

عنوان مقالات

- ارزیابی کارایی مصرف آب و عملکرد سیبزمینی (*Solanum tuberosum* L.) با فراهمی کود فسفر در شرایط کم آبیاری و خشک کردن جزئی منطقه ریشه ..... ۶۴۷  
اعظم اسدی - حمید خزاعی - جعفر نباتی
- بررسی اثر رفتار نواحی ماندابی در مدل های یک بعدی هیدرودینامیک و انتقال مواد محلول در رودخانه ها ..... ۶۶۳  
امیرحسین منتظری - سجاد خدام باشی امامی - مهدی مظاهری
- ارزیابی اثر تنش های توأمان آبی و شوری در برآورد عملکرد بیولوژیکی ذرت علوفه ای از طریق تبخیر و تعرق دوره ای ..... ۶۷۹  
فرامرز زرگر یعقوبی - مهدی سرانی تبریزی - علی محمدی ترکاشوند - مهرداد اسفندیاری - هادی رضائیان اعتدالی
- تخمین عددی شاخص کیفی آب شرب با استفاده از روش های درختی و رویکردهای ترکیبی موجک و تحلیل مؤلفه اصلی ..... ۶۹۷  
محمدتقی ستاری - سحر جاویدان
- ارزیابی تبخیر تعرق مرجع با استفاده از روش های داده کاوی و مقایسه آن با نتایج سامانه نیاز آب در استان قزوین ..... ۷۱۳  
آزاده صداقت - نیاز علی ابراهیمی پاک - آرش تافته - سیده نرگس حسینی
- نقش تلفیقی GIS، RS و ژئوالکترونیک در تعیین مناطق مستعد احداث سد زیرزمینی (مطالعه موردی: حوزه پوشش استان کرمان) ..... ۷۳۱  
نجمه حاج سید علی خانی - حمزه سعیدیان
- مطالعه شاخص مقاومت به آنتی بیوتیک در باکتری های هتروتروف و کلی فرم آب و رسوب رودخانه گوهررود ..... ۷۴۵  
فاطمه صابری نیا - محمدباقر فرهنگی - نفیسه یغمائیان مهابادی - ریحانه شوکتی - نسرین قربانزاده
- امکان سنجی کاربرد Zn[Mn]-Al LDHs به عنوان ماتریکسی برای رهاسازی B، Zn و Mn در محیط شبیه سازی شده محلول خاک ..... ۷۶۳  
حدیث حاتمی - امیر فتوت
- پیامد سه ساله خاک ورزی حفاظتی و گیاه پوششی بر برخی شناسه های کیفیت خاک و اجزاء عملکرد ذرت ..... ۷۷۵  
محسن نائل - سیده صبا صالحی - جواد حمزه‌ئی - مرضیه زندی باغچه مریم

Contents

- Water Use Efficiency Evaluation in Deficit Irrigation and Partial Root Zone Drying in Potato (*Solanum tuberosum* L.) ..... 345  
A. Asadi, H.R. Khazaie, J. Nabati
- The Effect of Stagnant Zone Behavior in One-Dimensional Hydrodynamic Models and Solute Transport in Rivers ..... 661  
A. Montazeri, S. Khodambashi Emami, M. Mazaheri
- Evaluating the Effect of Combined Water and Salinity Stresses in Estimating the Fodder Maize Biological Yield through Periodic Evaporation and Transpiration ..... 677  
F. Zargar Yaghoubi, M. Sarai Tabrizi, A. Mohammadi Torkashvand, M. Esfandiari, H. Ramezani Etedali
- Numerical Estimation of Drinking Water Quality Index Using Tree Methods and Combined Wavelet Approaches and Principal Component Analysis ..... 695  
M.T. Sattari, S. Javidan
- Evaluating Reference Evapotranspiration Using Data Mining Methods and Comparing it with the Results of Water Requirement System in Qazvin Province ..... 711  
A. Sedaghat, N.A. Ebrahimi Pak, A. Tafteh, S.N. Hosseini
- The Combined Role of GIS, RS and Geoelectric in Determining the Susceptible Areas of Underground Dam Construction (Case Study: Pashueyeh Basin of Kerman Province) ..... 729  
N. Hajseyedalikhani, H. Saeediyar
- Antibiotic Resistance Index of Heterotrophic and Coliform Bacteria in Water and Sediment of Goharrood River ..... 743  
F. Saberinia, M.B. Farhangi, N. Yaghmaeian Mahabadi, R. Shokati, N. Ghorbanzadeh
- Evaluation of Zn[Mn]-Al LDHs as Matrices for Release of B, Zn and Mn in A Simulated Soil Solution ..... 761  
H. Hatami, A. Fotovat
- Three-year Effects of Conservation Tillage and Cover Crop on Selected Soil Quality Indicators and Corn Yield Components ..... 773  
M. Nael, S.S. Salehi, J. Hamzei, M. Zandi Baghche-Maryam

# آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

با شماره پروانه 21/2015 مورخه 1368/4/11 و درجه علمی - پژوهشی شماره 26524 تاریخ 1373/10/19 از

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد 36 شماره 6 بهمن - اسفند سال 1401

بر اساس مصوبه وزارت عتف از سال 1398، کلیه نشریات دارای درجه "علمی-پژوهشی" به نشریه "علمی" تغییر نام یافتند.

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول: رضا ولیزاده (استاد - تغذیه نشخوارکنندگان (دانشگاه فردوسی مشهد)

سر دبیر: امیر فتوت (استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

اعضای هیئت تحریریه:

اوستان، شاهین	استاد - علوم خاک (دانشگاه تبریز)
بذرافشان، جواد	دانشیار - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه تهران)
تقوایان، صالح	استادیار - آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، امریکا)
خراسانی، رضا	دانشیار - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)
خرمالی، فرهاد	استاد - علوم خاک (دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان)
علیزاده، امین	استاد - آبیاری و زهکشی (دانشگاه فردوسی مشهد)
فتوت، امیر	استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)
قدیری، حسین	استاد - خاکشناسی (دانشگاه گریفیت، استرالیا)
لکزیان، امیر	استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)
لیاقت، عبدالمجید	استاد - آبیاری و زهکشی (دانشگاه تهران)
مساعدی، ابوالفضل	استاد - آبیاری و مهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)
موسوی بایگی، محمد	استاد - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

نشانی: دانشگاه فردوسی مشهد - دانشکده کشاورزی - ص.پ. 91775-1163 - دبیرخانه نشریات علمی - نشریه آب و خاک

پست الکترونیکی: [jswa3@um.ac.ir](mailto:jswa3@um.ac.ir)

مقاله‌های این شماره در سایت <https://jsw.um.ac.ir> به صورت کامل نمایه شده است.

این نشریه به صورت دو ماهانه (شش شماره در سال) منتشر می‌شود.

# بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## مندرجات

- 647 ارزیابی کارایی مصرف آب و عملکرد سیب زمینی (*Solanum tuberosum* L.) با فراهمی کود فسفر در شرایط کم آبیاری و خشک کردن جزئی منطقه ریشه  
اعظم اسدی - حمید خزاعی - جعفر نباتی
- 663 بررسی اثر رفتار نواحی ماندابی در مدل های یک بعدی هیدرودینامیک و انتقال مواد محلول در رودخانه ها  
امیرحسین منتظری - سجاد خدام باشی امامی - مهدی مظاهری
- 679 ارزیابی اثر تنش های توأمان آبی و شوری در برآورد عملکرد بیولوژیکی ذرت علوفه ای از طریق تبخیر و تعرق دوره ای  
فرامرز زرگر یعقوبی - مهدی سرائی تبریزی - علی محمدی ترکاشوند - مهرداد اسفندیاری - هادی رضائی اعتدالی
- 697 تخمین عددی شاخص کیفی آب شرب با استفاده از روش های درختی و رویکردهای ترکیبی موجک و تحلیل مؤلفه اصلی  
محمدتقی ستاری - سحر جاویدان
- 713 ارزیابی تبخیر تعرق مرجع با استفاده از روش های داده کاوی و مقایسه آن با نتایج سامانه نیاز آب در استان قزوین  
آزاده صداقت - نیازعلی ابراهیمی پاک - آرش تافته - سیده نرگس حسینی
- 731 نقش تلفیقی GIS، RS و ژئوالکترونیک در تعیین مناطق مستعد احداث سد زیرزمینی (مطالعه موردی: حوزه پشویی استان کرمان)  
نجمه حاج سید علی خانی - حمزه سعیدیان
- 745 مطالعه شاخص مقاومت به آنتی بیوتیک در باکتری های هتروتروف و کلی فرم آب و رسوب رودخانه گوهررود  
فاطمه صابری نیا - محمدباقر فرهنگی - نفیسه یغمائیان مهابادی - ریحانه شوکتی - نسرین قربانزاده
- 763 امکان سنجی کاربرد Zn[Mn]-Al LDHs به عنوان ماتریکسی برای رها سازی B، Zn و Mn در محیط شبیه سازی شده محلول خاک  
حدیث حاتمی - امیر فتوت
- 775 پیامد سه ساله خاک ورزی حفاظتی و گیاه پوششی بر برخی شناسه های کیفیت خاک و اجزاء عملکرد ذرت  
محسن نائل - سیده صبا صالحی - جواد حمزه ئی - مرضیه زندی باغچه مریم





## Water Use Efficiency Evaluation in Deficit Irrigation and Partial Root Zone Drying in Potato (*Solanum tuberosum* L.)

A. Asadi<sup>1</sup>, H.R. Khazaie<sup>ID 2\*</sup>, J. Nabati<sup>ID 3</sup>

Received: 07-02-2022

Revised: 07-11-2022

Accepted: 29-11-2022

Available Online: 22-02-2023

### How to cite this article:

Asadi, A., Khazaie, H.R., & Nabati, J. (2023). Water Use Efficiency Evaluation in Deficit Irrigation and Partial Root Zone Drying in Potato (*Solanum tuberosum* L.). *Journal of Water and Soil* 36(6): 645-659. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/jsw.2022.75179.1141](https://doi.org/10.22067/jsw.2022.75179.1141)

### Introduction

Due to climate change, one of the limiting factors of crop production is environmental stress which, by disrupting the natural metabolism of the plant, limit plant growth and finally reduce crop production. Drought stress causes the greatest reduction in crop productivity compared to other environmental stresses. Therefore, the use of methods to reduce water consumption in agriculture is more important due to the lack of freshwater resources. Increasing water use efficiency and maintaining plant yield by reducing water consumption has a particular importance for crop production and should be paid special attention. Drought stress reduces photosynthesis, stomatal conductance, biomass, growth and consequently plant yield. The effects of drought stress on the yield of plants such as potatoes (*Solanum tuberosum* L.), wheat (*Triticum aestivum* L.), rice (*Oryza sativa* L.) etc., which play an important role in the nutrition and food of the world, has a great importance. Achieving the desired soil moisture range is one of the most important approaches to increase water use efficiency and not significantly reduce yield. For this goal, a factorial experiment was conducted in a completely randomized design with five replications in the research greenhouse of Ferdowsi University of Mashhad.

### Materials and Methods

Factors studied in this experiment included three levels of irrigation 1- full irrigation (100% of field capacity), 2- *medium drought stress* (70% of field capacity), 3- partial root-zone drying (70% of field capacity), time of induction of water stress (two weeks after planting and 50% at flowering time) and two levels of phosphate ( $\text{CaH}_4[\text{PO}_4]_2 \text{H}_2\text{O}$ ) fertilizer (based on soil analysis ( $25 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) and adding 25% more than recommended ( $31 \text{ mg.kg}^{-1}$ )) at the beginning of the period phosphate was mixed with soil inside the pot in greenhouse condition. Fontane potato cultivar was used in this study. In irrigation treatments, one part of the pots was stressed two weeks after planting and the second part of the pots were fully irrigated until the beginning of flowering and irrigation treatments were applied at 50% flowering stage. From the prepared samples, membrane stability index, osmotic potential, and relative water content were measured in the laboratory and at the end of experiment, plant height, tuber weight, biomass and plant water use efficiency were measured. Minitab 18 software was used to analyze the data.

### Results and Discussion

The results showed that with increasing phosphate fertilizer from  $25 \text{ mg.kg}^{-1}$  to  $31 \text{ mg.kg}^{-1}$ , plant biomass increased significantly and in all treatments biomass increased between 2 to 28%. Partial root-zone drying treatment showed a 17.4% increase in biomass. In the *medium drought stress* treatment, the total growth period and

1 and 2- Ph.D. Student in Crop Physiology and Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [h.khazaie@um.ac.ir](mailto:h.khazaie@um.ac.ir))

3- Assistant Professor, Research Center for Plant Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

phosphorus level of  $31 \text{ mg.kg}^{-1}$ , the lowest water use efficiency was observed, and there was no significant difference in the *medium* drought stress treatment of the total growth period and the phosphorus level of  $25 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Partial root-zone drying treatment of roots from flowering time and  $31 \text{ mg.kg}^{-1}$  P, with full irrigation treatment  $25 \text{ mg.kg}^{-1}$  P have the same water use efficiency, but the performance of this treatment compared to full irrigation treatment was reduced by 28%. Water use efficiency in partial root-zone drying (intermittent irrigation) has increased compared to traditional irrigation, which indicates a more optimum use of water in the *medium* drought stress method. Full irrigation treatment had the highest tuber weight per plant and partial root-zone drying during the growing season treatment had the lowest tuber weight per plant (65%) compared to full irrigation. The partial root-zone drying treatment after flowering, ranked second after full irrigation treatment, for tuber weight per plant and more tuber weight per plant compared to other drought treatments. Using  $31 \text{ mg.kg}^{-1}$  phosphate, tuber weight per plant in full irrigation treatment reached  $332 \text{ g.plant}^{-1}$  which increased by 13% and was significantly different from all treatments. With increasing phosphate level from  $25 \text{ mg.kg}^{-1}$  to  $31 \text{ mg.kg}^{-1}$ , in the partial root-zone drying treatment from flowering time, tuber weight per plant increased by 28% to  $207 \text{ g.plant}^{-1}$ . Tuber weight per plant in other drought treatments decreased with increasing phosphate level from  $25 \text{ mg.kg}^{-1}$  to  $31 \text{ mg.kg}^{-1}$ , although this decrease was not statistically significant.

## Conclusion

Compared to deficit irrigated methods, partial root-zone drying from the beginning of growth and full irrigation has the ability to use available nitrogen at the end of the growing season and has more greenery than other drought treatments. This effect probably explains the filling of the gland tubers at the end of the growing season and thus the keeping of yield production. The best methods for saving water consumption and maintaining the yield, the partial root-zone drying methods is better than the medium drought stress method.

**Keywords:** Membrane stability, Relative humidity, Water use efficiency

## مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۱، ص. ۶۴۵-۶۵۹

# ارزیابی کارایی مصرف آب و عملکرد سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) با فراهمی کود فسفر در شرایط کم‌آبیاری و خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه

اعظم اسدی<sup>۱</sup> - حمید خزاعی<sup>۲\*</sup> - جعفر نباتی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۸

## چکیده

امروزه باتوجه به کمبود منابع آب، توجه بیشتری به استفاده از روش‌های کاهش مصرف آب در کشاورزی می‌شود. این پژوهش در سال ۱۳۹۵ به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با پنج تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، روی گیاه سیب‌زمینی رقم فوتانه، اجرا شد. عوامل مورد بررسی شامل سه سطح آبیاری: آبیاری کامل (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی)، کم‌آبیاری (۷۰ درصد ظرفیت زراعی)، خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه (۷۰ درصد ظرفیت زراعی)، دو زمان اعمال تنش (دو هفته پس از کاشت و ۵۰ درصد گلدهی) و دو سطح کود فسفات (براساس آزمایش خاک  $(25 \text{mg.Kg}^{-1})$  و افزودن ۲۵ درصد بیشتر از میزان توصیه‌شده  $(31 \text{mg.Kg}^{-1})$  بودند. تیمارهای آبیاری یک قسمت از گلدها دو هفته بعد از کاشت، تحت تنش قرار گرفت و قسمت دوم گلدها تا شروع گلدهی به‌طور کامل آبیاری شدند و در مرحله ۵۰ درصد گلدهی تیمارهای آبیاری روی آن‌ها اعمال شد. با افزایش کود فسفات از ۲۵ به  $31 \text{mg.Kg}^{-1}$  میزان زیست‌توده گیاه افزایش یافت. تیمار آبیاری کامل و خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه، به ترتیب ۲۸ و ۱۷/۴ درصد افزایش زیست‌توده نشان دادند. در تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد و سطح فسفر  $31 \text{mg.Kg}^{-1}$  کمترین کارایی مصرف آب مشاهده شد. کارایی مصرف آب تیمار خشک‌کردن جزئی ریشه از زمان گلدهی و  $31 \text{mg.Kg}^{-1}$  فسفر، با تیمار آبیاری کامل در  $25 \text{mg.Kg}^{-1}$  فسفر کارایی مصرف آب مشابه داشتند ولی در این تیمار عملکرد ۲۸ درصد کاهش یافت در صورتی که در تیمار کم‌آبیاری نسبت به تیمار آبیاری کامل، کارایی مصرف آب ۵۰ درصد کاهش عملکرد غده در تک بوته نشان داد؛ به‌طور کلی روش خشک‌کردن جزئی ریشه روش مناسب‌تری نسبت روش کم‌آبیاری از نظر صرفه‌جویی در مصرف آب و حفظ عملکرد است.

واژه‌های کلیدی: آبیاری، زیست‌توده، ظرفیت زراعی، غده، فسفر

## مقدمه

ازجمله عوامل محدودکننده تولیدات زراعی، تنش‌های محیطی می‌باشند که با ایجاد اختلال در متابولیسم طبیعی گیاه، رشد گیاه را

محدود و درنهایت باعث کاهش تولید محصول می‌شوند (Chai, et al., 2016). گیاهان زراعی در معرض چندین تنش محیطی قرار دارند که همه آن‌ها بر رشد و تکامل گیاه تأثیر می‌گذارند و مانع حداکثر بهره‌وری گیاهان زراعی می‌شوند (Farooq et al., 2012). تنش خشکی، بیشترین کاهش بهره‌وری محصول را در مقایسه با دیگر تنش‌های محیطی ایجاد می‌کند. تنش خشکی، از طریق ایجاد تغییرات آناتومیک، مورفولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی بر جنبه‌های مختلف رشد و نمو گیاه تأثیر می‌گذارد. شدت خسارت خشکی بستگی به طول مدت تنش و مرحله رشد گیاه متفاوت است. تنش خشکی باعث کاهش فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، زیست‌توده، رشد و درنهایت عملکرد گیاه می‌شود (Kasman and

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی و استاد گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
(\*) نویسنده مسئول: (Email: h.khazaie@um.ac.ir)  
۳- استادیار گروه بقولات، پژوهشکده علوم گیاهی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

ریشه و نگهداری آماس و پتانسیل آب در قسمت هوایی گیاه رخ دهد، باید ننگه‌داشته شود (Shi et al., 2015). روش آبیاری جزئی منطقه ریشه به دلیل کاهش آب آبیاری، در صرفه‌جویی مصرف آب و بهبود کارایی مصرف آب مفید است. اساس فیزیولوژیکی برای بهبود کارایی مصرف آب در هر دو روش کم‌آبیاری و خشک‌کردن جزئی ریشه، مبتنی بر استفاده سیستم پیام‌رسانی آبسزیک اسید ریشه به ساقه است که باعث می‌شود در طول خشک شدن متوسط خاک، هدایت روزنه‌ای کاهش یافته و سرعت تعرق کم شود (Chai, et al., 2016). یکی دیگر از مهم‌ترین عوامل در تولید و رشد گیاهان زراعی، آب است که می‌تواند به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار گیرد و تولیدات گیاهان زراعی را با مشکل مواجه کند.

افزایش کارایی مصرف آب و حفظ عملکرد گیاه با کاهش مصرف آب، برای تولید گیاهان زراعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و باید به این مهم توجه ویژه‌ای شود. دست یافتن به دامنه‌های پاسخ رطوبتی برای افزایش کارایی مصرف آب و عدم کاهش چشمگیر عملکرد، یکی از مهم‌ترین رویکردها است؛ با توجه به حساسیت گیاه سیب‌زمینی به تنش خشکی و دست یافتن به روشی به منظور کاهش مصرف آب با حداقل خسارت، این مطالعه با هدف بررسی روش کم‌آبیاری و مقایسه با آبیاری کامل در فراهمی فسفر، میزان کاهش عملکرد سیب‌زمینی، بهترین کارایی مصرف آب روی فرایندها و کارکردهای گیاه انجام شد.

## مواد و روش‌ها

پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با پنج تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. عوامل مورد مطالعه شامل سه سطح آبیاری (آبیاری کامل که در آن رطوبت گلدان‌ها همیشه در حالت ظرفیت زراعی نگهداری شد، تنش کم (رطوبت گلدان‌ها حدود ۷۰ درصد ظرفیت زراعی نگهداری شدند) و خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه (یک قسمت گلدان در حدود ۷۰ درصد ظرفیت زراعی آبیاری شدند و قسمت مقابل آن اجازه داده شد تا ۶۰-۷۰ درصد رطوبت از دست دهد سپس مکان آبیاری در گلدان جابجا شد). زمان اعمال تنش آبی (دو هفته پس از کاشت و زمان ۵۰ درصد گلدهی) و کاربرد کود فسفات (سوپر فسفات تریپل  $(CaH_4[PO_4]_2 \cdot H_2O)$  در دو سطح (فسفر به میزان مورد نیاز بر اساس آزمایش خاک  $(25 mg \cdot Kg^{-1})$  و  $(25 mg \cdot Kg^{-1})$  بیشتر از میزان توصیه‌شده  $(31 mg \cdot Kg^{-1})$ ) که در ابتدای دوره با خاک داخل گلدان مخلوط شد (جدول ۱). رقم سیب‌زمینی فونتانه در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت.

(Duman, 2015). بررسی اثرات تنش خشکی بر عملکرد گیاهانی مانند سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.)، گندم (*Triticum aestivum* L.) و برنج (*Oryza sativa* L.) و غیره که نقش مهمی در تغذیه و سبد غذایی مردم جهان دارند، از اهمیت بالایی برخوردار است.

سیب‌زمینی رتبه چهارم را بعد از گندم، برنج و ذرت (*Zea mays*) در سبد غذایی مردم جهان به خود اختصاص داده است (Gültekin and Ertek, 2018). سیب‌زمینی یک محصول بسیار حساس به کمبود آب خاک است (Gültekin and Ertek, 2018). ریشه‌های کم‌پشت و کم‌عمق سیب‌زمینی باعث می‌شود این گیاه به کمبود آب آسیب‌پذیر باشد. شدت خشکی، مدت و زمان تنش خشکی در طول دوره‌های مختلف رشد سیب‌زمینی، بر عملکرد گیاه تأثیر می‌گذارد (Chai et al., 2016). سیب‌زمینی از حساسیت بالایی نسبت به تنش خشکی در تمام مراحل نمو به‌ویژه مرحله تشکیل غده برخوردار می‌باشد (Shock et al., 2013). اعمال هرگونه تنش، محتوای نسبی آب، کارایی مصرف آب، تعداد غده در بوته، درصد ماده خشک و عملکرد گیاه را کاهش می‌دهد (Quandahor et al., 2019).

فسفر یکی از عوامل مهم محدود کننده بهره‌وری محصول است و در سیستم‌های تولید سیب‌زمینی مدیریت کود فسفر یک بخش حیاتی است. فسفر رشد و توسعه شاخساره، تقسیم سلولی در ریشه و غده و سنتز نشاسته را تحت تأثیر قرار می‌دهد. میزان فسفر کافی در گیاه برای بهینه‌سازی عملکرد، محتوای ماده خشک، کیفیت غذایی و مقاومت در برابر خشکی و بیماری‌ها ضروری است (Liu et al., 2015).

در دهه‌های اخیر، یکی از گزینه‌های مدیریت برای غلبه بر تنش خشکی در کشاورزی استفاده از روش خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه بوده است. روش خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه (PRD) یک راه کار کم‌آبیاری است که برای نگهداری نیمی از سیستم ریشه در خشکی طراحی شده است، یا خشک‌کردن نیمی از ریشه درحالی که نیمه دیگر آن به‌منظور حفظ آب برگ آبیاری می‌شود سپس برعکس شده و اجازه می‌دهد قسمتی از ریشه که در حال خشک شدن بود آب جذب کند درحالی که قسمتی که آبیاری کامل انجام می‌گرفت در خشکی قرار می‌گیرد؛ بنابراین، به‌طور متناوب بخشی از ریشه در حال خشک شدن و بخشی در حال آبیاری کامل قرار می‌گیرد. این باعث آقاء پیام هورمونی از جمله آبسزیک اسید (ABA) شده و روزنه‌ها تا حدی بسته می‌شوند و بهبود کارایی مصرف آب را به همراه دارد. موفقیت کاربرد روش خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه متکی بر جابجایی منظم سمت خشک و آبیاری شده ریشه است و تا زمانی که پیام شیمیایی تحمل

جدول ۱- مشخصات فیزیکوشیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش

Table 1- Physico-chemical characteristics of the soil used in the test

pH	EC (dS.m <sup>-1</sup> )	Bulk Density (g.cm <sup>3</sup> )	OC%	Clay%	Sand%	Silt%	N%	P (mg.Kg <sup>-1</sup> )	K (mg.Kg <sup>-1</sup> )
اسیدیته	هدایت الکتریکی	وزن مخصوص ظاهری	کربن آلی	رس	شن	سیلت	نیتروژن	فسفر	پتاسیم
7.9	1.15	1.4	0.17	12	59	29	0.026	1.5	80

درصد کنترل گردید. پس از یک هفته و در شرایطی که ۶۰-۷۰ درصد رطوبت موجود در بخش خشک ریشه کاهش یافت، آبیاری بین دو قسمت، جابه‌جا و این تناوب تا انتهای دوره رشد تکرار شد.

#### محتوای رطوبت نسبی برگ

محتوای رطوبت نسبی برگ، در دو مرحله آزمایش (زمان ۵۰ درصد گلدهی و انتهای آزمایش) اندازه‌گیری شد. به این منظور، یک برگ در دمای آزمایشگاه وزن شد، سپس به مدت ۲۴ ساعت داخل پتری دیش به صورت غوطه‌ور در آب قرار گرفت. برای به دست آوردن وزن نمونه در حالت آماس، بعد از خروج نمونه از پتری دیش آب اضافی آن با دستمال کاغذی گرفته شده و وزن گردید، سپس برای ۲۴ ساعت نمونه داخل یک فویل با وزن مشخص، داخل آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. پس از خروج نمونه از آون، نمونه‌ها وزن شدند تا وزن خشک نمونه مشخص شود و مقدار رطوبت نسبی برگ هر نمونه از معادله (۲) به دست آمد.

$$(2) \quad 100 \times \frac{(\text{وزن خشک} - \text{وزن تر})}{(\text{وزن خشک} - \text{وزن تورژمانس})} = \text{محتوای نسبی آب برگ}$$

#### پتانسیل اسمزی

در دو مرحله آزمایش (زمان ۵۰ درصد گلدهی و انتهای آزمایش)، پتانسیل اسمزی نمونه برگ با استفاده از دستگاه اسمومتر مدل (OM802.D) شرکت Wogel بر پایه روش نقطه انجماد تعیین شد. ابتدا نمونه‌های برگ و ریشه در ریزلوله‌های (میکروتیوب) ۰/۵ میلی‌لیتری همگن (هموژنیزه) و عصاره‌گیری شد. دستگاه اسمومتر توسط محلول استاندارد گلوکز واسنجی شد سپس پتانسیل اسمزی عصاره به دست آمده توسط دستگاه، تعیین کمیت شد.

#### پایداری غشاه

میزان پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی بر اساس تشکیل کمپلکس مالون دی‌آلدئید (MDA; Malondialdehyde) با تیوباربتوریک اسید (TBA) سنجش شد و غلظت MDA با استفاده از ضریب تصحیح  $1 \times 10^{-5} \times \text{M}^{-1} \times \text{Cm}^{-1}$  با طول موج ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Heath and Packer, 1968).

گلدان‌هایی با ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر و قطر دهانه ۳۲ سانتی‌متر انتخاب شدند. برای اعمال روش خشک کردن جزئی ریشه و کنترل رطوبت خاک در دو طرف ریشه، گلدان با استفاده از صفحات پلاستیکی به دو بخش مساوی تقسیم و صفحه جداکننده با بدنه گلدان کاملاً آب‌بندی شد تا از نفوذ رطوبت به دو طرف جلوگیری شود. سپس از وسط لبه بالایی صفحه جداکننده به عمق ۱۰ سانتی‌متر قطعه‌ای جدا شد و گیاهچه به صورتی در این قسمت قرار گرفت که ریشه گیاه در طرفین صفحه جداکننده قرار بگیرد و رشد کند. بافت خاک داخل گلدان‌ها بر اساس آزمایش هیدرومتری خاک، شنی-لومی تعیین شد. روش خشک کردن جزئی منطقه ریشه به این صورت بود که یک قسمت از گلدان‌ها دو هفته بعد از کاشت تحت تنش خشکی قرار گرفتند و قسمت دوم گلدان‌ها تا مرحله گلدهی به صورت کامل آبیاری شدند و بعداً اینک ۵۰ درصد گیاهان وارد مرحله گلدهی شدند تنش خشکی روی آن‌ها اعمال شد. سطح رطوبت در هر گلدان با نصب حسگر دستگاه رطوبت‌سنج خاک (Soil Moisture Meter) مدل (M0750) در گلدان‌ها تحت نظر قرار گرفت. همچنین حسگرهای رطوبتی (TDR) به طول ۱۶ سانتی‌متر در عمق ۲۵ سانتی‌متری گلدان، در دو تکرار اندازه‌گیری شد. ابتدا حسگرها بر اساس شرایط رطوبتی خاک گلدان‌ها واسنجی شدند و رابطه بین رطوبت حجمی خاک و عدد قرائت‌شده از حسگر استخراج شد. برای تعیین میزان آب لازم برای اعمال تیمار آبیاری، رطوبت خاک در ساعت ۸ الی ۹ صبح به صورت روزانه با استفاده از حسگر رطوبتی قرائت‌شده و حجم آب لازم با استفاده از معادله (۱) محاسبه گردید. و به هر گلدان داده شد.

$$(1) \quad V = (\theta_1 - \theta_2) \times Z \times A$$

در رابطه فوق: V، حجم آب مورد نیاز بر حسب مترمکعب،  $\theta_1$ ، رطوبت حجمی خاک در سطح تنش مورد نظر،  $\theta_2$ ، رطوبت حجمی قرائت‌شده خاک توسط دستگاه، Z، عمق ریشه گیاه که در این مطالعه برابر با نیم متر لحاظ شد و A، متوسط سطح مقطع گلدان بر حسب متر مربع بود. در تیمار آبیاری کامل رطوبت خاک همواره در حد ظرفیت زراعی  $\pm 5$  درصد نگهداری شد و در تیمارهای کم‌آبیاری سنتی، رطوبت خاک همواره (۷۰ درصد ظرفیت زراعی)  $\pm 5$  درصد نگهداری شد. در تیمارهای خشک کردن جزئی منطقه ریشه، آبیاری در یک سمت ریشه انجام شد و رطوبت آن در سطح تنش مورد نظر  $\pm 5$

## ارتفاع بوته و زیست‌توده

ارتفاع بوته از سطح خاک، وزن تر اندام هوایی، وزن تر غده در انتهای دوره رشد اندازه‌گیری شد. سپس اندام هوایی و غده‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد داخل آون قرار داده شدند و پس‌از آن وزن خشک اندام هوایی و غده‌ها اندازه‌گیری شد.

