داده‌های هیدرولوژیکی که اغلب به‌صورت خودکار اندازه‌گیری می‌شوند (مانند بارش، حجم آب عبوری، تبخیر و تعرق، عمق برف)، بسیاری از متغیرهای کیفیت آب هنوز به اندازه‌گیری‌های دستی و کار فشرده نیاز دارند. این اندازه‌گیری‌ها معمولاً از طریق نمونه‌برداری و آنالیز شیمیایی با استفاده از ابزارهای تحلیلی بزرگ و پیچیده انجام می‌شوند. اگرچه حسگرها برای صدها متغیر کیفیت آب توسعه داده شده‌اند، اما استقرار آن‌ها در محل برای اندازه‌گیری‌های خودکار از نظر مکان، مدت‌زمان و متغیرهای کیفیت آب (مانند دما، DO، رسانایی خاص، مواد مغذی مانند نیترات و فسفات، کربن آلی محلول) محدود است.

سیستم‌های پایش برخط قدیم^{۱۱} SCADA با محدودیت‌هایی که به دلایل مختلف مثل تعداد سنسورها و کلاینت‌ها ایجاد می‌شوند، مواجه هستند. زیرساخت فیزیکی این فناوری، نیاز به کابل‌کشی و تجهیزات اضافی را افزایش می‌دهد و این در حالی است که ظرفیت این شبکه محدود است. این محدودیت‌ها با افزایش حجم داده‌های منتقل شده می‌توانند منجر به اشباع شبکه و کاهش کارایی سیستم شوند. نیچ بیوت^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۳) اعلام داشتند که افزایش تعداد سنسورها نیاز به قدرت پردازش و ذخیره‌سازی بیشتری دارد و مدیریت و نگهداری سیستم را پیچیده‌تر می‌سازد، احتمال خطا و کاهش بهره‌وری را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، نرم‌افزار SCADA ممکن است دارای محدودیت‌هایی در پشتیبانی از تعداد بالای سنسورها و کلاینت‌ها باشد. برای کاهش این محدودیت‌ها، استفاده از تکنولوژی‌های نوین، ارتقا سخت‌افزارها، نرم‌افزارها و بهبود امنیت شبکه ضروری است.

شکوهی و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی اعلام داشتند که روش‌های سنتی اندازه‌گیری کیفیت آب با چالش‌ها و محدودیت‌های متعددی مواجه هستند. این روش‌ها معمولاً به نمونه‌برداری دستی و انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه نیاز دارند که فرآیندی زمان‌بر و پرهزینه است و امکان تحلیل لحظه‌ای و مداوم را فراهم نمی‌کند. علاوه بر این، احتمال آلودگی نمونه‌ها در حین انتقال و دست‌کاری انسانی نیز وجود دارد که می‌تواند به نتایج نادرست منجر شود. تجهیزات و مواد شیمیایی موردنیاز برای آنالیزهای آزمایشگاهی هزینه‌بر بوده و نیاز به تخصص بالا دارند. این مشکلات باعث می‌شود که روش‌های سنتی نتوانند به‌طور کارآمدی سنجش کیفیت آب را در زمان واقعی، پایش و کنترل کنند. این دیدگاه با پژوهش زینورین و همکاران^{۱۳} (۲۰۲۲) نیز مطابقت دارد.

بنا بر پژوهش پارکر و همکاران^{۱۴} (۲۰۱۹)، استفاده از روش گلوله برفی^{۱۵} برای یافتن کارشناسان خبره به‌منظور اخذ نظر و رای آن‌ها، یکی از تکنیک‌های نمونه‌گیری غیرتصادفی است که به‌ویژه برای دسترسی به خبره‌های خاص و پنهان مناسب است. در این روش، فرایند با انتخاب یک یا چند کارشناس اولیه که به جمعیت کارشناسان موردنظر دسترسی دارند، آغاز می‌شود. از این افراد اولیه خواسته می‌شود تا سایر ذینفعان مرتبط با

¹ COD (Chemical Oxygen Demand)

² EC (Electrical Conductivity)

³ Turbidity

⁴ pH (Potential of Hydrogen)

⁵ NO₃ (Nitrate)

⁶ TN (Total Nitrogen)

⁷ TP (Total Phosphorus)

⁸ Arsenic

⁹ Lead

¹⁰ Rangzan et al

¹¹ Supervisory Control And Data Acquisition

¹² Nechibvute et al

¹³ Zainurin et al

¹⁴ Parker et al

¹⁵ Snowball Sampling

جمعیت هدف را معرفی کنند. سپس این فرآیند به صورت زنجیره‌ای تکرار می‌شود این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که نمونه‌های کافی جمع‌آوری شوند یا معرفی افراد جدید متوقف شود. این روش به دلیل استفاده از روابط اجتماعی برای شناسایی نمونه‌ها، به‌ویژه در مطالعات شبکه‌های اجتماعی و جمعیت‌های غیرقابل دسترس، بسیار کاربردی است. با این حال، به دلیل غیر تصادفی بودن نمونه‌گیری و احتمال سوگیری، نتایج آن ممکن است قابل تعمیم به کل جمعیت نباشد (یادگاری و آسوشه، ۱۴۰۲).

در پژوهش نوری و همکاران^۱ (۲۰۲۰)، روش دلفی-فازی برای تدوین برنامه تأمین بهینه آب استفاده شده است. این روش با استفاده از نظرات کارشناسان به ارائه تصمیمات مؤثرتری برای مدیریت بهتر منابع آب در شرایط اقلیمی پژوهش انجام شده که منطقه نیمه‌خشک است کمک می‌کند و با توجه به نیازهای محلی، انتخاب سناریوهای بهینه را تسهیل می‌کند.

در مقاله یادگاری و آسوشه (۱۴۰۲)، برای دستیابی به مدلی فناورانه در ارائه خدمات اصلی، خدمات ارزش‌افزوده و زیرساخت در بیمارستان، از نظرات کارشناسان استفاده شد. در این روش با استفاده از نمونه‌گیری گلوله برفی، انتخاب کارشناسان انجام شد و با تشکیل پنل خبرگان توسط این کارشناسان نیازهای عملکردی و غیر عملکردی مشخص شد و مدل کلی بیمارستان طراحی گردید.

در پژوهش ایم^۲ و همکاران (۲۰۲۲)، اعلام داشته‌اند که رویکردهای یادگیری عمیق در سنجش کیفیت آب دقت بالایی در پیش‌بینی و تحلیل داده‌ها ارائه می‌دهند. این روش‌ها انعطاف‌پذیری بالایی دارند و می‌توانند از داده‌های جدید بدون نیاز به تغییرات گسترده در ساختار مدل استفاده کنند. همچنین این روش‌ها، با قابلیت یکپارچگی و مقیاس‌پذیری، می‌توانند از داده‌های متنوع و بزرگ استفاده کرده و در زمینه‌های مختلفی از جمله داده‌های زمانی و مکانی به تحلیل و پیش‌بینی‌های دقیق‌تر و سریع‌تری بپردازند. این تحقیق با پژوهش مک‌کابل و همکاران (۲۰۱۷) هم‌راستا است.

سعید و همکاران (۲۰۲۴)، در تحقیقات خود ادغام مدل‌های کیفیت آب با مدل‌های اکولوژیکی و سپس تحلیل با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی را پیشنهاد می‌کنند که می‌تواند به درک بهتر روابط پیچیده بین کیفیت آب، زیستگاه و سلامت اکوسیستم کمک کند.

نیکنام و همکاران^۳ (۲۰۲۴)، در پژوهش خود اعلام کرده‌اند که الگوریتم یادگیری عمیق، همراه الگوریتم فدرال (FL^۴)، یک روش مؤثر پیش‌بینی کیفیت آب است. در معماری مبتنی بر FL پیشنهادی، مدل‌های مختلف یادگیری ماشین در بخش نزدیک به سنسورها یا لبه، برای آموزش مدل با مجموعه داده محلی استفاده می‌شود. سپس از سرور برای جمع‌آوری یافته‌های لبه محلی و آموزش یک مدل داده سرتاسری برای افزایش دقت پیش‌بینی کیفیت آب استفاده می‌شود. ویلنجیری و همکاران^۵ (۲۰۲۳) نیز در پژوهش خود نشان دادند که مدل‌های هوش مصنوعی در برخی مسائل، نتایج بهتری در پیش‌بینی سری‌های زمانی ارائه می‌دهند.

وليام و همکاران^۶ (۲۰۲۳) و ژی و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهش‌های خود نشان دادند که شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN^۷) و سایر تشخیص‌دهنده‌های الگوی پیچیده مانند ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM^۸)، نمونه‌هایی از فناوری‌های حسگر پیشرفته هستند که به‌عنوان راه‌حلی برای شناسایی ناهنجاری‌ها و برآورد شدت چنین بی‌نظمی‌هایی پیاده‌سازی شده‌اند.

¹ Noori et al

² Im et al

³ Niknam et al

⁴ Federated learning

⁵ Vellingiri et al

⁶ William et al

⁷ Artificial Neural Network

⁸ Support Vector Machine

یافته‌های نصیر و همکاران^۱ (۱۴۰۱) در بخش طبقه‌بندی کیفیت و توصیف کیفی آب نشان داد که مدل CATBoost^۲ دقیق‌ترین طبقه‌بندی کننده را با دقت ۹۴.۵۱٪ ارائه می‌دهد. از نظر دقت در طبقه‌بندی کیفیت آب، به ترتیب پاسخ هر یک از الگوریتم‌ها CATBoost (۹۴.۵۱٪)، جنگل تصادفی^۳ (۹۴٪)، MLP^۴ (۸۸.۶٪)، XGBoost^۵ (۸۸.۱٪)، درخت تصمیم^۶ (۸۱.۶٪)، SVM (۸۰.۷٪) و رگرسیون لجستیک (۷۲.۹٪) دقت در طبقه‌بندی داشته است. با این حال، برای انباشتن مدل‌های مجموعه، دقت ۱۰۰ درصد توسط طبقه‌بندی کننده‌های متعدد، از جمله درخت تصمیم و CATBoost ارائه شد.

شمس‌الدین و همکاران (۲۰۲۲) بر اساس پژوهشی که انجام داده‌اند، اعتقاد دارند بهترین مدلی که بالاترین عملکرد در طبقه‌بندی کیفیت داده‌ها را داشته باشد SVM با دقت ۹۶.۳۵٪ بود. این مدل با دقت ۹۱.۹۷٪ و بازیابی ۸۴.۸۹٪ بر اساس میانگین کلان پشتیبانی می‌شد. مدل SVM همچنین یک مدل چند کلاسه است که در طبقه‌بندی داده‌ها از کلاس‌های مختلف بر اساس یک ماتریس سردرگمی عملکرد خوبی دارد. در نتیجه، مدل SVM به‌عنوان بهترین مدل طبقه‌بندی کننده در این پژوهش انتخاب شد و آزمون t نشان داد که نتایج آزمون در سطح اطمینان ۰/۰۵ از نظر آماری معنی‌دار است.

در پژوهش حسنی و همکاران (۱۳۹۱)، طراحی شاخص کیفی بر اساس سیستم استنتاج فازی صورت گرفته است. بعد از طراحی، شاخص به‌وسیله داده‌های حاصل از آب قنات‌های منطقه یزد مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته‌ها نشان می‌دهد که شاخص کیفی ارائه‌شده در این مطالعه نسبت به شاخص NSF^۷ که از ۹ پارامتر برای بیان کیفیت آب استفاده می‌کند، دارای نتایج سخت‌گیرانه‌تری است.

در پژوهش وانگ و همکاران^۸ (۲۰۱۷)، الگوریتم‌های پیش‌بینی سری زمانی برای سنجش کیفیت آب با استفاده از روش‌های شبکه عصبی سنتی مقایسه شده است. در این پژوهش، یک روش جدید پیش‌بینی کیفیت آب مبتنی بر شبکه عصبی سری زمانی حافظه بلندمدت و کوتاه‌مدت LSTM NN^۹ برای پیش‌بینی کیفیت آب پیشنهاد شده است. در مرحله اول، یک مدل پیش‌بینی مبتنی بر LSTM NN ایجاد می‌شود. این یافته تحقیقی با نظر حق^{۱۰} و هاری‌گویندان (۲۰۲۲) مطابقت دارد.

هوش مصنوعی در حوزه‌های مختلفی از جمله در امور آب و آبیاری به محققان کمک می‌کند. در پژوهش آشوری و همکاران (۱۴۰۲)، هوش مصنوعی در پیش‌بینی فرونشست زمین در استان سمنان با درصد خطای کمتری پیش‌بینی موفقیت‌آمیزی داشته است.

مک‌کابل و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که استفاده از رویکردهای آماری سنتی در پیش‌بینی کیفیت آب مؤثر است. این روش‌ها معمولاً با محدودیت‌هایی مواجه هستند. آن‌ها قادر به شبیه‌سازی پویایی و تغییرات زمانی کیفیت آب به‌صورت دقیق نیستند و برای این کار به مدل‌های پیچیده‌تر و غیرخطی نیاز است. همچنین، محدودیت‌های مربوط به تفسیر و استنتاج از مدل‌های آماری و نیاز به داده‌های زمانی و مکانی دقیق، می‌تواند مانع از دقت و کارایی در پیش‌بینی کیفیت آب شود. در مقابل، روش‌های مبتنی بر فرآیند، اگرچه روش بهتری در مکانیسم‌های دینامیک کیفیت آب ارائه می‌دهند، اما با چالش‌هایی همچون نیاز به داده‌های دقیق و جامع، پیچیدگی محاسباتی و نیاز به کالیبراسیون مداوم روبرو هستند.

¹ Nasir et al

² CATBoost (Categorical Boosting)

³ Random Forest

⁴ Multilayer Perceptron

⁵ eXtreme Gradient Boosting

⁶ Decision Tree

⁷ NSF (National Sanitation Foundation Water Quality Index)

⁸ Wang et al

⁹ LSTM (Long Short-Term Memory) Neural Network

¹⁰ Haq et al

به‌طور کلی، هر دو روش دارای مزایا و محدودیت‌های خود هستند و استفاده از آن‌ها به شرایط محیطی و اهداف مطلوب مدل‌سازی کیفیت بستگی دارد.

در مقاله ناندی و همکاران^۱ (۲۰۲۴)، مقوله هوا و آب هر دو با استفاده از شبکه‌های عصبی برای کشور هندوستان بررسی شده است. در این پژوهش، در ۲۱ شهر از هندوستان آلودگی آب‌وهوا در درجه نگران‌کننده‌ای قرار دارد و آنالیز کیفیت آن مورد تحلیل قرار گرفته است. در این تحقیق نیز از الگوریتم‌های LSTM و ANN استفاده شد.

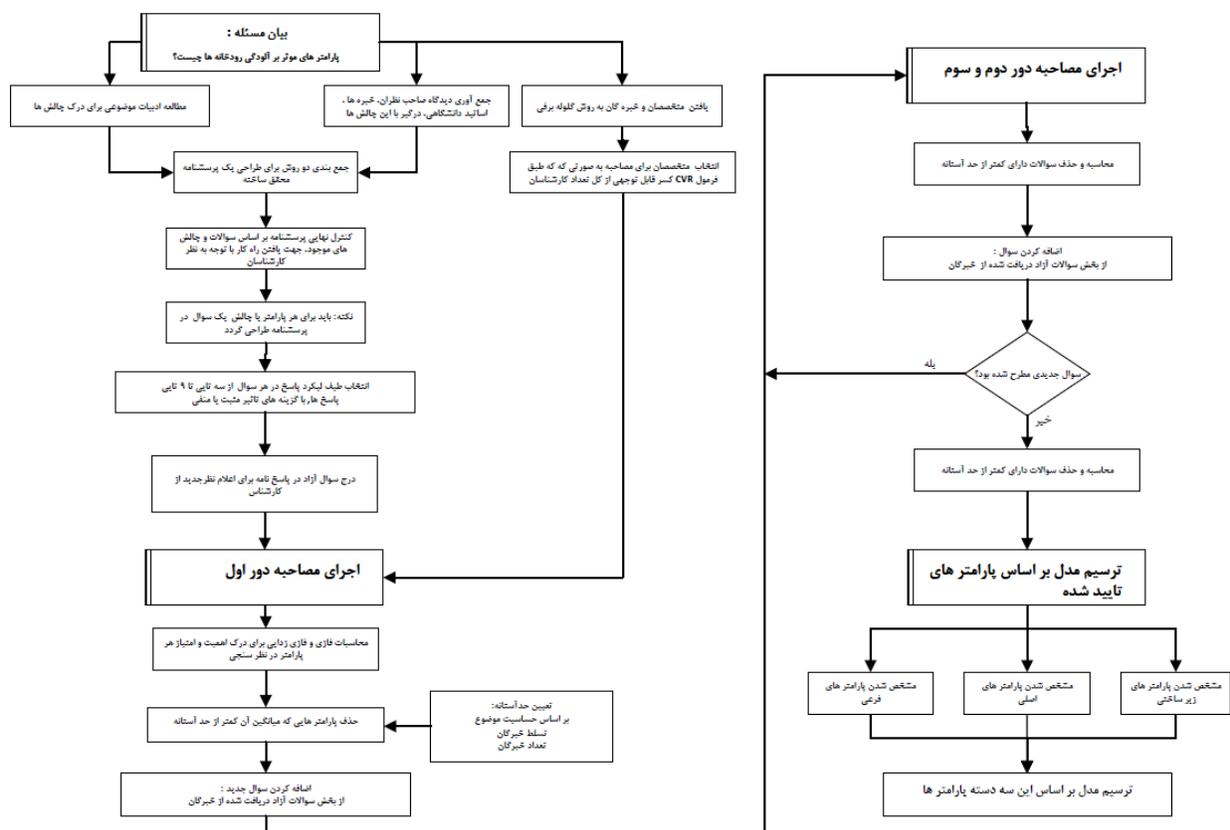
در مطالعات گذشته و ادبیات موضوعی، مشکلات روش‌های سنتی پایش کیفیت آب و همچنین اولویت‌بندی پارامترها به‌طور کامل بررسی و تحلیل نشده است و هنوز فناوری نوینی که بتواند این فرآیندهای سنجش کیفیت آب را بهبود بخشد معرفی نگردیده است. هوش مصنوعی با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه‌های مختلف، هنوز نتوانسته است به شکل مؤثری در تجهیزات پایش کیفیت آب به کمک کارشناسان بیاید. این واقعیت‌ها نشان‌دهنده نیاز به رویکردهای نوآورانه‌تری از جمله اینترنت اشیا است که بتوانند کارآمدی و دقت در پایش کیفیت آب را افزایش دهد.