## کارایی مصرف آب

با تقسیم عملکرد غده و زیست‌توده گیاه در هر گل‌دان بر میزان آب مصرفی همان گل‌دان، راندمان مصرف آب محاسبه شد.

## تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل داده‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی و با استفاده از آزمون LSD انجام شد. اگر تیمارها در سطح پنج درصد معنی‌دار شده بودند مقایسه میانگین‌ها صورت گرفت. برای آنالیز داده‌ها از نرم‌افزار Minitab 18 و برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel 16 استفاده شد.

## نتایج و بحث

## محتوای رطوبت نسبی برگ

در مرحله گلدهی و مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی محتوای نسبی آب برگ، بین تیمارهای مختلف تفاوت آماری معنی‌داری وجود داشت (جدول ۲). در مرحله گلدهی، تیمار آبیاری کامل بیشترین محتوای نسبی آب برگ را به خود اختصاص داد و بین تیمارهای خشکی تفاوت معنی‌دار آماری وجود نداشت. در مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی نیز در تیمار آبیاری کامل بیشترین محتوای نسبی آب برگ مشاهده شد، میزان نسبی آب برگ در تیمار کم‌آبیاری در کل دوره رشد با تیمار آبیاری کامل تفاوت آماری معنی‌دار نداشت؛ و محتوای نسبی آب برگ در تیمارهای خشکی با یکدیگر تفاوت آماری معنی‌دار نداشت (جدول ۲).

کاربرد کود فسفر، در هر دو مرحله گلدهی و ۲۱ روز پس از گلدهی، تأثیر معنی‌داری بر محتوای نسبی آب برگ نشان نداد و افزایش ۲۵ درصدی کود فسفر بر محتوای آب برگ تأثیری نداشت (جدول ۲).

جدول ۲- اثر کم‌آبیاری و خشک کردن جزئی منطقه ریشه بر محتوای نسبی آب برگ، شاخص پایداری غشاء و پتانسیل اسمزی در سبب زمینی در مراحل مختلف رشد

Table 2- Effect of deficit irrigation and partial root zone drying on, relative water content, membrane stability index and osmotic potential of potato at different growth stages

Stages مرحله	Irrigation آبیاری	Relative water content محتوای نسبی آب (%)	Membrane stability index پایداری غشاء (%)	Osmotic potential پتانسیل اسمزی (MPa)
Flowering گلدهی	Control کنترل	845 <sup>a</sup>	37.5 <sup>a</sup>	1.4 <sup>b</sup>
	Deficit irrigation 1 کم آبیاری ۱	932 <sup>a</sup>	34.4 <sup>a</sup>	1.3 <sup>b</sup>
	Partial root drying 1 خشک کردن جزئی ریشه ۱	864 <sup>a</sup>	37.5 <sup>a</sup>	1.5 <sup>a</sup>
21 days after flowering ۲۱ روز پس از گلدهی	Control کنترل	937 <sup>a</sup>	26.1 <sup>a</sup>	1.4 <sup>d</sup>
	Deficit irrigation 1 کم آبیاری ۱	834 <sup>ab</sup>	22.6 <sup>a</sup>	1.6 <sup>c</sup>
	Deficit irrigation 2 کم آبیاری ۲	732 <sup>bc</sup>	17.2 <sup>a</sup>	2.1 <sup>a</sup>
	Partial root drying 1 خشک کردن جزئی ریشه ۱	646 <sup>c</sup>	19.2 <sup>a</sup>	1.7 <sup>c</sup>
	Partial root drying 2 خشک کردن جزئی ریشه ۲	751 <sup>bc</sup>	26.4 <sup>a</sup>	1.9 <sup>b</sup>

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، با یکدیگر تفاوت معنی‌داری ندارند. تیمارهایی که از ابتدای دوره رشد اعمال شدند با عدد ۱ و تیمارهایی که بیست‌ویک روز پس از گلدهی اعمال شدند با عدد ۲ نشان داده شدند.

In each column means followed by the same letters are not significantly different ( $p \leq 0.05$ ), at 5% probability level based on LSD. Treatments that were applied from the beginning of the growth period with the number 1 and the treatments that were applied twenty one days after flowering were indicated by the number 2.

تفاوت میان ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک متفاوت نظیر تغییر اندازه برگ، زاویه برگ وجود یا عدم وجود موم و بازتاب برگ و روزه‌ها باعث تفاوت بین ارقام از لحاظ محتوای نسبی آب برگ در بین ارقام متحمل و حساس متفاوت است (Quandahor et al., 2019). با گذشت زمان از ابتدای تنش میزان رطوبت نسبی برگ کاهش یافته است. همان‌گونه که در جدول ۴ نشان داده شده در تیمار آبیاری خشک کردن جزئی ریشه با افزایش فسفر، محتوای نسبی آب برگ با تیمار آبیاری کامل تفاوت آماری معنی‌داری ندارد چون همیشه نیمی از ریشه در حالت هیدراته قرار دارد و رطوبت نسبی برگ حفظ می‌شود ولی در تیمار کم‌آبیاری رطوبت نسبی برگ کاهش می‌یابد.

### شاخص پایداری غشاء

در زمان گلدهی و همچنین در ۲۱ روز پس از گلدهی بین تیمارهای آبیاری تفاوت معنی‌دار از نظر شاخص پایداری غشاء وجود نداشت (جدول ۲).

شاخص پایداری غشاء تحت تأثیر کود فسفاته قرار نگرفت. در زمان گلدهی و همچنین مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی، افزایش کود فسفاته از ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم به ۳۱ میلی‌گرم در کیلوگرم باعث کاهش شاخص پایداری غشاء شد ولی این کاهش معنی‌دار نبود.

برهمکنش تیمارهای آبیاری و کاربرد کود فسفاته بر شاخص پایداری غشاء برگ‌های سیب‌زمینی، حاکی از تفاوت معنی‌داری بین تیمارها بود (جدول ۳). در مرحله گلدهی و کاربرد  $25\text{mg.Kg}^{-1}$  فسفر، تیمار آبیاری کامل با  $44/2$  درصد، بیشترین شاخص پایداری غشاء مشاهده شد و بین تیمار خشک کردن جزئی ریشه در کل دوره رشد با آبیاری کامل از نظر شاخص پایداری غشاء تفاوت معنی‌دار وجود نداشت. با افزایش کاربرد کود فسفر به  $31\text{mg.Kg}^{-1}$  شاخص پایداری غشاء در تیمار خشک کردن جزئی ریشه کل دوره رشد  $10/7$  درصد افزایش یافت و در دو تیمار دیگر حدود دو درصد کاهش شاخص پایداری غشاء مشاهده شد (جدول ۳).

هدف اصلی فرایندهای تخریبی القاء شده با خشکی، غشاءها هستند و مشخص شده است که تحت تنش خشکی محتوای لیپید غشاء به دلیل ممانعت از بیوسنتز لیپیدها و تحرک لیپولیتیک و فعالیت‌های پراکسیداتیو، کاهش پیدا می‌کند (Chaki et al., 2020). بر اساس نتایج به دست آمده توسط پژوهشگران، در پاسخ به تنش خشکی شاخص پایداری غشاء در گیاه نخود (*Cicer arietinum*) (L.) به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (Yactayo et al., 2013). در گیاه خیار (*Cucumis sativus* L.)، میزان نشت یونی تأثیر تنش خشکی افزایش یافت. تنش خشکی با شروع یک تنش اکسیداتیو همراه است؛ بنابراین در طی تنش خشکی تولید و ذخیره گروه‌های

برهمکنش تیمار آبیاری و کود فسفر حاکی از تفاوت معنی‌دار بین تیمارها بود (جدول ۳). با افزایش فسفر خاک در مرحله گلدهی، در تیمار آبیاری کامل چهار درصد و خشک کردن جزئی ریشه ۱۵ درصد محتوای نسبی آب برگ افزایش یافت و تیمار آبیاری کامل و  $31\text{mg.Kg}^{-1}$  کود فسفر با  $74/5$  درصد، بیشترین محتوای آب برگ را داشت و سایر تیمارهای خشکی با یکدیگر تفاوت معنی‌دار آماری نداشتند (جدول ۳). کاربرد  $31\text{mg.Kg}^{-1}$  فسفر در تیمار کم‌آبیاری از زمان گلدهی با ۵۷ درصد کمترین درصد محتوای نسبی آب را در بین تمام تیمارها به خود اختصاص داد که  $17/5$  درصد نسبت به آبیاری کامل کاهش داشت و تفاوت معنی‌داری بین دیگر تیمارهای خشکی با تیمار آبیاری کامل وجود نداشت (جدول ۳).

محتوای نسبی آب برگ، یکی از ویژگی‌های اصلی روابط آب گیاهان به شمار می‌رود (Chai et al., 2016) که به دلیل کاهش آب در شرایط تنش تحت تأثیر کمبود آب قرار می‌گیرد. در شرایط تنش خشکی محتوای نسبی آب برگ در گیاه گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) کاهش یافت؛ درحالی‌که پتانسیل آب ریشه خیلی زودتر از برگ و غلاف کاهش یافت (Thalman and Santelia, 2017). محتوای نسبی آب برگ، پتانسیل آب برگ و پتانسیل اسمزی در آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) تحت تأثیر تنش خشکی قرار گرفتند (Farooq et al., 2012). با این حال، در مواجهه با تنش خشکی ژنوتیپ‌های مختلف رفتار متفاوت نشان می‌دهند، پتانسیل آب برگ در ژنوتیپ‌های متحمل در برابر خشکی نسبت به ژنوتیپ‌های حساس پس از مواجهه با خشکی، برای مدت طولانی بالاتر می‌ماند (Chai et al., 2016). با توجه به شدت و مدت خشکی اثرات خشکی متفاوت است. با کاهش شدید خشکی، محتوای نسبی آب برگ به‌طور خطی کاهش می‌یابد. برخی پژوهش‌ها نشان می‌دهد در گیاه آنیسون (*Pimpinella anisum* L.) با اعمال تنش خشکی محتوای نسبی آب برگ در هر دو مرحله گلدهی و پر شدن دانه کاهش می‌یابد. بدین معنی که در اوایل دوره تنش تفاوت معنی‌داری بین محتوای نسبی آب برگ تیمار شاهد تیمار تحت تنش وجود نداشت، ولی با افزایش شدت تنش، پس از گذشت یک هفته محتوای آب نسبی در هر دو مرحله گلدهی و پر شدن دانه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. تغییر جزئی محتوای نسبی آب برگ احتمالاً بیانگر پیام‌های ارسالی از ریشه در شرایط تنش خشکی که عامل بسته شدن روزنه‌ها و کاهش فتوسنتز می‌باشد این پیام‌های شیمیایی همان اسید آسزیک می‌باشد. بالا بودن محتوای نسبی آب برگ در شرایط کم‌آبی می‌تواند با رفتار روزنه‌ها و سیستم ریشه‌ای گیاه در ارتباط باشد، زیرا یک گیاه برای حفظ محتوای رطوبتی درونی نیاز به داشتن ریشه عمیق به منظور جذب آب دارد (Heidari et al., 2014).

## پتانسیل اسمزی

در زمان گلدهی، پتانسیل اسمزی در برگ سیبزمینی در تیمار خشک کردن جزئی ریشه با ۱۰ درصد افزایش نسبت به آبیاری کامل تفاوت معنی‌داری داشت و بین تیمار آبیاری کامل و تیمار کم آبیاری از زمان گلدهی تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۲). تیمار کم آبیاری از زمان گلدهی در مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی بیشترین میزان پتانسیل اسمزی را نشان داد و تیمار آبیاری کامل کمترین میزان پتانسیل اسمزی را نشان داد، تیمار خشک کردن جزئی ریشه از زمان گلدهی با ۱۰ درصد کاهش در رتبه دوم و تیمارهای خشک کردن جزئی ریشه کل دوره و کم آبیاری کل دوره رشد با ۲۳ درصد کاهش پتانسیل اسمزی در رتبه سوم قرار گرفتند و تمام تیمارهای خشکی با تیمار آبیاری کامل تفاوت معنی‌دار داشتند (جدول ۲).

سمی و مخرب اکسیژن آزاد افزایش یابد. در نتیجه تحت شرایط تنش خشکی به سرعت چربی‌های غشاء پراکسید گردیده و پایداری غشاء یاخته از بین می‌رود (Bayat et al., 2013). نتایج به دست آمده از این آزمایش در ۲۱ روز پس گلدهی با این مطالب مطابقت دارد. پژوهشگران بیان کردند با افزایش شدت تنش خشکی میزان پایداری غشاء سلولی کاسته شده است و چنانچه تنش خشکی در مراحل انتهایی تر رشد رخ دهد شدت نشت از دیواره سلولی افزایش یافته و پایداری غشاء کمتر می‌شود (Quandahor et al., 2019). در ارزیابی خسارت سلولی شاخص پایداری غشاء به عنوان نفوذپذیری غشاء مورد استفاده قرار گرفت، نتایج نشان داد که تخلیه رطوبت خاک تأثیر معنی‌داری بر کاهش پایداری غشاء سلولی دارد (Dashti et al., 2014). با توجه به شاخص‌های فیزیولوژیکی و مکانیسم‌های مورد مطالعه در این پژوهش، به احتمال زیاد افزایش کربوهیدرات‌های محلول باعث افزایش پتانسیل اسمزی شده و باعث حفظ آب درون سلول در نتیجه حفاظت از ساختار غشاء و جلوگیری از پراکسیداسیون غشاء شده است.

جدول ۳- اثر تیمارهای آبیاری و کود فسفات در مراحل مختلف رشد بر محتوای نسبی آب برگ، پایداری غشاء و پتانسیل اسمزی در سیبزمینی  
Table 3- Effect of irrigation and phosphate fertilizer treatments at different growth stages on relative water content, membrane stability index and osmotic potential in potato

Stages مرحله	Irrigation آبیاری	Relative water content محتوای نسبی آب (%)		Membrane stability index شاخص پایداری غشاء (%)		Osmotic potential پتانسیل اسمزی (MPa)	
		25	31	25	31	25	31
Flowering گلدهی	Control کنترل	71.9 <sup>ab</sup>	77.0 <sup>a</sup>	44.2 <sup>a</sup>	30.7 <sup>b</sup>	1.4 <sup>b</sup>	1.4 <sup>bc</sup>
	Deficit irrigation <sub>1</sub> کم آبیاری ۱	69.2 <sup>b</sup>	67.9 <sup>b</sup>	31.0 <sup>b</sup>	37.6 <sup>ab</sup>	1.4 <sup>bc</sup>	1.3 <sup>c</sup>
	Partial root drying <sub>1</sub> خشک کردن جزئی ریشه ۱	66.6 <sup>b</sup>	69.2 <sup>b</sup>	42.4 <sup>a</sup>	32.5 <sup>b</sup>	1.6 <sup>a</sup>	1.5 <sup>ab</sup>
21 days after flowering ۲۱ روز پس از گلدهی	Control کنترل	72.0 <sup>a</sup>	74.5 <sup>a</sup>	34.3 <sup>a</sup>	17.9 <sup>c</sup>	1.4 <sup>c</sup>	1.4 <sup>c</sup>
	Deficit irrigation <sub>1</sub> کم آبیاری ۱	69.8 <sup>ab</sup>	67.7 <sup>ab</sup>	23.7 <sup>bc</sup>	21.6 <sup>c</sup>	1.6 <sup>b</sup>	1.6 <sup>b</sup>
	Deficit irrigation <sub>2</sub> کم آبیاری ۲	67.2 <sup>ab</sup>	57.1 <sup>c</sup>	16.3 <sup>c</sup>	18.0 <sup>c</sup>	2.0 <sup>a</sup>	2.1 <sup>a</sup>
	Partial root drying <sub>1</sub> خشک کردن جزئی ریشه ۱	66.6 <sup>a-c</sup>	65.7 <sup>a-c</sup>	20.2 <sup>c</sup>	18.2 <sup>c</sup>	1.7 <sup>b</sup>	1.7 <sup>b</sup>
	Partial root drying <sub>2</sub> خشک کردن جزئی ریشه ۲	60.2 <sup>bc</sup>	70.5 <sup>a</sup>	20.0 <sup>c</sup>	30.7 <sup>b</sup>	2.0 <sup>a</sup>	1.7 <sup>b</sup>

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند. تیمارهایی که از ابتدای دوره رشد تنش خشکی اعمال شدند با عدد ۱ و تیمارهایی که بیست و یک روز پس از گلدهی تیمار خشکی اعمال شدند با عدد ۲ نشان داده شدند.

In each column means followed by the same letters are not significantly different ( $p \leq 0.05$ ), at 5% probability level based on LSD. Treatments that were applied from the beginning of the growth period with the number 1 and the treatments that were applied twenty one days after flowering were indicated by the number 2.

خشک کردن جزئی ریشه نیمی از ریشه در حالت خشکی قرار دارد تا با لقا اسیدآسیزیک باعث افزایش مواد محلول سلول و افزایش قدرمطلق پتانسیل اسمزی و تحمل بهتر تنش شود. به همین دلیل در آخر فصل گیاهان این تیمار آبیاری و تیمار آبیاری کامل سبز بودند ولی تیمار کم‌آبیاری خشک شده بودند.

#### ارتفاع بوته

در مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی، بیشترین ارتفاع بوته در تیمار آبیاری خشک کردن جزئی منطقه ریشه از زمان گلدهی به ثبت رسید. تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد و تیمار خشک کردن جزئی منطقه ریشه کل دوره رشد در رده دوم قرار گرفتند (جدول ۴).

تأثیر افزایش کود فسفات بر ارتفاع بوته معنی‌دار بود (جدول ۵). با افزایش مقدار فسفر از  $25\text{mg.Kg}^{-1}$  به  $31\text{mg.Kg}^{-1}$  ارتفاع بوته شش سانتی‌متر افزایش یافته است (جدول ۵). برهمکنش کود فسفات و تیمارهای آبیاری بر ارتفاع بوته حاکی از تفاوت معنی‌دار بین تیمارها بود (جدول ۶). تیمار آبیاری کامل و کاربرد  $31\text{mg.Kg}^{-1}$  فسفات در زمان گلدهی بیشترین ارتفاع بوته را به ثبت رساند و با تمام تیمارهای خشکی تفاوت معنی‌دار داشت؛ و تیمار آبیاری کامل و سطح کاربرد  $25\text{mg.Kg}^{-1}$  فسفات در رده دوم قرار گرفته است و با تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد تفاوت معنی‌دار داشت. با کاربرد  $31\text{mg.Kg}^{-1}$  فسفات، ارتفاع بوته در تمام تیمارها افزایش پیدا کرد و تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد پایین‌ترین ارتفاع بوته را دارا بود.

در مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی، در سطوح مختلف کود فسفات بین تیمارهای مختلف آبیاری تفاوت معنی‌دار وجود داشت (جدول ۶). تیمار خشک کردن جزئی منطقه ریشه کل دوره رشد و کاربرد  $31\text{mg.Kg}^{-1}$  فسفات با بیشترین ارتفاع بوته در رده اول و تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد تیمار خشک کردن جزئی منطقه ریشه و کاربرد  $25\text{mg.Kg}^{-1}$  فسفات با کاربرد  $31\text{mg.Kg}^{-1}$  فسفات، کمترین ارتفاع بوته را دارا بود (جدول ۶). با افزایش سطح فسفر خاک، ارتفاع بوته در تمام تیمارهای آبیاری به‌طور معنی‌دار افزایش پیدا کرد.

در روش آبیاری خشک کردن جزئی ریشه ارتفاع بوته سیب‌زمینی بیشتر از آبیاری کامل بود (Roosta et al., 2010) که این نتایج با مرحله پس از گلدهی در این آزمایش مطابقت دارد. تنش خشکی بر ارتفاع، وزن خشک ریشه و زیست‌توده خیار تأثیر معنی‌داری نداشت (Bayat et al., 2013). افزایش میزان فسفر خاک باعث افزایش ارتفاع و رشد گیاه سیب‌زمینی شد و ارتفاع بوته در رژیم‌های آبیاری کم‌آبیاری و خشک کردن جزئی ریشه مشابه یکدیگر بود (Sun et al., 2015).

با افزایش کاربرد کود فسفات از  $25\text{mg.Kg}^{-1}$  به  $31\text{mg.Kg}^{-1}$  در مرحله گلدهی میزان پتانسیل اسمزی کاهش یافت؛ درحالی‌که در مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی با کاربرد  $31\text{mg.Kg}^{-1}$  فسفر، پتانسیل اسمزی کاهش معنی‌داری نشان نداد (جدول ۳).

برهمکنش کاربرد کود فسفات و تیمارهای آبیاری نشان داده است در مرحله گلدهی با کاربرد  $25\text{mg.Kg}^{-1}$  فسفر میزان پتانسیل اسمزی در تیمار خشک کردن جزئی ریشه با  $1/6$  مگاپاسگال، بیشترین مقدار و  $12/5$  درصد از تیمار شاهد بیشتر بود و با آن تفاوت معنی‌دار داشت. با افزایش کود فسفات به  $31\text{mg.Kg}^{-1}$  میزان پتانسیل اسمزی کاهش یافت و اختلاف بین تیمار خشک کردن جزئی ریشه در کل دوره رشد و تیمار آبیاری کامل معنی‌دار نبود، ولی با تیمار کم‌آبیاری در کل دوره رشد تفاوت معنی‌دار داشت (جدول ۳).

در مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی در سطح  $25\text{mg.Kg}^{-1}$  کود فسفات بیشترین مقدار پتانسیل اسمزی با دو مگا پاسگال به تیمار خشک کردن جزئی ریشه از زمان گلدهی و تیمار کم‌آبیاری از زمان گلدهی اختصاص یافت و با دیگر تیمارهای آبیاری تفاوت معنی‌دار داشتند و تیمارهای خشک کردن جزئی ریشه در کل دوره رشد و تیمار کم‌آبیاری در کل دوره رشد با ثبت پتانسیل اسمزی  $1/7$  مگاپاسگال و  $15$  درصد کمتر نسبت به آن‌ها، در رده دوم قرار گرفتند. میزان پتانسیل اسمزی در تیمار آبیاری کامل در کمترین مقدار بود. با افزایش کود فسفات، تیمار کم‌آبیاری از زمان گلدهی بیشترین میزان پتانسیل اسمزی را به خود اختصاص داد. تفاوت بین تیمار خشک کردن جزئی ریشه از زمان گلدهی با دو تیمار دیگر خشکی معنی‌دار نبود و همچنان کمترین میزان پتانسیل اسمزی به تیمار آبیاری کامل تعلق گرفت (جدول ۳).

افزایش غلظت مواد محلول سلول و حفظ فشار آماس را تنظیم اسمزی گویند؛ و مهم‌ترین مکانیسم در حفظ فعالیت‌های فیزیولوژیکی از جمله پتانسیل آب برگ است و در بسیاری از گیاهان حفظ تورژانس توسط تنظیم اسمزی موجب بهبود عملکرد و زنده‌مانی گیاه در شرایط تنش خشکی است (Chai et al., 2016). نتایج پژوهشگران در گیاه نخود نشان داد در تیمارهای تحت تنش خشکی رطوبت آب برگ به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و به دنبال آن با غلیظ شدن مواد درون یاخته‌ای، میزان قدر مطلق پتانسیل اسمزی برگ در تیمارهای تحت تنش نسبت به شاهد به‌طور معنی‌دار افزایش پیدا کرد (Zare Mehrjerdi et al., 2016). فرض بر این است که تنظیم اسمزی در برگ‌ها و ایجاد مکش منفی به درون یاخته‌ها باعث افزایش توانایی گیاه برای جذب آب از خاک و در نتیجه بهبود توانایی گیاه برای تحمل به خشکی می‌شود (Yactayo et al., 2013). در این پژوهش با اعمال تنش خشکی قدرمطلق پتانسیل اسمزی افزایش یافته و این به دلیل افزایش مواد محلول داخل سلول است در تیمار

جدول ۴- اثر کم آبیاری و خشک کردن جزئی منطقه ریشه بر ارتفاع بوته، زیست توده، وزن غده و کارایی مصرف آب در سبب زمینی در مراحل مختلف رشد

Table 4- Effect of deficit irrigation and partial root zone drying on, plant height, biomass, tuber weight and water use efficiency of potato at different growth stages

Stages مرحله	Irrigation آبیاری	Plant height ارتفاع بوته (cm)	Biomass زیست توده (g.plant <sup>-1</sup> )	Tuber weight وزن غده (g.plant <sup>-1</sup> )	Water use efficiency کارایی مصرف آب
Flowering گلدهی	Control کنترل	67.16 <sup>a</sup>	-	-	-
	Deficit irrigation 1 کم آبیاری ۱	58.39 <sup>b</sup>	-	-	-
	Partial root drying 1 خشک کردن جزئی ریشه ۱	58.90 <sup>b</sup>	-	-	-
21 days after flowering ۲۱ روز پس از گلدهی	Control کنترل	67.2 <sup>a</sup>	14.6 <sup>a</sup>	311 <sup>a</sup>	5.39 <sup>a</sup>
	Deficit irrigation 1 کم آبیاری ۱	58.4 <sup>b</sup>	9.90 <sup>b</sup>	145 <sup>cd</sup>	5.01 <sup>ab</sup>
	Deficit irrigation 2 کم آبیاری ۲	66.7 <sup>a</sup>	10.60 <sup>b</sup>	156 <sup>bc</sup>	3.46 <sup>c</sup>
	Partial root drying 1 خشک کردن جزئی ریشه ۱	57.7 <sup>b</sup>	9.73 <sup>b</sup>	122 <sup>d</sup>	4.84 <sup>ab</sup>
	Partial root drying 2 خشک کردن جزئی ۲	71.4 <sup>a</sup>	13.7 <sup>a</sup>	178 <sup>b</sup>	4.57 <sup>b</sup>

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، با یکدیگر تفاوت معنی‌داری ندارند. تیمارهایی که از ابتدای دوره رشد اعمال شدند با عدد ۱ و تیمارهایی که بیست و یک روز پس از گلدهی اعمال شدند با عدد ۲ نشان داده شدند.

In each column means followed by the same letters are not significantly different ( $p \leq 0.05$ ), at 5% probability level based on LSD. Treatments that were applied from the beginning of the growth period with the number 1 and the treatments that were applied twenty one days after flowering were indicated by the number 2.

جدول ۵- اثر کود فسفات بر ارتفاع بوته، زیست توده، وزن غده و کارایی مصرف آب سبب زمینی در مراحل مختلف رشد

Table 5- Effect of phosphate fertilizer on plant height, biomass, tuber weight and water use efficiency potato leaves at different growth stages

Stages مرحله	Plant height ارتفاع بوته (cm)		Biomass زیست توده (g.plant <sup>-1</sup> )		Tuber weight وزن غده (g.plant <sup>-1</sup> )		Water use efficiency کارایی مصرف آب	
	Triple superphosphate (mg.Kg <sup>-1</sup> ) سوپرفسفات تریپل							
	25	31	25	31	25	31	25	31
Flowering گلدهی	59.43 <sup>b</sup>	63.53 <sup>a</sup>	-	-	-	-	-	-
21 days after flowering ۲۱ روز پس از گلدهی	61.71 <sup>b</sup>	67.5 <sup>a</sup>	10.8 <sup>b</sup>	12.6 <sup>a</sup>	175 <sup>a</sup>	189 <sup>a</sup>	4.58 <sup>a</sup>	4.74 <sup>a</sup>

در هر صفت، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

In each treat means followed by the same letters are not significantly different ( $p \leq 0.05$ ), at 5% probability level based on LSD.

استفاده بهتر از نیتروژن خاک، ارتفاع بوته از آبیاری کامل نیز بیشتر بود.

#### زیست توده

میزان زیست توده گیاه سبب زمینی در تیمارهای مختلف آبیاری

با اعمال روش‌های کم آبیاری و خشک کردن جزئی ریشه از ابتدای رشد، گیاه از ابتدا تحت شرایط تنش قرار گرفته و ارتفاع بوته کاهش یافته ولی در روش خشک کردن جزئی ریشه بعد از گلدهی، چون همیشه نیمی از ریشه در حالت هیدراته قرار دارد گیاه کاهش ارتفاع چندانی نداشته و با افزایش کود فسفر و رشد ریشه بیشتر و

با توجه به نوع محصول و زمان وقوع کمبود آب حساسیت گیاه به کمبود آب متفاوت است. در گیاه برنج تیمار کم‌آبیاری در مرحله پنجه زنی فعال تعداد پنجه، ساقه، خوشه و تعداد سنبلچه را به‌طور قابل توجهی کاهش داد و در نهایت منجر به کاهش عملکرد دانه شد (Hussain et al., 2018). طی مراحل تاسل‌دهی ذرت مدت‌زمان کوتاه کمبود آب، ۳۰ درصد تولید زیست‌توده و ۴۰ درصد عملکرد دانه را کاهش داد (Chai et al., 2016). تنش آب در سویا (*Glycine max*) هنگامی که کم‌آبیاری در زمان اوایل گلدهی و در مرحله پایان گلدهی اعمال شد به میزان ۹ تا ۱۳ درصد، در زمان توسعه غلاف ۴۵ درصد و در هنگام انتهای غلاف دهی ۴۶ درصد کاهش عملکرد را موجب گردید (Chai et al., 2016). نتایج مطالعه دیگر میان سه رژیم آبیاری، نشان داد در گیاه سیب‌زمینی گیاهانی که تحت شرایط آبیاری کامل رشد می‌کنند، ماده خشک اندام هوایی و گیاهانی که تحت تنش خشکی جزئی منطقه ریشه رشد کرده بودند، ماده خشک ریشه به‌طور قابل توجهی بالاتر بود و پس از آن گیاهان تحت شرایط کم‌آبیاری پایین‌ترین ماده خشک را تولید کردند (Sun et al., 2015).

تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشتند (جدول ۴). در مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی تیمار خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه با تیمار آبیاری کامل تفاوت آماری نداشت. تیمارهای کم‌آبیاری، کم‌آبیاری کل دوره رشد و خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه کل دوره رشد با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نداشتند و در یک گروه آماری قرار گرفتند (جدول ۴). با افزایش کود فسفات میزان زیست‌توده گیاه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و در کل تیمارها بین ۲ تا ۲۸ درصد افزایش زیست‌توده مشاهده شد (جدول ۵). برهمکنش تیمارهای آبیاری و کاربرد کود فسفات بر میزان زیست‌توده سیب‌زمینی رقم فونتانه نشان داد باوجوداین که در تیمار آبیاری کامل با افزایش کود فسفات میزان زیست‌توده نیز افزایش یافت ولی در تیمارهای خشکی کاربرد کود فسفات اثر معنی‌داری بر زیست‌توده گیاه نداشت (جدول ۶). با افزایش کود فسفات از  $25 \text{mg.Kg}^{-1}$  به مقدار  $31 \text{mg.Kg}^{-1}$  مقدار زیست‌توده، در تیمار آبیاری کامل و خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه، به ترتیب ۲۸ و ۱۷/۴ درصد افزایش یافت و بقیه تیمارهای خشکی با یکدیگر تفاوت آماری معنی‌داری نداشتند (جدول ۶).

جدول ۶- اثر تیمارهای آبیاری و کود فسفات در مراحل مختلف رشدی بر ارتفاع بوته، زیست‌توده، وزن غده و کارایی مصرف آب در سیب‌زمینی

Table 6- Effect of irrigation and phosphate fertilizer treatments at different growth stages on plant height, biomass, tuber weight and water use efficiency in potato

Stages مرحله	Irrigation آبیاری	Plant height ارتفاع گیاه (cm)		Biomass زیست‌توده (g.plant <sup>-1</sup> )		Tuber weight وزن غده (g.plant <sup>-1</sup> )		Water use efficiency کارایی مصرف آب	
		25	31	25	31	25	31	25	31
Flowering گلدهی	Control کنترل	64.3 <sup>ab</sup>	70.0 <sup>a</sup>	-	-	-	-	-	-
	Deficit irrigation <sub>1</sub> کم آبیاری ۱	56.2 <sup>c</sup>	60.6 <sup>bc</sup>	-	-	-	-	-	-
	Partial root drying <sub>1</sub> خشک کردن جزئی ریشه ۱	57.8 <sup>bc</sup>	60.0 <sup>bc</sup>	-	-	-	-	-	-
21 days after flowering ۲۱ روز پس از گلدهی	Control کنترل	64.3 <sup>c-e</sup>	70.0 <sup>a-c</sup>	12.3 <sup>c</sup>	17.1 <sup>a</sup>	289 <sup>b</sup>	332 <sup>a</sup>	4.82 <sup>bc</sup>	5.97 <sup>a</sup>
	Deficit irrigation <sub>1</sub> کم آبیاری ۱	56.2 <sup>f</sup>	60.0 <sup>ef</sup>	10.2 <sup>de</sup>	9.6 <sup>e</sup>	147 <sup>de</sup>	143 <sup>de</sup>	5.41 <sup>ab</sup>	4.63 <sup>bc</sup>
	Deficit irrigation <sub>2</sub> کم آبیاری ۲	62.0 <sup>d-f</sup>	71.5 <sup>ab</sup>	9.7 <sup>e</sup>	11.6 <sup>cd</sup>	165 <sup>d</sup>	147 <sup>de</sup>	3.60 <sup>de</sup>	3.34 <sup>e</sup>
	Partial root drying <sub>1</sub> خشک کردن جزئی ریشه ۱	55.4 <sup>f</sup>	60.0 <sup>ef</sup>	9.7 <sup>e</sup>	9.8 <sup>e</sup>	129 <sup>e</sup>	116 <sup>e</sup>	4.82 <sup>bc</sup>	4.87 <sup>bc</sup>
	Partial root drying <sub>2</sub> خشک کردن جزئی ریشه ۲	67.4 <sup>b</sup>	75.4 <sup>a</sup>	12.4 <sup>c</sup>	15.0 <sup>b</sup>	148 <sup>d</sup>	207 <sup>c</sup>	4.25 <sup>cd</sup>	4.89 <sup>bc</sup>

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند. تیمارهایی که از ابتدای دوره رشد تنش خشکی اعمال شدند با عدد ۱ و تیمارهایی که بیست‌ویک روز پس از گلدهی تیمار خشکی اعمال شدند با عدد ۲ نشان داده شدند.

In each column means followed by the same letters are not significantly different ( $p < 0.05$ ), at 5% probability level based on LSD. Treatments that were applied from the beginning of the growth period with the number 1 and the treatments that were applied twenty one days after flowering were indicated by the number 2

سطح فسفات، در تیمار خشک کردن جزئی ریشه از زمان گلدهی وزن غده در بوته با ۲۸ درصد افزایش به ۲۰۷ گرم در بوته رسید. وزن غده در بوته در سایر تیمارهای خشکی با افزایش میزان فسفات، کاهش یافت هرچند این کاهش از لحاظ آماری معنی دار نبود (جدول ۶).

به طور کلی کمبود رطوبت خاک از طریق افزایش مقاومت روزه‌ای برگ، کاهش میزان فتوسنتز برگ، زیست‌توده اندام هوایی، رشد غده باعث کاهش عملکرد غده می‌گردد (Obidiegwu et al., 2015). سیب‌زمینی به کمبود رطوبت خاک حساس بوده و کاهش حجم آبیاری به خصوص در زمان آغازش غده و غده بندی، باعث افت عملکرد غده این گیاه می‌گردد (Eskandari et al., 2011). در مطالعه‌ای تعداد غده بالا و عملکرد بالا در تیمارهای آبیاری کامل و خشک کردن جزئی ریشه مشاهده شد. یک رابطه خطی بین کاهش عملکرد غده و میزان آبیاری مشاهده کردند. با کاهش میزان آبیاری و اعمال تنش خشکی، درصد ماده خشک اندام‌های هوایی و غده‌ها در سیب‌زمینی افزایش می‌یابد ولی کاهش عملکرد را به دنبال دارد (Yactayo et al., 2013). کاهش پتانسیل آب اطراف ریشه و کمبود آب در دسترس گیاه باعث می‌شود آب کمتری به بافت‌های زنده گیاه هدایت و درصد ماده خشک غده‌ها افزایش می‌یابد (Gültekin and Eskandari et al., 2011; Ertek, 2018). با وجود اینکه با کاهش آب میزان عملکرد غده کاهش می‌یابد ولی در تیمار خشک کردن جزئی ریشه و فسفر بالا افت عملکرد غده نسبت به بقیه تیمارها کمتر است و این به دلیل آبیاری نیمی از ریشه و هیدراته نگه داشتن گیاه به طوری که محتوای آب برگ با تیمار آبیاری کامل تفاوت معنی‌داری ندارد و از طرفی استفاده بیشتر فسفر باعث رشد زیست‌توده بهتر نسبت به بقیه تیمارهای کم‌آبی بود. در نتیجه عملکرد غده نسبت به تیمار آبیاری کامل کمتر و از بقیه تیمارهای آبیاری بیشتر است.

#### کارایی مصرف آب

بررسی اثر تیمارهای آبیاری بر میزان کارایی مصرف آب گیاه سیب‌زمینی نشان داد بین تیمارهای آبیاری تفاوت معنی‌دار وجود دارد (جدول ۴). تیمار آبیاری کامل بیشترین مقدار زیست‌توده و در نتیجه بیشترین کارایی مصرف آب را به ثبت رساند (جدول ۵). کارایی مصرف آب در تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد و تیمار خشک کردن جزئی ریشه کل دوره رشد با تیمار آبیاری کامل تفاوت معنی‌دار نداشت (جدول ۴)؛ و کمترین کارایی مصرف آب با ۳۶ درصد کاهش نسبت به تیمار آبیاری کامل، در تیمار کم‌آبیاری از زمان گلدهی مشاهده شد.

برهمکنش تیمار آبیاری و کود فسفات نشان داد بیشترین کارایی مصرف آب در تیمار آبیاری کامل و کاربرد  $31 \text{mg.Kg}^{-1}$  کود فسفات است و با تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد و کاربرد  $25 \text{mg.Kg}^{-1}$  فسفات

پژوهشگران گزارش کردند وزن زیست‌توده سیب‌زمینی در دو روش کم‌آبیاری سنتی و خشک کردن جزئی ریشه حدود ۲۴ درصد کمتر از تیمارهای آبیاری کامل بوده است و مشابه بوده است (Liu et al., 2015). بیشترین مقدار وزن خشک اندام هوایی گیاه سیب‌زمینی مربوط به تیمار آبیاری کامل است (Golestani-Kermani et al., 2013). نتایج حاصل از اعمال تیمارهای مختلف آبیاری نشان داد که روش خشک کردن جزئی منطقه ریشه باعث کاهش کمتر وزن خشک سیب‌زمینی نسبت به کم‌آبیاری شد (Golestani-Kermani et al., 2013). اهمیت تغذیه فسفر برای تولید غده به خوبی اثبات شده است و کود فسفات به طور معنی‌داری باعث افزایش مقدار فسفر قابل دسترس گیاه در خاک و تأثیر مثبت روی زیست‌توده و افزایش کارایی مصرف آب در گیاه سیب‌زمینی شد. (Rosen et al., 2014). نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر نیز با این یافته‌ها مطابقت دارد و با توجه به افزایش ارتفاع بوته در تیمار خشک کردن جزئی ریشه و  $31 \text{mg.Kg}^{-1}$  کود فسفر، این تیمار آبیاری توانایی استفاده از نیتروژن قابل دسترس در انتهای فصل رشد را دارد و نسبت به دیگر تیمارهای خشکی بیشتر سبز می‌ماند و بعد از آبیاری کامل بیشترین زیست‌توده را دارد.

#### وزن غده در بوته

اثر تیمارهای مختلف آبیاری بر وزن غده در بوته حاکی از تفاوت معنی‌داری بین تیمارها بود (جدول ۴). در تیمار آبیاری کامل بیشترین وزن غده در بوته و تیمار خشک کردن جزئی ریشه کل دوره رشد با ۶۵ درصد کاهش نسبت به آبیاری کامل، کمترین وزن غده در بوته را به ثبت رساند. در رده دوم، تیمار خشک کردن جزئی ریشه از زمان گلدهی قرار گرفت و از سایر تیمارهای خشکی وزن غده در بوته بیشتری داشت و با تیمار آبیاری کامل تفاوت معنی‌دار داشت (جدول ۴).

افزایش کود فسفات از ۲۵ به  $31 \text{mg.Kg}^{-1}$  افزایش ۱۴ گرمی وزن غده در بوته را به دنبال داشت. ولی این افزایش وزن از لحاظ آماری معنی‌دار نبود (جدول ۵).

برهمکنش تیمار آبیاری و کود فسفات بر وزن غده در بوته حاکی از اختلاف معنی‌دار بین تیمارهای مختلف بود (جدول ۶). با کاربرد  $25 \text{mg.Kg}^{-1}$  کود فسفات تیمار آبیاری کامل بیشترین مقدار وزن غده در بوته را نشان داد و با تیمارهای خشکی در آن سطح فسفات تفاوت معنی‌دار داشت. تیمار خشک کردن جزئی ریشه کمترین مقدار وزن غده در بوته را دارا بود و با تیمار کم‌آبیاری از زمان گلدهی تفاوت معنی‌دار داشت (جدول ۶). با کاربرد  $31 \text{mg.Kg}^{-1}$  فسفات، وزن غده در بوته در تیمار آبیاری کامل به ۳۳۲ گرم در بوته رسید که ۱۳ درصد افزایش داشت و با تمام تیمارها تفاوت معنی‌دار داشت. با افزایش

(Yactayo et al., 2013). تیمار خشک کردن جزئی ریشه در زمان بلوغ اعمال شود در مقایسه با روش‌های کم‌آبیاری، خشک کردن جزئی ریشه از ابتدای رشد و آبیاری کامل توانایی استفاده از نیتروژن قابل دسترس در انتهای فصل رشد دارد و نسبت به دیگر تیمارهای خشکی بیشتر سبز می‌ماند. این اثر احتمالاً پر شدن غده که در اواخر فصل رشد و در نتیجه نگهداری عملکرد انجام می‌شود را توضیح می‌دهد.

### نتیجه گیری

با توجه به شاخص‌های فیزیولوژیکی و مکانیسم‌های مورد مطالعه در این پژوهش، با اعمال تنش خشکی قدرمطلق پتانسیل اسمزی ۳۰ درصد افزایش یافته که به دلیل افزایش مواد محلول درون سلول است. در تیمار خشک کردن جزئی ریشه نیمی از ریشه در حالت خشکی قرار دارد تا با القاء اسیدآسزیک باعث افزایش مواد محلول سلول و افزایش قدرمطلق پتانسیل اسمزی و تحمل بهتر تنش شود. به همین دلیل در آخر فصل گیاهان این تیمار آبیاری و تیمار آبیاری کامل سبز بودند ولی تیمار کم‌آبیاری خشک شده بودند.

در روش خشک کردن جزئی ریشه بعد از گلدهی، با افزایش کود فسفر، سبب رشد بیشتر ریشه و استفاده بهتر از نیتروژن خاک شده به طوری که ارتفاع بوته شش درصد از آبیاری کامل نیز بیشتر بود. با وجود اینکه با کاهش آب میزان عملکرد غده کاهش می‌یابد ولی در تیمار خشک کردن جزئی ریشه و فسفر بالا افت عملکرد غده نسبت به سایر تیمارهای خشکی ۲۰ درصد کمتر است و این به دلیل آبیاری نیمی از ریشه و هیدراته نگه داشتن گیاه می‌باشد، به طوری که محتوای آب برگ با تیمار آبیاری کامل تفاوت معنی‌داری ندارد و از طرفی استفاده بیشتر فسفر باعث رشد زیست‌توده بهتر نسبت به سایر تیمارهای کم‌آبی بود. در نتیجه عملکرد غده نسبت به تیمار آبیاری کامل کمتر و از بقیه تیمارهای آبیاری ۳۰ درصد بیشتر است. بدلیل فراهمی فسفر در ۲۵ میلی گرم در کیلوگرم با افزایش فسفر پایداری غشاء، پتانسیل اسمزی و وزن غده تحت تاثیر افزایش فسفر قرار گرفتند ولی این تاثیر معنی‌دار نبود. اگر تیمار خشک کردن جزئی ریشه در زمان بلوغ اعمال شود در مقایسه با روش‌های کم‌آبیاری، خشک کردن جزئی ریشه از ابتدای رشد و آبیاری کامل توانایی استفاده از نیتروژن قابل دسترس در انتهای فصل رشد را دارد و نسبت به دیگر تیمارهای خشکی سبزمانی بیشتری دارد. این اثر احتمالاً پر شدن غده در اواخر فصل رشد و در نتیجه نگهداری عملکرد را توضیح می‌دهد. روش خشک کردن جزئی ریشه روش مناسب‌تری نسبت به روش کم‌آبیاری از نظر صرفه‌جویی در مصرف آب و حفظ عملکرد است.

تفاوت آماری معنی‌داری نداشت (جدول ۶). کمترین کارایی مصرف آب در تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد و کاربرد  $31 \text{mg.Kg}^{-1}$  فسفات مشاهده شد و با تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد و کاربرد  $25 \text{mg.Kg}^{-1}$  فسفات تفاوت معنی‌دار نداشت (جدول ۶).

کارایی مصرف آب، ماده خشک تولید شده در واحد مصرف آب می‌باشد. ژنوتیپ‌ها و محصولات مختلف تحت خشکی کارایی مصرف آب متفاوت دارند (Fahad et al., 2017). پژوهشگران گزارش دادند کارایی مصرف آب بالاتر در گندم و گوجه‌فرنگی تحت خشکی نسبت به شاهد عمدتاً به دلیل کاهش میزان تعرق در خشکی بود (Nadeem et al., 2014).

کارایی مصرف آب در روش خشک کردن جزئی ریشه (کم‌آبیاری متناوب) نسبت به کم‌آبیاری سنتی افزایش یافته است که این امر نشان‌دهنده استفاده مناسب‌تر از آب در روش کم‌آبیاری متناوب است (Golestani-Kermani et al., 2013). در کم‌آبیاری متناوب افزایش کارایی مصرف آب به دلیل است که کاهش هدایت روزنه‌ها، تعرق را بیشتر از فتوسنتز کاهش می‌دهد. درحالی که در تنش‌های شدید و طولانی مدت روزنه‌ها کاملاً بسته شده و فتوسنتز پایین آمده و باعث کاهش کارایی مصرف آب و در نهایت کاهش عملکرد گیاه می‌شود (۱۳). پژوهشگران حداکثر راندمان مصرف آب را از کم‌آبیاری متناوب (خشک کردن جزئی ریشه) به دست آورده‌اند (Yactayo et al., 2013). درحالی که برخی پژوهشگران، بیشترین مقدار راندمان مصرف آب را از آبیاری کامل گزارش کرده‌اند. تفاوت در شرایط اقلیمی و محیطی، بافت خاک، شدت تنش وارد شده و نوع رقم مورد استفاده در این گزارش‌ها و اینکه همگی در مزرعه انجام شده‌اند، تفاوت‌های ارائه شده را توجیه می‌کند. در مجموع، مطالب ذکر شده روش کم‌آبیاری متناوب (خشک کردن جزئی ریشه) را در استفاده از آب نسبت به آبیاری کامل و کم‌آبیاری سنتی کارایی بهتری را نشان می‌دهد (Golestani-Kermani et al., 2013). کارایی مصرف آب یک صفت مطلوب برای ایجاد تحمل به خشکی در گیاهان در مطالعات مدنظر می‌باشد در واقع گیاهانی که از کارایی مصرف آب بالاتری برخوردار هستند به ازای مصرف آب کمتر تولید بیشتری دارند (Zare Mehrjerdi et al., 2016). تیمار خشک کردن جزئی ریشه ممکن است از طریق ارتقاء رشد ریشه موجب بهره‌برداری بهتر از ذخایر آب خاک شود. گرچه در این مطالعه میزان ریشه اندازه‌گیری نشد اما مطالعات متعددی نشان داده‌اند که خشک کردن جزئی ریشه عمق ریشه و تراکم ریشه را افزایش می‌دهد و هدایت هیدرولیکی بالاتر ریشه با محدودیت تأمین آب یافت می‌شود (Chai et al., 2016). همچنین سایر پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که تیمار خشک کردن جزئی ریشه هنگامی که پس از شروع بلوغ اعمال شود، تنها استراتژی صرفه‌جویی در آب قادر به حفظ عملکرد است و باعث افزایش قابل توجه در کارایی مصرف آب می‌شود

## منابع

1. Bayat, H., Mardani, H., Arouie, H., & Salahvarzi, Y. (2011). Effects of salicylic acid on morphological and physiological characteristics of cucumber seedling (*Cucumis sativus* cv. Super Dominus) under drought stress. *Journal of Plant Production* 18(3): 63-76. (In Persian with English abstract)
2. Chai, Q., Gan, Y., Zhao, C., Xu, H.L., Waskom, R.M., Niu, Y., & Siddique, K.H. (2016). Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 36(1): 1-21.
3. Chaki, M., Begara-Morales, J.C., & Barroso, J.B. (2020). Oxidative stress in plants. *Antioxidants* 9(6):481. <https://doi.org/10.3390/antiox9060481>.
4. Dashti, M., Kafi, M., Tavakoli, H., & Mirza, M. (2014). The effect of water deficit stress on water relations, photosynthesis and accumulation of osmolate in Nowruzak medicinal plant. *Iranian Journal of Crop Research* 12: 813-821. (In Persian with English abstract)
5. Eskandari, A., Khazaei, H.R., Nezami, A., & Kafi, M. (2011). Study of the effect of irrigation regime on yield and some qualitative characteristics of three potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.). *Journal of Soil and Water, Agricultural Sciences and Industries* 25(2): 247-240. (In Persian with English abstract)
6. Fahad, S., Bajwa, A.A., Nazir, U., Anjum, S.A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, S., Nasim, W., Adkins, S., Saud, S., & Ihsan, M.Z. (2017). Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. *Frontiers in Plant Science* 8: 1147. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147>.
7. Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A., & Siddique, K.H. (2012). Drought stress in plants: an overview. *Plant Responses to Drought Stress* 1-33. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0>.
8. Golestani-Kermani, S., Nouri-Emamzadei, M.R., Shayannejad, M., Shahnazari, A., & Mohammadkhani, A. (2013). Effects of water stress on quantitative and qualitative properties of potato crop (*Agria* c.v.) in deficit irrigation and partial root zone drying techniques. *Science and Engineering Irrigation* 37(3): 123-135. (In Persian with English abstract)
9. Gültekin, R., & Ertek, A. (2018). Effects of deficit irrigation on the potato tuber development and quality. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences* 2(3): 93-98. <https://doi.org/10.31015/jaefs.18015>.
10. Heath, R.L., & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics* 125(1): 189-198.
11. Heidari, N., Puryousef, M., & Tavakoli, A. (2014). The effect of drought stress on photosynthesis, its related parameters and relative water content of *Pimpinella anisum* L. *Iranian Journal of Biology* 27: 829-839. (In Persian with English abstract)
12. Hussain, H.A., Hussain, S., Khaliq, A., Ashraf, U., Anjum, S.A., Men, S., & Wang, L. (2018). Chilling and drought stresses in crop plants: implications, cross talk, and potential management opportunities. *Frontiers in Plant Science* 9: 393. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00393>.
13. Kasman, A., & Duman, Y.S. (2015). CO<sub>2</sub> emissions, economic growth, energy consumption, trade and urbanization in new EU member and candidate countries: a panel data analysis. *Economic Modelling* 44: 97-103. <http://doi.org/10.1016/j.econmod.2014.10.022>.
14. Liu, G., Rubaek, C.H., Liu, F., & Andersen, M.N. (2015). Effect of partial root-zone drying and deficit irrigation on nitrogen and phosphorus uptake in potato. *Agriculture Water Management* 59: 66-76.
15. Nadeem, S.M., Ahmad, M., Zahir, Z.A., Javaid, A., & Ashraf, M. (2014). The role of mycorrhizae and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in improving crop productivity under stressful environments. *Biotechnology Advances* 32(2): 429-448. <http://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.12.005>.
16. Obidiegwu, J.E., Bryan, G.J., Jones, H.G., & Prashar, A. (2015). Coping with drought: stress and adaptive responses in potato and perspectives for improvement. *Frontiers in Plant Science* 6: 542. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00542>.
17. Quandahor, P., Lin, C., Gou, Y., Coulter, J.A., & Liu, C. (2019). Leaf morphological and biochemical responses of three potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars to drought stress and aphid (*Myzus persicae* Sulzer) infestation. *Insects* 10(12): 435. <https://doi.org/10.3390/insects10120435>.
18. Roosta, H.R., Nazari F., & Shahnazari, A. (2010). Comparative effects of conventional irrigation (CI) and partial root zone drying (PRD), and various sources of nitrogen on growth and yield in potato under field condition. *Advance in Environmental Biology* 4(1): 117-124.
19. Rosen, C.J., Kelling, K.A., Stark, J.C., & Porter, G.A. (2014). Optimizing phosphorus fertilizer management in potato production. *American Journal of Potato Research* 91(2): 145-160. <https://doi.org/10.1007/s12230-014-9371-2>.
20. Shi, S., Fan, M., Iwama, K., Li, F., Zhang, Z., & Jia, L. (2015). Physiological basis of drought tolerance in potato grown under long-term water deficiency. *International Journal of Plant Production* 9(2): 305-320.

21. Shock, C.C., Wang, F.X., Flock, R., Feibert, E.B.G., Shock, C.A., & Pereira, A. (2013). Irrigation monitoring using soil water tension. file:///C:/Users/JAFARN~1/AppData/Local/Temp/em8900.pdf
22. Sun, Y., Cui, X., & Liu, F. (2015). Effect of irrigation regimes and phosphorus rates on water and phosphorus use efficiencies in potato. *Scientia Horticulturae* 190: 64-69. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.04.017>.
23. Thalmann, M., & Santelia, D. 2017. Starch as a determinant of plant fitness under abiotic stress. *New Phytologist* 214(3): 943-951. <https://doi.org/10.1111/nph.14491>.
24. Yactayo, W., Ramírez, D.A., Gutiérrez, R., Mares, V., Posadas, A., & Quiroz, R. (2013). Effect of partial root-zone drying irrigation timing on potato tuber yield and water use efficiency. *Agricultural Water Management* 123: 65-70. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.03.009>.
25. Zare Mehrjerdi, M., Bagheri, A., Bahrami, A.R., Nabati, J., & Masoumi, A. (2016). The effect of drought stress on osmotic regulation, proline variability and root and leaf soluble sugars and its relationship with drought tolerance in twelve chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes. *Iranian Crop Science* 47(3): 462-451. (In Persian)



## The Effect of Stagnant Zone Behavior in One-Dimensional Hydrodynamic Models and Solute Transport in Rivers

A. Montazeri<sup>1</sup>, S. Khodambashi Emami<sup>2</sup>, M. Mazaheri<sup>3\*</sup>

Received: 11-07-2022

Revised: 03-11-2022

Accepted: 07-12-2022

Available Online: 22-02-2023

### How to cite this article:

Montazeri, A., Khodambashi Emami, S., & Mazaheri, M. (2023). The Effect of Stagnant Zone Behavior in One-Dimensional Hydrodynamic Models and Solute Transport in Rivers. *Journal of Water and Soil* 36(6): 661-675. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/jsw.2022.77613.1181](https://doi.org/10.22067/jsw.2022.77613.1181)

### Introduction

Showing the rivers as a one-dimensional problem has simplified or eliminated many processes affecting salinity transfer in the river. Storage processes are one of the factors affecting water quality in rivers. Generally, as a substantial factor, the limitation of observational data confines the use of two-dimensional and three-dimensional models, leading to the use of more widely employed one-dimensional models. Most existing computer models are developed based on the Advection-Dispersion Equation (ADE) and do not consider the storage zone. For this purpose, Modified Advection-Dispersion Equation (MADE) is proposed to consider the stagnant area by defining effective velocity and dispersion coefficient. In this study, a solution has been proposed to apply the effect of the Stagnant zone in water quality simulation in one-dimensional models. The river simulation is closer to the natural conditions. In this model, to prove the improvement of the proposed method, the average stagnant zone fraction expressed as the fraction of the average cross-sectional area of the river ( $\eta$ ) and employed in a one-dimensional model through the definition of the effective velocity and the dispersion coefficient. This model is considered representative of the one-dimensional models developed only by the Advection /Dispersion relation, and the proposed method was investigated for the Arvand River. Observational data along the river were used to calibrate and validate the model.

### Materials and Methods

Since the available and well-known one-dimensional computer programs are generally developed based on the 1D Advection-Dispersion model, they do not consider factors affecting salinity transport such as topography and river morphology heterogeneities known as storage areas. In such a way, these processes are not expressed by presenting the problem as a one-dimensional equation. In this research, in order to increase the accuracy of the simulation with well-known and available one-dimensional models a corrective solution is proposed. To compare the proposed modified method and the base ADE, at the first, the tidal and transboundary arvand river is modeled as a study area, which is a well-mixed river. The river's upstream and downstream boundary conditions were defined according to the available data in 2014. Manning's roughness parameters ranged from 0.017 to 0.033, and the dispersion coefficient was 285 m<sup>3</sup>/s according to previous studies. In order to apply the effect of stagnant areas in the modified equations, it is essential to determine the value of  $\eta$  for the river. This study uses three parameters of dispersion factor (a), dispersion exponent (b), and  $\eta$  by ant colony algorithm with the definition of 5 initial ants and 100 repetitions in Sehan station in the study area, Arvand river was optimized. The values of the estimated parameters are respectively  $\eta = 0.168$ ,  $a = 273.4$ ,  $b = 0.94$ . Therefore, in the modified model, corrections were made using the speed and effective dispersion coefficient as the modified Advection - Dispersion (MADE) method and considering variable dispersion coefficient depending on the flow's speed in the one-dimensional model. These changes were validated in the other two stations (Faw and Dweeb.)

1, 2 and 3- Master's Degree and Associate Professor in Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [m.mazaheri@modares.ac.ir](mailto:m.mazaheri@modares.ac.ir))

## Results and Discussion

Based on this study results, increasing the parameter  $\eta$  caused the peak of the time series to rise and the river's travel time to decrease. The shortening of the water travel time in the river, although increases the dispersion coefficient due to the influence of the stagnant zone, the effect of this parameter on the time series of the simulated concentration is reduced. Like the observational data, the slope of falling and rising limbs is increased. By comparing the one-dimensional model in the two cases of using the effective dispersion coefficient and velocity and without it, the increase in accuracy in the simulation was determined at Sehan station - 123 km from the river formation site - after optimizing the coefficients with three statistical errors parameters. In addition, these changes at two other stations along the river with distances of 180 and 150 km from the river's source confirm this accuracy. For instance, the simulated and measured concentration in 12 months of the year by applying the optimized coefficients reaches the correlation coefficient ( $r$ ) of 0.86 to 0.97 at a distance of 150 km from the upstream, and the root means square error (RMSE) improves 1.27 ppt. The remaining difference in the concentration estimation may be caused by the effect of other parameters or even the entry of agricultural runoff from the lands along the river.

## Conclusion

Accurate estimation and simulation of concentration in river engineering have always been one of the environmental challenges. This research aimed to improve water quality simulation using one-dimensional model in well-mixed rivers. In order to increase the accuracy of the modeling and become closer to the actual conditions, correction factors such as considering the dead zones along the river have been suggested. Analysis showed that, on average, 16% of the surface of the Arvand River's cross-sections are stagnant areas, and the dispersion coefficient depends on the river's speed. These areas include bed dunes and meanderings of the river. The point that attracts attention is the tidal irrigation channels on the sides of the river. The results showed that in Sehan, Dweeb, and Faw stations, the root means square error decreases to 1.78, 1.27, and 0.84, respectively. Therefore, the modified 1D model estimated the concentration (in this study salinity) closer to the measurement data. In Dweeb and Sehan stations, the effect of dead zones such as river meandering is evident. Still, in Faw station, no significant improvement in the impact of stagnant zones was observed due to its proximity to the river mouth. The results of this research can be used for higher accuracy in one-dimensional water quality simulations and bringing the models closer to the natural conditions in rivers.