روش پژوهش

همانطوریکه قبلاً اشاره شد اولویت‌بندی پارامترهای سنجش کیفیت آب و همچنین شناسایی مشکلات موجود در روش‌های مرسوم تعیین کیفیت آب در جهت ارائه یک سیستم مبتنی بر اینترنت اشیا بسیار مهم است. چراکه قبل از طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم سخت‌افزاری که شامل قطعات مختلفی از جمله سنسورها، عملگرها، پردازنده‌ها، زیرساخت شبکه و غیره است نیاز است که بدانیم چه پارامترهای مهمی قابل‌اندازه‌گیری هستند که می‌توانند مشکلات موجود را حل یا آن‌ها را کاهش دهند. لذا در این پژوهش ابتدا، از روش‌های گلوله برفی و دلفی-فازی استفاده شد. از روش گلوله برفی برای شناسایی کارشناسان خبره در زمینه کیفیت آب و سنجش آن در سازمان‌های مربوطه از جمله سازمان محیط‌زیست، اداره آب و فاضلاب، سازمان شیلات و غیره بهره گرفته شد. در این روش از کارشناسان اولیه که به‌صورت تصادفی انتخاب شده بودند، درخواست شد تا کارشناسان متبحر دیگری را معرفی کنند. این فرآیند به افزایش تعداد کارشناسان و تشکیل پنل دلفی کمک کرد. به این ترتیب، فهرستی از افرادی را که در زمینه پایش آلودگی آب دارای تخصص بودند، گردآوری شد (نوری و همکاران، ۲۰۲۰، و شاهینی و همکاران، ۱۴۰۲).

در روش دلفی-فازی، شرکت‌کنندگان در پنل دلفی می‌توانند نظرات خود را درباره موضوع موردنظر بیان کنند و سپس میزان توافق به‌صورت فازی محاسبه می‌شود. این روش برای یافتن نقاط قوت و ضعف موضوع موردبحث، تعیین اولویت‌ها و ارائه پیشنهادها برای حل مسائل بسیار مؤثر است. در نهایت، به کمک کارشناسان شناسایی شده و تشکیل پنل دلفی، به اهداف پژوهش پرداخته شد. نتیجه این پنل شامل پاسخ به چالش‌های مطرح شده در مورد اولویت‌بندی پارامترها و شناسایی مشکلات موجود در سنجش کیفیت آب، نوع مشکلات سنجش دستی و انتظارات از فناوری‌های روز همچون هوش مصنوعی بود. مراحل مختلف پنل دلفی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است در شکل (۱) نشان داده شده است.

¹ Nandi et al



شکل ۱. نمایش مراحل اجرای روش پژوهش دلفی-فازی.

یافته‌ها

در این بخش نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده ارائه می‌گردد. ابتدا اولویت‌بندی پارامترها، بعد شناسایی چالش‌های موجود و همچنین نیازمندی‌های جدید سازمان‌ها مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. اولویت‌بندی پارامترها:

داده‌های جمع‌آوری شده از کارشناسان خبره در سازمان‌های مختلف، با استفاده از کد نوشته شده در نرم‌افزار پایتون و روابط مربوط به فازی‌سازی مقادیر و سپس فازی‌زدایی آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل برای اولویت‌بندی پارامترهای مختلف آب از دیدگاه سازمان‌های مختلف؛ تجمیع کردن تمام پارامترهای مورد نیاز، معمولاً ۱۸ پارامتر؛ در جدول (۱) ارائه گردیده است. بر اساس نظرات کارشناسان در بخش‌های مختلف سازمان‌ها و اداره‌های مربوطه، سنجش میزان آلودگی‌های فلزات سنگینی مانند کروم، سرب و آرسنیک دارای بالاترین اولویت هستند. این نشان‌دهنده اهمیت بالای فلزات سنگین به‌عنوان یکی از عوامل اصلی آلودگی آب در تمام سازمان‌های مربوطه است که نیازمند نظارت دقیق و مستمر است. در مقابل، کمترین اهمیت به سنجش پارامتر کلروفیل a داده شد که نشان می‌دهد این پارامتر در مقایسه با سایر عوامل آلودگی از اولویت کمتری برخوردار است. لازم به ذکر است که این ۱۸ پارامتر آب، نیازمندی‌های سازمان‌های مختلف بوده که توسط کارشناسان مربوطه در روش پژوهش به‌دست آمده است.

جدول ۱. اولویت بندی سنجش پارامترهای آب مبتنی بر نظر کارشناسان به روش دلفی-فازی

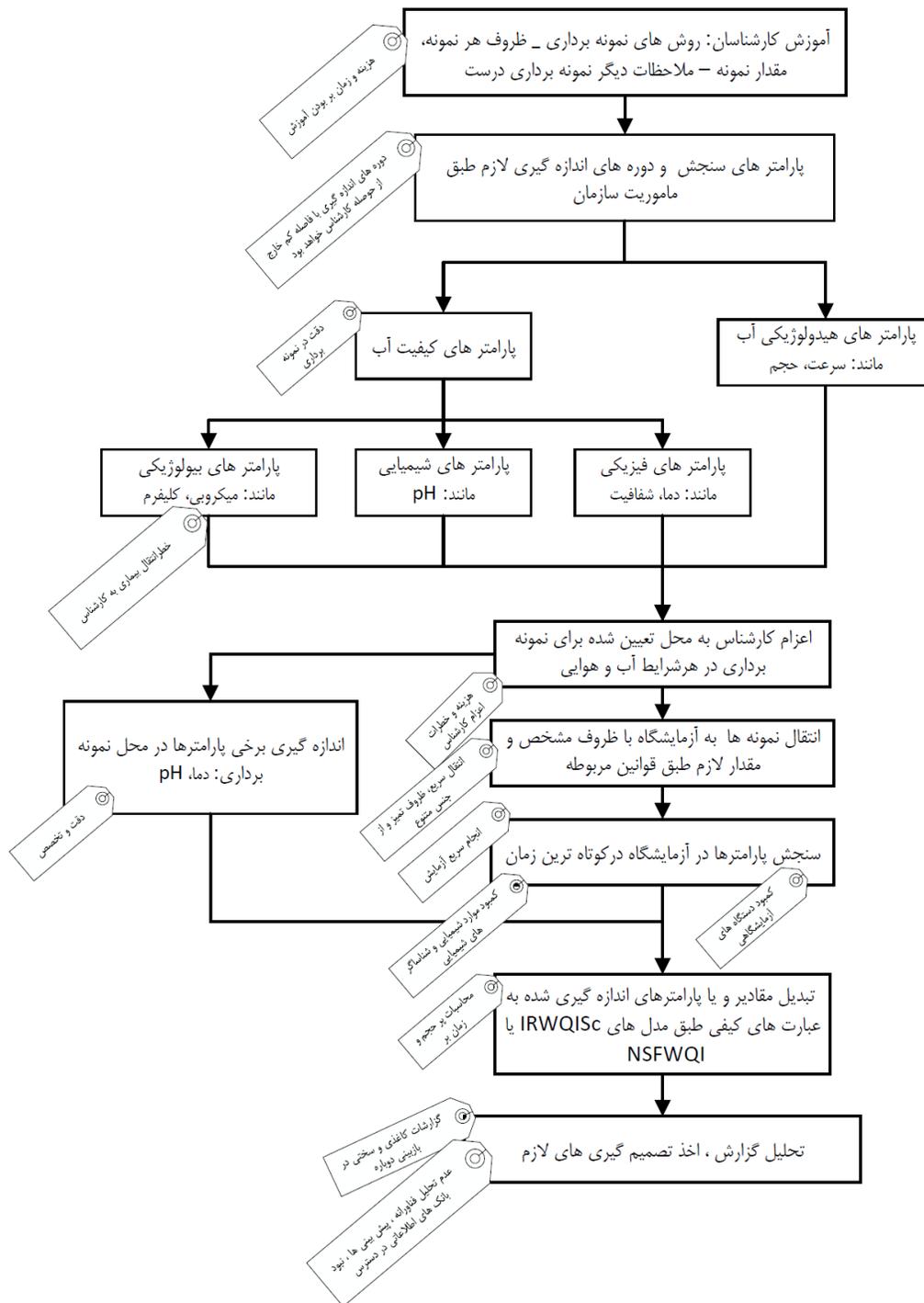
ردیف	پارامتر سنجش آب
۱	فلزات سنگین (مانند سرب، جیوه، کادمیوم، کروم و نیکل)
۲	سطح اکسیژن محلول (DO)
۳	مقدار pH
۴	یون نیترات
۵	میزان اکسیژن مورد نیاز برای اکسایش شیمیایی (COD)
۶	هدایت الکتریکی (EC)
۷	سختی یا مجموع مواد معلق در آب (TSS)
۸	یون آمونیوم
۹	سنجش TOC (کل کربن آلی)
۱۰	کدورت یا شفافیت
۱۱	یون فسفات
۱۲	مقدار روغن و گریس معلق در آب (GREASE & OIL)
۱۳	نرخ مصرف اکسیژن توسط میکروارگانیسمها (BOD - نیاز اکسیژنی بیولوژیک)
۱۴	کلیرم مدفوعی
۱۵	سختی کل (مجموع غلظت یونهای کلسیم و منیزیم)
۱۶	سموم و فنل
۱۷	مقدار کلر محلول در آب
۱۸	کلروفیل a

شناسایی مشکلات موجود

نتایج تحقیق صورت گرفته با اجرای پنل مصاحبه در وبسایت اینترنتی انجام و نتایج به فرمت نرم افزار اکسل در برنامه پایتون بارگذاری شد، نتایج محاسبه به زبان پایتون به روش دلفی-فازی نشان می دهد که تمامی ادارات و سازمان هایی که مسئولیت پایش آلودگی آب را بر عهده دارند، ناچار هستند که برخی از پارامترهای آب از قبیل دما و pH را در محل رودخانه اندازه گیری کنند. این پارامترها به دلیل نوع و ویژگی آنها که در تعیین کیفیت آب دارند، قابل اندازه گیری از نمونه های آب برداشت شده و انتقال داده شده به آزمایشگاه نمی باشند؛ اما در مورد دیگر پارامترها شرایط متفاوت است چراکه نمونه های برداشت شده از مکان های مختلف رودخانه باید در ظروف خاص و به مقدار لازم ریخته و نگهداری و سپس حمل گردد. باید این نمونه ها حداکثر تا زمان مشخصی به آزمایشگاه انتقال داده شود و در آنجا مورد سنجش و اندازه گیری قرار گیرد، در این بین خطر

سرایت بیماری به کارشناسان در حین نمونه‌برداری و حمل آب آلوده وجود دارد. سازمان حفاظت محیط‌زیست از روش‌های سنتی و دستی برای اندازه‌گیری پارامترهای کیفی آب استفاده می‌کند. این روش‌ها عموماً زمان‌بر و پرهزینه هستند و ممکن است با مسائلی مانند دقت کمتر و نیاز به دوره‌های آزمایش طولانی‌تر مواجه شوند. در مقابل اداره آب و فاضلاب به دلیل ضرورت و سرعت پاسخ به وقایع و حوادث، از نظارت برخط برای برخی پارامترهای خاص سازمانی و آن‌هم اغلب پارامترهای هیدرولوژیکی آب شامل فشار، دبی، ارتفاع آب و برخی پارامترهای آلودگی محدود مانند pH، کدورت، رسانایی و غلظت کلر استفاده می‌کند. همچنین اداره شیلات یا آبخیزداری به روش‌های دستی و سنتی، اعزام کارشناسان به محل موردنظر و نمونه‌گیری و انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه و غیره برای پایش آلودگی آب متکی است و بر اندازه‌گیری پارامترهایی مانند دما، اکسیژن، آمونیاک و آمونیوم تأکید دارد.

فلوچارت کلی مراحل روش سنتی و مرسوم که در اکثر سازمان‌ها برای سنجش پارامترهای آب رودخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. همانطوری که در شکل (۲) مطرح شده، آموزش کارشناسان مربوطه با روند کار سنجش و تهیه نمونه‌های مناسب از مکان‌های موردنظر در زمان‌های مشخص جز اولین مراحل روش موجود است. همچنین مشکلات موجود در هر مرحله با روش دلفی-فازی و تایید کارشناسان مربوطه شناسایی که در شکل (۲) به‌طور مختصر نشان داده است.



شکل ۲. فلوچارت روش سستی و مرسوم موجود در اکثر سازمانها برای سنجش پارامترهای آب رودها و مشکلات موجود در هر مرحله

برخی از این چالش‌ها شامل کمبود نیروی ماهر برای نمونه‌برداری و اندازه‌گیری، طولانی بودن دوره‌های نمونه‌برداری، کاهش دقت به دلیل مداخله انسانی، خطرات بهداشتی و بیماری برای کارکنان، هزینه‌های بالا، نیاز به ظروف تمیز و نگهداری مناسب آن‌ها، الزام سرعت و دقت در انتقال نمونه به آزمایشگاه‌ها، پیچیدگی محاسبات و تبدیل واحدها برای شناسه‌های کیفی است. این چالش‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به در این پژوهش صورت گرفته در شناسایی مشکلات در روش مرسوم پایش کیفیت آب و همچنین افزایش داده‌های استخراج شده از آزمایش‌ها بر روی نمونه‌ها، دقت کم همراه نتایج با هزینه بالای آزمایش‌ها، تعداد زیاد رودخانه‌ها و غیره، همه کارشناسان موافق استفاده از فناوری‌های جدید مانند اینترنت اشیا، رایانش ابری و هوش مصنوعی برای سنجش پارامترهای آب بودند. نتایج این پژوهش، با نظر الصریفی و همکاران (۱۴۰۲) مطابقت داشت. برخی از نیازمندی‌های جدید سازمان‌ها عبارت‌اند از: نیاز به فناوری برخط برای جمع‌آوری داده‌های سنسورها و ذخیره‌سازی دیجیتالی داده‌ها در بانک‌های اطلاعاتی است. همچنین پاک‌سازی خطای داده‌های ارسالی از سنسورها شامل داده‌های گم‌شده^۱، داده‌های خارج از محدوده^۲ و آنالیز داده‌ها با عملیات پیش‌پردازش داده‌های حوزه‌های دیگر مشترک است. از دیگر نیازمندی‌های استخراج شده از نظرات کارشناسان؛ تحلیل تغییرات پارامترها و ارتباط بین پارامترها، طبقه‌بندی هوشمندانه توصیف کیفیت آب، پیش‌بینی آن، وضعیت هر پارامتر در آینده و نهایتاً بصری سازی نتایج و ارائه گزارش‌های برخط مختلف است. لازم به ذکر است که برخی از این نیازمندی‌های استخراج شده در این پژوهش با نتایج دیگر پژوهشگران مانند شکوهی و همکاران (۲۰۱۹)، قمرنیا و همکاران (۱۴۰۲، الف) و در قمرنیا و همکاران (۱۴۰۲، ب) مطابقت دارد.

ارائه یک سیستم مبتنی بر اینترنت اشیا برای سنجش برخی از پارامترهای سنجش آب

در جهت کاهش مشکلات شناسایی شده و برآورده ساختن نیازمندی‌های جدید، یک سیستم چهار لایه‌ای مبتنی بر اینترنت اشیا برای سنجش پارامترهای کیفیت آب که شامل لایه ادراک، شبکه، پلتفرم ابری و کاربردی است ارائه گردید که بلاک دیاگرام^۳ کلی آن در شکل (۳) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مدل چهار لایه‌ای در منابع نمودیا و آجانکار^۴ (۲۰۲۳) و کومار و همکاران^۵ (۲۰۱۹) اشاره شده است. در لایه ادراک با استفاده از سنسورهای مختلف، برای مثال دما، کدورت، میزان اسیدیته یا بازیته بودن آب و غیره اندازه‌گیری و سپس تبدیل به داده‌های رقمی می‌شوند و از طریق لایه شبکه به لایه پلتفرم ابری ارسال می‌شوند. در این بین امکان نوپزی شدن و از دست رفتن برخی از داده‌ها وجود دارد که با استفاده از الگوریتم‌های داده‌کاوی و پیش‌پردازش، عملیات پاک‌سازی داده‌ها صورت می‌گیرد و در نهایت جهت بهره‌برداری توسط الگوریتم‌های هوش مصنوعی، الگوهای مناسب مانند تأثیر پارامترها بر هم و شاخص کیفیت آب محاسبه و به صورت بصری سازی در لایه کاربرد نمایش داده می‌شود. لازم است اشاره گردد در این شکل، لایه ادراک با سیستم سخت‌افزار طراحی و پیاده‌سازی شده جایگزین شده است. در این لایه انواع سنسورها برای اندازه‌گیری پارامترهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

¹ Missing values

² Outliers

³ Block Diagram

⁴ Nimodiya and Ajankar

⁵ Kumar et al



شکل ۳. نمونه پیاده‌سازی اولیه، پیشنهاد شده بر پایه فناوری اینترنت اشیا برای سنجش کیفیت برخی از پارامترهای آب

جدول ۲. نمونه‌هایی از سنسورهای مختلف، همراه با ویژگی‌ها و مشخصات فنی آن‌ها که برای اندازه‌گیری ۹ پارامتر کیفیت آب طبق استاندارد NSFQWI همراه با روش سنتی مورد استفاده برای سنجش پارامترها.