**Keywords:** Advection-Dispersion equation, Ant colony optimization, Arvand river, Stagnant zone

## مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۱، ص. ۶۷۵-۶۶۱

# بررسی اثر رفتار نواحی ماندابی در مدل‌های یک بعدی هیدرودینامیک و انتقال مواد محلول در رودخانه‌ها

امیرحسین منتظری<sup>۱</sup> - سجاد خدام باشی امامی<sup>۲</sup> - مهدی مظاهری<sup>۳\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۶

## چکیده

بیان رودخانه به عنوان مسئله یک بعدی باعث شده بسیاری از عوامل دخیل در انتقال آلاینده در رودخانه ساده شوند و یا در نظر گرفته نشوند. در رودخانه‌ها نواحی نگهداشت عاملی اثرگذار در کیفیت آب می‌باشند. عموماً محدودیت داده‌های مشاهداتی که یکی از عوامل محدود کننده استفاده از مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی است باعث استفاده گسترده‌تر از مدل‌های یک‌بعدی شده است. اکثر مدل‌های تجاری موجود بر اساس معادله انتقال-انتشار کلاسیک توسعه یافته‌اند و نواحی نگهداشت را در نظر نمی‌گیرند. به این منظور برای مدل‌سازی تأثیرات نواحی ماندابی از سرعت و ضریب پراکندگی مؤثر به عنوان روشی برای بهبود عملکرد معادله انتقال-انتشار پیشنهاد شده است. سرعت و ضریب پراکندگی مؤثر، از طریق اصلاح سرعت متوسط جریان و ضریب پراکندگی طولی، با نسبت مساحت سطح مقطع ناحیه ماندابی به سطح مقطع عرضی رودخانه تعریف می‌شوند. با جای گذاری این پارامترها در حل معادلات سنت-ونانت و انتقال-انتشار در مدل‌های یک‌بعدی اعمال و رودخانه ارونند با آن مورد بررسی قرار گرفت. برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل از MIKE11 به عنوان نماینده‌ای از مدل‌های یک بعدی اعمال و رودخانه ارونند با آن مورد بررسی قرار گرفت. برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل از داده‌های مشاهداتی غلظت در طول رودخانه استفاده شد. پارامترهای فاکتور پراکندگی و توان پراکندگی همراه با نسبت مساحت سطح مقطع ناحیه ماندابی به سطح مقطع عرضی رودخانه برای ایستگاه sehan در ۱۲۳ کیلومتری از القرنه، با الگوریتم بهینه سازی کلونی مورچگان برآورد شد و برای ایستگاه‌های Faw و Dweeb با داده‌های غلظت مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. در ایستگاه Sehan، Dweeb و Faw سه پارامتر خطای ضریب همبستگی، نش-ساتکلیف و جذر میانگین مربعات در مدل اصلاح شده کاهش یافته و به عنوان مثال پارامتر آماری خطای جذر میانگین مربعات به ترتیب به ۱/۷۸، ۱/۲۷ و ۰/۸۴ کاهش می‌یابد؛ بنابراین اصلاحات حاکی از بهبود نتایج پیش‌بینی طبق مدل مفهومی جدید است.

**واژه‌های کلیدی:** ارونرد، الگوریتم مورچگان، معادله انتقال-انتشار، ناحیه نگهداشت

## مقدمه

مستلزم درک کامل از کیفیت آب و فرآیندهای مؤثر بر سرنوشت مواد آلاینده در رودخانه است. در رودخانه‌های ساحلی یا جزرومدی که منتهی به دریا یا محیط‌های آبی شور هستند، مصب رودخانه محل ورود آب شور به آب شیرین رودخانه است (Hussain et al., 2019). در این رودخانه‌ها، جزرومد باعث نفوذ مکرر جبهه آب شور به رودخانه شده و عامل اصلی کاهش کیفیت و افزایش مواد محلول در آب رودخانه می‌باشد. این اتفاق موجب کاهش کیفیت خاک اطراف رودخانه، کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی و پرهزینه شدن برداشت و تصفیه آب می‌شود (Nhung et al., 2019). بررسی شوری در رودخانه‌های جزرومدی به خصوص در نزدیکی مصب به مراتب

رودخانه‌ها و نه‌های طبیعی منبع اصلی آب آشامیدنی، کشاورزی و صنعتی برای سال‌های متمادی بوده‌اند. در سال‌های گذشته حفظ و بهبود کیفیت آب آن‌ها برای محققان و دولت‌ها اهمیت بیشتری پیدا کرده است. برنامه‌ریزی و مدیریت برای برداشت و استفاده از رودخانه

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش‌آموخته‌گان کارشناسی ارشد و دانشیار گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
\* - نویسنده مسئول: (Email: m.mazaheri@modares.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.2022.77613.1181

رودخانه، اددی‌ها، نواحی هایدروهییک<sup>۳</sup> و نواحی ماندابی<sup>۴</sup> باشد (Choi et al., 2016; Rana et al., 2019; Zaramella et al., 2020). در استفاده از معادلات یک بعدی در پیش‌بینی کیفیت رودخانه‌ها، فرایندهای نگهداشت عموماً ساده شده یا در نظر گرفته نمی‌شوند (Tong and Deng, 2015; Kelleher et al., 2013). مقطع عرضی رودخانه (A) به دو بخش شامل ناحیه ماندابی (A<sub>S</sub>) و ناحیه جریان (A<sub>f</sub>) تقسیم می‌شود. مناطق ماندابی در نهرها و رودخانه‌ها معمولاً در پشت تلماسه‌های بستر، در نزدیکی دیواره‌های مقعر در پیچان‌رودها و یا نواحی متخلخل در بدنه رودخانه تشکیل می‌شوند (شکل ۱). پهنه‌های ماندابی قسمتی از رودخانه یا نهر هستند که از جریان اصلی جدا شده‌اند، اما به طور متوسط در محاسبه مساحت مقطع عرضی کل رودخانه به حساب می‌آیند، از این رو مناطق ماندابی، سطح مقطع موثر جریان را کاهش می‌دهند (Cheme et al., 2021; Khodambashi and Mazaheri, 2022). این اتفاق باعث شده سرعت موثر بالاتر از سرعت میانگین اندازه‌گیری شده و یا محاسبه شده از طریق روابط ریاضی باشد (Seo and Cheong, 2001). سرعت موثر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$U_f = \frac{1}{A_f} \int_0^{A_f} u dA \quad (1)$$

A<sub>f</sub> سطح مقطع عرضی ناحیه جریان<sup>۵</sup> [L<sup>2</sup>]، u سرعت نقطه‌ای در ناحیه جریان [LT<sup>-1</sup>]، U<sub>f</sub> سرعت موثر جریان در رودخانه [LT<sup>-1</sup>] و A سطح مقطع کل رودخانه [L<sup>2</sup>] است. در مناطق ماندابی به علت اینکه انتقال (جابه‌جایی) پدیده غالب نبوده، سرعت در آن‌ها از سرعت متوسط در رودخانه کمتر است و به صفر میل می‌کند. با توجه به این A<sub>f</sub> < A می‌باشد، در نتیجه U<sub>f</sub> > U است. در اینجا U سرعت متوسط آب در رودخانه [LT<sup>-1</sup>] تعریف می‌شود که از تقسیم دبی رودخانه بر سطح مقطع عرضی محاسبه می‌شود. بزرگی سرعت موثر نسبت به سرعت متوسط باعث شده گرادیان سرعت در رودخانه افزایش یافته و ضریب پراکندگی موثر به همان نسبت بزرگ‌تر باشد. سینگ (Singh, 2003) با ایجاد تغییراتی در ADE مدل انتقال - انتشار اصلاح شده (MADE) را برای رودخانه‌های دارای نواحی ماندابی توسعه داد. همچنین او با بررسی رودخانه میسوری، نشان داد نتایج مدل ADE با جایگزین کردن سرعت و ضریب پراکندگی موثر در مدل به جای پارامترهای اصلی بهبود می‌یابد.

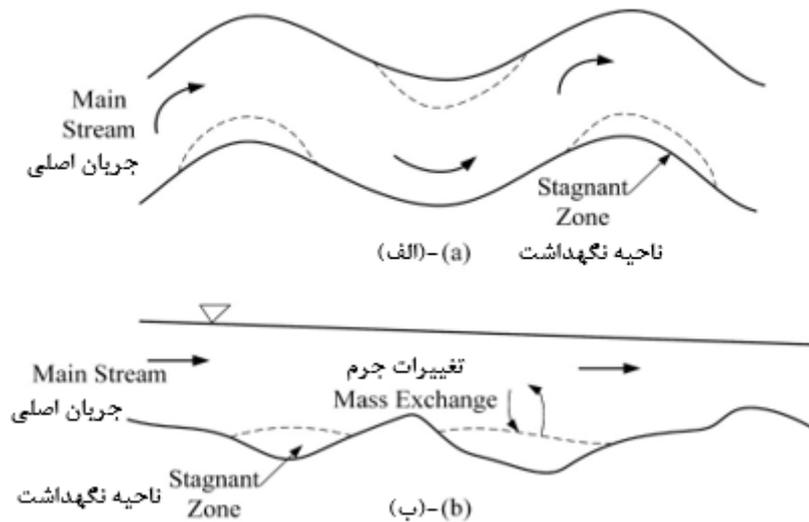
پیچیده‌تر از شرایط دیگر است به این علت که پدیده‌ی جزومد دائماً باعث تغییر حرکت جریان آب شور دریا می‌شود که در هنگام مد به سمت بالادست رودخانه و در هنگام جزر به سمت دریا است. شاخص‌های گوناگونی موثر بر پیشروی، اختلاط و نفوذ آب‌شور به رودخانه هستند که از آن‌ها می‌توان به ارتفاع جزومد، دبی‌های ورودی به رودخانه، توپوگرافی و ناهمگونی‌های مورفولوژی رودخانه که به عنوان نواحی نگهداشت شناخته می‌شوند، شیب بستر رودخانه، سرعت باد و اصطکاک بستر اشاره کرد که بیشترین تأثیر را بر سرنوشت جبهه آب شور می‌گذارند (Savenije, 2005; Singh, 2008). این فرایندها غالباً در مصب رودخانه‌های اختلاط کامل با طرح مسئله به عنوان یک معادله یک بعدی ساده می‌شوند (Yu et al., 2012; Saadat et al., 2022). نفوذ جبهه آب شور در رودخانه‌های جزر و مدی توسط دو فرایند انتقال<sup>۱</sup> و انتشار قابل تشریح است. در فرایند انتقال جریان آب همراه خود شوری را منتقل می‌کند و فرایند پراکندگی<sup>۲</sup> به علت تغییر در پروفیل سرعت اتفاق می‌افتد و باعث باز شدن ابر جبهه شوری در رودخانه می‌شود (Chapra, 2008).

در سراسر دنیا مطالعات گوناگونی در رابطه با نفوذ آب شور به رودخانه‌های منتهی به گستره‌های آبی شور انجام شده است (Eslami et al., 2019; Haddout et al., 2020; Pereira et al., 2022). رودخانه مرزی اروند نیز مستثنا نبوده و در سال‌های گذشته کیفیت آن مورد توجه واقع شده است (Abdullah et al., 2017; Al-Aesawi et al., 2021; Al-Battat, 2019; Lafta, 2022). عنوان مثال گنگ و همکاران (Gong et al., 2022) به منظور تدقیق اثرات تغییرات دبی، دامنه جزومد و باد را بر نفوذ شوری، مصب رودخانه ای در کشور چین را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که اثرات دامنه جزومد بر میزان نفوذ شوری به رودخانه موثرتر از دیگر فاکتورها است. به علاوه در مطالعاتی به اثرات اهمیت مورفولوژی و بستر رودخانه بر کیفیت آب رودخانه‌های جزومدی که در معرض نفوذ آب شور هستند توجه شده است (Abarca et al., 2002; Guo, 2022; Mai et al., 2019; Winn et al., 2006).

رشد روزافزون نگرانی‌های زیست‌محیطی سبب شده مطالعات گسترده‌ای بر روی فرایندهای موثر بر انتقال مواد محلول در رودخانه‌ها انجام گیرد (Kwon et al., 2021; Zaghayan and Ketabchi, 2022). فرایندهای نگهداشت یک مفهوم برای تشریح اثر مناطقی درون یا نزدیک رودخانه بوده که سرعت آب در آن‌ها نسبت به جریان اصلی کمتر است و می‌تواند شامل استخرهای کنار

3- Hyporheic  
4- Stagnant Zone  
5- Flow Zone

1- Advection  
2- Dispersion



شکل ۱- طرح شماتیک از نواحی ماندابی در یک رودخانه (الف) نما از بالا (ب) نمای از کنار رودخانه  
Figure 1- Sketch showing Stagnant zones (a) plan view and (b) sectional view

وابسته به کیفیت آب رودخانه هستند بنابراین کیفیت آب این رودخانه از اهمیت بالایی برخوردار است. با این حال به علت اینکه اطلاعات سطح مقطع عرضی و وضعیت بستر این رودخانه به طور دقیق در دسترس نیست و یکی از علل استفاده از مدل‌های یک بعدی همین موضوع می‌باشد، برای سنجش صحت روش پیشنهادی، از این رودخانه بهره گرفته شد. پارامترهای فاکتور پراکندگی (a) و توان پراکندگی (b) همراه با  $\eta$  از طریق واسنجی مدل MIKE11 برای یک ایستگاه در اروندرود با الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان تعیین می‌شود و برای دو ایستگاه دیگر مورد صحت‌سنجی قرار می‌گیرد.

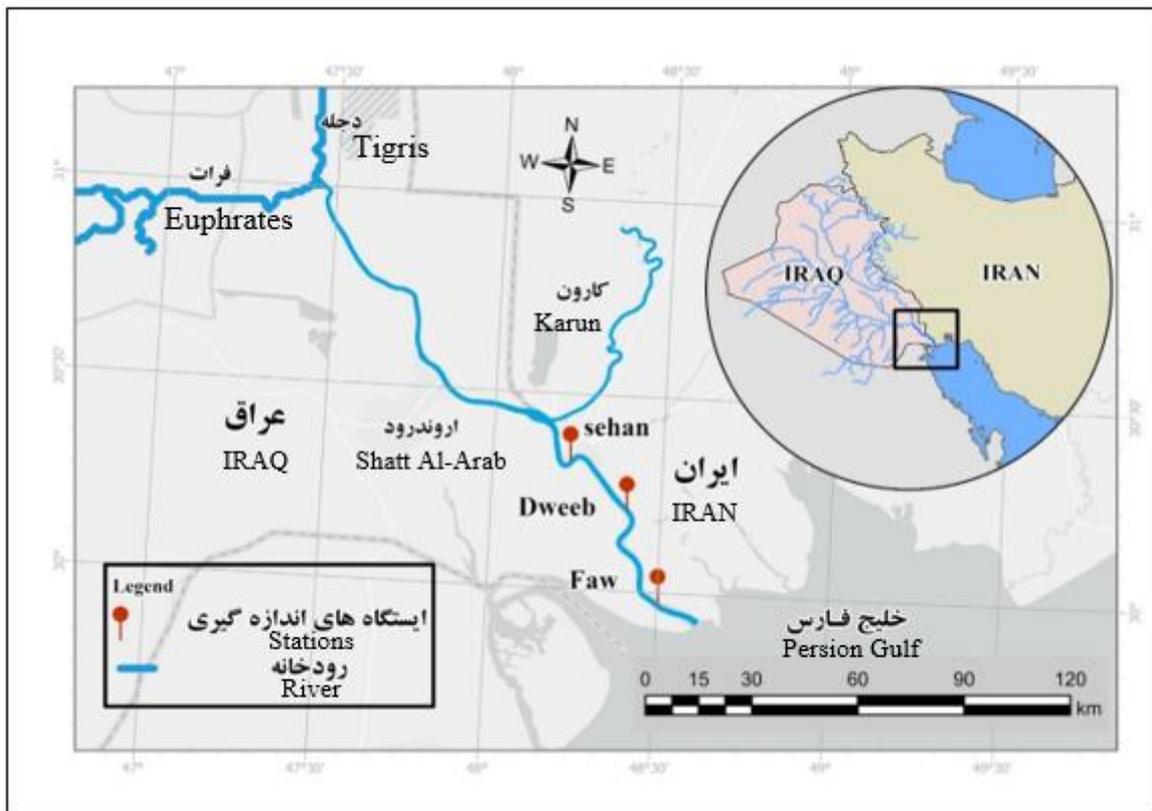
## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

رودخانه اروند با طول تقریبی ۱۹۲ کیلومتر یکی از بزرگ‌ترین مصب‌های جهان است که در جنوب ایران قرار گرفته است. رودخانه‌های دجله و فرات در القرنه<sup>۱</sup> نزدیک شهر بصره در عراق به هم می‌رسند و در ۳۳ کیلومتر شهر بصره رودخانه کارون به آن می‌پیوندد و اروندرود ایجاد می‌شود. این رودخانه پس از طی مسیر ۸۴ کیلومتری در مرز کشور ایران و عراق به خلیج فارس می‌ریزد (شکل ۲). عرض این رودخانه از ۲۵۰ متر در پایین‌دست دجله و فرات تا بیش از ۷۰۰ متر در مصب رودخانه می‌رسد عرض این رودخانه در ورودی به خلیج فارس ۱۲۵۰ متر نیز بیان شده است.

سینگ (Singh, 2008) سه مدل انتقال آلاینده در رودخانه‌ها شامل مدل نگهداشت موقت (TSM)، مدل انتقال - انتشار اصلاح شده (MADE) و مدل انتقال - انتشار کسری (FRADE) را برای تعدادی از رودخانه‌های ایالات متحده آمریکا به کار برد و نتیجه گرفت که معادله انتقال - انتشار اصلاح شده در مقایسه با دو مدل دیگر دارای پارامترهای کمتر و به لحاظ کاربردی ساده تر است. همچنین او نشان داد این مدل در مدل‌سازی رودخانه‌های دارای نواحی ماندابی بسیار تواناتر می‌باشد.

طرح مسئله به عنوان یک مدل یک بعدی باعث شده بسیاری از عوامل دخیل در انتقال مواد محلول در رودخانه ساده شوند و یا در نظر گرفته نشوند. در شرایطی که داده‌های مشاهداتی برای یک رودخانه محدود باشد و یا مدل‌های پیچیده دوبعدی و سه‌بعدی نمی‌توانند به طور قابل اعتماد مورد صحت‌سنجی قرار گیرند، از سرعت و ضریب پراکندگی مؤثر استفاده می‌شود. عموماً در مدل‌های یک بعدی نواحی نگهداشت تعریف نمی‌شوند و اکثر مدل‌های یک بعدی بر اساس رابطه‌ی پایه‌ی انتقال - انتشار توسعه یافته‌اند. ارزش عملی این روش در این واقعیت نهفته است که اثر مناطق ماندابی در استفاده از معادلات یک بعدی سنت - ونانت و انتقال - انتشار اعمال شده و در مدل‌های توسعه یافته شده یک بعدی بکار گرفته شود. برای اینکه اثر نواحی ماندابی در معادلات دیده شود، لازم است مقدار  $\eta$  برای رودخانه مورد نظر تعیین گردد. این پارامتر در نهایت از طریق سرعت (یا دی) و ضریب پراکندگی مؤثر وارد مدل می‌شود. رودخانه اروند علاوه بر مرزی بودن تنها ورودی آب شیرین به خلیج فارس محسوب می‌شود همچنین از آنجایی که اراضی و نخیلات اطراف رودخانه



شکل ۲- محدوده مطالعاتی و موقعیت رودخانه اروند  
Figure 2- Study area and location of Arvand river

(*et al., 2017*) شبیه‌سازی جریان و کیفیت آب و انتقال آلودگی (در این مطالعه شوری) رودخانه توسط مدل یک بعدی انجام شد. مدل‌های زیادی برای تحلیل و شبیه‌سازی کیفیت و انتقال آلودگی در رودخانه‌ها توسعه داده شده است. MIKE11 یک ابزار یک بعدی با هیدرودینامیک قوی برای شبیه‌سازی جریان و کیفیت مصب‌ها، رودخانه‌ها و کانال‌ها است که توسط مؤسسه هیدرولیک دانمارک<sup>۲</sup> ایجاد و توسعه داده شده است (*DHI, 2016*). به منظور برآورد غلظت شوری در رودخانه مورد مطالعه، دو ماژول هیدرودینامیک (HD) و انتقال-انتشار (AD) مورد استفاده قرار گرفته است. قدم اول در مدل‌سازی عددی هر پدیده‌ای شناخت روابط حاکم بر آن پدیده است. نتایج مدل هیدرودینامیک شامل عمق آب و سرعت جریان از ورودی‌های مدل کیفیت برای پیش‌بینی شوری در مصب اروندرود می‌باشد. معادلات حاکم بر جریان رودخانه معادلات یک بعدی سنت-ونانت است (*Martin et al., 2018*).

ارتفاع کف این رودخانه در حدود ۰٫۷ متر در طول ۶۳ کیلومتر تا منطقه بصره کاهش می‌یابد. عمق رودخانه بین ۸٫۵ متر تا ۲۴ متر در فصول پرآبی و کم‌آبی بیان شده است (*Abdullah et al., 2015*; *Al-Asadi, 2017*). قسمت پایین حوضه دجله - فرات نشان دهنده بزرگترین منطقه تالابی در خاورمیانه و غرب آسیا است که تحت شرایط طبیعی ۲۰ هزار کیلومتر مربع را دربر می‌گیرد (*UNEP, 2001*). اصلی‌ترین منبع تأمین آب شیرین در آن منطقه رودخانه اروند است و پایدار ماندن بسیاری از نخیلات وابسته به کیفیت آب این رودخانه است. مهم‌ترین منبع کاهش کیفیت آب رودخانه نفوذ آب شور از سمت خلیج فارس به رودخانه است که بررسی عوامل اثر گذار بر برآورد کیفیت آب در اثر نفوذ آب شور را اجتناب ناپذیر کرده است (*Montazeri et al., 2023*).

#### مدل‌سازی

در این پژوهش با توجه به اطلاعات از وضعیت شوری و این که رودخانه جزرومدی اروند اختلاط کامل<sup>۱</sup> محسوب می‌شود (*Abdullah*)

2- Danish Hydraulic Institute (DHI)

1- Well-mixed

صفر باشد ضریب پراکندگی در طول ثابت و برابر فاکتور پراکندگی می‌شود و در صورتی که  $b$  عددی غیر صفر باشد، ضریب پراکندگی در محاسبات مدل وابسته به میزان سرعت بوده و در طول رودخانه و در زمان به علت غیریکنواخت بودن جریان متغیر خواهد بود.

به منظور مقایسه و بررسی بهبود نتایج در مدل MIKE11، ابتدا مدل بدون تغییرات پیشنهادی در رودخانه ارون اجرا شد. با توجه به اطلاعات موجود برای سال ۲۰۱۴ (شکل ۳)، ابتدا سری زمانی دبی و غلظت مواد محلول ورودی به رودخانه به عنوان شرایط مرزی بالادست وارد مدل شد (Mohamed and Abood, 2017). با توجه به جداول جزرومد در دهانه خروجی ارون، تراز سطح آب دریا به عنوان شرایط مرزی پایین دست رودخانه در نظر گرفته شد (Tables, 2014) و همراه با غلظت متوسط شوری خلیج فارس به مدل معرفی شد. قابل ذکر است شرایط مرزی پایین دست به صورتی تعریف شد که شوری خلیج فارس امکان بازگشت به شبکه محاسباتی در رودخانه را داشته باشد. همچنین، رودخانه کارون نیز به عنوان ورودی به شبکه‌ی رودخانه به صورت نقطه‌ای با جریان و غلظت ثابت تعریف شد (Montazeri et al., 2022).

پارامترهای هیدرودینامیک و کیفیت رودخانه پارامترهای مهم و اثرگذار در پیش‌بینی شرایط جریان و غلظت در رودخانه هستند. این تحقیق ضریب زبری مانینگ  $0.17$  تا  $0.33$  و ضریب پراکندگی  $285$  مترمربع بر ثانیه با توجه به مطالعات و گزارش‌های پیشین در رودخانه بکار گرفته شد (Abdullah et al., 2016; Al-Taei et al., 2019; Etemad-Shahidi et al., 2011; Montazeri et al., 2022). که در این پژوهش نیز از همین ضرایب برای شبیه‌سازی حالت پایه مدل MIKE11 استفاده شد.

به علاوه از اثر باد صرف نظر شد و ضریب واکنش با توجه به این که شوری آلاینده‌ای زوال‌ناپذیر است در شبیه‌سازی صفر ( $k=0$ ) در نظر گرفته شد (Kanda et al., 2015). با عنایت به رابطه (۶) در ابتدا فاکتور پراکندگی بگونه‌ای تعریف شد که در طول رودخانه بدون تغییر باشد ( $b=0$ ). بنابراین پس از مدل‌سازی هیدرودینامیک جریان (HD)، نتایج آن به مدل کیفیت (AD) وارد شد. در نتیجه سری زمانی غلظت در طول رودخانه قابل استخراج است.

حال با توجه به هدف مطالعه برای بهبود نتایج، تخمین بهتر تغییرات غلظت و جبران کمبود داده در مدل‌سازی، باید تغییراتی در پارامترهای ورودی اعمال شود. تأثیر نواحی ماندابی در رودخانه از طریق تعریف پارامتر  $\eta$  و اثر آن بر سری زمانی جریان ورودی به رودخانه و ضریب پراکندگی دیده می‌شود. ضریب پراکندگی و سرعت مؤثر به صورت عبارات (۷) و (۸) وارد مدل می‌شود.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA(S_0 - S_f) \quad (3)$$

در این روابط  $A$  سطح مقطع جریان  $[L^2]$ ،  $q$  دبی جریان ورودی جانبی در واحد طول  $[L^2T^{-1}]$ ،  $Q$  دبی جریان  $[L^3T^{-1}]$ ،  $g$  شتاب گرانش زمین  $[MT^{-2}]$ ،  $S_f$  شیب خط انرژی،  $S_0$  شیب بستر،  $h$  عمق آب  $[L]$ ،  $x$  مکان  $[L]$  و  $t$  زمان  $[T]$  می‌باشد. معادله انتقال-انتشار برای پیش‌بینی و نحوه انتقال ماده آلاینده بسط داده شده که بر اساس معادله بقای جرم و قانون اول فیک<sup>۱</sup> به دست آمده است. این معادله بیانگر دو مکانیزم انتقال جرم، شامل انتقال ماده آلاینده توسط جریان و پراکندگی بر اساس اختلاف غلظت و سرعت است که در ماژول AD به صورت یک‌بعدی با فرض اختلاط کامل استفاده می‌شود (Chapra, 2008).

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} = -\frac{\partial(QC)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) - AKC \pm AS \quad (4)$$

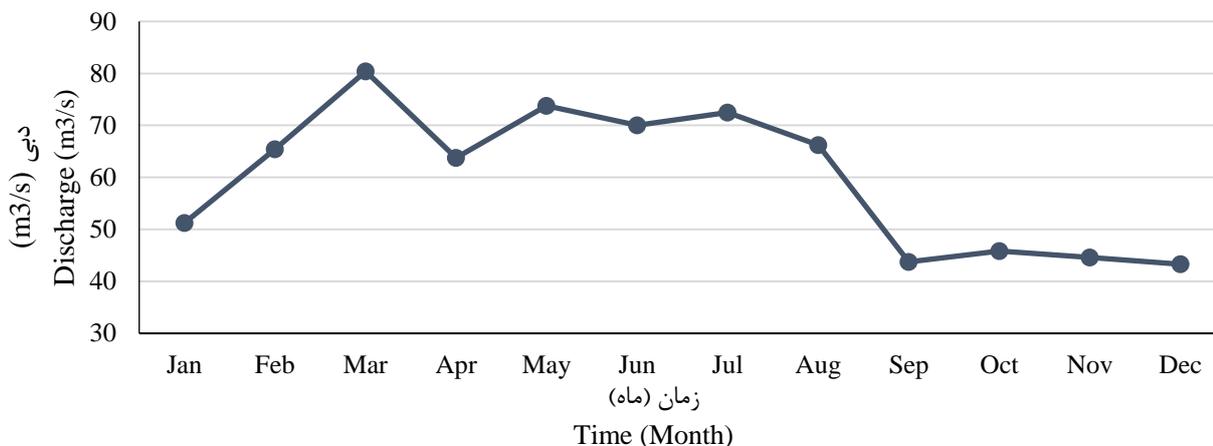
$C$  غلظت آلاینده در شبکه‌ی زمانی و مکانی رودخانه  $[ML^{-3}]$ ،  $A$  سطح مقطع جریان  $[L^2]$ ،  $Q$  دبی رودخانه  $[L^3T^{-1}]$ ،  $D$  ضریب پراکندگی طولی  $[L^2T^{-1}]$ ،  $K$  ضریب زوال آلاینده (بعد آن تابعی از درجه واکنش می‌باشد. برای واکنش درجه صفر  $[ML^{-3}T^{-1}]$ ، برای واکنش درجه یک دارای بعد  $[T^{-1}]$ ، برای واکنش درجه دو  $[L^3M^{-1}T^{-2}]$ ،  $S$  ترم منبع  $[ML^{-3}T^{-1}]$ ،  $x$  فاصله از محل تخلیه آلاینده  $[L]$  و  $t$  زمان  $[T]$  است. در مدل MIKE11 حل عددی روابط دیفرانسیلی (۲) تا (۴) با روش تفاضل محدود به شکل ضمنی صورت می‌گیرد. انتخاب گام زمانی و مکانی تا حد زیادی برای ارضا کردن شرایط پایداری معادله (۴) اهمیت دارد. شرط پایداری مدل MIKE11 در عبارت (۵) قابل مشاهده است. به علت اینکه جریان آب غیرماندگار و غیریکنواخت در نظر گرفته شده است، شرط پایداری در هر زمان و هر مکان باید برقرار باشد.

$$\frac{U \Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (5)$$

در این رابطه  $\Delta x$  گام مکانی  $[L]$ ،  $\Delta t$  گام زمانی  $[T]$  و  $U$  سرعت متوسط جریان در رودخانه  $[LT^{-1}]$  است. به علت اینکه ضریب پراکندگی میزان زیادی به گرادیان مکانی سرعت وابسته است، در مدل MIKE11 این ضریب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D = aU^b \quad (6)$$

در این رابطه  $U$  سرعت متوسط جریان رودخانه  $[LT^{-1}]$ ،  $a$  فاکتور پراکندگی  $[L^2T^{-1}]$  و  $b$  توان پراکندگی می‌باشند. در حالتی که  $b$  برابر



شکل ۳- جریان ورودی به رودخانه اروند از بالادست در سال ۲۰۱۴  
Figure 3- Monthly rate of discharge in the upstream of the Arvand River in 2014

روش واسنجی نشده‌اند. در این پژوهش از یکی از روش‌های فرا ابتکاری مبتنی بر هوش جمعی استفاده شده است که در برآورد پارامترها در یک مجموعه یکتا توانمند است (Blum, 2005; Dorigo et al., 2006).

پایاده‌سازی الگوریتم کلونی مورچه در چند مرحله صورت می‌گیرد. گام اول ایجاد مورچه‌های اولیه، ارزیابی، مرتب‌سازی و قراردادن آن‌ها در بایگانی می‌باشد. در این مقاله ۵ مورچه اولیه ایجاد شده که هر یک ۳ مقدار برای فاکتور پراکندگی ( $a$ ) و توان پراکندگی ( $b$ ) و نسبت مساحت مقطع عرضی ناحیه ماندابی به رودخانه ( $\eta$ ) در بر دارند. در گام دوم باید ضرایب وزنی  $w_l$  و احتمالات  $P_l$  محاسبه شود. این دو ضریب را می‌توان با عبارات مختلفی محاسبه نمود که رایج‌ترین روش محاسبه آن‌ها به صورت زیر می‌باشد:

$$w_l = \frac{1}{qk\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(l-1)^2}{2q^2k^2}} \quad (9)$$

$$P_l = \frac{w_l}{\sum_1^k w_k} \quad (10)$$

در این روابط  $l$  شماره مورچه اولیه موردنیاز،  $k$  تعداد مورچه‌های اولیه،  $q$  ضریب کنترل تابع می‌باشد. در مرحله سوم مدل احتمالی مربوط به هر کدام از متغیرهای تصادفی ساخته می‌شود. برای ایجاد توزیع نرمال نیازمند میانگین و واریانس داریم که میانگین عدد تصادفی انتخاب شده، در نظر گرفته می‌شود و واریانس از فرمول (۱۱) قابل محاسبه است. در نهایت برای استخراج مدل احتمالی توزیع‌های نرمال با ساختار فرمول (۱۲) ترکیب می‌شوند:

$$U_f = \frac{U}{1-\eta} \quad (7)$$

$$D_f = \frac{D}{1-\eta} \quad (8)$$

در روابط  $D$  ضریب پراکندگی  $[L^2T^{-1}]$ ،  $D_f$  ضریب پراکندگی موثر  $[L^2T^{-1}]$  و  $\eta$  نسبت مساحت مقطع عرضی ناحیه ماندابی به مقطع عرضی رودخانه است. برای رودخانه اروند سرعت موثر از طریق تقسیم سری زمانی دبی ورودی به عبارت  $(1-\eta)$  تولید می‌شود. وارد کردن ضریب پراکندگی موثر به مدل MIKE11 کمی پیچیده‌تر به نظر می‌رسد. با توجه به وابستگی این ضریب به گرادبان مکانی سرعت،  $\eta$  از طریق فاکتور پراکندگی در مدل وارد می‌شود. پارامترهای  $a$ ،  $b$  و  $\eta$  در مدل MIKE11 برای ایستگاه Sehan با فاصله ۱۲۳ کیلومتری از القره توسط الگوریتم فرا ابتکاری کلونی مورچگان واسنجی شده، سپس تغییرات اعمال شده در دو ایستگاه دیگر در طول رودخانه با توجه به داده‌های موجود اندازه‌گیری در سال ۲۰۱۴ صحت سنجی می‌شوند. ارتباط غیرمستقیم بین مورچه‌ها از طریق مسیرهای فرمونی آنها را قادر می‌سازد کوتاه‌ترین مسیرها را بین لانه و منابع غذایی خود بیابند. این ویژگی الهام بخش تعریف الگوریتمی جمعیت محور است که می‌تواند راه حل‌های تقریبی برای مسائل بهینه سازی پیچیده پیدا کنند. جزء اصلی الگوریتم‌های ACO مدل فرمونی است که برای نمونه برداری احتمالی از فضای جستجو استفاده می‌شود (Dorigo and Stützle, 2019). تاکنون روش‌های مختلفی برای واسنجی مدل‌های انتقال آلاینده استفاده شده است (Ward et al., 2017)؛ با این حال محققین موفق به انتخاب بهترین

مشاهداتی و غلظت‌های شبیه‌سازی شده توسط MIKE11 به عنوان تابع هدف تعریف می‌شود. برای پیاده سازی الگوریتم کلونی مورچگان برای شروع ۵ مورچه اولیه انتخاب و ۱۰۰ تکرار در نظر گرفته شده است. روند پیشرفت در الگوریتم بهینه‌سازی در شکل ۵ قابل مشاهده است. مقادیر پارامترهای برآورد شده به ترتیب  $\eta = 0.168$ ،  $\eta = 273/4$ ،  $a = 0.94$ ،  $b$  می‌باشد.

افزایش پارامتر  $\eta$  باعث شده سرعت آب و ضریب پراکندگی در معادلات سنت-ونانت و انتقال-انتشار افزایش یابد. افزایش سرعت موجب کاهش زمان حرکت آب در رودخانه یا به اصطلاح Travel Time می‌شود. علی‌رغم افزایش ضریب پراکندگی به واسطه تأثیر ناحیه ماندابی، کوتاه شدن زمان حرکت آب در رودخانه باعث شده تا اثرگذاری این پارامتر بر سری زمانی غلظت شبیه‌سازی یا مشاهداتی کاهش یابد و شیب شاخه پایین رونده و بالارونده افزایش یافته و قلّه سری زمانی غلظت بالاتر رود. تغییرات حاصل از اعمال اثر ناحیه ماندابی بر نتایج شبیه‌سازی توسط معادلات یک بعدی سنت-ونانت و انتقال-انتشار در ایستگاه Sehan در شکل ۶ به خوبی قابل مشاهده است. در این شکل داده‌های مشاهده شده با شبیه‌سازی متوسط غلظت ماهانه در اروندرود در دو سناریوی با و بدون اثر دادن نواحی ماندابی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

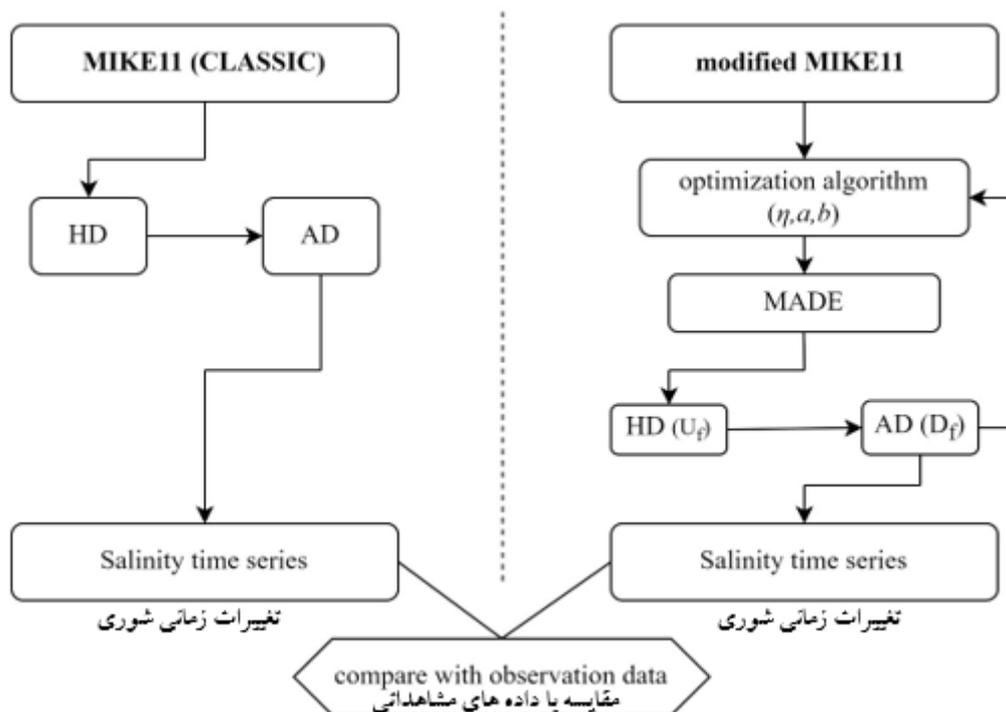
$$\sigma_i^i = \xi \sum_{n=1}^k \frac{|\mu_n^i - \mu_l^i|}{k-1} \quad (11)$$

$$G_i = \sum_l P_l N(\mu_l^i, \sigma_l^{i2}) \quad (12)$$

در این عبارات  $i$  شمارنده متغیر تصادفی،  $n$  شمارنده مورچه،  $\mu$  مقدار متغیر تصادفی،  $\xi$  ضریب کنترل تابع است. در نهایت با نمونه‌گیری تصادفی از هر متغیر و تولید مورچه‌های ثانویه، مورچه‌های جدید و موارد موجود در بایگانی ادغام شده و سپس آن‌ها را با توجه به تابع هدف مسئله مرتب کرده و اعضای اضافی حذف می‌شود. با بروزرسانی بهترین پاسخ یافته شده تا این لحظه می‌توان الگوریتم را در صورت نیاز تکرار نمود. در شکل ۴ فلوجارتی از نحوه‌ی مدل‌سازی مدل MIKE11 در دو حالت پایه و اصلاح شده با هدف مقایسه سری زمانی غلظت خروجی از این دو مدل ارائه شده است.

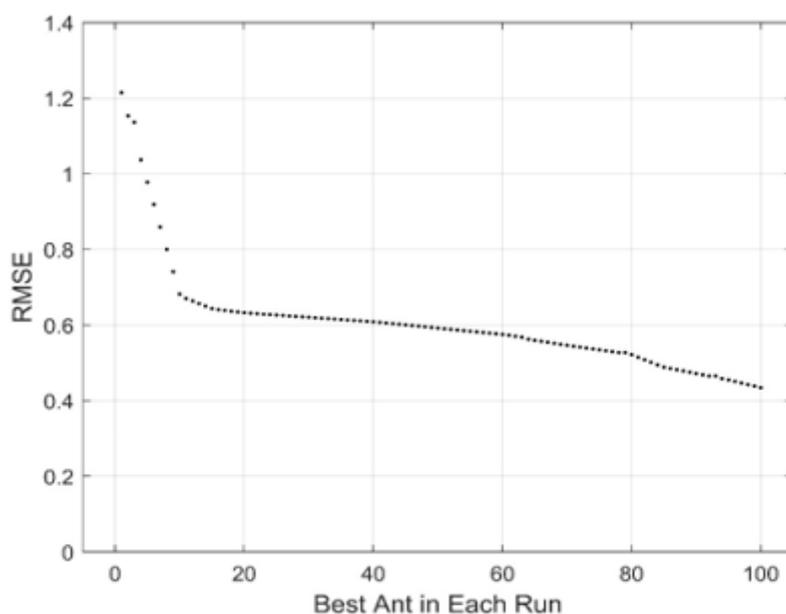
### نتایج و بحث

واسنجی مدل MIKE11 اصلاح شده برای توابع هدف در ایستگاه Sehan در فاصله تقریباً ۷۰ کیلومتری از مصب اروندرود توسط الگوریتم کلونی مورچگان انجام شده است. در این پژوهش برای واسنجی مدل، شاخص RMSE میان داده‌های غلظت



شکل ۴- فلوجارت شبیه‌سازی و مقایسه نتایج دو مدل پایه و اصلاح شده

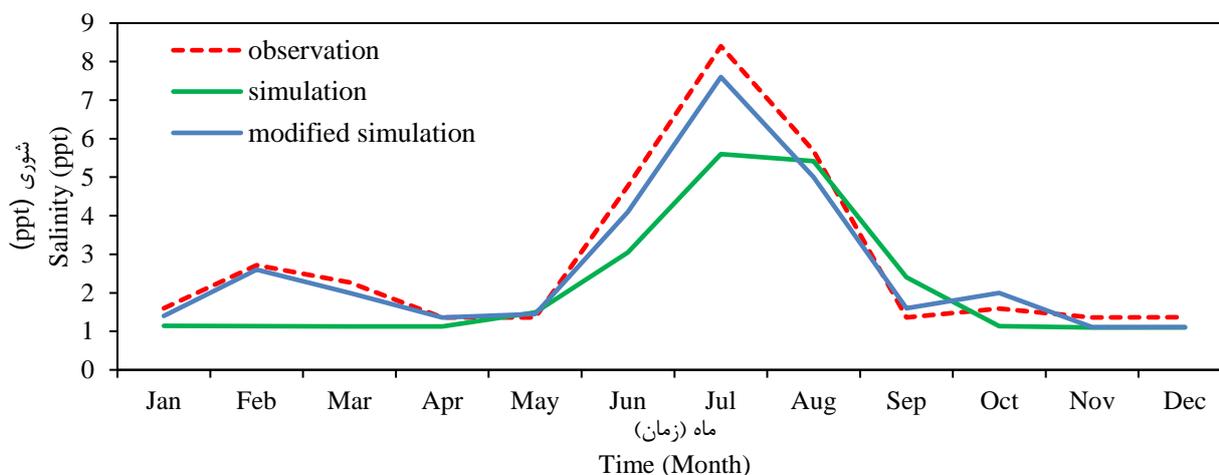
Figure 4- Simulation flowchart and comparison of the results of two classic and modified models



بهترین مورچه در هر بار اجرا

شکل ۵- تغییرات شاخص بهینه‌سازی با پیشرفت در الگوریتم کلونی مورچگان

Figure 5- changes in Object function (RMSE) with progress in ant colony algorithm



شکل ۶- سری زمانی غلظت شوری برای ماه‌های مختلف برای ایستگاه Sehan

Figure 6- Time series of salinity concentration for different months at Sehan station

قله سری زمانی به خوبی مشهود است. مقایسه نتایج MIKE11 و MIKE11 اصلاح شده توسط سه شاخص ضریب همبستگی<sup>۱</sup> (r)، خطای جذر میانگین مربعات<sup>۲</sup> (RMSE) و شاخص نش- ساتکلیف<sup>۳</sup> (NSE) در جدول ۱ قابل مشاهده است. افزایش دقت نتایج مدل با

همان‌طور که از شکل ۶ مشخص است استفاده از ضریب پراکندگی و سرعت مؤثر در معادلات، با افزایش ارتفاع بیشینه غلظت مشاهداتی و افزایش شیب در شاخه‌های پایین رونده و بالارونده باعث بهبود نتایج مدل شده است. این تغییرات به این معناست که شبیه سازی توسط مدل یک بعدی اصلاح شده به داده‌های مشاهداتی غلظت نزدیک‌تر شده است. بهبود تخمین غلظت در شاخه بالارونده و

1- Correlation Coefficient  
2- Root mean squar Error  
3- Nash-Sutcliffe

داده‌های اندازه‌گیری و یا حتی ورود زه آب‌های کشاورزی از مزارع و نخیلات حاشیه رودخانه باشد که عموماً تخمین و اندازه‌گیری آن‌ها امری مشکل است. اما مدل بهبود یافته با دقت بهتری شرایط ماهانه غلظت را پیش‌بینی می‌کند که تخمین آن در شرایط متفاوت جریان‌های ورودی به رودخانه و حتی بالا آمدن سطح دریاها و تغییر در دامنه جزرومد برای استفاده کشاورزی و حتی شرب اهمیت قابل توجهی دارد.

به طور کلی، غلظت شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری در ۱۲ ماه از سال در حالت اعمال ضرایب بهینه شده ضریب همبستگی (r) را در فاصله ۱۵۰ کیلومتر از بالادست از ۰/۸۶ به ۰/۹۷ می‌رساند و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ۱/۲۷ ppt بهبود می‌یابد. در ایستگاه دیگر یعنی ۱۲۳ کیلومتری از بالادست اروندرود ضریب همبستگی از ۰/۹۳ به ۰/۹۸ رسیده است و با توجه به خطای RMSE، مدل اصلاح شده با خطای کمتری غلظت ماهانه را تخمین می‌زند. نتایج صحت سنجی دو ایستگاه ذکر شده با سه شاخص خطای آماری در جدول ۲ محاسبه شده است.

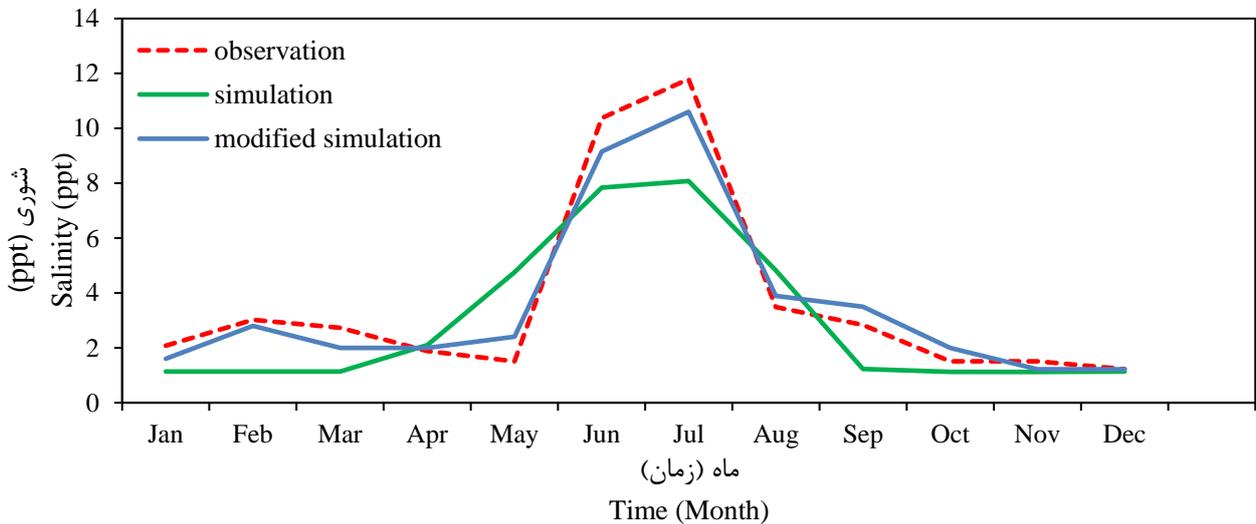
افزوده شدن پارامتر ۱۱ کاملاً مشهود است و به‌عنوان مثال خطای آماری RMSE از ۲/۲۱ ppt به ۰/۴۳ ppt کاهش می‌یابد همچنین شاخص NSE نیز به طور قابل ملاحظه‌ای به عدد یک نزدیک می‌شود. بنابراین نتایج شبیه‌سازی مدل با پارامترهای بهینه شده در این ایستگاه (Sehan) یعنی متغیر در نظر گرفتن فاکتور پراکندگی در طول رودخانه با توجه به سرعت جریان و اثر دادن نواحی ماندابی در باعث افزایش دقت مدل‌سازی شده است.

در این بخش نتایج برای دو ایستگاه Faw و Dweeb با فواصل ۱۵۰ و ۱۸۰ کیلومتری از مبدأ رودخانه مورد صحت سنجی قرار می‌گیرد. جانمایی این دو ایستگاه در شکل ۲ مشخص شده است. نتایج سری زمانی غلظت شوری در ایستگاه‌های Faw و Dweeb به ترتیب در شکل ۷ و ۸ قابل مشاهده است. در این دو ایستگاه پس از اعمال ضرایب واسنجی شده در ایستگاه Sehan، نتایج شبیه‌سازی مدل اصلاح شده به داده‌های مشاهداتی غلظت نزدیک‌تر شده است. با توجه به این که در این دو ایستگاه کلیات سری زمانی به خوبی مدل شده است با این حال بیشترین خطا متعلق به بیشینه غلظت در سری زمانی می‌باشد. این اختلاف ممکن است ناشی از خطا در ثبت

جدول ۱- نتایج بهینه‌سازی در ایستگاه Sehan

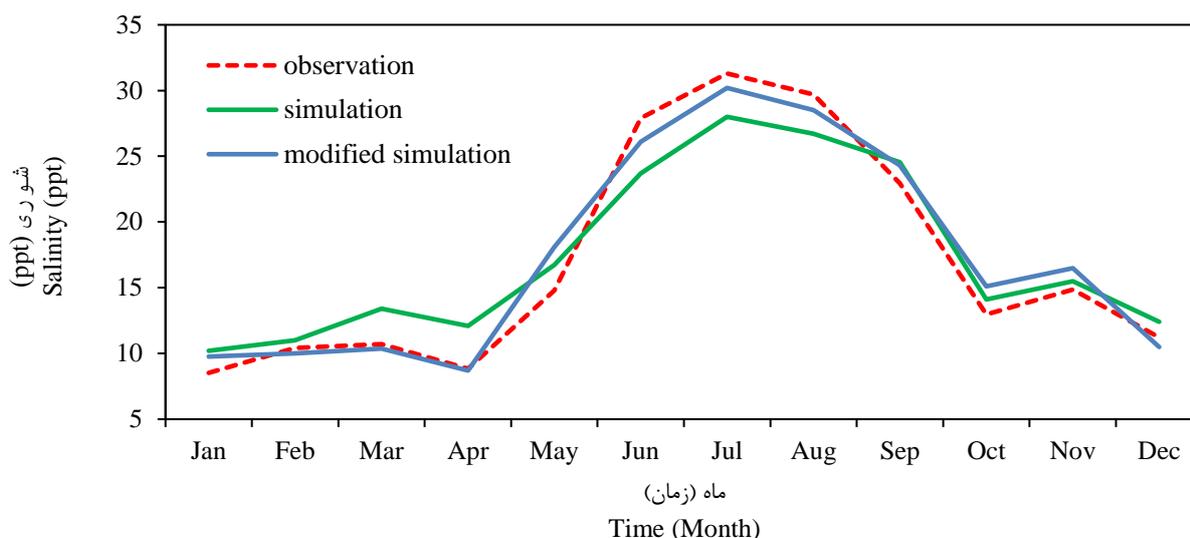
Table 1- Optimization results at Faw station

فاصله از القرنة (km) Distance from al-Qurna	مدل Model	r	RMSE (ppt)	NSE
123 (Sehan)	MIKE11	0.91	2.21	0.72
	Modified MIKE11	0.99	0.43	0.97



شکل ۷- مقایسه داده‌های اندازه‌گیری غلظت با نتایج خروجی در دو حالت از شبیه‌سازی در ایستگاه Dweeb

Figure 7- Time series of salinity concentration for different months at Dweeb station



شکل ۸- مقایسه داده‌های اندازه گیری غلظت با نتایج خروجی در دو حالت از شبیه‌سازی در ایستگاه Faw  
Figure 8- Time series of salinity concentration for different months at Faw station

جدول ۲- نتایج صحت سنجی برای ایستگاه‌های Sehan و Dweeb

Table 2-Validation results for Dweeb and Sehan stations

فاصله از القرنة (km) Distance from al-Qurna	مدل Model	r	RMSE (ppt)	NSE
150 (Dweeb)	MIKE11	0.86	1.97	0.72
	Modified MIKE11	0.97	0.7	0.95
180 (Faw)	MIKE11	0.93	2.38	0.86
	Modified MIKE11	0.98	1.54	0.97

کیفیت آب برآورد کردند و در مدل اصلاح شده نسبت به مدل پایه خطای کمتری وجود داشت به‌عنوان مثال خطای آماری RMSE بیش از ۵۰ درصد کاهش یافت و در نهایت نتایج شبیه‌سازی در دو ایستگاه Dweeb و Faw نیز با اعمال ضرایب به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود داشت.

نتایج بررسی نشان داد به طور متوسط در حدود ۱۶ درصد از سطوح مقاطع عرضی رودخانه اروند را نواحی ماندابی تشکیل می‌دهند که بیشتر این نواحی شامل تل ماسه‌های بستر و ناهمواری‌های موجود در بدنه رودخانه می‌باشد، نکته‌ای که جلب توجه می‌کند کانال‌های آبیاری جزرومدی در جوانب رودخانه است که تعداد آن‌ها با توجه به مشاهدات میدانی و تصاویر ماهواره‌ای نیز کم نیست. ورودی این کانال‌ها در مجاورت رودخانه منجر به تغییرات و به هم ریختن جریان آب در رودخانه می‌شود و عموماً سرعت آب در دهانه ورودی این کانال‌ها کمتر است. این عامل به طور مستقیم ناحیه ماندابی نیست؛ اما اثرات کاملاً مشابه در طول رودخانه دارد و عموماً اثر آن در مدل‌های یک‌بعدی دیده نمی‌شوند. با مقایسه سه ایستگاه اندازه‌گیری غلظت در طول رودخانه می‌توان گفت در ایستگاه‌های Dweeb و Sehan اثر نواحی ماندابی همچون پیچ و خم رودخانه به وضوح

## نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بهبود شبیه‌سازی انتقال مواد محلول در رودخانه‌های تحت سلطه فرایند پراکندگی یک چارچوب برای اصلاح مدل‌های یک بعدی مرسوم به منظور افزایش دقت مدل‌سازی و نزدیک کردن آن به شرایط واقعی، ارائه داده است. این چارچوب فاکتوری اصلاحی مبتنی بر نسبت سطح مقطع عرضی نواحی ماندابی به سطح مقطع عرضی رودخانه را برای اصلاح سرعت جریان و ضریب پراکندگی در شرایط غیریکنواخت و غیرماندگار در معادلات اعمال می‌کند. در این مطالعه از مدل یک بعدی MIKE11 برای رودخانه مرزی و جزرومدی اروند استفاده شد. در نهایت با به‌کارگیری تئوری فراابتکاری بهینه‌سازی الگوریتم مورچگان ضرایب مربوط به نواحی ماندابی و متغیرهای پراکندگی بهینه شدند و تغییرات به مدل معرفی شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی در دو حالت یعنی اعمال کردن ضرایب بهینه و حالت پایه با مقادیر مشاهداتی موجود، حاکی از دقت بالای شبیه‌سازی کیفیت آب اروندرود در مدل اصلاح شده است. در مرحله بهینه‌سازی با مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های مشاهداتی ضرایب  $a = 0.168$ ,  $b = 0.94$  تخمین دقیق‌تری از

دخیل در مدل مورد بررسی قرار گیرد. از نتایج این پژوهش می‌توان در جهت دقت بالاتر در شبیه‌سازی‌های یک بعدی کیفیت آب و نزدیک کردن مدل‌ها به شرایط واقعی در رودخانه‌ها بهره برد.

### سیاسگزاری

نویسندگان وظیفه خود می‌دانند که از حوزه‌ی معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس به دلیل حمایت مالی از این پژوهش، تقدیر و تشکر نمایند.

مشخص است و در مدل اصلاح شده دقت شبیه‌سازی با تغییرات بیشتری بهبود یافته؛ اما در ایستگاه Faw به علت نزدیک بودن به مصب رودخانه، اثرگذاری نواحی ماندابی مانند پیچ و خم در رودخانه کمتر است، همچنین به علت نزدیکی به آب شور خلیج فارس کانال‌های آبیاری کمتری احداث شده است. به همین علت اختلاف زیادی در مدل پایه و اصلاح شده رخ نداده است. رودخانه اروندرود یکی از رودخانه‌های پراهمیت کشور است که با توجه به شرایط مرزی آن اطلاعات اندازه‌گیری شده محدودی در دسترس و به عنوان یک رودخانه نمونه در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است. در نهایت پیشنهاد می‌شود برای دیگر رودخانه‌ها با داده‌های اندازه‌گیری کامل تر اثر نواحی ماندابی در مدل‌های یک بعدی با تغییر ضرایب

### منابع

1. Abarca, E., Carrera, J., Voss, C.I., & Sánchez-Vila, X. (2002). *Effect of aquifer bottom morphology on seawater intrusion*. 17<sup>th</sup> Salt Water Intrusion Meeting (SWIM).
2. Abdullah, A.D., Gisen, J.I.A., Van Der Zaag, P., Savenije, H.H.G., Karim, U.F.A., Masih, I., & Popescu, I. (2016). Predicting the salt water intrusion in the Shatt al-Arab estuary using an analytical approach. *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-20-4031-2016>.
3. Abdullah, A.D., Masih, I., van der Zaag, P., Karim, U.F.A., Popescu, I., & Al Suhail, Q. (2015). Shatt al Arab River system under escalating pressure: a preliminary exploration of the issues and options for mitigation. *International Journal of River Basin Management* 13(2): 215–227.
4. Abdullah, A.D., Popescu, I., Dastgheib, A., van der Zaag, P., Masih, I., & Karim, U.F.A. (2017). Analysis of possible actions to manage the longitudinal changes of water salinity in a tidal river. *Water Resources Management* 31(7): 2157–2171.
5. Al-Aesawi, Q., Al-Nasrawi, A.K.M., Jones, B.G., & Yang, S.-Q. (2021). Geomatic freshwater discharge estimations and their effect on saltwater intrusion in alluvial systems: a case study in Shatt Al-Arab estuary. *Environmental Earth Sciences* 80(18): 1–15.
6. Al-Asadi, S.A.R. (2017). The future of freshwater in Shatt Al-Arab River (Southern Iraq). *Journal Geography Geology* 9(2): 24–38.
7. Al-Battat, M.Q. (2019). Empirical prediction model of salt intrusion along Shatt Al-Arab River, southern Iraq. *Mesopotamian Journal of Marine Sciences* 34(1): 1–12.
8. Al-Taei, S.A., Alfartusi, A.J., & Abdulhussein, I.A. (2019). Determination of hydrodynamic resistance coefficient (Manning's coefficient) in Shatt Al Arab River, southern of Iraq-Basrah. *Journal of Engineering and Sustainable Development* 23(03).
9. Blum, C. (2005). Ant colony optimization: Introduction and recent trends. *Physics of Life Reviews* 2(4): 353–373.
10. Chapra, S.C. (2008). *Surface water-quality modeling*. Waveland press.
11. Cheme, E.K., Mazaheri, M., Karami Cheme, E., & Mazaheri, M. (2021). The effect of neglecting spatial variations of the parameters in pollutant transport modeling in rivers. *Environmental Fluid Mechanics* 21(3): 587–603.
12. Choi, S.Y., Seo, I.W., & Kim, Y.-O. (2020). Parameter uncertainty estimation of transient storage model using Bayesian inference with formal likelihood based on breakthrough curve segmentation. *Environmental Modelling & Software* 123: 104558.
13. DHI. (2016). *'Mike 11 – User Guide'*. Danish Hydraulic Institute, p. 512.
14. Dorigo, M., Birattari, M., & Stutzle, T. (2006). Ant colony optimization. *IEEE Computational Intelligence Magazine* 1(4): 28–39.
15. Dorigo, M., & Stützle, T. (2019). Ant colony optimization: overview and recent advances. *Handbook of Metaheuristics* 311–351.
16. Eslami, S., Hoekstra, P., Nguyen Trung, N., Ahmed Kantoush, S., Van Binh, D., Do Dung, D., Tran Quang, T., & van der Vegt, M. (2019). Tidal amplification and salt intrusion in the Mekong Delta driven by anthropogenic sediment starvation. *Scientific Reports* 9(1): 1–10.
17. Etemad-Shahidi, A., Parsa, J., & Hajiani, M. (2011). Salinity intrusion length: comparison of different approaches. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering* 164(1): 33–42.