پارامتر	نام سنسور	نمونه سنسور سنجش در فناوری اینترنت اشیا	روش‌های سنجش سنتی
Dissolved Oxygen (DO)	Dissolved Oxygen Sensor	Hach LDO Model	پروپ‌های الکتروشیمیایی، روش وینکلر (Winkler)
pH	pH Sensor	Hanna Instruments HI98191	pH متر الکتریکی، معرف‌های شیمیایی و کاغذهای تست pH
Temperature	Temperature Sensor	DS18B20 (Maxim Integrated)	ترموترهای دیجیتال یا الکترونیکی
Nitrate (NO ₃ ⁻)	Nitrate Sensor	Vernier NO3-BTA	اسپکتروفومتر، الکترودهای یون‌سنج
Phosphate (PO ₄ ⁻)	Phosphate Sensor	Eutech Instruments PC 450	اسپکتروفومتر
Turbidity	Turbidity Sensor	YSI 6136 Turbidity Sensor	توربیدیمتر
Total Dissolved Solids (TDS)	TDS Sensor	HM Digital TDS-3	TDS متر
Biochemical Oxygen Demand (BOD)	BOD Sensor (Indirect measurement via DO)	In-Situ RDO PRO-X	انکوباسیون ۵ روزه در ۲۰ درجه سانتی‌گراد و اندازه‌گیری کاهش DO
Heavy Metals	Specific Heavy Metal Sensors (Indirect measurement)	YSI EXO2 (for multiple metals)	اسپکترومتری جذب اتمی (AAS)، طیف‌سنجی جرمی پلاسما جفت شده القایی (ICP-MS)

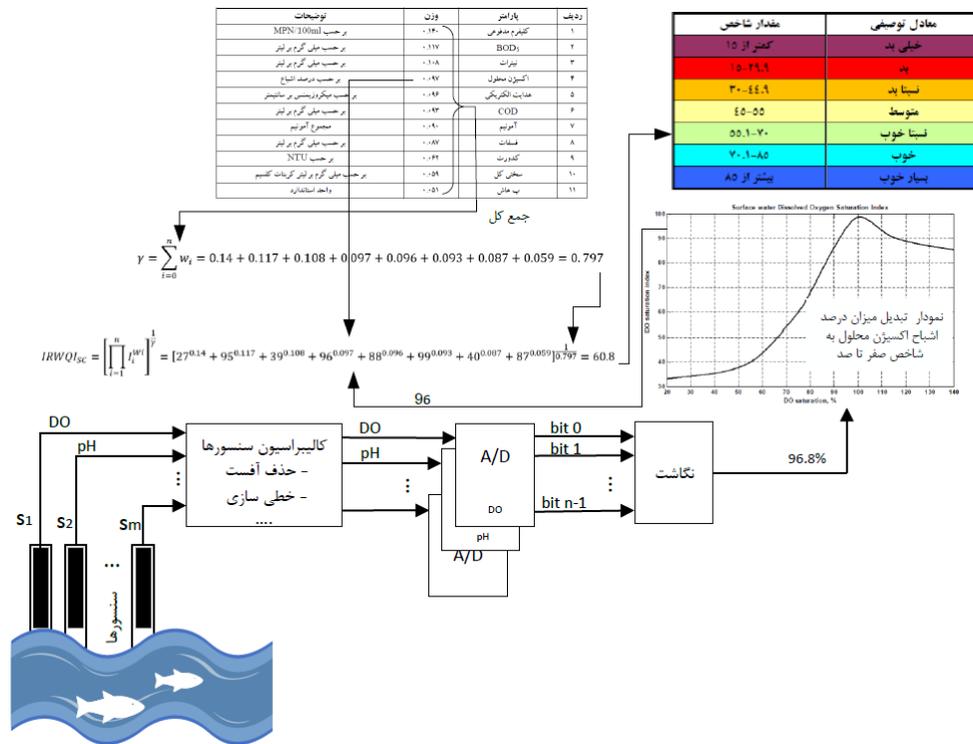
کالیبراسیون سنسورها

یکی از کارهای اساسی که در نصب و راه‌اندازی سنسورهای اشاره‌شده در جدول (۲) باید انجام داد، کالیبراسیون یا تنظیم دقیق سنسورها است که دارای عملکرد درست و بدون خطا در محیط عملیاتی باشند. به عبارت دیگر، مقدار اندازه‌گیری شده توسط یک سنسور باید به‌طور دقیق به مقدار واقعی پارامتر نگاشت شود. شاخص کیفیت سنسورها بر اساس دقت اندازه‌گیری، وضوح سرعت تولید داده تعیین می‌شود. دقت اندازه‌گیری به معنای توانایی سنسور در ارائه نتایج برابر با مقدار واقعی است. وضوح یا رزولوشن^۱ سنسور نیز بیانگر حساسیت و توانایی آن در تشخیص تغییرات کوچک و ناچیز در پارامترهای مورد اندازه‌گیری است. سرعت تولید داده نیز یکی دیگر از شاخص‌های مهم است که نشان‌دهنده توانایی سنسور در ارائه سریع و به‌موقع داده‌ها از پارامترهای سنجیده شده است. جدا از کیفیت ذاتی سنسورها، عواملی مانند نویزی شدن در مسیر انتقال سیگنال و هیستریزیس یا پسماند اثر می‌تواند باعث ایجاد خطا در عملکرد سنسورها شوند. نویزی شدن می‌تواند به دلیل تداخلات ناشی از قرارگیری در میدان‌های مغناطیسی، الکتریکی و یا الکترومغناطیسی یا دیگر منابع نویز در مسیر انتقال سیگنال رخ دهد و هیستریزیس نیز می‌تواند ناشی از تغییرات شرایط محیطی یا ویژگی‌های مواد سازنده سنسور باشد. این خطاها باعث انحراف داده‌ها از مقدار واقعی شده و نیاز به اصلاح دارند.

شکل (۴) یک نمای کلی از تنظیم این مقادیر اندازه‌گیری شده به مقادیر واقعی را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۴) عملکرد سنسورها معمولاً با چند مشکل از قبیل افست اندازه‌گیری، غیرخطی بودن بازه سنجش و سایر موارد مواجه می‌شوند. خطای افست به معنای وجود اختلاف ثابت و همیشگی بین مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار واقعی است، درحالی‌که مشکل غیرخطی بودن به عدم تطابق خطی بین ورودی و خروجی سنسور اشاره دارد. همه این مشکلات باید با فرایند کالیبراسیون یا تنظیم مؤلفه‌های سنسورها حل شوند. علاوه بر این، سنسورها به دلایل مختلف از جمله تفاوت‌های ساخت حتی در انواع مشابه، تأثیر شرایط محیطی، فرسودگی ناشی از استفاده مداوم، نیاز به کالیبراسیون دوره‌ای و یا تعویض دارند. خروجی تنظیم‌شده سنسورها که معمولاً به صورت آنالوگ است توسط مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال (A/D) تبدیل می‌شوند. مقادیر دیجیتالی و رقمی با استفاده از تابع نگاشت به مقادیر واقعی پارامتر مربوطه تبدیل می‌شوند. مقادیر واقعی پارامترها با استفاده از نمودار انتقالی، تبدیل به مقادیر نرمال‌سازی می‌شود و بعد با استفاده از جدول مربوطه وزن پارامتر موردنظر به دست می‌آید و درنهایت کیفیت سنجش آب تعیین می‌گردد. در شکل (۴) عملیات فوق برای پارامتر اکسیژن محلول (DO) نشان داده شده است.

روش کالیبراسیون استفاده‌شده در دستگاه‌های سنجش آلودگی آب رودخانه با فناوری اینترنت اشیا شامل دو مرحله اصلی است. در مرحله اول، از آبی که مقادیر پارامترهای آن از قبل در یک آزمایشگاه مجهز مشخص تعیین شده است (محلول استاندارد) برای کالیبراسیون سنسور استفاده می‌گردد. سپس مقادیر سنجیده شده توسط سنسور با مقادیر تجهیزات استاندارد آزمایشگاهی برای یک نمونه آب نامشخص مقایسه می‌شوند. این مقایسه به تنظیم و تصحیح داده‌های سنسور کمک می‌کند تا اطمینان حاصل شود که داده‌های حاصله دقیق و قابل‌اعتماد هستند. این روش کالیبراسیون، تضمین می‌کند که دستگاه‌های سنجش آلودگی آب می‌توانند به‌درستی شرایط آلودگی را ارزیابی کرده و نتایج دقیق‌تری ارائه دهند.

^۱ رزولوشن در تشخیص یک سنسور به معنای دقت یا توانایی سنسور در تشخیص و اندازه‌گیری تغییرات کوچک در محیط است. به طور خاص، رزولوشن به میزان کوچک‌ترین تغییر قابل تشخیص توسط سنسور اشاره دارد.



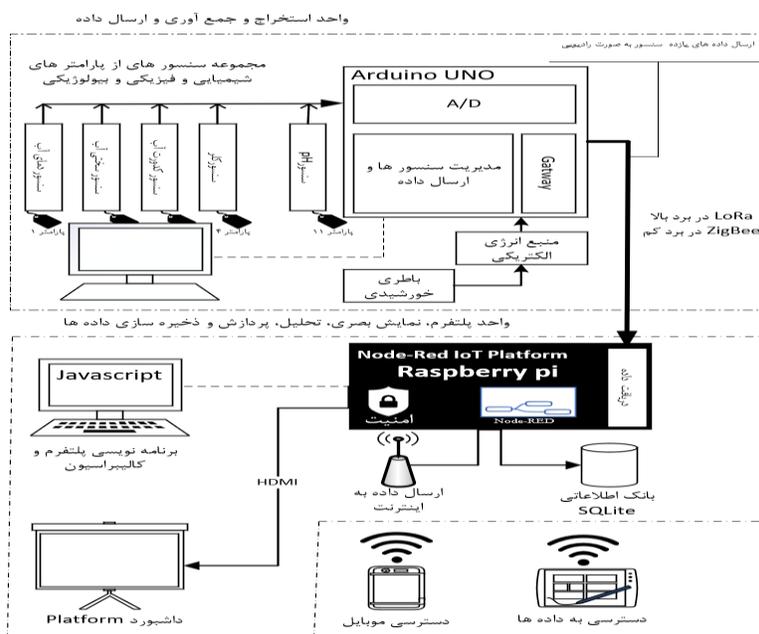
شکل ۴. مراحل کالیبراسیون و تنظیم پارامترهای سنجیده شده و نگاشت آن‌ها به مقادیر واقعی و محاسبه سنجش کیفیت آب.

در این پژوهش با توجه به نتایج به‌دست آمده و امکان تهیه سنسورها به لحاظ دسترس بودن و بودجه تحقیق، پنج سنسور انتخاب شد تا عملکرد و اجرای ساختار اینترنت اشیا ارائه‌شده مورد ارزیابی قرار گیرد. درنهایت برای کنترل صحت عملکرد سنسورها مقادیر اندازه‌گیری شده توسط آن‌ها با تجهیزات کالیبره آزمایشگاه مقایسه شد.

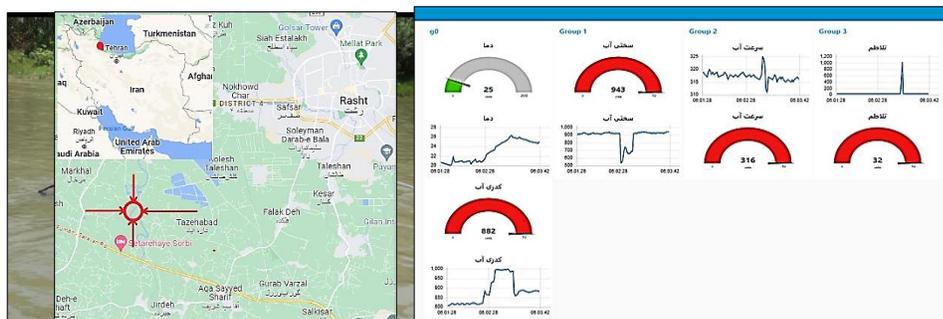
نمونه سخت‌افزاری طراحی و پیاده‌سازی گردید که در شکل (۵) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این سیستم به‌طور واقعی در رودخانه پسیخان در ۱۰ کیلومتری رشت مورد تست و ارزیابی قرار گرفت. با انجام مطالعات دقیق، یک راهکار مناسب برای ساخت شناور، استفاده از لوله‌های پلیکا با قطر بالا به‌عنوان ماده‌ای مقاوم در برابر آب انتخاب گردید. شکل (۶) داشبورد مدیریت بصری سازی داده‌ها، همچنین یک نمونه از دستگاه ساخته‌شده و مکان جغرافیای نصب و راه‌اندازی دستگاه را نشان می‌دهد. دستگاه بعد از سنجش پارامترهای مختلف کیفیت آب، داده‌های مربوطه را بر طبق استانداردهای لازم و دوره‌های زمانی تعریف‌شده به پلتفرم ابری ارسال و در پایگاه داده ذخیره و مورد پردازش و بصری سازی قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که کلیه مراحل طراحی، پیاده‌سازی، پروتکل‌های استفاده‌شده، کدهای برنامه‌نویسی شده در ماژول آردینو و رزبری‌پی، داده‌های جمع‌آوری شده از محیط واقعی و غیره در سایت گیت‌هاب^۱ گزارش شده است.

شکل (۵) جزییات بیشتری از لایه ادراک که شامل سخت‌افزارها از قبیل آردینو، رزبری‌پی، سنسورها، منابع تغذیه انرژی و غیره است را نمایش می‌دهد (میربهاری و همکاران، ۱۴۰۲).

¹ <https://github.com/Mirbahariuni/Mirbahariuni-Designing-a-device-based-on-the-Internet-of-Things-to-detect-water-quality/issues>



شکل ۵. جزئیات سخت‌افزاری سیستم پیشنهادشده برای پایش کیفیت آب مبتنی بر اینترنت اشیا (میر بهاری و همکاران، ۱۴۰۲).



شکل ۶. داشبورد نمایش پارامترها در پلتفرم اینترنت اشیا، یک نمونه از دستگاه سنجش کیفیت آب رودخانه و

محل جغرافیایی تست دستگاه ساخته شده (میر بهاری و همکاران، ۱۴۰۲).

بحث

سنجش کیفیت آب مخصوصاً کیفیت آب رودخانه‌ها یک فرآیند بسیار مهمی است که در برخی از سازمان‌ها از قبیل محیط‌زیست، آب و فاضلاب و اداره شیلات و غیره به روش سنتی و معمولاً دستی انجام می‌گیرد. در این فرآیند کارشناسان خبره در بازه‌های زمانی مشخص به مکان‌های تعیین شده در مسیر رودخانه‌ها اعزام و برخی از پارامترها را در همان مکان اندازه‌گیری و برخی دیگر از پارامترها را با نمونه‌گیری از آب و انتقال نمونه‌های آب به آزمایشگاه اندازه‌گیری و در نهایت کیفیت آب محاسبه می‌شود. در این پژوهش با کمک روش دلفی-فازی اولویت‌بندی پارامترهای مؤثر در کیفیت آب و همچنین مشکلات موجود در فرآیند دستی سنجش کیفیت آب با کمک کارشناسان و خبرگان از طریق پرسشنامه و مصاحبه انجام شد.

نتیجه گیری

تجزیه و تحلیل داده های جمع آوری شده به روش دلفی-فازی با محاسبه امتیازات کسب شده با نرم افزار پایتون در پنل خبرگان نشان داد که پارامترهای سنجش فلزات سنگین بیشترین و کلروفیل a کمترین میزان اهمیت را در سنجش کیفیت آب دارند. بعلاوه مشکلات در روش های سنتی و مرسوم کیفیت آب مستلزم ارسال کارشناسان خبره آب با تجهیزات مناسب در زمان مناسب به مکان های مربوطه است که این روال هزینه زیادی را برای سازمان ها دارد و نیز وقت گیر است. همچنین نتایج به دست آمده از سنجش، در برخی موارد قدیمی شده و اعتبار لازم را نخواهد داشت. همچنین نمونه برداری از آب در برخی موارد به علت محدودیت ها در ظروفی صورت می گیرد که مناسب نیستند، لذا لزوم سنجش برخط بیشتر احساس می گردد، علاوه بر این ها کارشناسان عقیده داشتند که با توجه به نیازهای یاد شده باید از فناوری های جدید هوش مصنوعی و اینترنت اشیا برای جمع آوری، ذخیره سازی و پردازش و استخراج الگوها از داده ها استفاده شود. تحقیق انجام شده و نتایج آن منجر به پیشنهاد سیستمی مبتنی بر اینترنت اشیا برای سنجش کیفیت آب رودخانه ها گردید. این سیستم شامل مجموعه از سخت افزارها و نرم افزارها در چهار لایه، ادراک، شبکه، پلتفرم ابری و کاربردی است. سنسورهای مختلفی با توجه به امکان تهیه و دسترسی، در لایه ادراک برای سنجش پارامترهای اولویت دار مورد استفاده قرار گرفتند. داده های جمع آوری شده در لایه پلتفرم توسط الگوریتم های مختلف پاک سازی می شوند و می توان با استفاده از الگوریتم های هوش مصنوعی و داده کاوی، الگوهای مناسب را استخراج کرد. این سیستم پیشنهادی علاوه بر برطرف کردن مشکلات روش های مرسوم سنتی، توانایی برآورده کردن نیازمندی های جدید را که مبتنی بر استفاده از هوش مصنوعی هستند دارا است.

تقدیر و تشکر

از آقای دکتر محمود مرادی استاد گروه مدیریت دانشگاه گیلان که در مراحل طراحی پرسشنامه محقق ساخته برای اجرای مصاحبه پنل دلفی، انتخاب متدولوژی تحقیق و نظارت بر روند تحقیق با ما همکاری داشتند تشکر و قدردانی می نمایم. همچنین از همه کارشناسان محترم سازمان محیط زیست استان، از کارشناسان آزمایشگاه اداره آب و فاضلاب و موسسه تحقیقات بین المللی تاسماهیان دریای خزر از جمله خانم دکتر کلانتری، خانم دکتر ججاری، خانم دکتر موسوی و آقای دکتر محمود محسنی که در روند پژوهش از ابتدا تا انتها با نظرات تخصصی خود ما را در انجام این پژوهش یاری نمودند، همچنین از آقای پروفیسور علی رسول زاده از دانشکده مهندسی آب دانشگاه محقق اردبیلی، خانم دکتر فرزانه آزادی از دانشگاه فنی و حرفه ای در حوزه شیمی تجزیه، نهایت تشکر و قدردانی را می نمایم.

منابع

- آشوری، رضا، امامقلی زاده، صمد، حاجی کندی، هومن، و جمالی، سعید. (۱۴۰۲). بررسی تغییرات مکانی فرونشست دشت دامغان و پیش بینی آن با استفاده مدل شبکه عصبی مصنوعی. فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۳(۳)، ۸۷-۶۸.
<https://doi.org/10.22126/atwe.2023.9801.1065>
- الصریفی، رسول جواد، عباس، شیرین آبادی، رضا، ربیعی فر، حمید رضا، و نجارچی، محسن. (۱۴۰۲). پیش بینی نوسانات تراز آب زیرزمینی دشت سنقر با استفاده از روش های یادگیری ماشین. فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۴(۱)، ۱۱۸-۹۹.
<https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10418.1117>
- حسینی، قاسم، محوی، امیرحسین، ناصری، سیمین، عرب علی بیک، حسین، یونسیان، مسعود، و قریبی، حامد. (۱۳۹۰). طراحی شاخص کیفی آب های زیرزمینی با استفاده از منطق فازی. <http://healthjournal.arums.ac.ir/article-1-79-fa.html>
- سازمان شیلات ایران. (۱۳۹۷). دستورالعمل اجرایی نظارت و کنترل بر کیفیت آب در مراکز تکثیر. معاونت توسعه آبی پروری: معاونت توسعه آبی پروری. <https://www.fisheries.ir/Articlefile/.docx>

- شاهینی، شبنم، فرج پهلوی، عبدالحسین، خادمی زاده، شهناز، و نادران طحان، مرجان. (۱۴۰۲). ارائه معماری پیشنهادی به کارگیری اینترنت اشیا در کتابخانه‌های دانشگاهی ایران. پژوهشنامه پردازش و مدیریت اطلاعات، ۳۸(۴)، ۱۴۵۷-۱۴۹۸.
<https://doi.org/10.22034/jipm.2023.701680>
- صفائیان توپکانلو، الهه، مظاهری، سید احمد، و ملکزاده شفاوردی، آزاده. (۱۳۹۵). بررسی کیفیت آب با استفاده از شاخصهای کیفی منابع آب معدن فیروزه نیشابور (شمال غرب شهرستان نیشابور، خراسان رضوی). هفتمین همایش انجمن زمین شناسی اقتصادی ایران، مشهد، ایران.
<https://profdoc.um.ac.ir/paper-abstract-1049398.html>
- قمرنیا، هوشنگ، پالاش، زلیخا، و پالاش، میثم. (۱۴۰۲، الف). ارزیابی کیفیت آب رودخانه گلین در استان کرمانشاه با استفاده از شاخص NSFQI. فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۳(۲)، ۶۷-۵۱.
<https://doi.org/10.22126/atwe.2023.9040.1048.51-67>
- قمرنیا، هوشنگ، پالاش، زلیخا، و پالاش، میثم. (۱۴۰۲، ب). بررسی کیفی آب رودخانه گلین در استان کرمانشاه با استفاده از شاخص کیفیت آب کانادا (CWQI) جهت احداث مراکز پرورش ماهی. محیط زیست و مهندسی آب، ۳(۳)، ۳۳۴-۳۲۰.
<https://doi.org/10.22034/ewe.2022.339853.1771>
- معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور. (۱۳۸۸). دستورالعمل پایش کیفیت آب‌های سطحی (جاری) (نشریه شماره ۵۲۲). معاونت نظارت راهبردی دفتر فنی و اجرایی: وزارت نیرو، دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا.
https://waterstandard.wrm.ir/uploaded_files/DCMS/WRMResearch_files/522-s.pdf
- معاونت محیط زیست انسانی. (۱۳۹۲). شاخص کیفیت آب کشور و طبقه بندی آن. بهمن ۱۳۹۲. دفتر آب و خاک: سازمان حفاظت محیط زیست.
<https://dl.hsenk.ir/uploads/2023/06/HSEnk-2154.pdf>
- میربهراری، سید هاشم، شاه بهرامی، اسدالله، و پورذاکر عربانی، سودابه. (۱۴۰۲). شناسایی چالش‌های پایش کیفیت آب و ارائه راهکاری فناورانه مبتنی بر اینترنت اشیا، نخستین کنفرانس ملی اینترنت اشیا با تمرکز بر صنعت کشاورزی، اهواز، ایران. <https://civilica.com/doc/1905139>
- یادگاری، فاطمه، و آسوشه، عباس. (۱۴۰۲). ارائه مدل خدمات بیمارستان هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا. مجله انفورماتیک سلامت و زیست پزشکی، ۴(۹)، ۲۷۶-۲۶۷.
<http://dx.doi.org/10.34172/jhbmi.2023.06>

References

- Al-Sarifi, A. R. J., Shirinabadi, R., Rabieifar, H. R., & Najarchi, M. (2024). Prediction of groundwater level fluctuations in Songhor plain using machine learning methods. *Advanced Technologies in Water Productivity*, 4(1), 99-118. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10418.1117> [In Persian]
- American Public Health Association. (2023), American Water Works Association, Water Environment Federation. Lipps WC, Braun-Howland EB, Baxter TE, eds. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 24th ed. Washington DC: APHA Press. <https://www.standardmethods.org/doi/10.2105/SMWW.2882.219>
- Ashoori, R., Imamgholizadeh, S., Hajikandi, H., & Jamali, S. (2023). Investigation of spatial changes in the subsidence of Damghan plain and its prediction using artificial neural network model. *Advanced Technologies in Water Productivity*, 3(3), 68-87. <https://doi.org/10.22126/atwe.2023.9801.1065> [In Persian]
- Deputy of Human Environment. (2014). Environmental quality index of the country and its classification. Water and Soil Office: Environmental Protection Organization. <https://dl.hsenk.ir/uploads/2023/06/HSEnk-2154.pdf> [In Persian]
- Deputy of Planning and Strategic Supervision of the President. (2009). Guidelines for monitoring the quality of surface waters (Publication No. 522). Strategic Supervision Deputy, Office of Technical and Executive: Ministry of Energy, Office of Water and Wastewater Engineering Standards. https://waterstandard.wrm.ir/uploaded_files/DCMS/WRMResearch_files/522-s.pdf [In Persian]

- Dhok, R. P. (2020). Water Quality Index of Groundwater of Karha River Basin Area, Baramati, India. *Journal of Emerging Technologies and Innovation Research*, 7, 280-289.
- Ghamarnia, H., Palash, Z., & Palash, M. (2023a). Evaluation of water quality of Golin River in Kermanshah Province using NSFQI index. *Advanced Technologies in Water Productivity*, 3(2), 51-67. <https://doi.org/10.22126/atwe.2023.9040.1048> [In Persian]
- Ghamarnia, H., Palash, Z., & Palash, M. (2023b). Evaluation of the water quality of Golin River in Kermanshah Province using the Canadian Water Quality Index for establishing fish farming centers. *Environmental and Water Engineering*, 9(3), 320-334. <https://doi.org/10.22034/ewe.2022.339853.1771> [In Persian]
- Haq, K. R. A., & Harigovindan, V. P. (2022). Water quality prediction for smart aquaculture using hybrid deep learning models. *Ieee Access*, 10, 60078-60098.
- Hassani, Q., Mahvi, A., Naseri, S., Arabalibeyk, H., Younesian, M., & Gharibi, H. (2012). Designing a groundwater quality index using fuzzy logic. Retrieved from <http://healthjournal.arums.ac.ir/article-1-79-fa.html> [In Persian]
- <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=3bb3f82ffeef4525885c362144343119be5040ab>
- <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3180482>
- <https://eprints.glos.ac.uk/id/eprint/6781>
- https://www.researchgate.net/profile/Rajaram-Dhok/publication/358659911_water_quality_index_of_groundwater_of_karha_river_basin_area_baramati_india/links/620dfacef02286737ca4ce35/water-quality-index-of-groundwater-of-karha-river-basin-area-baramati-india.pdf
- Im, Y., Song, G., Lee, J., & Cho, M. (2022). Deep learning methods for predicting tap-water quality time series in South Korea. *Water*, 14(22), 3766. <https://doi.org/10.3390/w14223766>
- Iran Fisheries Organization. (2019). Executive guidelines for monitoring and controlling water quality at reproduction centers (Version 1, Document Code: MT/02/031). Aquaculture Development Deputy: Iran Fisheries Organization. <https://www.fisheries.ir/Articlefile/.docx> [In Persian]
- Kachroud, M., Trolard, F., Kefi, M., Jebari, S., & Bourrié, G. (2019). Water quality indices: Challenges and application limits in the literature. *Water*, 11(2), 361. <https://doi.org/10.3390/w11020361>
- Kumar, S., Tiwari, P., & Zymbler, M. (2019). Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review. *Journal of Big data*, 6(1), 1-21. <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0268-2>
- McCabe, M. F., Rodell, M., Alsdorf, D. E., Miralles, D. G., Uijlenhoet, R., Wagner, W., & Wood, E. F. (2017). The future of Earth observation in hydrology. *Hydrology and earth system sciences*, 21(7), 3879-3914. <https://doi.org/10.5194/hess-2017-54>
- Mirbahari, S. H., Shahbahrani, A., & Arabani, S. P. (2023). Identification of challenges in water quality monitoring and presentation of a technological solution based on the Internet of Things. First National Conference on Internet of Things with a focus on agriculture industry, Ahvaz, Iran. <https://civilica.com/doc/1905139> [In Persian]
- Nandi, B. P., Singh, G., Jain, A., & Tayal, D. K. (2024). Evolution of neural network to deep learning in prediction of air, water pollution and its Indian context. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(1), 1021-1036. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04911-y>
- Nasir, N., Kansal, A., Alshaltone, O., Barneih, F., Sameer, M., Shanableh, A., & Al-Shamma'a, A. (2022). Water quality classification using machine learning algorithms. *Journal of Water Process Engineering*, 48, 102920. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102920>

- Nechibvute, A., & Mudzingwa, C. (2013). Wireless sensor networks for scada and industrial control systems. *International Journal of Engineering and Technology*, 3(12), 1025-1035.
- Niknam, A. R. R., Sabaghzadeh, M., Barzkar, A., & Shishebori, D. (2024). Comparing ARIMA and various deep learning models for long-term water quality index forecasting in Dez River, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32228-x>
- Nimodiya, A. R., & Ajankar, S. S. (2022). A Review on Internet of Things. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 113(1), 135-144. https://www.researchgate.net/profile/Aditi-Nimodiya/publication/357783537_A_Review_on_Internet_of_Things/links/649ba1b095bbbe0c6ef8f8cb/A-Review-on-Internet-of-Things.pdf
- Noori, A., Bonakdari, H., Morovati, K., & Gharabaghi, B. (2020). Development of optimal water supply plan using integrated fuzzy Delphi and fuzzy electre III methods—Case study of the Gamasiab basin. *Expert Systems*, 37(5), e12568. <https://doi.org/10.1111/exsy.12568>
- Parker, C., Scott, S., & Geddes, A. (2019). *Snowball sampling*. SAGE research methods foundations.
- Rangzan, K., Kabolizadeh, M., & Karimi, D. (2020). Evaluation of Sentinel-2 and Landsat-8 Satellite images capability and evaluation of image fusion capability in seasonal zoning of NSFQI and IRWQIsc qualitative indices in surface water. *Geography and Environmental Planning*, 31(1), 73-102. <https://doi.org/10.22108/gep.2020.123228.1309>
- Saeed, A., Alsini, A., & Amin, D. (2024). Water quality multivariate forecasting using deep learning in a West Australian estuary. *Environmental Modelling & Software*, 171, 105884. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105884>
- Safaian Toopkanloo, E., Mozaheri, S. A., & Malekzadeh Shafaroudi, A. (2015). Assessment of water quality using quality indices of Firouzeh mineral water resources in Nishapur (northwest of Nishapur city, Razavi Khorasan). Seventh Symposium of the Iranian Economic Geology Association, Mashhad, Iran. <https://profdoc.um.ac.ir/paper-abstract-1049398.html> [In Persian]
- Shahini, S., Farajpahlou, A., Khadami Zadeh, S., & Naderan Tahan, M. (2023). Presenting a proposed architecture for employing the Internet of Things in Iranian academic libraries. *Journal of Information Processing and Management*, 38(4), 1457-1498. <https://doi.org/10.22034/jipm.2023.701680> [In Persian]
- Shamsuddin, I. I. S., Othman, Z., & Sani, N. S. (2022). Water quality index classification based on machine learning: A case from the Langat River Basin model. *Water*, 14(19), 2939. <https://doi.org/10.3390/w14192939>
- Shokoohi, A. R., & Modaberi, H. (2019). Evaluating and comparing the sensitivity of NSFQI and IRWQISC models to water quality parameters. *Iran-Water Resources Research*, 14(5), 118-132. https://www.iwrr.ir/article_65746_en.html?lang=fa
- Vellingiri, J., Kalaivanan, K., Gopinath, M. P., Gobinath, C., Subramaniam, P. R., & Rangarajan, S. (2023). Strategies for classifying water quality in the Cauvery River using a federated learning technique. *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*, 4, 187-193. <https://doi.org/10.1016/j.ijcce.2023.04.004>
- Vo, D. T., Nguyen, X. P., Nguyen, T. D., Hidayat, R., Huynh, T. T., & Nguyen, D. T. (2021). A review on the internet of thing (IoT) technologies in controlling ocean environment. *Energy sources, Part A: Recovery, utilization, and environmental effects*, 1-19. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1960932>
- Wang, Y., Zhou, J., Chen, K., Wang, Y., & Liu, L. (2017). Water quality prediction method based on LSTM neural network. In 2017 12th international conference on intelligent systems and knowledge engineering (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISKE.2017.8258814>

- William, P., Oyebode, O. J., Ramu, G., Gupta, M., Bordoloi, D., & Shrivastava, A. (2023). Artificial intelligence-based models to support water quality prediction using machine learning approach. In 2023 International Conference on Circuit Power and Computing Technologies, 1495-1501. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCPCT58313.2023.10245020>
- Yadegari, F., & Asoosheh, A. (2023). Presenting a smart hospital services model based on the Internet of Things. *Journal of Health and Biomedical Informatics*, 9(4), 267-276. <http://dx.doi.org/10.34172/jhbmi.2023.06> [In Persian]
- Zainurin, S. N., Wan Ismail, W. Z., Mahamud, S. N. I., Ismail, I., Jamaludin, J., Ariffin, K. N. Z., & Wan Ahmad Kamil, W. M. (2022). Advancements in monitoring water quality based on various sensing methods: a systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(21), 14080. <https://doi.org/10.3390/ijerph192114080>
- Zhi, W., Appling, A. P., Golden, H. E., Podgorski, J., & Li, L. (2024). Deep learning for water quality. *Nature Water*, 1-14. <https://doi.org/10.1038/s44221-024-00202-z>



Numerical investigation of flow in 180-degree bend with different radius and lateral intakes by SRH-2D model

Hadiseh Sedighi Harsini¹ , Rasool Ghobadian² 

¹ Ph.D. student of Water structures, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: hadiseh.136989@gmail.com

² Corresponding author, Associate Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: r_ghobadian@razi.ac.ir

ABSTRACT

In nature, different types of river bends such as simple, complex, sharp, mild, etc. can be seen. The hydraulic behavior of the flow in the place of water intake from the river bends is more complicated than the straight path. Due to the presence of secondary flow in the bends, the outer wall of the bend is a suitable place for taking water from the river (Dehghani et al, 2007). Using SRH-2D numerical model, the behavior of flow in a 180-degree bend with side intake and three ratios of bend radius to channel width (R/B) were investigated. In this way, three ratios of bend radius to the channel width, equivalent to 2 (sharp bend), 3 and 4 (mild bend) were used. The hydraulic parameters such as flow velocity and streamline and spanwise water level were taken for sections of 100, 110, 115 and 125 degrees along the main channel and one section at the beginning of the side channel. The SRH-2D model was able to simulate well the flow in a 180-degree bend with a lateral intake. Also, the different flow areas including the point of stagnation, the minimum velocity after the intake which tends to the inner wall bend, the minimum velocity, the separation zone and the maximum flow area inside the intake channel were correctly modeled. In taking and deviation of water from a mild bend, the entering velocity into the intake is higher than that from a sharp bend, which can be effective in reducing sedimentation in the intake opening. In the cross-sections before and after the lateral intake, the highest value of flow depth occurs near the outer wall of the bend and the lowest value occurs near the inner wall of the bend. The sharper the bend, the greater spanwise slope of the water surface.