18. Gong, W., Lin, Z., Zhang, H., & Lin, H. (2022). The response of salt intrusion to changes in river discharge, tidal range, and winds, based on wavelet analysis in the Modaomen estuary, China. *Ocean & Coastal Management* 219: 106060.
19. Gooseff, M.N., Wondzell, S.M., Haggerty, R., & Anderson, J. (2003). Comparing transient storage modeling and residence time distribution (RTD) analysis in geomorphically varied reaches in the Lookout Creek basin, Oregon, USA. *Advances in Water Resources* 26(9): 925–937. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(03\)00105-2](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(03)00105-2).
20. Guo, Y. (2022). Hydrodynamics in Estuaries and Coast: Analysis and Modeling. In *Water* 14(9): 1478. MDPI.
21. Haddout, S., Priya, K.L., & Adarsh, S. (2020). A predictive model for salt intrusion in estuaries applied to the Muthupet estuary (India) and Bouregreg estuary (Morocco). *ISH Journal of Hydraulic Engineering* 26(4): 430–447.
22. Hussain, M.S., Abd-Elhamid, H.F., Javadi, A.A., & Sherif, M.M. (2019). Management of seawater intrusion in coastal aquifers: a review. *Water* 11(12): 2467.
23. Kanda, E.K., Kosgei, J.R., & Kipkorir, E.C. (2015). Simulation of organic carbon loading using MIKE 11 model: a case of River Nzoia, Kenya. *Water Practice and Technology* 10(2): 298–304.
24. Kelleher, C., Wagener, T., McGlynn, B., Ward, A.S., Gooseff, M.N., & Payn, R.A. (2013). Identifiability of transient storage model parameters along a mountain stream. *Water Resources Research* 49(9): 5290–5306.
25. Khodambashi Emami, S., & Mazaheri, M. (2022). 'Sensitivity analysis of transient storage parameters in mathematical modeling of pollution transport in rivers containing storage Zone', *Irrigation Sciences and Engineering*. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22055/jise.2022.39365.2009>.
26. Kwon, S., Noh, H., Seo, I.W., Jung, S.H., & Baek, D. (2021). Identification framework of contaminant spill in rivers using machine learning with breakthrough curve analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18(3): 1023.
27. Lafta, A.A. (2022). Numerical assessment of Karun river influence on salinity intrusion in the Shatt Al-Arab river estuary, northwest of Arabian Gulf. *Applied Water Science* 12(6): 1–11.
28. Mai, N.T.P., Kantoush, S., Sumi, T., Thang, T.D., & Binh, D.V. (2019). *The influences of tidal regime and morphology change on salinity intrusion in Hau river*. E-Proceedings of the 38<sup>th</sup> IAHR World Congress.
29. Martin, J.L., McCutcheon, S.C., & Schottman, R.W. (2018). *Hydrodynamics and transport for water quality modeling*. CRC press.
30. Mohamed, A.-R.M., & Abood, A.N. (2017). Compositional change in fish assemblage structure in the Shatt Al-Arab River, Iraq. *Asian Journal of Applied Sciences* 5(5).
31. Montazeri, A., Mazaheri, M., & Morid, S. (2022). 'Mathematical model of salinity intrusion in the Arvand Tidal river and its effect on salinity of lands around the River', *Journal of Environmental Studies* 48(2): 221-248. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jes.2022.334989.1008258>.
32. Montazeri, A., Mazaheri, M., Morid, S., & Mosaddeghi, M.R. (2023). Effects of upstream activities of Tigris-Euphrates River Basin on water and soil resources of Shatt al-Arab Border River. *Science of The Total Environment* 858: 159751.
33. Nhung, T.T., Le Vo, P., Van Nghi, V., & Bang, H.Q. (2019). Salt intrusion adaptation measures for sustainable agricultural development under climate change effects: A case of Ca Mau Peninsula, Vietnam. *Climate Risk Management* 23: 88–100.
34. Pereira, H., Sousa, M.C., Vieira, L.R., Morgado, F., & Dias, J.M. (2022). Modelling salt intrusion and estuarine plumes under climate change scenarios in two transitional ecosystems from the NW Atlantic coast. *Journal of Marine Science and Engineering* 10(2): 262.
35. Rana, S.M.M., Boccelli, D.L., Scott, D.T., & Hester, E.T. (2019). Parameter uncertainty with flow variation of the one-dimensional solute transport model for small streams using Markov chain Monte Carlo. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.003>.
36. Runkel, R.L. (1998). *One-dimensional transport with inflow and storage (OTIS): A solute transport model for streams and rivers* (Vol. 98, Issue 4018). US Department of the Interior, US Geological Survey.
37. Saadat, A.M., Mazaheri, M., & MV Samani, J. (2022). *Backward solution (in-time) of the pollution transport equation in river using group preserving scheme*. Ferdowsi Civil Engineering. <https://doi.org/10.22067/jfeci.2022.77645.1165>.
38. Savenije, H.H.G. (2005). *Salinity and tides in alluvial estuaries*. Gulf Professional Publishing.
39. Seo, I.W., & Cheong, T.S. (2001). Moment-based calculation of parameters for the storage zone model for river dispersion. *Journal of Hydraulic Engineering* 127(6): 453–465.
40. Singh, S.K. (2003). Treatment of Stagnant zones in riverine advection-dispersion. *Journal of Hydraulic Engineering* 129(6). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2003\)129:6\(470\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2003)129:6(470)).
41. Singh, S.K. (2008). Comparing three models for treatment of Stagnant zones in riverine transport. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 134(6). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2008\)134:6\(853\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2008)134:6(853)).
42. Tables, A.T. (2014). NP203 admiralty tide tables (ATT), vol 3 Indian Ocean and South China Sea (including Tidal Stream Tables). *Hydrographer to the Navy, Admiralty Hydrography Department Place*.

43. Tong, Y., & Deng, Z. (2015). Moment-based method for identification of pollution source in rivers. *Journal of Environmental Engineering* 141(10): 4015026.
44. UNEP, H. (2001). The Mesopotamian Marshlands: demise of an ecosystem. *Division of Early Warning and Assessment, United Nations Environment Program (UNEP) Nairobi, Kenya*, 46.
45. Ward, A.S., Kelleher, C.A., Mason, S.J.K., Wagener, T., McIntyre, N., McGlynn, B., Runkel, R. L., & Payn, R. A. (2017). A software tool to assess uncertainty in transient-storage model parameters using Monte Carlo simulations. *Freshwater Science*. <https://doi.org/10.1086/690444>.
46. Winn, K.O., Saynor, M.J., Eliot, M.J., & Elio, I. (2006). Saltwater intrusion and morphological change at the mouth of the East Alligator River, Northern Territory. *Journal of Coastal Research* 22(1): 137–149.
47. Yu, Q., Wang, Y., Gao, S., & Flemming, B. (2012). Modeling the formation of a sand bar within a large funnel-shaped, tide-dominated estuary: Qiantangjiang Estuary, China. *Marine Geology* 299: 63–76.
48. Zaghayan, M.R., & Ketabchi, H. (2022). Investigating the relationship between the river flow and dissolved solids concentration. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* 175(2): 89–97.
49. Zaramella, M., Marion, A., Lewandowski, J., & Nützmänn, G. (2016). Assessment of transient storage exchange and advection–dispersion mechanisms from concentration signatures along breakthrough curves. *Journal of Hydrology* 538: 794–801.



## Evaluating the Effect of Combined Water and Salinity Stresses in Estimating the Fodder Maize Biological Yield through Periodic Evaporation and Transpiration

F. Zargar Yaghoubi<sup>1</sup>, M. Sarai Tabrizi<sup>2\*</sup>, A. Mohammadi Torkashvand<sup>3</sup>, M. Esfandiari<sup>4</sup>, H. Ramezani Etedali<sup>5</sup>

Received: 23-07-2022

Revised: 01-11-2022

Accepted: 30-11-2022

Available Online: 22-02-2023

### How to cite this article:

Zargar Yaghoubi, F., Sarai Tabrizi, M., Mohammadi Torkashvand, A., Esfandiari, M., & Ramezani Etedali, H. (2023). Evaluating the Effect of Combined Water and Salinity Stresses in Estimating the Fodder Maize Biological Yield through Periodic Evaporation and Transpiration. *Journal of Water and Soil* 36(6): 677-693. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/jsw.2022.77735.1183](https://doi.org/10.22067/jsw.2022.77735.1183)

### Introduction

The rise in water demand and reduction of water quality and soil in irrigating areas, especially in dry and semi-arid areas of the world, have turned into one of the most crucial challenges for water and soil engineering in recent years. This issue leads us toward optimal quantitative and qualitative management of these valuable resources aimed at achieving economic performance and water productivity. The periodic evaporation and transpiration of the plant in the conditions of simultaneous water and salinity stress are known as one of the most important factors in the qualitative and quantitative growth of the plant yield. Applying mathematical models that simulate the relationship between field variables and yield can be seen as a useful tool in water and soil management issues in such a situation, which has the potential to ensure optimal use of the water and soil resources of any country by providing the plant's water needs and preventing its further loss.

### Materials and Methods

A factorial experiment was performed in 2019 based on completely randomized blocks design with three replications in plots with an area of 9 square meters at the agricultural and animal husbandry farm of Aliabad Fashafuyeh, located in Qom province to examine the simultaneous effect of different levels of water stress and salinity on the periodic evaporation-transpiration and fresh yield of the single cross 704 forage corn cultivar. The applied treatments included the irrigation water salinity at three electrical conductivity levels of 1.8 ( $S_0$ ), 5.2 ( $S_1$ ), and 8.6 ( $S_2$ ) deci Siemens/meter (dS/m), which were prepared by mixing saline well water of the region with fresh (drinking) water and three water stress levels of 100% ( $W_0$ ), 75% ( $W_1$ ), and 50% ( $W_2$ ) of the plant's water requirement. The depth of soil moisture in the corn plant root zone was measured by the TDR device at five depths of 7.5, 12, 20, 40, and 60 cm during different growth stages of the plant using pairs of 7.5, 12, and 20 cm stainless steel electrodes.

### Results and Discussion

The simultaneous water and salinity stresses, which led to the reduced amount of periodic evaporation-transpiration of the yield compared to ideal conditions (without stress), were simulated by additive and multiplicative models. The results suggested a decrease in the evaporation and transpiration with the increased

1, 3 and 4- Ph.D. Student of Soil Engineering and Sciences, Professor and Assistant Professor, Department of Soil Engineering and Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, respectively.

2- Assistant Professor, Department of Water Engineering and Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(\*- Corresponding Author Email: [m.sarai@srbiau.ac.ir](mailto:m.sarai@srbiau.ac.ir))

5- Associate Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

simultaneous water and salinity stresses so that the amount of total evaporation-transpiration in different treatments was measured to be between 692.7 and 344.9 mm and the fresh yield was estimated between 50.4 and 3.2 tons per hectare. Also, the highest amount of periodic evaporation and transpiration in all treatments was found to occur in the development and intermediate stages, and the relative fresh yield in the  $W_0S_0$  to  $W_2S_2$  treatments was calculated between 66% and 100%. The results of modeling the relative yield of the crop based on the amounts of relative evaporation and transpiration of corn in different growth stages and under the different treatments of water stress and salinity, indicated that Singh's additive model and Rao's multiplicative model were appropriate, while the Minhas model was recognized to be inappropriate in this estimation.

## Conclusion

The research results suggested the significant impact of water stress and salinity at least at the 95% level on evaporation and transpiration and the corn yield. Moreover, the effect of the sensitivity of different growth stages of the plant on the reduction of evaporation and transpiration of corn varies so that in the three treatment groups  $W_0$ ,  $W_1$ , and  $W_2$ , the highest average decrease in slope was related to the final stage (13.6%) followed by the middle stage with an average decrease of 8.4% compared to the control treatment. Therefore, the highest decrease rate in evaporation-transpiration slope has been observed in these two growth stages due to the beginning of flowering, fruit formation, and physiological ripening of seeds. These results come from the lack of sufficient water storage and increased salinity of irrigation water in the soil. Water stresses and salinity will reduce water absorption and evaporation-transpiration, and ultimately, reduce crop production due to the decreased amount and potential of water in the soil. Another finding to be mentioned is the priority of water stress compared to salinity stress in reducing evaporation and transpiration and production yield. Also, by managing water and salinity stresses in the critical stages of plant growth (especially the middle stage), which is the time of flowering and the beginning and completion of the maize production process, a significant reduction in the crop can be somewhat prevented.

**Keywords:** Experimental models, Relative evaporation-transpiration, Relative performance, Simultaneous stress, TDR

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۱، ص. ۶۹۳-۶۷۷

## ارزیابی اثر تنش‌های توأمان آبی و شوری در برآورد عملکرد بیولوژیکی ذرت علوفه‌ای از طریق تبخیر و تعرق دوره‌ای

فرامر زرگر یعقوبی<sup>۱</sup> - مهدی سرائی تبریزی<sup>۲\*</sup> - علی محمدی ترکاشوند<sup>۳</sup> - مهرداد اسفندیاری<sup>۴</sup> - هادی رضانی اعتدالی<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۹

### چکیده

تأثیر توأمان کمیّت و کیفیت آب آبیاری در شرایط غالب مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله چالش‌های مهم بخش کشاورزی در کاهش میزان تبخیر-تعرق گیاه و تولید محصول نهایی می‌باشد. به‌منظور بررسی اثر هم‌زمان سطوح مختلف تنش آبی و شوری بر تبخیر و تعرق دوره‌ای و عملکرد تر ذرت علوفه‌ای رقم سینگل کراس ۷۰۴، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل (۳<sup>۲</sup>) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در کرت‌های به مساحت ۹ مترمربع در مزرعه کشاورزی و دام‌پروری علی‌آباد فشافویه واقع در استان قم در سال ۱۳۹۹ اجرا گردید. تیمارهای اعمال شده شامل شوری آب آبیاری در سه سطح هدایت الکتریکی ۱/۸ (S<sub>0</sub>)، ۵/۲ (S<sub>1</sub>) و ۸/۶ dS/m (S<sub>2</sub>) که از طریق اختلاط آب چاه شور منطقه با آب شیرین تهیه و تنش آبی نیز در سه سطح به‌ترتیب شامل ۱۰۰٪ (W<sub>0</sub>)، ۷۵٪ (W<sub>1</sub>) و ۵۰٪ (W<sub>2</sub>) نیاز آبی گیاه (کنترل با دستگاه TDR-150) استفاده شد. تبخیر و تعرق کل در تیمارهای مختلف بین ۶۹۲/۷ (W<sub>0</sub>S<sub>0</sub>) تا ۳۴۴/۹ (W<sub>2</sub>S<sub>2</sub>) میلی‌متر و عملکرد تر بین ۵۰/۴ تا ۳۳/۲ تن بر هکتار اندازه‌گیری شد. نتایج این پژوهش نشان داد که بیش‌ترین میزان تبخیر و تعرق دوره‌ای در تمامی تیمارها در مراحل توسعه و میانی صورت گرفته است. به‌طوری‌که میزان تبخیر و تعرق نسبی در مراحل توسعه، میانی و پایانی رشد به‌ترتیب بین تیمار شاهد و بقیه تیمارها ۱۰۰-۴۵٪، ۱۰۰-۴۹٪ و ۱۰۰-۴۴٪ برآورد شد. میزان عملکرد نسبی تر نیز در تیمارهای W<sub>0</sub>S<sub>0</sub> تا W<sub>2</sub>S<sub>2</sub> بین ۱۰۰ تا ۶۶ درصد محاسبه گردید. همچنین نتایج نشان داد که بیش‌ترین کاهش درصد عملکرد بین گروه تیماری W<sub>2</sub> (تیمارهای W<sub>2</sub>S<sub>0</sub>، W<sub>2</sub>S<sub>1</sub> و W<sub>2</sub>S<sub>2</sub>) برابر با ۱۳/۶ درصد و سپس گروه تیماری W<sub>0</sub> (تیمارهای W<sub>0</sub>S<sub>0</sub>، W<sub>0</sub>S<sub>1</sub> و W<sub>0</sub>S<sub>2</sub>) برابر با ۱۲ درصد و کم‌ترین آن بین گروه تیماری W<sub>1</sub> (تیمارهای W<sub>1</sub>S<sub>0</sub>، W<sub>1</sub>S<sub>1</sub> و W<sub>1</sub>S<sub>2</sub>) به میزان ۳ درصد به‌دست آمد. نتایج مدل‌سازی عملکرد نسبی محصول بر اساس مقدار تبخیر و تعرق نسبی ذرت در مراحل مختلف رشدی و در شرایط تیمارهای مختلف تنش‌های آبی و شوری حاکی از مناسب بودن مدل جمع‌پذیر سینگ با ارزیابی‌های آماري EF، R<sup>2</sup> و RMSE به‌ترتیب ۰/۳۶۱، ۰/۸۹۱ و ۰/۰۶۵ و ضریب‌پذیر رانو با آنالیزهای ذکر شده ۳/۱۷۱، ۰/۹۱۴ و ۰/۱۶۵ بوده و مدل مینهاس نامناسب در این برآورد تشخیص داده شد. بنابراین مدل‌های انتخابی با برآورد مناسب عملکرد نسبت به آب مصرفی علاوه بر تأمین نیاز آبی گیاه موجب کاهش حجم آب آبیاری و هدر رفت آن و استفاده بهینه از منابع آبی کشور می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی:** تبخیر-تعرق نسبی، تنش هم‌زمان، عملکرد نسبی، مدل‌های تجربی، TDR

۱، ۳ و ۴- به‌ترتیب دانشجوی دکتری علوم و مهندسی خاک، استاد و استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(\*)- نویسنده مسئول: (Email: m.sarai@srbiau.ac.ir)

۵- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

## مقدمه

2014). افزون بر عملکرد، اعمال یک حد ثابت از تنش آبی در مراحل رشد چهار برگی، دوازده برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه ذرت، تأثیر متفاوتی بر مقدار تبخیر-تعرق گیاه دارد به طوری که کم‌ترین مقدار تبخیر-تعرق مربوط به مرحله گل‌دهی است که علت آن حساسیت بیش‌تر ذرت به تنش خشکی در این مرحله می‌باشد (Saeidi and Sotoudeh Nia, 2021). در پژوهشی دیگر با افزایش تنش شوری در منطقه ریزوسفر، پتانسیل آب موجود در خاک کاهش یافته و جذب آب توسط گیاه کم می‌شود از این رو با کاهش کیفیت آب آبیاری (افزایش شوری از  $0/5$  به  $7/5$  dS/m) مقدار تبخیر-تعرق و عملکرد ذرت به ترتیب ۳۱ و ۶۰ درصد کاهش یافت (Lacerda et al., 2016). در تحقیقی دیگر در منطقه باجگاه استان فارس طی دو سال ۱۳۸۸ و ۱۳۸۹ نتایج نشان داد که با کاهش مقادیر آب مصرفی ذرت به میزان ۲۵ درصد ( $I_2$ ) و ۵۰ درصد ( $I_3$ ) کمتر از مقدار شاهد ( $I_1=1.25ET_c$ ) مقادیر ET (تبخیر-تعرق)، T (تعرق) و E (تبخیر) در تیمارهای  $I_2$  و  $I_3$  به‌طور معنی‌داری به‌ترتیب به‌میزان ۱۹ و ۴۲ درصد، (۲۵ و ۴۳ درصد) و (۳ و ۳۹ درصد) کمتر از تیمار شاهد خود ( $I_1$ ) بودند. همچنین با افزایش شوری از  $0/6$  ( $S_1$  به‌عنوان شاهد) به  $2$  ( $S_2$ ) و  $4$  dS/m ( $S_3$ ) در مقدار ET اختلاف معنی‌داری بین سطوح شوری  $S_2$  و  $S_3$  دیده نشد ولی تعرق (T) به‌ترتیب در  $S_2$  و  $S_3$  به‌مقدار ۵ و ۱۲ درصد کاهش نسبت به  $S_1$  داشته و تبخیر (E) به‌میزان ۱۶ و ۳۳ درصد افزایش نسبت به شاهد خود ( $S_1$ ) پیدا کرده بود که نشان از تأثیر شوری بر کاهش رشد، اندازه سطح سبز گیاه و ریشه می‌باشد که منجر به کاهش ET و T شده و به‌بیانی دیگر کاهش اندازه سطح سبز گیاه (تاج پوشش) سرانجام به تبخیر بالا از سطح خاک لخت در معرض تابش خورشید شده است (Azizian and Sepaskhah, 2014). بنابراین تنش‌های آبی و شوری هر دو از عوامل محدود‌کننده جذب آب و تعرق محسوب می‌شوند لیکن باید توجه داشت که اثر زیان‌بار تنش‌های مذکور در مراحل مختلف رشد گیاه متفاوت است از این رو با مدیریت تنش‌ها در مراحل حساس رشد می‌توان تبخیر-تعرق و عملکرد محصولات را در راستای افزایش بهره‌وری مصرف آب مدیریت نمود و در شرایط وجود تنش‌های آبی و شوری، از طریق کمی نمودن مقدار حساسیت گیاه در مراحل رشد، می‌توان مقدار عملکرد محصول را بر اساس مقدار تبخیر-تعرق گیاه تخمین زد. مدل‌های پلنک (Blank, 1975)، استوارت (Stewart et al., 1976)، سینگ (Sing et al., 1987)، جنسن (Jensen, 1968)، راتو (Rao et al., 1988) و مینهاس (Minhas et al., 1974) برای تخمین عملکرد محصول از روی مقدار تبخیر-تعرق گیاه طی دوره رشد، ارائه شده است. هدف از پژوهش حاضر، مدل‌سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای براساس تبخیر-تعرق دوره‌ای در شرایط تنش‌های توأمان آبی و شوری با استفاده از مدل‌های مذکور می‌باشد. با انجام

تنش به‌عنوان کاهش رشد کمی یا کیفی گیاه شناخته شده که در اثر تغییرات خارج از دامنه مطلوب عوامل محیطی، ایجاد می‌شود. دو تنش آبی (خشکی) و شوری از مهم‌ترین تنش‌های غیرزنده محیطی در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان می‌باشد. در این شرایط و محدودیت‌ها، برآورد نیاز آبی واقعی گیاه منجر به افزایش بهره‌وری مصرف آب خواهد شد. وجود هر یک از تنش‌های آبی و شوری جذب آب و به تبع آن عملکرد محصول را کاهش و وجود هم‌زمان این دو تنش این کاهش را تشدید می‌کند (Jalali et al., 1999). نتایج پژوهشی با پنج سطح شوری  $0/5$ ،  $1/5$ ،  $2/5$ ،  $3/5$  و  $5$  dS/m بر روی بادمجان نشان از کاهش مصرف آب با افزایش شوری می‌دهد (Unlukara et al., 2010). همچنین افزایش هر واحد شوری آب آبیاری در کشت ارکا باعث کاهش  $2/43$  درصدی مصرف آب گردید (Unlukara et al., 2008). در تحقیق دیگری بر روی آفتابگردان اثر دو سطح کمبود آب و چهار سطح شوری آب نشان داد که شوری آب باعث کاهش پتانسیل اسمزی خاک (افزایش فشار اسمزی محلول خاک) و کاهش جذب آب گیاه می‌شود (Shi et al., 2020). در پژوهش دیگری بر روی گوجه گیلاسی اثر دو سطح شوری آب آبیاری ( $4$  و  $7$  dS/m) و سه سطح تنش آبی ( $40$ ،  $50$  و  $65$  درصدی) تخلیه رطوبتی خاک (نشان از معنی‌دار شدن اثر تنش شوری بر عملکرد، تبخیر-تعرق کل و کارایی مصرف آب شد و تنش شوری  $7$  dS/m موجب کاهش عملکردی  $27$  درصدی و کاهش کارایی  $19/2$  درصدی مصرف آب نسبت به تیمار شاهد شده بود (Abdoli et al., 2018). وجود منابع آبی محدود در مناطق خشک و نیمه‌خشک استفاده از منابع آبی با کیفیت پائین و لب‌شور را اجتناب‌ناپذیر می‌کند لذا در کشت آبی گیاهان (فاریاب) از جمله ذرت ارائه راه‌کارهای عملی و پویا برای مدیریت کم‌آبیاری و استفاده از آب‌های نامتعارف اهمیت بسزایی دارد. از آنجایی که شدت اثر تنش‌ها در تبخیر-تعرق گیاهان در مراحل مختلف رشدی متفاوت می‌باشد، می‌توان عملکرد محصول را بر اساس آن مدل‌سازی کرد و مدلی تجربی برای آن ارائه نمود. حذف یک مرحله (نوبت) آبیاری در مراحل رشد رویشی، گل‌دهی و دانه‌بندی ذرت رقم سینگل کراس  $704$  منجر به عملکرد تر به‌ترتیب  $68$ ،  $62/2$  و  $66/47$  تن بر هکتار در شاهرود گردید که نشان از اثر بیشینه تنش خشکی در مرحله گل‌دهی بر کاهش عملکرد محصول دارد (Mohammadi, 2017) همچنین اعمال تنش  $50$  درصدی نیاز آبی ذرت در مرحله رشد رویشی آسیب‌جبران‌ناپذیری بر عملکرد گیاه در استان فارس وارد آورد و مشخص گردید که مرحله رشد زایشی (گل‌دهی) و اوایل پر شدن دانه حساس‌ترین مرحله به تنش خشکی می‌باشد (Hemati et al.,

(اوره)، ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپر فسفات تریپل و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود سولفات پتاسیم در آزمایش طرح اعمال گردید. تمام کودهای سوپر فسفات تریپل و سولفات پتاسیم در یک مرحله به صورت یکنواخت و قبل از کاشت در سطح کرت‌های مربوطه پخش گردید و به طور کامل با خاک مخلوط شدند. کود نیتروژن از منبع اوره در سه مرحله، یک سوم نیتروژن مورد نیاز را هم‌زمان با کاشت به صورت نواری در ۵ سانتی‌متری زیر و کنار بذر به زمین داده شد و بقیه آن (دو سوم کود باقیمانده) در دو مرحله به‌طور مساوی در زمان تُنک کردن و مرحله ظهور گل‌تاجی به خاک اضافه گردید. با توجه به شرایط مزرعه و میزان رشد ریشه ذرت، حداکثر عمق نمونه‌برداری ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. ریشه ذرت اکثراً تا عمق ۶۰ سانتی‌متری گسترش می‌یابد و ۹۰ درصد حجم توسعه آن تا عمق ۴۰ سانتی‌متری است. با توجه به هدف برداشت علوفه ذرت تاریخ کاشت و برداشت ۱۳۹۹/۴/۱۶ و ۱۳۹۹/۹/۳ و دوره رشد گیاه حدود ۱۴۰ روز در نظر گرفته شد. طول دوره رشد مربوط به زمان کاشت، داشت و برداشت محصول در پژوهش حاضر براساس گزارش فائو ۵۶ که مراحل رشدی گیاه را به چهار دوره اولیه<sup>۲</sup> (۲۵ روز)، توسعه<sup>۳</sup> (۴۰ روز)، میانی<sup>۴</sup> (۴۵ روز) و پایانی<sup>۵</sup> (۳۰ روز) تقسیم می‌کند تطبیق داده شد. برای تمامی تیمارها در طول دوره اولیه رشد (از زمان کاشت تا مرحله ۵ تا ۸ برگ) ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه در هر کرت تأمین گردید و هیچ‌گونه تنشی در این مرحله اولیه داده نشد و شروع تنش‌های آبی و شوری در بعد از این مرحله اعمال گردید. تیمارهای شوری بر اساس اختلاط آب چاه شور منطقه با آب شیرین (شرب) توسط روابط زیر نسبت به تعیین حجم آب‌های شور و شیرین اقدام گردید و قبل از هر نوبت آبیاری در مخازن پلاستیکی PVC تهیه و با کنترل مجدد هدایت الکتریکی توسط EC سنج پُر تابل مورد تست قرار گرفت.

$$EC_f = \frac{EC_w \times V_w + EC_s \times V_s}{V_w + V_s} \quad (1)$$

$$V_t = V_w + V_s \quad (2)$$

که در آن  $EC_f$  هدایت الکتریکی نهایی (dS/m)،  $EC_w$  هدایت الکتریکی آب چاه شور (dS/m)،  $EC_s$  هدایت الکتریکی آب شیرین (شرب) (dS/m)،  $V_w$  حجم آب شور چاه (lit)،  $V_s$  حجم آب شیرین (شرب) (lit)،  $V_t$  حجم آب کل (lit) که به هدایت الکتریکی نهایی (سطوح شوری مورد تحقیق) رسیده است، می‌باشد.

تحقیق حاضر، حساسیت تبخیر-تعرق ذرت در مراحل مختلف رشد تعیین، و مدلی جامع برای تخمین عملکرد محصول در شرایط تحت تنش معرفی خواهد شد.

## مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به منظور اثر برهم‌کنش تنش‌های توأمان آبی (خشکی) و شوری بر تبخیر-تعرق مرحله‌ای و عملکرد تر بیولوژیکی ذرت علوفه‌ای (بیوماس تر) در مزرعه کشاورزی و دامپروری علی‌آباد واقع بخش فشافویه-شهرستان حسن‌آباد قم انجام گردید. منطقه مورد مطالعه در موقعیت جغرافیای ۴۰° ۱۵' طول شرقی و ۳۵° ۱۷' عرض شمالی در کویری نسبتاً هموار و مسطح و در ارتفاع ۱۱۹۱ متری از سطح دریا دارای آب و هوای خشک و اصولاً کم‌باران و نسبتاً گرم و زمستان‌های سرد که به علت مسطح بودن در معرض وزش‌های بادی غیرموسمی قرار گرفته است. حداکثر دما در فصل تابستان ۴۲ درجه و حداقل در زمستان ۴- درجه سانتی‌گراد می‌باشد. الگوی کشت مرسوم در منطقه گندم و جو پائیزه، یونجه و ذرت بوده که بسیاری از کشاورزان از این الگو استفاده می‌کنند. گیاه مورد مطالعه، ذرت علوفه‌ای (رقم ۷۰۴ SC) که به صورت جوی پشته‌ای در کرت‌های مربعی شکل به ابعاد ۳ در ۳ متر با فاصله سه متر از هم از هر چهار طرف (ناحیه پیاده رو) در اواسط تیرماه ۱۳۹۹ کاشته شد. بذرها با حداقل خلوص و قوه‌نامیه به ترتیب ۹۸٪ و ۹۵٪ روی ردیف‌های کشت با فاصله ۲۵ سانتی‌متری و عمق ۵ تا ۷ سانتی‌متری و فاصله پشته‌ها از هم ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. عوامل اصلی آزمایش شامل سه سطح آبیاری (با نماد W) و سه سطح شوری (با نماد S) با سه تکرار در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی<sup>۱</sup> (RCBD) و به صورت آزمایش فاکتوریل ۳<sup>۲</sup> در ۲۷ واحد آزمایشی (کرت) انجام شد. سطوح آبیاری شامل W<sub>0</sub> (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه)، W<sub>1</sub> (تأمین ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه) و W<sub>2</sub> (تأمین ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه) که توسط دستگاه TDR مدل ۱۵۰ همواره کنترل گردید و سطوح شوری عبارتند از S<sub>0</sub> (با هدایت الکتریکی ۱/۸ dS/m)، S<sub>1</sub> (با هدایت الکتریکی ۵/۲ dS/m) و S<sub>2</sub> (با هدایت الکتریکی ۸/۶ dS/m) که از طریق اختلاط آب چاه شور منطقه (کلاس آبیاری ویلوکس C<sub>5</sub>S<sub>4</sub>) با آب شیرین (شرب) تأمین گردید. جهت بررسی خاک مزرعه آزمایشی در سه عمق ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متری نمونه‌های مرکبی برداشت گردید به گونه‌ای که معرف کل مزرعه و تغییرات خاک باشد. آنالیز شیمیایی و فیزیکی خاک در جدول ۱ ارائه شده است.