Keywords: 180-Degree bend, Lateral intake, SRH-2D model, Sharp bend

Article Type: Resebendh Article

Article history: Received: 12 June 2024 Revised: 24 August 2024 Accepted: 10 September 2024 ePublished: 22 September 2024

1. Introduction

In nature, different types of river bends such as simple, complex, sharp, mild, etc. can be seen. The hydraulic behavior of the flow in the place of water intake from the river bends is more complicated than the straight path. Due to the presence of secondary flow in the bends, the outer wall of the bend is a suitable place for taking water from the river.

2. Methodology

Using SRH-2D numerical model, the behavior of flow in a 180-degree bend with side intake and three ratios of bend radius to channel width (R/B) were investigated. In this way, three ratios of bend radius to the channel width, equivalent to 2 (sharp bend), 3 and 4 (mild bend) were used.

The hydraulic parameters such as flow velocity and streamline and spanwise water level were taken for sections of 100, 110, 115 and 125 degrees along the main channel and one section at the beginning of the side channel.

3. Results and discussion

Validation of the numerical model was done using the laboratory data of previous research. The results showed that the model correctly simulates the different parts of the flow in a bend with the presence of a side intake. The calculated and measured velocity values have an R^2 coefficient equal to 0.94.

According to the results obtained from this research, in the 115-degree section which corresponds to the axis of the side intake, with the increase of R/B ratio from 2 to 4, the velocity of the flow entering the intake increases by 6%. In the area of the outer wall of the bend, before the water intake, flow velocity in the sharp bend is higher than in the mild bend, and in the section immediately after the water intake, the flow velocity in the mild bend is higher than in the sharp bend.

Regardless of the relative radius of the bend, before the water intake opening, the position of the maximum flow velocity is in the vicinity of the outer wall of the bend, while after the intake opening, it is drawn towards the inner wall of the bend. In the 125-degree section, with the relative radius of the bend increasing from 2 to 4, the flow velocity in the outer wall has increased by 5%, but in the inner wall, the average velocity has decreased by 4%.

At the 115-degree section, the maximum amount of water level can be seen around the center line of the bend, and the sharper the size of the bend, the higher the amount of water level rises around the center line of the bend.

4. Conclusions

According to the obtained results, the SRH-2D model was able to simulate well the flow in a 180-degree bend with a lateral intake. Also, the different flow areas including the point of stagnation, the minimum velocity after the intake which tends to the inner wall bend, the minimum velocity, the separation zone and the maximum flow area inside the intake channel were correctly modeled. In taking and deviation of water from a mild bend, the entering velocity into the intake is higher than that from a sharp bend, which can be effective in reducing sedimentation

in the intake opening. In the cross-sections before and after the lateral intake, the highest value of flow depth occurs near the outer wall of the bend and the lowest value occurs near the inner wall of the bend. The sharper the bend, the greater spanwise slope of the water surface.

5. References

Dehghani, A., Ghodsian, M., Salehi Neyshabouri, S., & Shafeifar, M. (2007). Study on River Bed Evolution in 180° Alluvial Channel Bend. *Journal of Hydraulics*, 2(2), 1-16. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2007.85385> [In Persian]

6. Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Cite this article: Sedighi Harsini, H., & Ghobadian, R. (2024). Numerical investigation of flow in 180-degree bend with different radius and lateral intakes by SRH-2D model, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(3), 99-117. DOI: 10.22126/atwe.2024.10860.1132

Publisher: Razi University

© The Author(s).





بررسی هیدرولیک جریان در قوس های ۱۸۰ درجه از تند تا ملایم همراه با آبگیر جانبی با

مدل SRH-2D

حدیثه صدیقی هرسینی^۱، رسول قبادیان^۲

^۱ دانشجوی دکتری سازه های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: hadiseh.136989@gmail.com
^۲ نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: r_ghobadian@razi.ac.ir

چکیده

در طبیعت انواع قوس رودخانه ای از قبیل، ساده مرکب، تند، ملایم و ... قابل مشاهده هستند. رفتار هیدرولیکی جریان در محل آبگیری از قوس های رودخانه ای بسیار پیچیده تر از مسیر مستقیم است. در این مطالعه با استفاده از مدل عددی SRH-2D اثر سه نسبت شعاع قوس به پهنای کانال (R/B) معادل ۲ (قوس تند)، ۳ و ۴ (قوس ملایم) بر هیدرولیک جریان در محل آبگیر بررسی شد. پس از صحت سنجی مدل با استفاده از داده های آزمایشگاهی تحقیقات قبلی بر روی یک قوس ۱۸۰ درجه با $R/B=4/33$ ، پارامترهای هیدرولیکی سرعت و رقوم سطح آب برای مقاطع ۱۰۰، ۱۱۰، ۱۱۵ و ۱۲۵ درجه در طول کانال اصلی و یک مقطع در ابتدای کانال جانبی برداشت گردید. طبق نتایج به دست آمده، در مقطع ۱۱۵ درجه که منطبق بر محور آبگیر جانبی است، با افزایش نسبت R/B از ۲ به ۴ سرعت ورودی جریان به آبگیر ۶٪ افزایش پیدا می کند. در مقطع ۱۲۵ درجه با افزایش شعاع نسبی قوس از ۲ به ۴، سرعت در قوس خارجی ۵٪ افزایش پیدا کرده اما در قوس داخلی کاهش سرعت متوسط به میزان ۴٪ می باشد. در مقطع ۱۱۵ درجه، حداکثر رقوم سطح آب در حوالی خط مرکزی قوس قابل مشاهده است؛ و هر اندازه قوس تند تر باشد، مقدار بالازدگی سطح آب در حوالی خط مرکزی قوس بیشتر است. در سایر مقاطع قبل و بعد از دهانه آبگیر رقوم سطح آب در قوس خارجی بیشتر و هر اندازه قوس تند تر باشد شیب عرضی سطح آب بیشتر می باشد.

واژه های کلیدی: قوس ۱۸۰ درجه، آبگیر جانبی، مدل SRH-2D، قوس تند و ملایم، شبیه سازی جریان

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۳ خرداد ۱۴۰۳ اصلاح: ۰۳ شهریور ۱۴۰۳ پذیرش: ۲۰ شهریور ۱۴۰۳ چاپ الکترونیکی: ۰۱ مهر ۱۴۰۳

استناد: صدیقی هرسینی، حدیثه، و قبادیان، رسول. (۱۴۰۳). بررسی هیدرولیک جریان در قوس های ۱۸۰ درجه از تند تا ملایم همراه با آبگیر جانبی با مدل SRH-2D، *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۴(۳)، ۹۹-۱۱۷. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2024.10860.1132

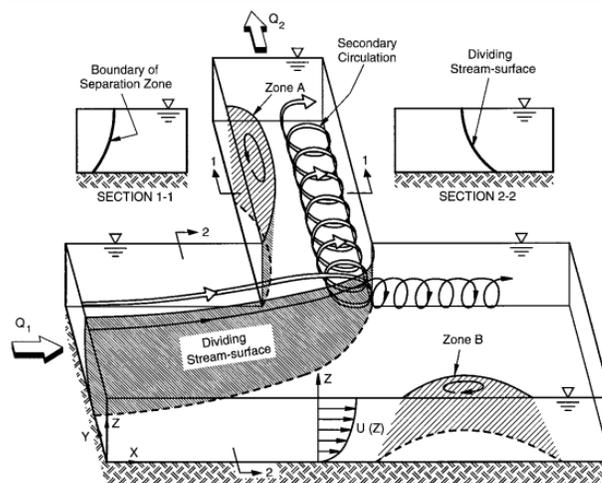


مقدمه

آبگیرها سازه‌هایی هستند که به وسیله‌ی آنها می‌توان آب را از مسیر اصلی خود، برای اهداف مختلف آبرسانی انحراف داد. الگوی جریان در محل آبگیری از کانال اصلی، همانند الگوی جریان در محل تلاقی دو رودخانه‌ها، از مباحث پیچیده و مهم در مهندسی هیدرولیک و رودخانه است. با نزدیک شدن جریان به کانال انحرافی، به علت وجود مکش در امتداد عرض دهانه آبگیر، انحراف خطوط جریان افزایش می‌یابد، که موجب تقسیم جریان بین آبگیر و پایین دست کانال اصلی می‌شود. به علت اینکه مومنتم جریان در راستای کانال اصلی بیشتر از کانال انحرافی بوده است، ناحیه جداشده در جداره داخلی کانال انحرافی تشکیل می‌شود. از طرفی وجود گرادیان فشار جانبی و نیروی گریز از مرکز ناشی از انحنای خطوط جریان، عدم تعادل در الگوی جریان ورودی به آبگیر را در پی دارد که باعث ایجاد چرخش های ثانویه در امتداد دیواره خارجی کانال انحرافی می‌شود (دهقانی و همکاران، ۱۳۸۴).

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

داوینچی^۱ (۱۵۰۷) و سپس کاردینالی^۲ (۱۸۲۸) جزء اولین پژوهشگرانی بودند که بر روی جریان آبگیرهای جانبی به تحقیق و پژوهش پرداختند (نیری و همکاران^۳، ۱۹۹۹). نیری و همکاران (۱۹۹۵) الگوی سه بعدی جریان در محل آبگیر جانبی را معرفی کرده اند که در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱. الگوی سه بعدی جریان در آبگیر جانبی (نیری و همکاران، ۱۹۹۵)

با نزدیک شدن جریان به آبگیر، به صورت جانبی توسط فشار مکش در انتهای کانال انشعابی تحت شتاب قرار می‌گیرد. این موضوع باعث می‌شود که جریان به گونه‌ای تقسیم شود که بخشی از آن وارد کانال انشعابی شود و بقیه به پایین دست در کانال اصلی ادامه جریان دهند. بخشی از جریان که توسط شاخه انشعابی خارج می‌شود با یک سطح لایه برشی منحنی مشخص می‌شود که به عنوان سطح جریان تقسیم کننده نشان داده می‌شود. به دلیل انحنای جانبی سطح تقسیم کننده جریان، جریان منحرف شده دچار عدم تعادل بین گرادیان فشار عرضی و برش و نیروی گریز از مرکز می‌شود، که یک سلول حرکت ثانویه در جهت عقربه‌های ساعت را آغاز می‌کند. این حرکت ثانویه با ناحیه جداشدگی در امتداد دیواره داخلی کانال انشعابی (منطقه A) در تعامل است و در نتیجه یک جریان سه بعدی بسیار پیچیده‌ای تشکیل می‌شود. انحنای جریان همچنین ممکن است یک سلول حرکت ثانویه در خلاف جهت عقربه‌های ساعت در کانال اصلی و پایین

¹ Davin Chi

² Cardinali

³ Neary et al

دست منطقه اتصال ایجاد کند. علاوه بر این، بسته به نسبت عمق جریان d به عرض کانال W ، و همچنین نسبت دبی انحرافی به دبی کانال اصلی در بالادست ($r = Q2/Q1$) ممکن است یک ناحیه جداشدگی در امتداد دیواره خارجی کانال اصلی (ناحیه B) ایجاد شود. این ناحیه در نسبت کم دبی انحرافی به دبی کل به ندرت ایجاد می‌شود.

پیرستانی و همکاران (۱۳۸۵) به بررسی آزمایشگاهی جریان انحرافی آبگیرهای جانبی با زوایای انحراف مختلف در یک قوس ۱۸۰ درجه پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که با توجه به تاثیری که آبگیر بر روی خطوط جریان در کانال اصلی می‌گذاشت موقعیت آبگیری ۷۵ درجه نسبت موقعیت‌های دیگر آبگیری دارای بیشترین دبی نسبی انحراف است. بیشترین تغییرات سرعت و قدرت جریان ثانویه و مومتم جریان عرضی در طول دهانه آبگیر اتفاق می‌افتد (پیرستانی و همکاران، ۱۳۸۷). از طرفی منتصری و همکاران (۱۳۸۷) نشان دادند که با ورود جریان به قوس، نه تنها یک جریان چرخشی در مقطع کانال به وجود می‌آید بلکه یک سلول چرخشی دیگر نیز با جهت مخالف در قوس خارجی به وجود می‌آید. این در حالی است که در مقاطع پس از آبگیر سلول چرخشی دوم در قسمت فوقانی جداره داخلی قوس تشکیل می‌شود. بررسی اثر زاویه‌های انحرافی مختلف بر روی تشکیل ناحیه جریان گردابی توسط عباسی و ملک نژاد (۲۰۱۴) انجام شد. نتایج مطالعات بیانگر این بود که ابعاد ناحیه گردابی در کانال انحرافی، به نسبت دبی انحرافی و زاویه انحراف بستگی دارد که افزایش زاویه انحراف موجب کاهش طول و عمق ناحیه جریان گردابی می‌شود.

استفاده از مدل‌های عددی برای شبیه سازی جریان در شرایط مختلف از جمله محل آبگیرها و تلاقی‌ها نیز مورد توجه محققین حوضه آب قرار گرفته است. رستم آبادی و همکاران (۱۳۸۸) با مدل سازی صفحات مستغرق در یک قوس ۱۸۰ درجه در مقابل دهانه آبگیر به وسیله نرم افزار FLUENT به این مهم دست یافتند که جریان ثانویه حول صفحات مستغرق در جهت جریان ثانویه اصلی در قوس است؛ در نتیجه امکان آبگیری بیشتر از جریان سطحی به مقدار کمتر رسوب ممکن می‌شود. نرم افزار سه بعدی SSIM2 در شبیه سازی خطوط جریان، میدان سرعت و تشخیص الگوی جریان در دهانه آبگیر نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد این در حالی است که در نواحی نزدیک دیوار به علت ضعف مدل $k-\epsilon$ و نواحی نزدیک بستر نتایج با نتایج آزمایشگاهی دارای اختلاف است (منتصری و آسیائی، ۱۳۹۳).

کارایی مدل سازی نرم افزار CCHE2D توسط حبیبی و همکاران (۱۳۹۳) انجام شد که نتایج شبیه سازی الگوی جریان، فرسایش و رسوبگذاری نشان دهنده این موضوع بود که مدل قادر به شبیه سازی خصوصیات جریان در محل تلاقی است. از طرفی یانگ^۲ (۲۰۱۳) با استفاده از یک مدل عددی که از مش بندی پویا استفاده شده بود، به بررسی خصوصیات جریان در تلاقی ۹۰ درجه پرداخت که نتایج جاکی از آن بود مدل به خوبی قادر است سطح جریان و سرعت را به خوبی شبیه سازی کند. قبادیان و صیدی تبار (۱۳۹۴) ضمن تاکید بر این موضوع که مدل عددی SSIM1 به خوبی جریان در آبگیر جانبی و قوس را شبیه سازی می‌کند، به این نتیجه دست یافتند که با افزایش موقعیت اتصال از ۴۵ به ۱۳۵ درجه حداکثر تنش برشی بستر در محل اتصال حدود ۸ درصد کاهش پیدا می‌کند.

شبیه سازی جریان در یک قوس ۱۸۰ درجه با حضور آبگیر جانبی و صفحات مستغرق به وسیله مدل عددی Flow3D توسط سرحدی و جباری^۳ (۲۰۱۷) انجام گرفت که نتایج مدل عددی حاکی از آن بود که زاویه ۶۰ درجه برای قرار گیری صفحات مستغرق موجب حداکثر دبی آبگیری از قوس می‌شود. سویی و هانگ^۴ (۲۰۱۷) به بررسی عددی ناحیه جداشدگی جریان در یک کانال قوسی با آبگیر جانبی پرداختند. نتایج عددی از این قرار بود که طول و عرض ناحیه جداشدگی به طور کلی با افزایش نسبت دبی و زاویه تقاطع افزایش پیدا می‌کند؛ این در حالی است که عرض ناحیه جداشدگی زمانی که زاویه بین ۶۰ تا ۹۰ درجه است ثابت می‌ماند. از طرفی منتصری و همکاران (۲۰۱۹) الگوی جریان در اطراف آبگیر جانبی در قوس ۱۸۰ درجه با زاویه آبگیری ۴۵ درجه و موقعیت آبگیر ۱۱۵ درجه را به وسیله مدل عددی SSIM2 در شبیه سازی کردند. پس از کالیبره کردن مدل با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، در کانال قوسی و بعد از آبگیر، نتایج بیانگر این مهم

¹ Abbasi & MalekNejad

² Yang

³ Sarhadi & Jabbari

⁴ Sui and Huang

بودند که در هر دو نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی یک نوع چرخش جریان دو سلولی اتفاق می‌افتد که یکی از آنها ساعتگرد و دیگری پادساعتگرد در حال چرخش هستند و در نزدیکی قوس داخلی و در حالت جریان آزاد مشاهده می‌شوند.

در پژوهشی شبیه‌سازی سه‌بعدی الگوی جریان در آبیگری از قوس ۱۸۰ درجه به وسیله نرم افزار Flow 3D توسط مشکاتی و صالحی نیشابوری (۱۴۰۰) انجام شد. مدل مورد نظر ابتدا در قوس ۱۸۰ درجه و سپس آبیگری از کانال مستقیم صحت‌سنجی شد. پس از آن الگوی جریان در آبیگری از قوس ۱۸۰ درجه برای زاویه استقرار ۴۰ درجه و تحت زاویه آبیگری ۴۵ درجه شبیه‌سازی شد و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی موجود مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که خطای مدل‌سازی در کانال اصلی و آبیگر به میزان ۷/۳ و ۱۹/۷ درصد می‌باشد که میزان قابل قبولی است.

بررسی آزمایشگاهی جریان اصلی، جریان ثانویه و تنش برشی بستر در یک قوس ۱۸۰ درجه توسط شکرین و همکاران^۱ (۲۰۲۲) انجام گرفت. برای این منظور از دو سری آزمایش با و بدون کرانه به عنوان سازه رودخانه دوستار با طبیعت استفاده شد. نتایج نشان داد که در آزمایشات با حضور کرانه‌ها اندازه سرعت جریان در میانه کانال در حالتی که صفحات مستغرق وجود دارند به اندازه ۱/۱۳ بار افزایش پیدا می‌کند. از طرفی وجود کرانه‌ها سرعت را در ناحیه چرخشی به اندازه ۳۸ درصد کاهش می‌دهند.

در یک مطالعه آزمایشگاهی اثر ترکیب همگرایی و صفحات مستغرق بر روی هیدرولیک جریان ورودی به آبیگر جانبی در قوس ۹۰ درجه توسط سراجیان و همکاران (۱۴۰۱) مورد بررسی قرار گرفت. این آزمایش‌ها که بر روی یک کانال مستطیلی با قوس ۹۰ درجه انجام شده بود از چهار دبی، چهار زاویه متفاوت صفحات مستغرق و چهار درجه همگرایی انتهایی کانال استفاده شده بود. نتایج حاکی از آن بود که در طی همگرا شدن کانال آزمایشگاهی دبی انحرافی به آبیگر افزایش پیدا می‌کند ولی با نصب صفحات مستغرق این دبی کاهش پیدا می‌کند. بررسی تحقیقات قبلی نشان می‌دهد عمده تحقیقات انجام شده در آبیگری از قوس ۱۸۰ درجه ملایم با مدل‌های سه‌بعدی انجام شده است. هزینه محاسبات انجام شده با مدل‌های سه‌بعدی بسیار زیاد و نیاز به سخت‌افزار قدرتمند جهت شبیه‌سازی دارند. مزیت استفاده از مدل‌های دو بعدی، سرعت در حل مساله و عدم نیاز به سخت‌افزار قدرتمند جهت شبیه‌سازی است. درحالی‌که در روش سه‌بعدی، نتایج به واقعیت نزدیکتر است. از این رو در تحقیق حاضر از مدل عددی SRH-2D با توجه به قابلیت‌های آن در شبیه‌سازی جریان در محیط‌های با اشکال پیچیده، استفاده شد. از طرفی تحقیقات متعدد قبلی نشان داده است الگوی جریان در قوس ساده ۱۸۰ درجه تند و ملایم اختلاف قابل توجهی با همدیگر دارد. در قوس تند همواره مسیر حداکثر سرعت جریان در مجاور دیواره داخلی قوس است در حالی‌که در قوس ملایم در حوالی زاویه بین ۴۵ تا ۶۰ درجه از ابتدای قوس مسیر جریان به سمت دیواره خارجی متمایل می‌شود. وجود آبیگر بر روی قوس ۱۸۰ درجه تند و ملایم چگونه الگوی جریان در طول قوس و در محل آبیگر را تحت تاثیر قرار می‌دهد، موضوعی است که در این تحقیق بدان پرداخته شده است. بدین منظور سرعت جریان و نیمرخ سطح آب در طول قوس، محل آبیگری و در کانال آبیگر مورد بررسی قرار گرفت.

روش پژوهش

مدل آزمایشگاهی

در این پژوهش از نتایج مدل آزمایشگاهی پیرستانی و همکاران (۱۳۸۷) استفاده گردید. مدل آزمایشگاهی با توجه به توصیه گراف و بلانکرت^۲ (۲۰۰۱) و اینکه جریان در قوس ۱۸۰ درجه دارای جریان ثانویه کاملاً توسعه یافته است، به صورت U شکل با مقطع مستطیلی به عرض و ارتفاع ۰/۶ متر و شعاع انحنا ۲/۶ متر و با نسبت شعاع انحنا به عرض ۴/۳۳، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس ساخته شده است. در این مدل آزمایشگاهی، کانال انحرافی با مقطع مستطیلی با طولی ۱/۱ متری، عرض ۰/۲۵ متری و ارتفاع ۰/۳ متری در موقعیت ۱۱۵ درجه از ابتدای قوس آبیگری می‌نماید. در شکل (۲) نمای شماتیکی از مدل آزمایشگاهی قابل مشاهده است.

¹ Shokrian et al

² Graf & Blanckaert

$$\left(\begin{matrix} \tau_{bx} \\ \tau_{by} \end{matrix} \right) = \rho C_f (U/V) \sqrt{U^2 + V^2} \quad (4)$$

$$C_f = \frac{gn^2}{h^{1/3}} \quad (5)$$

که در آن n ضریب زبری مانینگ می باشد. تنش برای حالت جریان آشفته بر اساس معادلات بوسینسک به صورت زیر است:

$$T_{xx} = 2(\vartheta + \vartheta_t) \left(\frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2}{3}k \right) \quad (6)$$

$$T_{xy} = 2(\vartheta + \vartheta_t) \left(\frac{\partial U}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (7)$$

$$T_{yy} = 2(\vartheta + \vartheta_t) \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}k \right) \quad (8)$$

که در آن ϑ لزجت دینامیکی سیال، ϑ_t لزجت گردابه ای و k انرژی جنبشی در حالت آشفته می باشد. مدل برای محاسبه لزجت گردابه ای از دو رابطه k - ε و Parabolic استفاده می کند.

ب) معرفی مدل SMS 9.2

مدل SRH-2D جهت مش بندی محدوده ی مطالعاتی به یک نرم افزار مش ساز نیاز است که در اینجا از مدل SMS9.2 استفاده شده است. محدوده مطالعاتی رسم شده به وسیله Auto Cad در مدل SMS9.2 با فرمت dxf فراخوانی می شود. سپس با ایجاد مش بندی صحیح و معرفی مرزها و شرایط اولیه، محدوده مطالعاتی برای ارسال به نرم افزار SRH-2D آماده می شود. مش بندی به صورت اتوماتیک توسط نرم افزار انجام شد و به دلیل حساسیت بالا در قوس، مش ها ریزتر و به صورت ترکیبی از مش مثلثی و مستطیلی انتخاب شده است. در شکل (۳) نمای شماتیکی از محدوده مطالعاتی با مش بندی و شرایط مرزی در نرم افزار SMS9.2 قابل مشاهده است.



شکل ۳. نمای شماتیکی از محدوده مطالعاتی مش بندی شده و شرایط مرزی آن در مدل SMS9.2

پس از آماده سازی مش بندی محدوده مطالعاتی همانطور که در شکل (۳) قابل مشاهده است، برای مقطع ورودی دبی جریان به عنوان شرط مرزی بالادست، برای مقطع خروجی از آبگیر دبی آبگیر و برای مقطع خروجی از قوس، عمق جریان در مدل SRH-2D به عنوان شرایط مرزی پایین دست در نظر گرفته شده است. از طرفی با فرض اینکه بستر در ابتدا کاملاً خشک بوده و سپس جریان روی آن اتفاق افتاده است، شرط اولیه Dry برای اجرای مدل SRH-2D در نظر گرفته شد.

یافته‌ها

صحت‌سنجی مدل SRH-2D

همانطور که در بخش قبل ذکر گردید، جهت صحت‌سنجی مدل SRH-2D در این پژوهش از نتایج مدل آزمایشگاهی پیرستانی و همکاران (۱۳۸۷) استفاده گردید. از آنجائیکه درستی و دقت نتایج شبیه‌سازی به اندازه شبکه‌بندی جریان وابسته است، بدین منظور در مش‌بندی محدوده مورد مطالعه از سه نوع شبکه بندی ریز، متوسط و درشت استفاده شد. همچنین با توجه به نتایج تحقیقات قبلی و محرز بودن نواحی چرخشی در محدوده آبگیر از مدل مدل آشفتگی $k-\epsilon$ برای تعیین لزجت گردابی در محاسبات تنش‌های اغتشاشی استفاده شد. مقادیر ارائه شده در جدول (۱) نشان می‌دهد شبکه مش‌بندی متوسط دارای خطای کم و زمان شبیه‌سازی مناسبی است. همچنین با مقایسه شبکه‌های مش ریز و متوسط، مشخص گردید که ریز شدن شبکه و افزایش زمان شبیه‌سازی، تاثیر چندانی بر روی نتایج نداشته و نتایج مستقل از زمان و اندازه شبکه است. در نتیجه شبکه مش متوسط به عنوان شبکه مش‌بندی بهینه در نظر گرفته شده است. جهت برآورد خطای شبکه‌های مش‌بندی از دو پارامتر آماری MAE و RMSE استفاده شده است که در معادلات آن‌ها قابل مشاهده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [v_0 - v_i]^2} \quad (9)$$

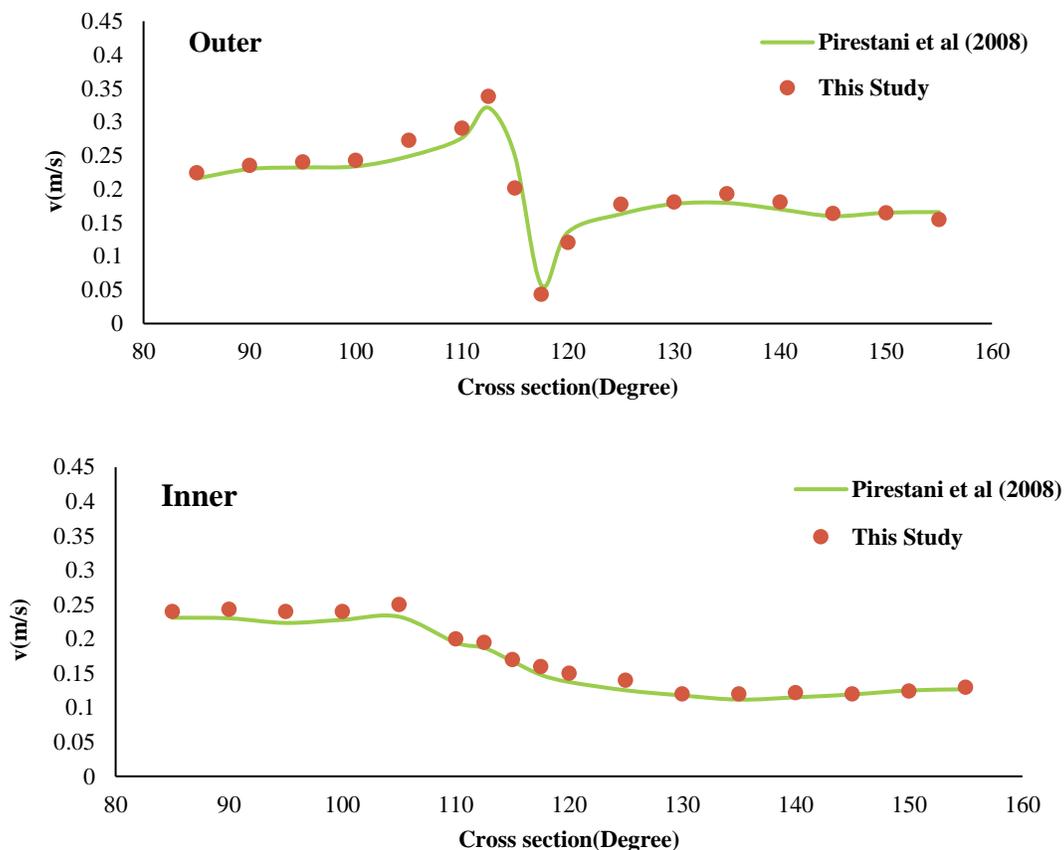
$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n (|v_0 - v_i|)}{n} \quad (10)$$

که در آن‌ها v_0 سرعت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، v_i سرعت اندازه‌گیری شده در مدل عددی، n تعداد داده‌های موجود است.

جدول ۱. نتایج صحت‌سنجی شبکه مش‌بندی

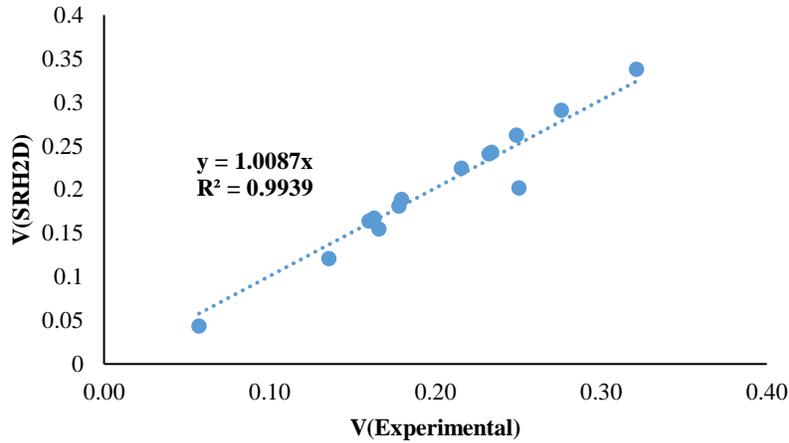
<i>TIME(Hour)</i>	<i>RMSE (m/s)</i>	<i>MAE(m/s)</i>	<i>Minimum Cell Size (cm)</i>	<i>Cell number</i>	<i>Cell Size(cm)</i>	<i>Mesh</i>
5	0.036	0.05	1.5	1052124	5	<i>Large</i>
12	0.016	0.013	1	1783042	3	<i>Medium</i>
24	0.012	0.011	0.5	2153279	2	<i>Small</i>

با توجه به نتایج صحت‌سنجی و میزان قابل قبول خطای محاسبه شده، می‌توان به نتایج مدل در شبیه‌سازی جریان در قوس ۱۸۰ درجه با آبگیر جانبی اعتماد کرد. در شکل (۴) سرعت محاسبه شده در مدل SRH-2D و مقایسه آن با مقدار اندازه‌گیری شده در مدل آزمایشگاهی پیرستانی و همکاران (۱۳۸۷) نمایش داده شده است.



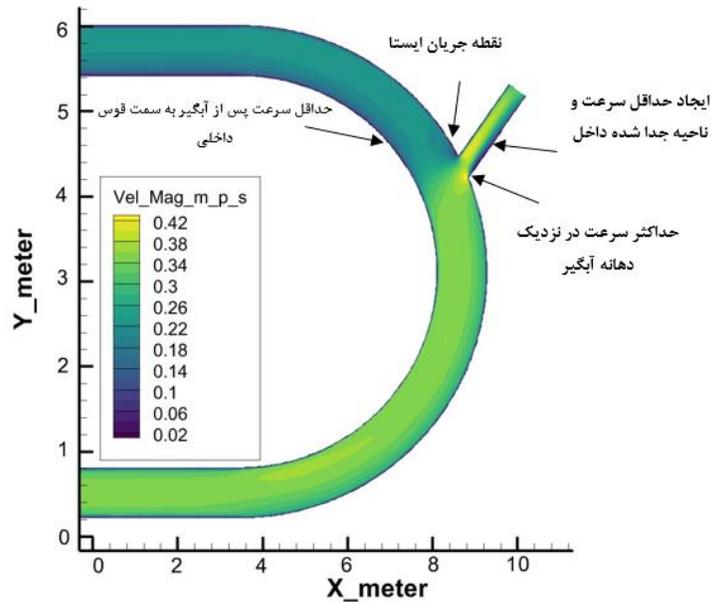
شکل ۴. مقایسه برآیند سرعت در نزدیکی قوس داخلی و خارجی در مدل آزمایشگاهی پیرستانی و همکاران (۱۳۸۷) و مدل عددی SRH-2D

همانطور که در شکل (۴) نمایان است هر دو نیمرخ طولی سرعت جریان قبل، در محل و بعد از آبگیر تقریباً بر هم منطبق هستند و از یک الگوی یکسان تبعیت می کنند. به گونه ای که مدل به درستی افت سرعت جریان از حدود 0.33 تا 0.4 متر بر ثانیه را در محل آبگیر که در مقطع 115 درجه واقع شده است را مدل سازی می کند. به منظور مقایسه دقیقتر مقادیر سرعت جریان اندازه گیری شده و محاسبه شده در شکل (۵) در مقابل همدیگر ترسیم شده است. همانگونه که مشاهده می شود، شیب خط رگرسیون تقریباً برابر با یک و ضریب R^2 معادل 0.94 نشان از دقت نسبتاً مناسب مدل عددی در شبیه سازی جریان در محدوده نسبتاً پیچیده آبگیری از قوس 180 درجه را دارد.