مقادیر کود شیمیایی اصلی ماکرو براساس نتایج تجزیه شیمیایی خاک محل آزمایش به میزان ۳۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن

## 1- Completely Random Block Design

- 2- Initial Stage
- 3- Development Stage
- 4- Middle Stage
- 5- Final Stage

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک منطقه مورد آزمایش

Table 1- Some physicochemical properties of the soil at experiment site

عمق Depth (cm)	شوری EC (dS.m <sup>-1</sup> )	اسیدیته pH	آهک TNV (%)	کربن آلی OC (%)	ازت کل Total N (mg.kg <sup>-1</sup> )	فسفر P (mean) (mg.kg <sup>-1</sup> )	پتاسیم K (mean) (mg.kg <sup>-1</sup> )	رطوبت حجمی FC (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	رطوبت حجمی PWP (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	بافت خاک Texture
0-20	8.67	7.86	14.18	0.61	627.8	5.65	197.30	29.8	14.7	Loam
20-40	7.96	7.88	12.35	0.58	582.0	5.38	181.37	28.5	15.1	Loam
40-60	8.42	7.94	13.11	0.53	561.2	4.93	168.02	35.6	18.4	Clay loam

حجمی ظرفیت زراعی خاک  $(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ ،  $\theta_i$  رطوبت حجمی لایه  $i$  ام خاک  $(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ ،  $D_i$  عمق ضخامت لایه  $i$  ام خاک (cm) و  $C_{WS}$  ضریب تنش آبی (مقدار آن با توجه به میزان تنش آبی طرح ۱، ۰/۷۵ و ۰/۵) می‌باشد.

### تعیین زمان و حجم آب آبیاری

با توجه به پایش هر روزه کرت‌ها (۲۷ کرت) و اعمال تنش‌های آبی  $W_0$  (۱۰۰٪ نیاز آبی گیاه)،  $W_1$  (۷۵٪ نیاز آبی گیاه) و  $W_2$  (۵۰٪ نیاز آبی گیاه)، زمان انجام آبیاری با استفاده از دستگاه بازتاب زمانی امواج محاسبه گردید. این زمان در گروه تیماری  $W_0$  (تیمارهای  $W_0S_0$ ،  $W_0S_1$  و  $W_0S_2$ ) مصرف صفر درصد آب سهل‌الوصول می‌باشد یعنی آن‌که همواره این سه سری کرت‌ها به‌همراه تکرارهایشان دچار تنش آبی نشده و همواره در تمامی دوره‌های رشدی خود تنشی از بابت آب آبیاری نداشته‌اند و فقط بین این سه ترکیب تیماری تنش‌های شوری  $S_0$  (۱/۸ dS/m)،  $S_1$  (۵/۲ dS/m) و  $S_2$  (۸/۶ dS/m) اعمال شده و در گروه تیماری  $W_1$  (تیمارهای  $W_1S_0$ ،  $W_1S_1$  و  $W_1S_2$ ) شروع زمان آبیاری اتمام مصرف شدن ۲۵ درصدی آب سهل‌الوصول در دوره‌های رشدی توسعه، میانی و پایانی است و اختلاف بین این سه گروه ترکیب تیماری، تنش‌های شوری  $S_0$ ،  $S_1$  و  $S_2$  می‌باشد و در نهایت، در گروه تیماری  $W_2$  (تیمارهای  $W_2S_0$ ،  $W_2S_1$  و  $W_2S_2$ ) شروع زمان آبیاری مصرف شدن ۵۰ درصد آب سهل‌الوصول در سه دوره رشدی توسعه، میانی و پایانی است و باز هم اختلاف بین این تیمارها از نظر تنش شوری  $S_0$ ،  $S_1$  و  $S_2$  می‌باشد. در تمامی ترکیبات تیماری ذکر شده (از  $W_0S_0$  تا  $W_2S_2$ ) در دوره رشد اولیه گیاه، هیچ‌گونه تنشی از بابت شوری و یا خشکی (آبی) به گیاه داده نشده بود. آب سهل‌الوصول  $^3$  (RAW) کسری از رطوبت بین حد ظرفیت مزرعه‌ای  $^4$  (FC) و نقطه پژمردگی دائم  $^5$  (PWP) است که با کاهش رطوبت خاک نسبت به حد RAW، گیاه وارد فاز تنش آبی می‌شود. حجم آب لازم برای کرت‌ها با توجه به چهار مرحله

داده‌های پژوهش شامل مقادیر تبخیر-تعرق در هر مرحله مختلف دوره رشدی ذرت (۴ مرحله) و عملکرد نهایی بیولوژیکی تر بود که تجزیه واریانس و مقایسه میانگین آن‌ها به‌روش توکی در سطح احتمال خطای ۵ درصد توسط نرم‌افزار SAS 5.4 انجام شد. سپس داده‌های آنالیز شده به‌صورت شکل و جدول تدوین و به دقت تفسیر شده است.

### اندازه‌گیری تبخیر و تعرق

اندازه‌گیری رطوبت عمق خاک منطقه ریشه ذرت توسط دستگاه بازتاب زمانی امواج  $^2$  TDR-150 (ساخت شرکت Spectrum امریکا) در پنج عمق ۷/۵، ۱۲، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متری (توسط پروب‌های فولادی ضد زنگ ۷/۵، ۱۲ و ۲۰ سانتی‌متری) در مراحل مختلف طول دوره رشد گیاه توسط جفت الکترودهای فولادی مخصوص دستگاه به‌صورت حجمی اندازه‌گیری شد. در ابتدا قبل از کاشت بذرها، دستگاه TDR توسط خاک محل کشت کالیبره گردید. به این صورت که برای هر نمونه رطوبت واقعی خاک از حد اشباع تا خشک یک مقدار توسط دستگاه ثبت گردید و سپس نمونه‌ها در آزمایشگاه تعیین رطوبت شدند و در نهایت یک برازش بین اعداد قرائت شده توسط دستگاه (محور Xها) و اعداد رطوبت واقعی خاک (محور Yها) داده شد. از این رو یک خط با معادله مشخص و ضریب همبستگی بالا  $(R^2=0/96)$  بین داده‌ها برازش شد که از آن برای تبدیل داده‌های دستگاه به داده‌های واقعی (رطوبت حجمی خاک) استفاده گردید. از آنجایی که در طول زمان کاشت، داشت و برداشت (فصل تابستان) هیچ‌گونه ریزش جوی در منطقه نازل نشده بود این فرصت مهیا گردید که از طریق پایش روزانه رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه گیاه (رطوبت تعیین شده توسط دستگاه TDR) و محاسبه بیلان آب در فاصله بین دو آبیاری، امکان برآورد مقدار تبخیر و تعرق روزانه توسط رابطه زیر، وجود داشت.

$$d_{H_2O} = \sum_{i=1}^n [(\theta_{FC} - \theta_i) / 100] \times D_i \times C_{WS} \quad (3)$$

که در آن،  $d_{H_2O}$  عمق آبیاری مورد نیاز (cm)،  $\theta_{FC}$  رطوبت

3- Readily Available Water  
4- Field Capacity  
5- Permanent Wilting Point

1- Statistical Analysis System  
2- Time Domain Reflectometry

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \sum_{i=1}^n a_i \left( \frac{ET_{si}}{ET_{mi}} \right) \quad (۵)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = 1 - \sum_{i=1}^n a_i \left( \frac{ET_{si}}{ET_{mi}} \right) \quad (۶)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \sum_{i=1}^n a_i \left( 1 - \left( 1 - \frac{ET_{si}}{ET_{mi}} \right)^2 \right) \quad (۷)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left( \frac{ET_{si}}{ET_{mi}} \right)^{a_i} \quad (۸)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left[ 1 - a_i \left( 1 - \frac{ET_{si}}{ET_{mi}} \right) \right] \quad (۹)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left( 1 - \left( 1 - \frac{ET_{si}}{ET_{mi}} \right)^2 \right)^{a_i} \quad (۱۰)$$

که  $Y_s$  عملکرد در تیمارهای مختلف تحت تنش آبی و شوری  $Y_m$  (ton/hect) بی‌شینه عملکرد در تیمار شاهد  $W_0S_0$  (ton/hect)،  $ET_{si}$  تبخیر-تعرق در تیمارهای مختلف تحت تنش در دوره نام رشد خود (mm) و  $ET_{mi}$  تبخیر-تعرق حداکثر ذرت در تیمار شاهد  $W_0S_0$  در دوره رشدی نام و  $n$  تعداد مراحل رشدی ذرت که برابر ۴ است، در نظر گرفته شد. جهت سادگی در کاربرد تمامی مدل‌های شش‌گانه فوق‌الذکر  $a_i$  ضرایب حساسیت هر مدل در دوره رشدی نام خود آن مدل می‌باشد. به طوری که مثلاً  $a_4$  در مدل بلنک ضریب حساسیت مرحله پایانی رشدی ( $i = 4$ ) در مدل بلنک است. با استفاده از داده‌های تبخیر-تعرق واقعی ذرت در منطقه مطالعاتی در مراحل چهارگانه رشدی، عملکرد نسبی ذرت با این مدل‌ها برآورد شد. سپس مقادیر برآورد شده (پیش‌بینی شده) با مقادیر واقعی عملکرد نسبی با هم مقایسه شدند. برای مقایسه مدل‌ها با هم از روابط شش‌گانه صحت‌سنجی و تحلیل حساسیت مدل‌های تجربی و نظری که امروزه ملاک سنجش انواع مدل‌های متداول در علوم خاک و آب در کارهای پژوهشی است، مورد ارزیابی قرار گرفتند. معادلات فوق با شماره‌های

دوره رشدی گیاه و به تبع آن توسعه عمق مؤثر ریشه ذرت و مساحت کرت‌ها از رابطه زیر تعیین گردید.

$$V_{H_2O} = d_{H_2O} \times A \quad (۴)$$

که در آن،  $V_{H_2O}$  حجم آب لازم برای انواع تیمارها که در کرت‌های مختلف هستند ( $m^3$ )،  $d_{H_2O}$  عمق آب آبیاری مورد نیاز (m) و  $A$  مساحت کرت ( $m^2$ ) می‌باشد.

در نهایت، متوسط عمق توسعه ریشه ذرت را ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که با پایان رسیدن دوره رشد گیاه و برداشت محصول و حفر گودال در خاک کرت‌ها بقایای ریشه ذرت در اعماق بیش‌تر از ۶۰ سانتی‌متری مشاهده نشد. از طرفی با فرض کوچک بودن کرت‌ها ( $9m^2$ ) و نبود درز و ترک در اعماق خاک و یا جریان‌های ترجیحی در آن، اطمینان حاصل شد که روند کاهش مقدار رطوبت خاک (منطقه ریشه) در روزهای پس از آبیاری، صرفاً متأثر از فرآیند تبخیر و تعرق بوده است. برای آبیاری کرت‌ها، آب از مخازن تیمارها (بشکه‌های PVC) توسط شلنگ و به صورت غرقابی و با جریان آرام به کرت‌ها داده شد. آبیاری به شکل یکنواخت در سطح هر کرت توزیع گردید و با توجه به کوچکی کرت و میزان دقیق برآورد حجم آب برای منطقه ریشه و محصور بودن کرت‌ها توسط پشته‌ها و عدم ایجاد رواناب، راندمان کاربرد آبیاری صد در صد در نظر گرفته شد.

### معرفی مدل‌های کاربردی

تنش آبی و شوری آب آبیاری هر دو منجر به کاهش مقدار تبخیر-تعرق و عملکرد تولید نسبت به شرایط ایده‌آل (بدون تنش) می‌شود. در این پژوهش، رابطه بین عملکرد و تبخیر-تعرق ذرت در طی مراحل رشدی و در شرایط تنش دوگانه آبی و شوری مدل‌سازی شد. متغیرهای وابسته و مستقل به ترتیب، عملکرد نسبی ( $\frac{Y_s}{Y_m}$ ) و تبخیر-تعرق نسبی در مراحل چهارگانه رشدی ذرت ( $\frac{ET_{si}}{ET_{mi}}$ ) در نظر گرفته شد. برای این منظور مدل‌های جمع‌پذیر بلنک، استوارت، سینگ و مدل‌های ضرب‌پذیر چنسن، راثو و مینهاس مورد استفاده قرار گرفتند. مدل‌های ذکر شده به ترتیب در روابط ۵ تا ۱۰ آورده شده‌اند. با استفاده از مقادیر تبخیر و تعرق نسبی در مراحل مختلف رشدی و عملکرد ذرت علوفه‌ای، ضرایب مربوط به هر دوره رشدی در شرایط تنش آبی و شوری با استفاده از نرم‌افزار SPSS<sup>۱</sup> برای مدل‌های مختلف برآورد شد. جهت مدل‌سازی دقیق، ضرایب گفته شده به طور مجزا در سطوح مختلف تنش آبی و شوری آب آبیاری تعیین شدند. همچنین با استفاده از معادلات آماری، مقایسه مدل‌های مختلف با یک‌دیگر انجام گردید.

که تنش آبی و شوری باعث کاهش مقدار تبخیر و تعرق ذرت نسبت به شرایط ایده‌آل (تیمار  $W_0S_0$ ) گردیده به طوری که میانگین تبخیر و تعرق از  $W_0S_0$  تا  $W_2S_2$  به میزان ۳۴۸ میلی‌متر یا ۵۰/۲٪ کاهش نشان داد که مؤید کاهش جذب آب توسط گیاه و اثر افزایش شوری آب آبیاری بر کاهش تبخیر و تعرق گیاهی است. شکل ۱ روند تبخیر و تعرق واقعی و نسبی را در تیمارهای مورد مطالعه نشان می‌دهد.

نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین طرح در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داد که مقادیر ET در مرحله ابتدای یا اولیه رشد به ترتیب از کم‌ترین تا بیش‌ترین تنش آبی و شوری در فاصله ۵۴/۳ تا ۴۹/۲ میلی‌متر کاهش یافته (کاهش ۹/۴ درصدی) و از نظر آماری به دو گروه قابل تقسیم می‌باشد (گروه تیماری  $W_0$  و گروه‌های تیماری  $W_1$  و  $W_2$ ). در این مرحله با وجودی که تنش از نظر آبی و شوری داده نشده بود ولی تنش آبی در سطح خطای یک درصد معنی‌دار شده بود (که علت آن را می‌توان خطای انسانی و یا وزش بادهای منطقه‌ای در آن زمان دانست) با این وجود یک میزان تفاوت ۵ میلی‌متری بین حداقل و حداکثر تبخیر-تعرق در این مرحله مشاهده گردید. و اثر تنش شوری و اثر متقابل این دو تنش (آبی و شوری) معنی‌دار نشده بود. در مرحله دوم یا توسعه، تبخیر و تعرق از تیمار شاهد تا  $W_2S_2$  به میزان ۱۲۷/۴ میلی‌متر کاهش و دو ترکیب تیماری  $W_2S_1$  و  $W_2S_2$  تفاوتی از نظر آماری برای ET نداشتند و سایر ترکیبات تیماری (۷ ترکیب تیماری دیگر) در گروه‌های متفاوتی از این حیث قرار گرفته‌اند. همچنین در این مرحله تنش آبی و شوری در سطح احتمال ۹۹ درصد بر مقادیر ET مؤثر بوده است لیکن اثر متقابل این دو تنش غیر معنی‌دار شده است. در مرحله میانی یا سوم رشد، تبخیر و تعرق از تیمار شاهد تا  $W_2S_2$  به میزان ۵۱ درصد کاهش یافته و تمام ترکیبات تیماری در گروه‌های متفاوتی قرار می‌گیرند و تنها در این مرحله اثر متقابل تنش‌های آبی و شوری در سطح احتمال ۹۹ درصد معنی‌دار شده است. بیش‌ترین کاهش ET از  $W_0S_0$  تا  $W_2S_2$  در مرحله پایانی به مقدار ۵۶ درصد اتفاق افتاده است که نشان از تأثیر زیاد اثر تنش‌های هم‌زمان دوگانه آبی و شوری بر ذرت در مرحله آخر رشدی می‌باشد. این مسله نشان می‌دهد که در مرحله چهارم رشدی که بخش آخر از مرحله رشد زایشی است و رسیدگی فیزیولوژیکی در آن اتفاق می‌افتد، اثر تنش‌های آبی و شوری در مراحل قبلی تبخیر و تعرق در این مرحله خود نمایی کرده و بیش‌ترین تأثیر را در این مرحله گذاشته است. جدول ۲ تجزیه واریانس عملکرد محصول و تبخیر و تعرق گیاه را در مراحل مختلف رشد نشان می‌دهد.

هر چه از تیمارهای  $W_0S_0$  به تیمارهای  $W_2S_2$  می‌رسیم با کاهش مقدار آب و پتانسیل آب در خاک و به تبع آن افزایش فشار اسمزی محلول خاک، کاهش جذب آب صورت گرفته که این کاهش منجر به کاهش مقدار تبخیر و تعرق ذرت در شرایط تنش آبی و شوری می‌شود. شکل ۲ مقدار ET ذرت را در تمامی ترکیبات تیماری

۱۱ تا ۱۶ به ترتیب به نام‌های بیشینه خطا<sup>۱</sup> ( $ME$ )، ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup> ( $RMSE$ )، ضریب تعیین<sup>۳</sup> یا  $CD$  ( $R^2$ )، ضریب تعیین تعدیل شده<sup>۴</sup> ( $R_{adj}^2$ )، کارایی مدل<sup>۵</sup> ( $EF$ ) و ضریب جرمی باقی‌مانده<sup>۶</sup> ( $CRM$ ) مشخص شده‌اند.

$$ME = \max |P_i - O_i| \quad (11)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (P_i - \bar{P}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (13)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{(1 - R^2) \cdot (n - 1)}{n - t - 1} \quad (14)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (15)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (16)$$

هر مدلی که مقدار  $ME$ ،  $RMSE$  و  $CRM$  آن به صفر نزدیک‌تر بود و یا مقدار  $R^2$ ،  $R^2_{adj}$  و  $EF$  آن به یک نزدیک‌تر باشد به عنوان مدل بهینه انتخاب می‌شود. حرف  $P$  و  $O$  به ترتیب داده‌های مشاهده‌ای (واقعی) و داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها هستند.  $n$  تعداد تیمارها و  $t$  تعداد فاکتورها یا عوامل بررسی شده (تنش‌های آبی و شوری) در این تحقیق بودند.

## نتایج و بحث

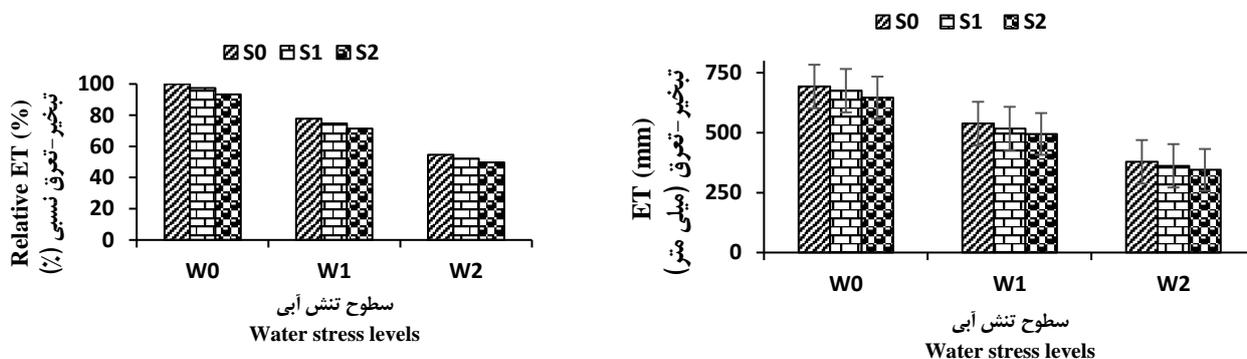
### تأثیر تیمارها بر تبخیر-تعرق واقعی (mm) و تبخیر-تعرق نسبی (%)

نتایج پژوهش سال زراعی ۱۳۹۹ در منطقه مورد مطالعه نشان داد

- 1- Maximum Error
- 2- Root Mean Square Error
- 3- Coefficient of Determination
- 4- Adjusted CD
- 5- Modeling Efficiency
- 6- Coefficient of Residual Mass

است که شاید به‌توان علت آن را به شرایط تغذیه‌ای کامل گیاه در تمامی ترکیبات تیماری در پژوهش فوق دانست و فقط در مرحله میانی رشد مقادیر ET ترکیبات تیماری به‌صورت ضرب‌پذیر در شرایط توأمان تنشی بوده است (جدول ۲).

به تفکیک دوره‌های رشدی گیاه و برآورد آن تا سطح احتمال ۹۵٪ را نشان می‌دهد. جدول تجزیه واریانس تأثیر دو عامل تنش آبی و شوری و اثر متقابل آنها را در کاهش ET در تمامی مراحل رشدی گیاه با حداقل سطح احتمال ۹۵٪ را تأیید می‌کند و فقط اثر متقابل تنش‌های آبی و شوری در مراحل توسعه و پایانی غیر معنی‌دار شده



شکل ۱- تبخیر و تعرق واقعی و نسبی تیمارهای مورد بررسی در پژوهش حاضر  
Figure 1- Absolute and relative evapotranspiration studied in the present study

جدول ۲- تجزیه واریانس تنش آبی، شوری و همزمان آن‌ها بر صفات مورد بررسی پژوهش (سال ۱۳۹۹)

Table 2- Analysis of variance of water, salinity and their simultaneity stresses on the studied traits (2020)

منبع تغییرات S.D.V	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Mean squares				عملکرد تر Wet yield (ton.hec <sup>-1</sup> )
		تبخیر و تعرق Evaporation and transpiration (mm)				
		مرحله اولیه Initial stage	مرحله توسعه Development stage	مرحله میانی Middle stage	مرحله پایانی Final stage	
بلوک Block	2	13.81*	1.06 <sup>n.s</sup>	19.61**	2.20 <sup>n.s</sup>	0.47*
تنش آبی Water stress	2	51.79**	32508.98**	30087.48**	11506.96**	290.21**
تنش شوری Salinity stress	2	0/80 <sup>ns</sup>	176.65**	567.76**	563.45**	39.11**
تنش شوری × تنش آبی Ws × Ss	4	0.06 <sup>ns</sup>	4.80 <sup>ns</sup>	7.32**	8.13 <sup>n.s</sup>	5.01**
خطا Error	16	2.47	1.92	1.38	5.03	0.12
ضریب تبیین R-Square	-	0.77	0.99	0.99	0.99	0.99
ضریب تغییرات <sup>۱</sup> C.V	-	3.08	0.84	0.63	1.97	0.83

ns, \*\* و \* به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح خطای ۱ و ۵ درصد  
ns, \*\* and \*: non-significant, significant at p≤0.01 and p≤0.05 respectively

جدول ۳- مقایسه میانگین اثرات متقابل تنش‌های آبی و شوری بر صفات مورد بررسی پژوهش (به روش آزمون توکی - سال ۱۳۹۹)  
Table 3- Comparison of the average interaction effects of water and salinity stresses on the studied traits (by Tukey test method - 2020)

ترکیبات تیماری Treatment compounds	تبخیر - تعرق Evaporation and transpiration (mm)				عملکرد تر Wet yield (ton.hec <sup>-1</sup> )
	مرحله اولیه	مرحله توسعه	مرحله میانی	مرحله پایانی	
	Initial stage	Development stage	Middle stage	Final stage	
W <sub>0</sub> S <sub>0</sub>	54.30 <sup>a</sup>	231.53 <sup>a</sup>	254.07 <sup>a</sup>	152.80 <sup>a</sup>	50.39 <sup>a</sup>
W <sub>0</sub> S <sub>1</sub>	53.57 <sup>a</sup>	227.53 <sup>b</sup>	248.13 <sup>b</sup>	145.93 <sup>b</sup>	46.71 <sup>b</sup>
W <sub>0</sub> S <sub>2</sub>	53.57 <sup>a</sup>	221.97 <sup>c</sup>	236.67 <sup>c</sup>	134.53 <sup>c</sup>	44.36 <sup>c</sup>
W <sub>1</sub> S <sub>0</sub>	50.10 <sup>b</sup>	166.63 <sup>d</sup>	190.93 <sup>d</sup>	130.43 <sup>d</sup>	41.41 <sup>d</sup>
W <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	49.80 <sup>b</sup>	162.33 <sup>e</sup>	184.10 <sup>e</sup>	121.17 <sup>e</sup>	40.75 <sup>e</sup>
W <sub>1</sub> S <sub>2</sub>	49.87 <sup>b</sup>	156.03 <sup>f</sup>	173.77 <sup>f</sup>	115.00 <sup>f</sup>	40.16 <sup>f</sup>
W <sub>2</sub> S <sub>0</sub>	49.80 <sup>b</sup>	110.50 <sup>g</sup>	137.33 <sup>g</sup>	80.77 <sup>g</sup>	38.44 <sup>g</sup>
W <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	49.30 <sup>b</sup>	106.30 <sup>h</sup>	130.67 <sup>h</sup>	75.50 <sup>h</sup>	35.81 <sup>h</sup>
W <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	49.20 <sup>b</sup>	104.10 <sup>h</sup>	124.5 <sup>i</sup>	67.07 <sup>i</sup>	33.23 <sup>i</sup>

بررسی مقایسه میانگین اثر متقابل تنش‌های آبی و شوری بر مقادیر ET مراحل چهارگانه رشدی گیاه حاکی از متفاوت بودن تأثیر سطوح مختلف تنش‌ی دارد به طوری که کمترین تفاوت بین مقادیر ET در مرحله ابتدای رشد و بیش‌ترین آن در دو مرحله توسعه و میانی مشاهده گردیده است (جدول ۳). بررسی تأثیر سطوح مختلف آبی و شوری آب آبیاری بر مقادیر ET در مراحل مختلف رشدی ذرت (شکل ۲) حکایت از بیش‌ترین درصد کاهش ET در مرحله پایانی با متوسط درصد کاهش ۱۳/۶٪ و پس از آن در مرحله میانی با متوسط درصد کاهش ۸/۴٪ و سپس در مرحله توسعه رشد با متوسط درصد کاهش ۵/۴٪ و کم‌ترین آن به مقدار ۱٪ مربوط به مرحله ابتدای رشد بوده که هیچ‌گونه تنش‌ی از لحاظ آبی و شوری نداشته است. بنابراین از طریق مدیریت کاهش تنش‌های فوق در مراحل حساس رشد گیاه ذرت می‌توان نقش به‌سزایی در افزایش ET گیاه و به تبع آن عملکرد محصول اقدام نمود. در پژوهشی اثر سه سطح شوری آب آبیاری (۲، ۴/۵ و ۷ dS/m) در اهواز بر مقدار تبخیر و تعرق کل دوره رشد ذرت (ET<sub>t</sub>) نشان داد که مقدار ET نسبی در تیمارهای ۴/۵ و ۷ dS/m با کاهش به ترتیب ۱۲/۵ و ۲۵ درصدی نسبت به تیمار شاهد (۲ dS/m) بوده است (Heidarinia et al., 2016) افزایش غلظت املاح در خاک با به‌کار بردن آب‌های شور برای آبیاری باعث کاهش قابلیت جذب آب توسط گیاه و کاهش تبخیر و تعرق و در نتیجه عملکرد محصول خواهد شد. در پژوهشی دیگر اثر تنش آبی در مراحل چهار برگی، ۱۲ برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه ذرت نشان از کاهش ET نسبی به ترتیب ۱۳/۲٪، ۳۰/۲٪، ۳۴/۱٪ و ۲۳/۲ درصدی نسبت به تیمار شاهد خود بود (Saeidi and Sotoudeh Nia, 2021). در پژوهشی دو سالانه در منطقه قزوین اثرات تیمارهای شوری و عنصر ازت در مراحل رشدی ذرت علوفه‌ای مطالعه شد. نتایج نشان داد که لزوم اطلاع از حساسیت گیاهی در مراحل مختلف رشدی به تبخیر و تعرق دوره‌ای نسبت به شرایط محیطی بسیار حائز اهمیت است