شکل ۵. مقدار سرعت در نزدیکی قوس خارجی در مدل عددی در مقابل مقدار آزمایشگاهی

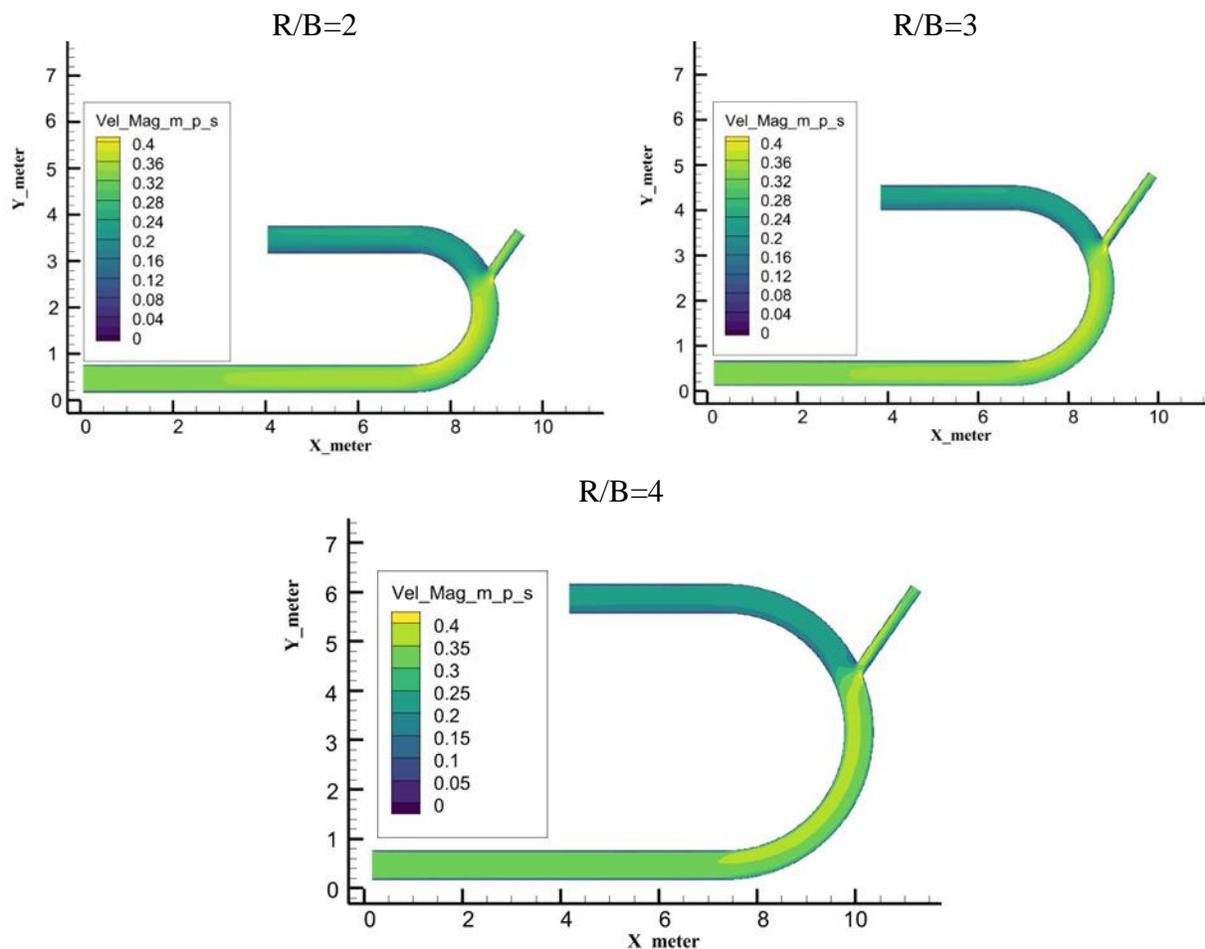
از طرفی طبق نتایج به دست آمده از اجرای مدل عددی SRH-2D که در شکل (۵) نشان داده شده است و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی پیرستانی و همکاران (۱۳۸۵)، مدل به خوبی قادر است نواحی مختلف جریان در یک قوس با آبگیر جانبی را شبیه سازی کند. همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است، نقطه جریان ایستا، حداقل سرعت پس از آبگیر که به سمت قوس داخلی تمایل پیدا کرده است، حداقل سرعت و ناحیه جداشدگی داخل آبگیر و در نهایت به دلیل افزایش سرعت جریان با نزدیک شدن به کانال آبگیر، حداکثر سرعت در نزدیکی دهانه آبگیر اتفاق می‌افتد که به درستی مدل سازی شده است.



شکل ۶. خطوط هم سرعت برای مدل عددی SRH-2D

بحث

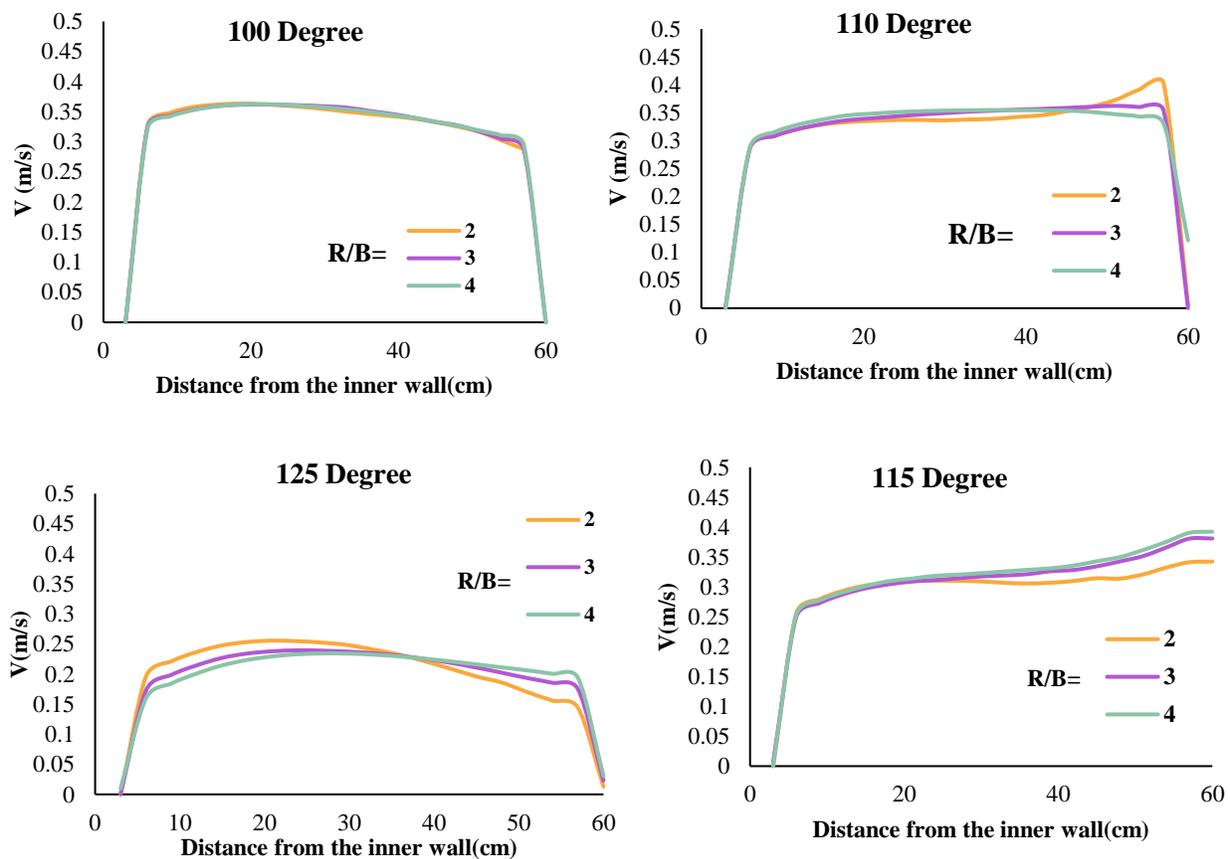
پس از صحت سنجی مدل با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و اعتماد با نتایج آن، در ادامه اثر تغییر شعاع قوس ۱۸۰ درجه یا به عبارتی تاثیر نوع قوس از ملایم تا تند بر الگوی جریان و برخی خصوصیات هیدرولیکی آن پرداخته شد. بدین منظور از سه قوس با نسبت شعاع انحنا خط مرکزی به پهنای مجرای معادل ۲، ۳ و ۴ استفاده شد. شرایط اولیه و مرزی مورد نظر همانند شرایط صحت سنجی برای مدل تعریف گردید و پارامترهای هیدرولیکی سرعت و تنش برشی برای مقاطع ۱۰۰، ۱۱۰، ۱۱۵ و ۱۲۵ درجه و ورودی آبگیر جانبی برداشت گردید. در شکل (۷) نمای کلی از محدوده های مورد بررسی را که بر روی آنها مقادیر سرعت جریان پهنه بندی شده، نشان داده شده است. همانطور که در تصاویر نمایان است قسمت های مختلف جریان شامل جریان ایستا، ناحیه جدا شده داخل آبگیر حداقل و حداکثر سرعت در طول کانال به خوبی شبیه سازی شده است.



شکل ۷. نمای کلی محدوده های شبیه سازی شده.

برای مقاطع ذکر شده در قسمت بالا سرعت متوسط برداشت گردید و در شکل (۸) نمودارهای آن به نمایش گذاشته شده است. همانطور که در اشکال قابل مشاهده است، در مقطع عرضی ۱۰۰ درجه که قبل از قرارگیری کانال آبگیر است تغییر در شعاع قوس کانال تاثیر خاصی بر روی

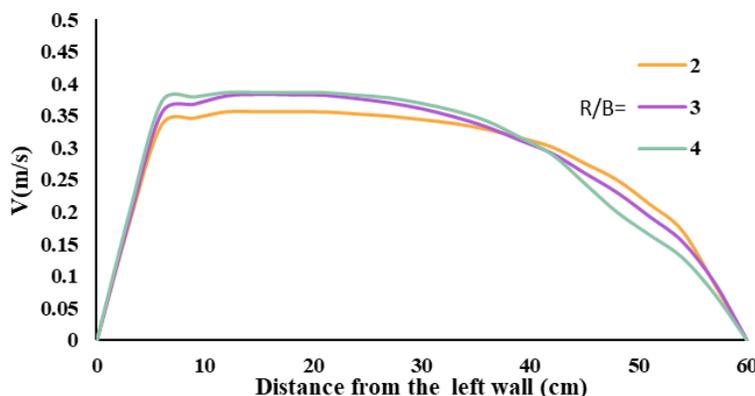
توزیع عرضی سرعت طولی جریان ندارد؛ این در حالی است که در مقطع ۱۱۰ درجه یعنی دقیقاً در محل محور کانال آبگیر، با افزایش شعاع قوس سرعت در قوس خارجی کاهش پیدا می‌کند، که این کاهش سرعت مقداری برابر با ۷٪ می‌باشد و نیز حداکثر سرعت برای هر ۳ حالت مربوط به قوس خارجی است. در مقطع ۱۱۵ درجه که منطبق بر محور آبگیر جانبی است با افزایش R/B از ۲ به ۴ سرعت در ورودی آبگیر ۶٪ افزایش پیدا می‌کند، ولی همچنان حداکثر سرعت مربوط به قسمت خارجی قوس است، که این امر به دلیل وجود جریان‌های ثانویه و گرادیان فشاری در قوس خارجی است که جریان را به سمت قوس خارجی می‌کشد و موجب افزایش سرعت در این ناحیه می‌گردد. پس از آبگیر، یعنی در مقطع ۱۲۵ درجه، حداکثر سرعت در مقطع عرضی به سمت قوس داخلی کشیده شود. این پدیده در حالی اتفاق می‌افتد که با افزایش شعاع نسبی قوس از ۲ به ۴، سرعت در قوس خارجی ۵٪ افزایش پیدا کرده اما در قوس داخلی کاهش سرعت متوسط به میزان ۴٪ مشاهده می‌شود. بطور کلی در محدوده دیواره خارجی قوس، قبل از دهانه آبگیر سرعت جریان در قوس تند بیشتر از قوس ملایم است و در مقطع مماس بر محور آبگیر جانبی و مقطع بلافاصله بعد از آبگیر سرعت جریان در قوس ملایم ($R/B=4$) بیشتر از قوس تند ($R/B=2$) است. همچنین سرعت جریان در مقطع بلافاصله بعد از آبگیر (مقطع ۱۲۵ درجه) به دلیل کاهش دبی جریان ناشی از آبگیری کمتر از مقاطع قبلی است.



شکل ۸. سرعت متوسط در مقاطع عرضی مختلف برای هر سه حالت نسبت شعاع به عرض کانال

از طرفی همانگونه در شکل (۹) نشان داده شده است در یک مقطع عرضی در کانال جانبی و در فاصله نیم متری از دهانه آبگیری، همواره حداکثر سرعت در مجاور (در فاصله حدود ۱۵ درصدی پهنای کانال آبگیر) دیوار سمت چپ کانال آبگیر رخ داده است. از طرفی در آبگیری از قوس ملایم مقدار حداکثر سرعت در مقطع عرضی بیشتر از آبگیری از قوس تند می‌باشد. در حالت کلی سرعت جریان در ابتدای کانال آبگیر در

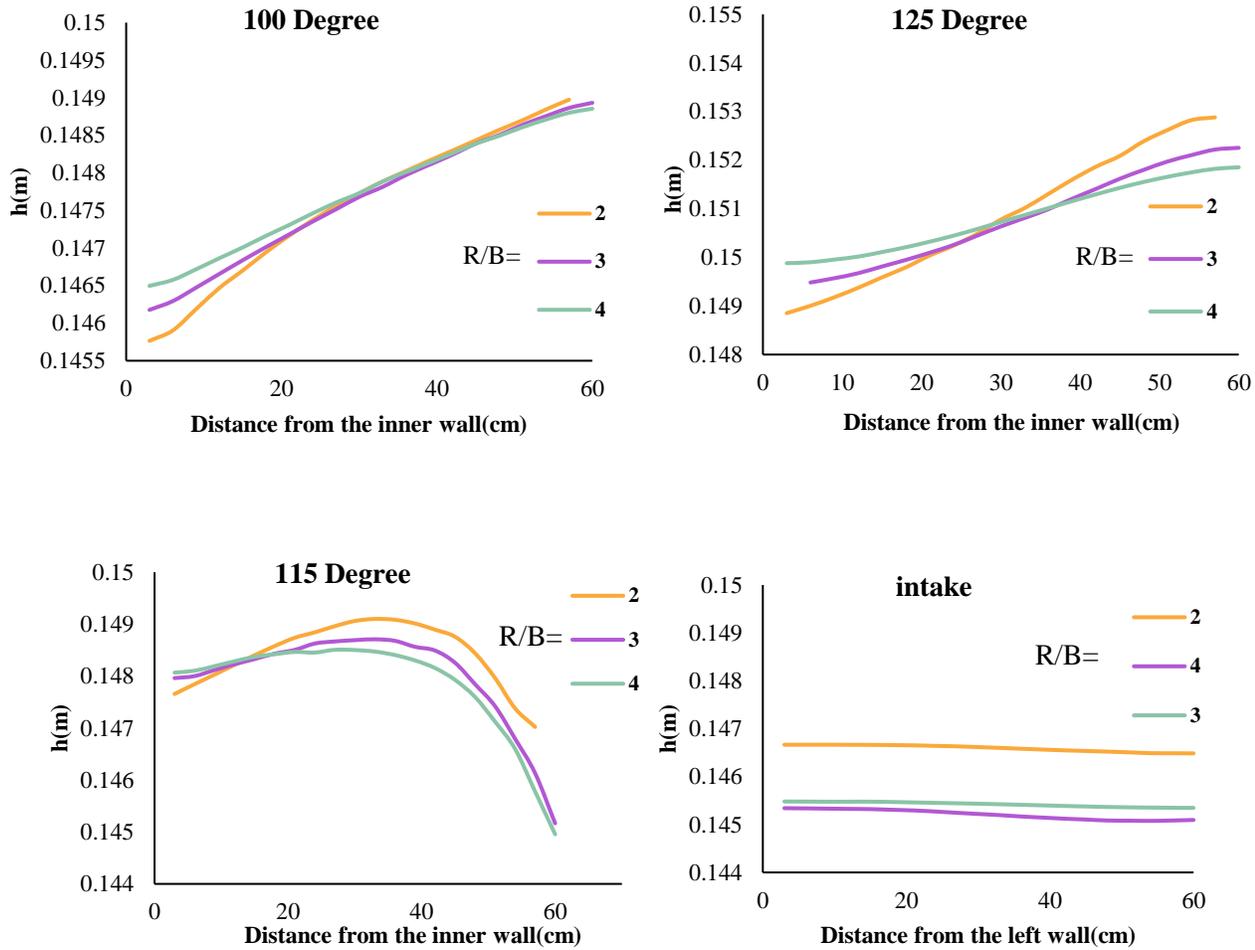
آبگیری قوس ملایم بیشتر است. این موضوع نشان می دهد به ازای دبی آبگیری یکسان، امکان رسوبگذاری در کانال آبگیر در آبگیری از قوس ملایم کمتر می باشد.



شکل ۹. سرعت متوسط در مقطع عرضی آبگیر جانبی

در شکل (۱۰) پروفیل عرضی عمق جریان برای مقاطع مختلف در طول قوس و در مقطعی از کانال آبگیر ترسیم شده است. همانگونه که مشاهده می شود، عمق جریان در کانال آبگیر به ازای آبگیری از قوس تند بیشترین مقدار و برای آبگیری از قوس ملایم کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است. هرچند عمق جریان در مجاور دیوار سمت چپ کانال آبگیر بیشتر از عمق جریان در مجاور دیوار ساحل راست (که در آنجا ناحیه جدا شدگی و جریان چرخشی قابل مشاهده است) بیشتر است، با این وجود تغییرات عرضی عمق جریان چندان قابل ملاحظه نمی باشد. برای مقاطع عرضی قبل و بعد از آبگیر جانبی (مقاطع ۱۰۰ و ۱۲۵ درجه)، بیشترین مقدار عمق جریان در مجاورت دیواره خارجی قوس و کمترین مقدار آن در مجاورت دیواره داخلی قوس رخ می دهد. علاوه بر این هر اندازه که قوس تند تر باشد به دلیل افزایش نیروی گریز از مرکز شیب عرضی سطح آب بیشتر می باشد.

در مقطع ۱۱۵ درجه (منطبق بر محور آبگیر جانبی) شرایط متفاوت است. به گونه ای که حداکثر رقوم سطح آب در نقطه ای حوالی خط مرکزی قوس قابل مشاهده است. با حرکت از این نقطه به سمت قوس داخلی و قوس خارجی رقوم سطح آب کاهش می یابد. هرچند که با حرکت به سمت قوس خارجی کاهش رقوم سطح آب در مقایسه با حرکت به سمت قوس داخلی بسیار بیشتر است. در قوس تند در مقایسه با دو قوس دیگر بیشترین بالادگی سطح آب در حوالی خط مرکزی قوس و کمترین رقوم سطح آب در مجاورت دیواره داخلی قوس قابل مشاهده است.

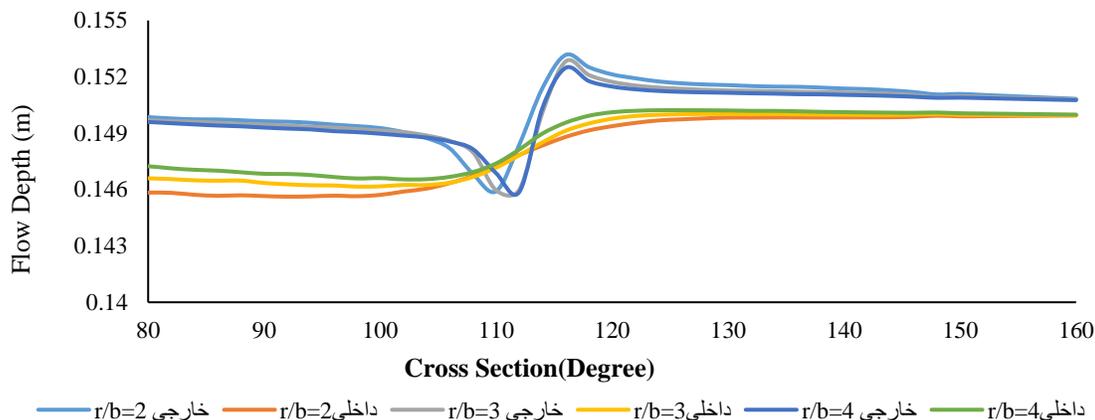


شکل ۱۰. پروفیل عرضی سطح آب در مقاطع مختلف و مقطع ابتدای آبگیر جانبی

در شکل (۱۱) پروفیل‌های طولی سطح جریان آب برای هر قوس مورد مطالعه در این تحقیق در نظر گرفته شده در مجاورت دیواره خارجی و دیواره داخلی قوس نشان داده شده است. همانطور که قابل مشاهده است، روند تغییرات طولی رقوم سطح آب در هر سه قوس از تند تا ملایم تقریباً یکسان است. به گونه ای که در مجاورت قوس داخلی با نزدیک شده به محل آبگیر رقوم سطح آب به آرامی کاهش یافته و سپس در محل آبگیر با شدت بیشتر شروع به افزایش عمق نموده سپس با تغییرات اندک به پیش می‌رود. همواره بیشترین عمق جریان مربوط به قوس ملایم با $R/B=4$ است.

در مجاورت قوس خارجی با نزدیک شدن به محل آبگیر رقوم سطح آب در ابتدا به آرامی کاهش می‌یابد و سپس به شدت سقوط می‌کند. در قوس ملایم رقوم سطح آب در فاصله بیشتری از ابتدای قوس در مقایسه با قوس تند سقوط می‌کند همچنین تا این مرحله کمترین رقوم سطح آب مربوط به قوس ملایم است. در مقطع منطبق بر محل آبگیر جانبی تقریباً کمترین رقوم سطح آب مشاهده می‌شود. در ادامه

با شیب بیشتر از شیب سقوط سطح آب صعود می نماید. بالازدگی سطح آب در قوس ملایم تند بیشتر از قوس ملایم است. هر اندازه قوس تند تر باشد قله مربوط به سطح آب بالاتر است. با فاصله گرفتن از محل آبگیر و حرکت به سمت انتهای قوس رقوم سطح آب در مجاور دیوار خارجی در ابتدا به شدت و سپس به آرامی کاهش می یابد. تاثیر شعاع قوس بعد از زاویه ۱۶۰ درجه تقریباً از بین رفته و رقوم سطح آب در هر سه قوس از تند تا ملایم به هم می رسند.



شکل ۱۱. پروفیل های طولی سطح جریان در نزدیکی دیواره ی داخلی و خارجی کانال با قوس ۱۸۰ درجه و آبگیر جانبی در ۱۱۵ درجه

نتیجه گیری

در این مطالعه شبیه سازی جریان در یک قوس ۱۸۰ درجه با آبگیر جانبی به وسیله نرم افزار دو بعدی SRH-2D انجام گرفت. ابتدا برای صحت سنجی مدل SRH-2D از نتایج آزمایشگاهی پیرستانی و همکاران (۱۳۸۷) استفاده گردید. طبق نتایج به دست آمده این مدل به خوبی جریان را در یک قوس به همراه آبگیر جانبی شبیه سازی می کند و قادر است نواحی مختلف جریان در یک قوس با آبگیر جانبی را که شامل: نقطه جریان ایستا، حداقل سرعت پس از آبگیر که به سمت قوس داخلی تمایل پیدا کرده است، حداقل سرعت و ناحیه جداشدگی داخل آبگیر و در نهایت حداکثر سرعت در نزدیکی دهانه آبگیر را به درستی مدل سازی کند.

پس از صحت سنجی مدل، جریان در قوس هایی با نسبت شعاع به عرض کانال ۲، ۳ و ۴ به همراه آبگیر جانبی که در مقطع ۱۱۵ درجه و زاویه آبگیری ۶۰ درجه بود شبیه سازی شد. شرایط مرزی و اولیه مدل به این صورت بود که دبی ورودی ۳۰ لیتر بر ثانیه دبی آبگیر ۴۰ درصد دبی ورودی و جریان با عمق ۱۵ سانتی متر از قوس خارج می شود. نتایج این تحقیق نشان داد:

- در محدوده دیواره خارجی قوس، قبل از دهانه آبگیر سرعت جریان در قوس تند بیشتر از قوس ملایم است و در مقطع مماس بر محور آبگیر جانبی و مقطع بلافاصله بعد از آبگیر سرعت جریان در قوس ملایم بیشتر از قوس تند است.

- در مقطع ۱۱۵ درجه که منطبق بر محور آبگیر جانبی است با افزایش نسبت شعاع قوس به پهنای کانال (R/B) از ۲ به ۴ سرعت ورودی به آبگیر ۶٪ افزایش پیدا می کند. به عبارتی در آبگیری از قوس ملایم سرعت ورودی به آبگیر بیشتر از قوس تند است.

- برای هر سه قوس تند تا ملایم مورد بررسی در این تحقیق در مقطع عرضی بعد از آبگیر حداکثر سرعت طولی جریان به سمت قوس داخلی کشیده می شود. این پدیده در حالی اتفاق می افتد که با افزایش شعاع نسبی قوس از ۲ به ۴، سرعت در قوس خارجی ۵٪ افزایش پیدا کرده اما در قوس داخلی کاهش سرعت متوسط به میزان ۴٪ مشاهده می شود.

- به ازای مقدار دبی آبگیری یکسان از هر سه قوس مورد بررسی در این تحقیق، مقدار سرعت جریان در ابتدای کانال آبگیر در آبگیری از قوس ملایم بیشتر و عمق جریان کمتر می باشد. به عبارتی احتمال ته نشینی رسوب در دهانه آبگیر بر روی قوس ملایم کمتر است.

- در مقاطع عرضی قبل و بعد از آبگیر جانبی بیشترین مقدار عمق جریان در مجاورت دیواره خارجی قوس و کمترین مقدار آن در مجاورت دیواره داخلی قوس رخ می‌دهد. هراندازه که قوس تند تر باشد شیب عرضی سطح آب بیشتر است.

- در مقطع ۱۱۵ درجه که منطبق بر محور آبگیر جانبی است، حداکثر رقوم سطح آب در حوالی خط مرکزی قوس قابل مشاهده است؛ و هر اندازه قوس تند تر باشد، مقدار بالازدگی سطح آب در حوالی خط مرکزی قوس بیشتر است.

منابع

- پیرستانی، محمد رضا، صالحی نیشابوری، سید علی اکبر، و مجدزاده طباطبائی، محمد رضا. (۱۳۸۵). بررسی آزمایشگاهی جریان انحرافی ابگیرهای جانبی در کانال‌های قوسی. *مجله تحقیقات منابع آب*، ۲(۲)، ۷۸-۸۷. https://www.iwrr.ir/article_15436.html
- پیرستانی، محمد رضا، مجدزاده طباطبائی، محمد رضا، و برخوردارری، ندا. (۱۳۸۷). تحلیل جریان بر روی آبگیر جانبی در آبراهه قوسی با استفاده از مدل فیزیکی. *مجله آب و خاک (علوم صنایع کشاورزی)*، ۲۲(۲)، ۱۰۱۷-۱۰۲۲. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i22.1017>
- حیبی، سحر، رستمی، محمد، و موسوی، سید علی اکبر. (۱۳۹۳). بررسی عددی الگوی جریان و رسوب در محال تلاقی رودخانه‌ها. *نشریه علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران*، ۸(۲۴)، ۳۰۳-۳۱۰. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.20089554.1393.8.24.3.0>
- دهقانی، امیر احمد، قدسیان، مسعود، صالحی نیشابوری، سید علی اکبر، و شفیع فر، مهدی. (۱۳۸۴). بررسی شرایط جریان بر تغییرات بستر کانالهای آبرفتی در قوس ۱۸۰ درجه. *مجله هیدرولیک، انجمن هیدرولیک ایران*، ۱(۲)، ۱۶-۱. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2007.85385>
- سراجیان، محمد تقی، مسجدی، علیرضا، حیدرنازاد، محمد، و حسونی زاده، هوشنگ. (۱۴۰۱). بررسی اثر ترکیب همگرایی و صفحات مستغرق بر روی هیدرولیک جریان ورودی به آبگیر جانبی در قوس ۹۰ درجه رودخانه‌ها. *مجله علوم و فنون دریایی*، ۲۱(۳)، ۳۳-۴۳. <https://doi.org/10.22113/jmst.2021.250222.2394>
- منتصری، حسین، قدسیان، مسعود، شفیع فر، مهدی، صالحی نیشابوری، سید علی اکبر، و دهقانی، امیر احمد. (۱۳۸۷). مطالعه آزمایشگاهی میدان جریان و آبشستگی در قوس ۱۸۰ درجه با حضور آبگیر جانبی. *مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی*، ۱۵(۲)، ۲۴۰-۲۲۵. <https://www.magiran.com/volume/43888>
- رستم آبادی، معصومه، صالحی نیشابوری، سید علی اکبر، منتصری، حسین، و پیرستانی، محمد رضا. (۱۳۸۸). شبیه سازی عددی تاثیر صفحات مستغرق بر جریان ثانویه در قوس ۱۸۰ درجه در مقابل دهانه آبگیر جانبی. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۱۶(۳)، ۱۷-۳۹. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222069.1388.16.3.2.6>
- منتصری، حسین، و آسیائی، حسین. (۱۳۹۳). ارزیابی دقت مدل سه بعدی SSIIM2 در شبیه سازی میدان جریان در کانال قوسی U شکل با آبگیر جانبی. *نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۱(۴)، ۵۳-۲۹. https://jwsc.gau.ac.ir/article_2008.html?lang=fa
- مشکاتی، سید محمد هادی، و صالحی نیشابوری، سید علی اکبر. (۱۴۰۰). شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی الگوی جریان در آبگیری از قوس ۱۸۰ درجه. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۱(۵۲)، ۵۱-۳۷. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.306318.668672>
- قبادیان، رسول، و صیدی تبار، زهرا. (۱۳۹۴). بررسی عددی تاثیر موقعیت اتصال کانال فرعی بر الگوی جریان در قوس رودخانه. *نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۲(۶)، ۹۸-۸۱. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222069.1394.22.6.5.7.81-98>

References

- Abbasi, A.A., & MalekNejad, M. (2014). The effect of threshold and submerged vanes on sedimentary flow input to side basin. *Journal of Irrigation & Water Engineering*, 4(16),104-116. https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=-5sA2gIAAAAJ&citation_for_view=-5sA2gIAAAAJ:evX43VCCuoAC
- Graf and Blanckaert, H. W. (2001), Experiments on flow in a strongly curved channel bend, XXIXTAHR-congress, Beijing, China. https://www.researchgate.net/publication/37451825_Experiments_on_flow_in_a_strongly-curved_channel_bend

- Ghobadian, R., & Seyedi tabar, Z. (2016). Numerical investigating of the effect of lateral channel junction position on flow pattern at river bend. *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(6), 81-98. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222069.1394.22.6.5.7> [In Persian]
- Meshkati, S. H., & Salehi, S. A. A. (2021). Numerical Simulation of 3D Flow Pattern at Lateral Intake in 180-degree bend. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(1), 37-51. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.306318.668672> [In Persian]
- Montaseri, H., & Asiaei, H. (2014). Validating of SSIIM 3D MODEL for Flow field Simulation in a U shape Channel Bend with Intake. *Journal of Water and Soil Conservation*, 21(4), 29-53. https://jwsc.gau.ac.ir/article_2008.html?lang=fa [In Persian]
- Rostam Abadi, M., Salehi Neishabouri, S.A.A., Montaseri, H., & Pirestani, M.R. (2012). Numerical simulation of the effect of submerged vanes on strength of secondary flow at 180° bend with lateral intake. *Journal of Water and Soil Conservation*, 16(3), 17-39. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222069.1388.16.3.2.6> [In Persian]
- Montsari, H., Ghodsian, M., Shafiifar, M., Salehi Neishabouri, S. A. A., & Dehghani, A. A. (2008). Laboratory study of flow field and scouring in 180- degree bend with the presence of lateral catchment. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 15(2), 225-240. <https://www.magiran.com/volume/43888> [In Persian]
- Serajian, M. T., Masjedi, A., Heidarnejad, M., & Hasonizadeh, H. (2022). Investigating the Effect of Convergence and Submerged Vanes Composition on the Hydraulic of the Lateral Intakes' Inlet Flow at 90° River Bends. *Journal of Marine Science and Technology*, 21(3), 33-43. <https://doi.org/10.22113/jmst.2021.250222.2394> [In Persian]
- Dehghani, A., Ghodsian, M., Salehi Neyshabouri, S., & Shafeifar, M. (2007). Study on River Bed Evolution in 180° Alluvial Channel Bend. *Journal of Hydraulics*, 2(2), 1-16. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2007.85385> [In Persian]
- Habibi, S., Rostami, M., & Mousavi, S. A. (2014). Numerical Simulation of Flow and Sediment Structure in Confluence of Rivers. *Jwmseir*, 8(24). <http://jwmsei.ir/article-1-358-fa.html> [In Persian]
- Pirestani, M., Tabatabai, M., & Barkhordari, N. (2008). Flow analysis on lateral intake in the bend channel using a physical model. *Water and Soil*, 22(2). <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i22.1017> [In Persian]
- Pirestani, M., Salehi Neyshabouri, A., & Majdzadeh Tabatabai, M. (2006). Experimental Investigation of Flow in Lateral Intakes in Curved Channels. *Iran-Water Resources Research*, 2(2), 78-87. https://www.iwrr.ir/article_15436.html?lang=en [In Persian]
- Neary, V., Sotiropoulos, F., & Odgaard, A.J. (1999). Three-Dimensional Numerical Model of Lateral Intake Inflows. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(2), 126-140. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:2\(126\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:2(126))
- Neary, V. S., Sotiropoulos, F., & Odgaard, A. J. (1995). Predicting 3-D flows at lateral water intakes. Proc., Int. Conf. and Exposition on Hydropower, Hydropower Division, American Society of Civil Engineers, New York, 2305 – 2314. <https://experts.umn.edu/en/publications/predicting-3-d-flows-at-lateral-water-intakes>
- Montaseri, H., Asiaei, H., Baghlani, A., & Omidvar, P. (2019). Numerical study of flow pattern around lateral intake in a curved channel. *International Journal of Modern Physics*, 30(11). <https://doi.org/10.1142/S0129183119500839>
- Roberts, M.V.T. (2004). Flow Dynamics at Open Channel Confluent-Meander Bends. Ph.D. thesis, The University of Leeds, United Kingdom. <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.414170>
- Sarhadi, A., & Jabbari, E. (2017). Investigating Effect of Different Parameters of the Submerged Vanes on the Lateral Intake Discharge Located in the 180 Degree Bend Using the Numerical Model. *Civil Engineering Journal* 3(11). <https://doi.org/10.28991/cej-030947>

- Sui, B., & Huang. S. (2017). Numerical analysis of flow separation zone in a confluent meander bend channel. *Journal of Hydrodynamics*, 29(4),716-723. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(16\)60783-7](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(16)60783-7)
- Shokrian Hajibehza, M., Shafai Bejestan, M., Ferro, V., & Avaran, R. (2022). Mean flow, secondary currents and bed shear stress at a 180-degree laboratory bend with and without enhanced permeable groins as an Eco-friendly river structure. *Journal of Hydro-environment Research*, 44, 2-12. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2022.07.004>
- Yang, Q.Y., Liu, T.H., Lu, W.Z., & Wang, X.K. (2013). Numerical simulation of Confluence Flow in Open channel with Dynamic Meshes Techniques. Hindawi Publishing Corporation *Advances in Mechanical Engineering*, 860431. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/860431>