بررسی مقایسه میانگین اثر متقابل تنش‌های آبی و شوری بر مقادیر ET مراحل چهارگانه رشدی گیاه حاکی از متفاوت بودن تأثیر سطوح مختلف تنش‌ی دارد به طوری که کمترین تفاوت بین مقادیر ET در مرحله ابتدای رشد و بیش‌ترین آن در دو مرحله توسعه و میانی مشاهده گردیده است (جدول ۳). بررسی تأثیر سطوح مختلف آبی و شوری آب آبیاری بر مقادیر ET در مراحل مختلف رشدی ذرت (شکل ۲) حکایت از بیش‌ترین درصد کاهش ET در مرحله پایانی با متوسط درصد کاهش ۱۳/۶٪ و پس از آن در مرحله میانی با متوسط درصد کاهش ۸/۴٪ و سپس در مرحله توسعه رشد با متوسط درصد کاهش ۵/۴٪ و کم‌ترین آن به مقدار ۱٪ مربوط به مرحله ابتدای رشد بوده که هیچ‌گونه تنش‌ی از لحاظ آبی و شوری نداشته است. بنابراین از طریق مدیریت کاهش تنش‌های فوق در مراحل حساس رشد گیاه ذرت می‌توان نقش به‌سزایی در افزایش ET گیاه و به تبع آن عملکرد محصول اقدام نمود. در پژوهشی اثر سه سطح شوری آب آبیاری (۲، ۴/۵ و ۷ dS/m) در اهواز بر مقدار تبخیر و تعرق کل دوره رشد ذرت (ET<sub>t</sub>) نشان داد که مقدار ET نسبی در تیمارهای ۴/۵ و ۷ dS/m با کاهش به ترتیب ۱۲/۵ و ۲۵ درصدی نسبت به تیمار شاهد (۲ dS/m) بوده است (Heidarinia et al., 2016) افزایش غلظت املاح در خاک با به‌کار بردن آب‌های شور برای آبیاری باعث کاهش قابلیت جذب آب توسط گیاه و کاهش تبخیر و تعرق و در نتیجه عملکرد محصول خواهد شد. در پژوهشی دیگر اثر تنش آبی در مراحل چهار برگی، ۱۲ برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه ذرت نشان از کاهش ET نسبی به ترتیب ۱۳/۲٪، ۳۰/۲٪، ۳۴/۱٪ و ۲۳/۲ درصدی نسبت به تیمار شاهد خود بود (Saeidi and Sotoudeh Nia, 2021). در پژوهشی دو سالانه در منطقه قزوین اثرات تیمارهای شوری و عنصر ازت در مراحل رشدی ذرت علوفه‌ای مطالعه شد. نتایج نشان داد که لزوم اطلاع از حساسیت گیاهی در مراحل مختلف رشدی به تبخیر و تعرق دوره‌ای نسبت به شرایط محیطی بسیار حائز اهمیت است

نتایج تجزیه واریانس حاکی از معنی‌دار بودن اثرات تنش آبی و شوری آب آبیاری در سطح احتمال ۹۹ درصد می‌باشد. (جدول ۲). افزایش تنش آبی و شوری موجب افزایش فشار اسمزی محلول خاک و کاهش پتانسیل آب در خاک گردیده که باعث کاهش جذب آب و تعرق گیاه شده و به تبع آن عملکرد ذرت کاهش یافته است. همچنین حاکی از مؤثر بودن اثر بلوک‌بندی طرح RCBD در سطح احتمال ۹۵ درصد، معنی‌دار بودن اثرات اصلی تنش آبی، شوری و اثرات متقابل این دو تنش در سطح احتمال ۹۹ درصد بود. تأثیر هم‌زمان تنش‌ها بر عملکرد محصول به صورت ضرب‌پذیر بوده است به طوری که با افزایش تنش آبی و شوری، بیش‌ترین درصد کاهش عملکرد در گروه تیماری W<sub>2</sub> (تیمارهای W<sub>2</sub>S<sub>0</sub>، W<sub>2</sub>S<sub>1</sub> و W<sub>2</sub>S<sub>2</sub>) با درصد کاهش ۱۳/۶٪ نسبت به تیمار W<sub>2</sub>S<sub>0</sub> و بعد از آن گروه تیماری W<sub>0</sub> (تیمارهای W<sub>0</sub>S<sub>0</sub>، W<sub>0</sub>S<sub>1</sub> و W<sub>0</sub>S<sub>2</sub>) با درصد کاهش ۱۲ درصد نسبت به تیمار W<sub>0</sub>S<sub>0</sub> و در نهایت گروه تیماری W<sub>1</sub> (تیمارهای W<sub>1</sub>S<sub>0</sub>، W<sub>1</sub>S<sub>1</sub> و W<sub>1</sub>S<sub>2</sub>) با درصد کاهش ۳ درصد نسبت به تیمار

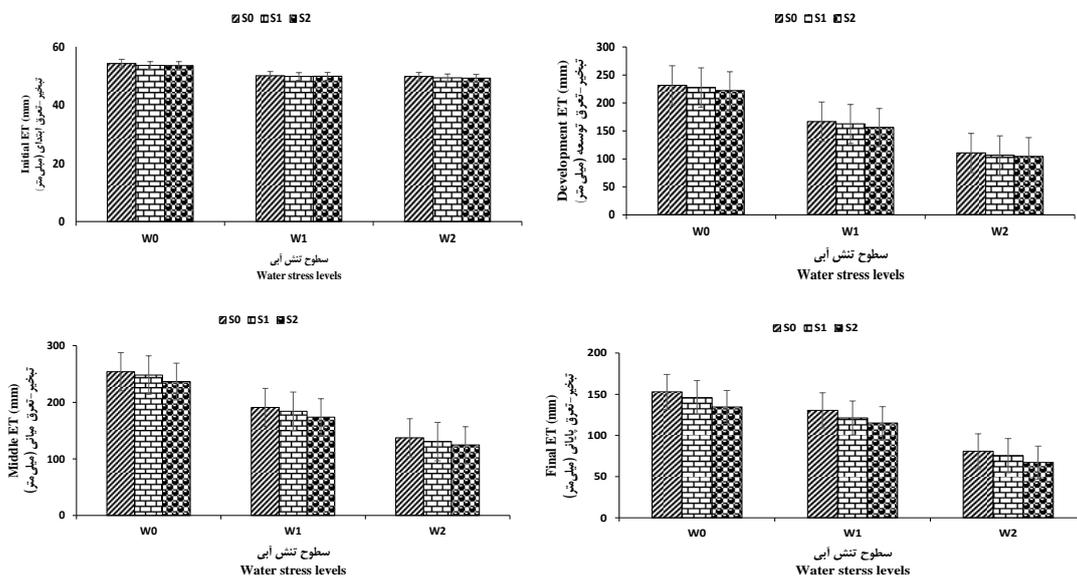
سطح شوری آب آبیاری (۰/۵، ۲/۱، ۳/۵ و ۵/۷ dS/m) بر عملکرد خشک ذرت (دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد) نشان از کاهش ۱۴ و ۲۶ درصدی نسبت به تیمار شاهد (۰/۵ dS/m) دارد (Saeidi, 2021).

### مدل‌سازی ضرایب رشدی ذرت به تنش آبی و شوری

با توجه به داده‌های پژوهش سال ۱۳۹۹ و استفاده از نرم افزار SPSS Ver. 26 ضرایب مراحل چهارگانه رشدی ذرت با توجه به تنش آبی و شوری اعمال شده برای تیمارهای مختلف تعیین و معادلات تجربی شش‌گانه مطرح شده در کلیات پژوهش آورده شده است.

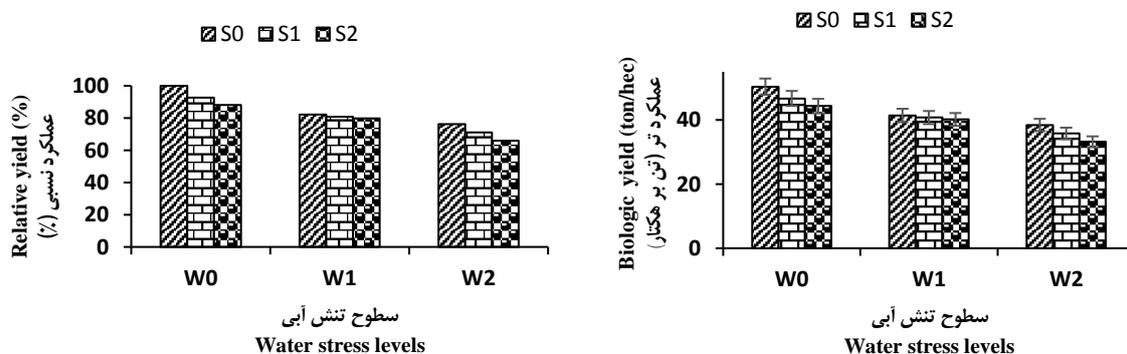
W1S0 در رتبه سوم قرار دارد. تنش‌های فوق به دلیل تأثیر بر کاهش جذب آب و تبخیر و تعرق گیاه موجب کاهش عملکرد تر بیولوژیکی محصول شده است. همچنین اعمال تنش‌ها در زمان‌های حساس رشد مانند ظهور گل‌های تاجی (نر) و پیدایش گل‌های ماده باعث اختلال در عمل گرده‌افشانی، عقیم شدن گیاه و مانعی در تشکیل دانه ذرت می‌شود. نتایج پژوهشی در شاهرود نشان داد که تنش آبی در مرحله گل‌دهی و دانه‌بندی به ترتیب بیش‌ترین و کمترین اثر را بر عملکرد بیولوژیکی ذرت دارد (Mohammadi Behmadi and Armin, 2017).

لذا با اعمال مدیریت آبیاری در مرحله گل‌دهی می‌توان از کاهش شدید عملکرد جلوگیری به عمل آورد. در پژوهشی دیگر اثر چهار



شکل ۲- تأثیر سطوح تنش آبی و شوری بر تبخیر-تعرق واقعی ذرت در مراحل مختلف دوره رشدی گیاه

Figure 2- Effect of water stress and salinity levels on absolute evapotranspiration of maize at different stages of plant growth

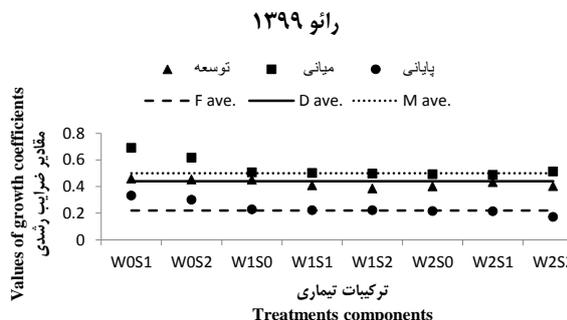
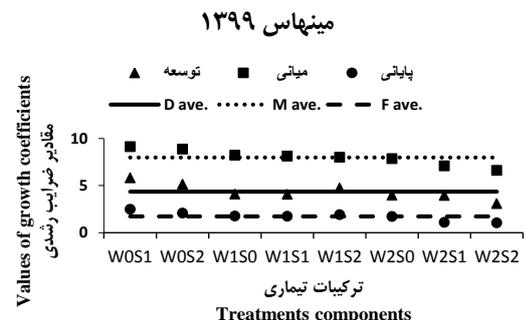
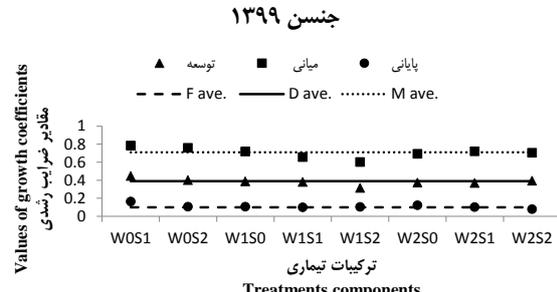
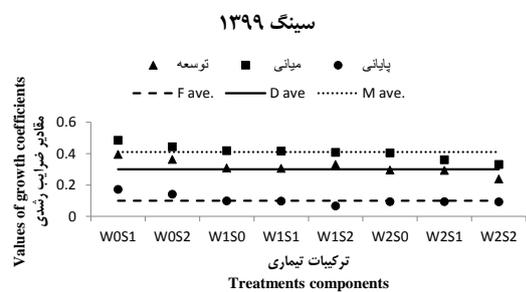
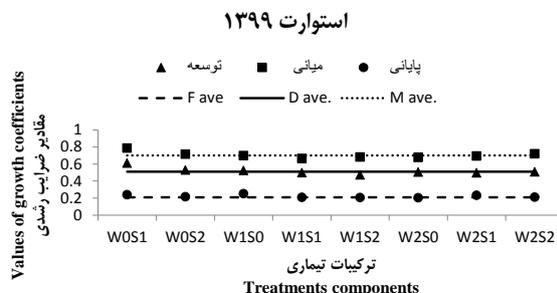
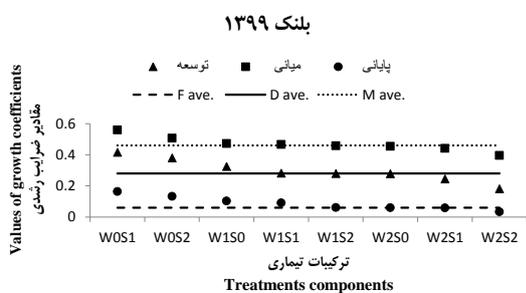


شکل ۳- عملکرد واقعی و نسبی تر تیمارهای مورد بررسی در پژوهش حاضر

Figure 3- Absolute and relative wet yield of the treatments studied in the present study

تا ۰/۱۱۵)، (۰/۱۰۵ تا ۰/۱۱۸)، (۱/۶۵۴ تا ۱/۸۵۸) و (۰/۲۲۷ تا ۰/۲۵۶) در مرحله آخر یا پایانی رشد قرار داشتند. شکل ۴ به طور شهودی مقادیر پراکندگی ضرایب حساسیت در مراحل رشدی مختلف ذرت را نسبت به میانگین آن در تیمارهای مختلف از W<sub>0</sub>S<sub>1</sub> تا W<sub>2</sub>S<sub>2</sub> در مدل های شش گانه نشان می دهد. میانگین ضرایب حساسیت در مرحله ابتدای رشد در مدل های پلنک، استوارت، سینگ، جنسن، مینهاس و رائو به ترتیب عبارتند از ۰/۱۱۱، ۰/۳۱۲، ۰/۱۳۰، ۰/۲۹۴، ۰/۳۸۳ و ۰/۴۸۲ و در مرحله توسعه ۰/۲۹۶، ۰/۵۱۷، ۰/۳۱۶، ۰/۳۸۳، ۰/۳۵۲ و ۰/۴۲۴ و در مرحله میانی ۰/۴۶۹، ۰/۷۰۴، ۰/۴۰۷، ۰/۷۰۴، ۰/۷۰۴ و ۰/۹۷۶ و در مرحله پایانی ۰/۰۸۸، ۰/۲۲۲، ۰/۱۰۷، ۰/۱۱۰، ۰/۱۲۸ و ۰/۲۳۸ محاسبه و در نهایت در مدل های شش گانه تجربی در جدول ۴ وارد شدند.

در همه مدل ها، مقادیر ضرایب حساسیت به تنش در مراحل مختلف رشدی ذرت در طول فصل رشد می باشد. مقادیر ضرایب حساسیت در مدل های پلنک، استوارت، سینگ، جنسن، مینهاس و رائو به ترتیب در بازه های کمینه و بیشینه (۰/۱۰۶ تا ۰/۱۱۹)، (۰/۲۹۹ تا ۰/۳۳۶)، (۰/۱۲۵ تا ۰/۱۴۰)، (۰/۲۸۱ تا ۰/۳۱۶)، (۳/۰۰۱ تا ۳/۳۷۱) و (۰/۴۶۰ تا ۰/۵۱۸) در مرحله ابتدای یا اولیه رشد، (۰/۲۸۵ تا ۰/۳۱۹)، (۰/۴۹۵ تا ۰/۵۵۷)، (۰/۳۰۳ تا ۰/۳۴۰)، (۰/۳۶۶ تا ۰/۴۱۲)، (۴/۱۶۵ تا ۴/۶۷۸) و (۰/۴۰۵ تا ۰/۴۵۵) در مرحله توسعه یا دوم رشدی، (۰/۶۷۳ تا ۰/۷۵۸)، (۰/۵۰۴ تا ۰/۶۷۴)، (۰/۷۵۸ تا ۰/۳۹۰)، (۰/۴۳۸ تا ۰/۶۷۳) تا (۰/۷۵۸ تا ۰/۵۱۴) و (۸/۵۷۴ تا ۷/۶۳۳) در مرحله سوم یا میانی رشد و بالاخره (۰/۰۸۴ تا ۰/۰۹۵)، (۰/۲۱۲ تا ۰/۲۳۹)، (۰/۱۰۳ تا ۰/۱۰۳)



شکل ۴- مقادیر ضرایب رشدی برآورد شده مدل ها در تیمارهای مختلف طرح

Figure 4- The amounts of estimated growth coefficients of models in the different treatments in plan

جدول ۴- معادلات تولید شده برای مدل‌های مورد بررسی در این پژوهش براساس داده‌های سال ۱۳۹۹  
Table 4- The equations generated for different models based on 2020 data

نام مدل Model name	معادله مدل Model equation
بلنک (Blank)	$\frac{Y_s}{Y_m} = 0.111 \left( \frac{ET_{S_1}}{ET_{m_1}} \right) + 0.297 \left( \frac{ET_{S_2}}{ET_{m_2}} \right) + 0.469 \left( \frac{ET_{S_3}}{ET_{m_3}} \right) + 0.088 \left( \frac{ET_{S_4}}{ET_{m_4}} \right)$
استوارت (Stewart)	$\frac{Y_s}{Y_m} = 1 - \left[ 0.312 \left( 1 - \frac{ET_{S_1}}{ET_{m_1}} \right) + 0.517 \left( 1 - \frac{ET_{S_2}}{ET_{m_2}} \right) + 0.704 \left( 1 - \frac{ET_{S_3}}{ET_{m_3}} \right) + 0.222 \left( 1 - \frac{ET_{S_4}}{ET_{m_4}} \right) \right]$
سینگ (Singh)	$\frac{Y_s}{Y_m} = 0.130 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ET_{S_1}}{ET_{m_1}} \right)^2 \right] + 0.316 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ET_{S_2}}{ET_{m_2}} \right)^2 \right] + 0.407 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ET_{S_3}}{ET_{m_3}} \right)^2 \right] + 0.107 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ET_{S_4}}{ET_{m_4}} \right)^2 \right]$
جنسن (Jensen)	$\frac{Y_s}{Y_m} = \left( \frac{ET_{S_1}}{ET_{m_1}} \right)^{0.294} \times \left( \frac{ET_{S_2}}{ET_{m_2}} \right)^{0.383} \times \left( \frac{ET_{S_3}}{ET_{m_3}} \right)^{0.704} \times \left( \frac{ET_{S_4}}{ET_{m_4}} \right)^{0.110}$
رائو (Rao)	$\frac{Y_s}{Y_m} = \left[ 1 - 0.482 \left( 1 - \frac{ET_{S_1}}{ET_{m_1}} \right) \right] \times \left[ 1 - 0.424 \left( 1 - \frac{ET_{S_2}}{ET_{m_2}} \right) \right] \times \left[ 1 - 0.538 \left( 1 - \frac{ET_{S_3}}{ET_{m_3}} \right) \right] \times \left[ 1 - 0.238 \left( 1 - \frac{ET_{S_4}}{ET_{m_4}} \right) \right]$
مینهاس (Minhas)	$\frac{Y_s}{Y_m} = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ET_{S_1}}{ET_{m_1}} \right)^2 \right]^{3.136} \times \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ET_{S_2}}{ET_{m_2}} \right)^2 \right]^{4.352} \times \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ET_{S_3}}{ET_{m_3}} \right)^2 \right]^{7.976} \times \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ET_{S_4}}{ET_{m_4}} \right)^2 \right]^{1.728}$

در شکل ۵ با یک‌دیگر مقایسه و قابلیت مدل‌ها در برآورد عملکرد نسبی نشان داده شده است. جهت اعتبار سنجی قابلیت مدل‌ها در برآورد عملکرد نسبی از آماره‌های ارزیابی  $EF$ ،  $R^2$ ،  $R^2_{adj}$ ،  $RMSE$ ،  $ME$  و  $CRM$  که برای تأیید کارکرد مدل‌ها به کار می‌رود استفاده گردید. در جدول ۵ پارامترهای آماری تحلیل حساسیت مدل‌های تجربی و نظری متداول در علوم خاک و آب با یک‌دیگر مقایسه و نسبت به رتبه‌بندی مدل‌ها اقدام شد. همانطوری که قبلاً در بخش معرفی مدل‌های کاربردی گفته شد معیار استاندارد برای انتخاب مدل بهینه، نزدیک بودن مقادیر  $EF$ ،  $R^2$  و  $R^2_{adj}$  به یک و نزدیک بودن مقادیر  $RMSE$ ،  $ME$  و  $CRM$  به صفر می‌باشد. در سه مدل جمع‌پذیر مطرح شده در پژوهش فوق مدل سینگ با ارزیابی‌های آماری  $EF$ ،  $R^2$ ،  $R^2_{adj}$ ،  $RMSE$ ،  $ME$  و  $CRM$  به ترتیب ۰/۸۹۱، ۰/۸۷۳، ۰/۰۶۵، ۰/۰۸۷ و ۰/۰۷۲- به‌عنوان مدل بهینه انتخاب گردید و در سه مدل ضرب‌پذیر جنسن، مینهاس و رائو، مدل رائو با آنالیزهای ذکر شده (۳/۱۷۱-، ۰/۹۱۴، ۰/۹۰۰، ۰/۱۶۵، ۰/۲۶۳ و ۰/۱۶- به‌عنوان مدل برتر تشخیص داده شد و مدل مینهاس با  $EF$  و  $R^2$  به ترتیب ۴۱/۱۰۳- و ۰/۸۴۳- به‌عنوان تنها مدل نامناسب در پژوهش فوق مشخص شد. آماره  $RMSE$  میانگین انحراف مقادیر برآورد شده از مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد که نمایش‌دهنده عدم اطمینان مطلق مدل می‌باشد و هرچه  $RMSE$  به صفر نزدیک‌تر باشد، عملکرد شبیه‌سازی مدل بهتر است. کم‌ترین

هر مرحله‌ای از رشد ذرت که نسبت به تیمارهای تنش حساس‌تر باشد مقدار ضریب حساسیت در آن مرحله بیشتر خواهد بود. تأثیر افزایش تنش‌ها بر کاهش مقدار تبخیر-تعرق و عملکرد محصول در مرحله حساس رشد گیاه بیشتر از دیگر مراحل است. نتایج مدل‌های تجربی نشان داد که در تمام مدل‌ها به غیر از مینهاس، به‌ترتیب مراحل حساس رشد عبارتند از میانی، توسعه و پایانی و در مدل مینهاس مرحله توسعه مقدم بر مرحله میانی در شرایط تنش هم‌زمان آبی و شوری صورت گرفته است. از آنجایی که در تمامی مدل‌ها دو مرحله رشدی توسعه و میانی از حساسیت بیش‌تری نسبت به تنش آبی و شوری برخوردار هستند از این رو اعمال تنش‌های مذکور در این مراحل بیش‌ترین تأثیر بر تبخیر-تعرق و عملکرد محصول را خواهد داشت و تنها مدل جنسن ویژگی یک‌نواختی بیش‌تری نسبت به مقادیر ضرایب حساسیت به تنش در کل تیمارهای تحت تنش آبی و شوری را نشان داده است (بر اساس محاسبات انحراف از میانگین مقادیر ضرایب رشدی). در پژوهشی مشابه این ویژگی یک‌نواختی توسط مدل بلنک شناخته شده بود (Hemati et al., 2014).

#### تأیید و ارزیابی مدل‌ها

با استفاده از داده‌های تبخیر-تعرق واقعی طی چهار مرحله دوره رشدی ذرت در منطقه مطالعاتی، عملکرد تر نسبی با مدل‌های شش‌گانه تعیین گردید. مقادیر واقعی و مدل‌سازی شده عملکرد نسبی

مدل برای انتخاب بذر مناسب در شرایط کم آبی می‌باشد و مرحله گل‌دهی مهم‌ترین مرحله از سیکل طبیعی رشد ذرت می‌باشد که نباید هیچ‌گونه تنش‌ی در این مرحله داده شود و در غیر این صورت شاهد کاهش معنی‌داری در عملکرد نسبت به تیمار شاهد می‌باشیم (Shi et al., 2020).

### نتیجه‌گیری

بر اساس نشریه آبیاری و زهکشی فائو ۵۶، کل مقادیر تبخیر-تعرق گیاه به چهار مرحله رشدی (ابتدایی، توسعه، میانی و پایانی) تقسیم می‌شود، بر این اساس عملکرد واقعی و نسبی ذرت علوفه‌ای SC.704 نسبت به سطوح مختلف تنش آبی و شوری در منطقه مطالعاتی بررسی گردید. مقادیر تبخیر و تعرق در مراحل چهارگانه رشد تیمار شاهد ( $W_0S_0$ ) که هیچ‌گونه تنش‌ی اعمال نگرددید به ترتیب عبارت بودند از  $۵۴/۳$ ،  $۲۳۱/۵$ ،  $۲۵۴/۱$  و  $۱۵۲/۸$  میلی‌متر که معادل  $۷/۸$ ،  $۳۳/۴$ ،  $۳۶/۷$  و  $۲۲/۱$  درصد کل تبخیر-تعرق تیمار شاهد است و متوسط تبخیر و تعرق در مرحله اولیه تمامی تیمارهای مورد بررسی (۹ تیمار)  $۵۱/۱$  میلی‌متر که برابر  $۷/۴\%$  تبخیر-تعرق تیمار شاهد محاسبه شد. در بقیه تیمارها از  $W_0S_1$  تا بیشینه تنش‌ها ( $W_2S_2$ ) مقدار تبخیر-تعرق بین  $۹۸/۳$  تا  $۴۵/۰$  درصد در مرحله توسعه،  $۹۷/۶$  تا  $۴۹/۰$  درصد در مرحله میانی و  $۹۵/۵$  تا  $۴۳/۹$  درصد در مرحله پایانی برآورد گردید که این مقادیر به ترتیب برابر یا متوسط کاهش  $۲/۵$  ( $W_0S_1$ )،  $۶/۶$  ( $W_0S_2$ )،  $۲۲/۳$  ( $W_1S_0$ )،  $۲۵/۳$  ( $W_1S_1$ )،  $۲۸/۶$  ( $W_1S_2$ )،  $۴۵/۴$  ( $W_2S_0$ )،  $۴۷/۸$  ( $W_2S_1$ ) و  $۵۰/۲$  ( $W_2S_2$ ) درصدی نسبت به کل تبخیر-تعرق تیمار شاهد اصلی ( $W_0S_0$ ) می‌باشد.

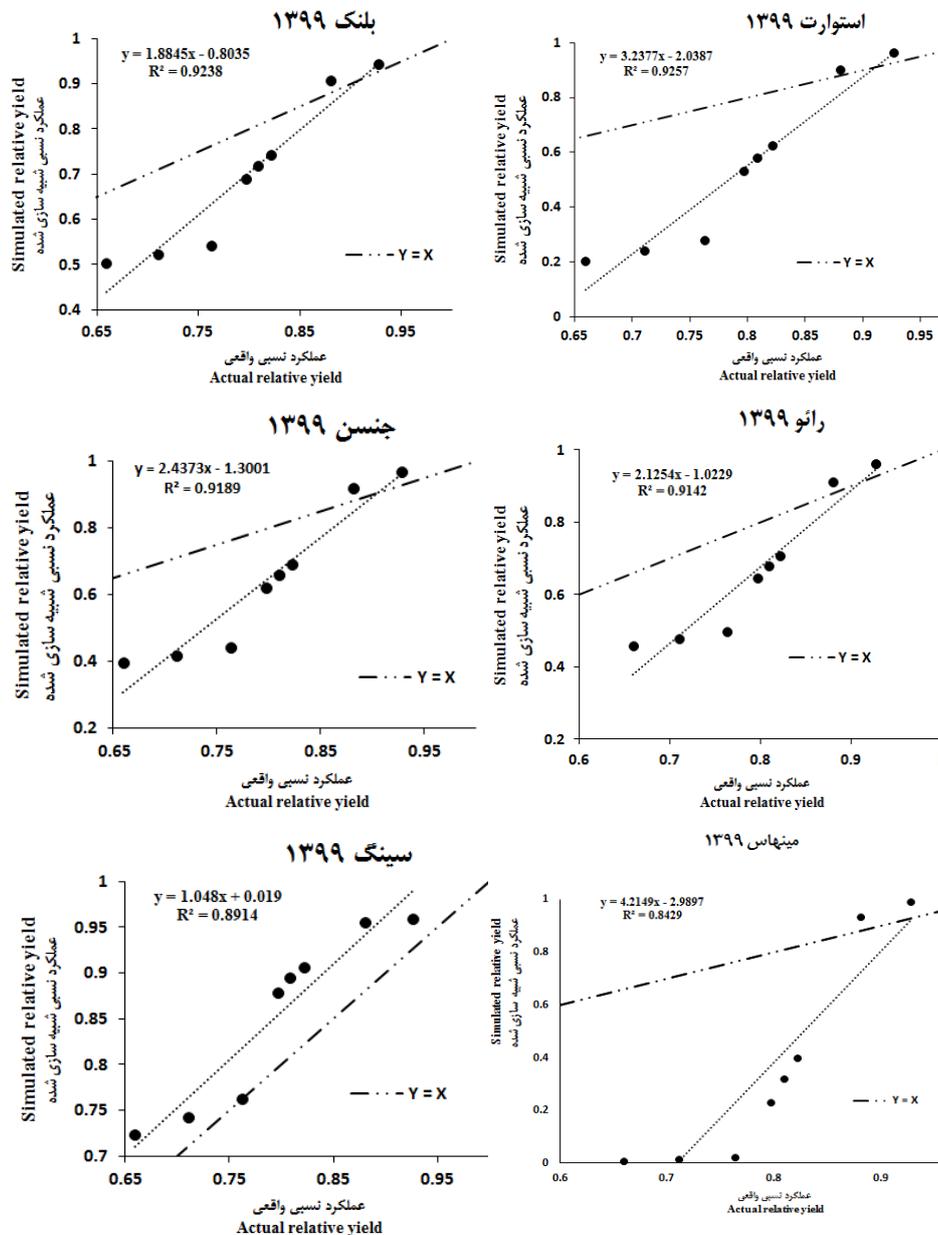
مقدار برای ME و RMSE صفر می‌باشد و مقدار زیاد ME نمایانگر بدترین حالت برآورد مدل است. پارامتر EF بیانگر نسبت انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از اندازه‌گیری شده به انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده از مقادیر میانگین می‌باشد و مقدار آن همیشه بین  $+۱$  تا  $\infty$  متغیر است و هرچه مقدار آن به واحد نزدیک‌تر باشد مدل کاراتر است. CRM نشان‌دهنده تمایل مدل برای بیش برآوردی یا کم برآوردی در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده است. تحلیل آماره CRM نشان داد که تمامی مدل‌های به غیر از سینگ کم‌تر از میزان حقیقی (واقعی) عملکرد تر نسبی را در شرایط تنش هم‌زمان آبی و شوری برآورد کرده است. فاکتور کارایی مدل‌سازی نشان داد که در شرایط تنش‌های گفته شده مدل‌های سینگ، پلنک، راثو، جنسن، استوارت، و مینهاس به ترتیب دارای اولویت‌بندی بوده و در شکل ۵ درستی این رتبه‌بندی قابل مشاهده است. لذا براساس نتایج گرفته شده، عملکرد نسبی تر ذرت تحت شرایط تنش آبی و شوری با استفاده از مدل بهینه (سینگ) قابل برآورد است و در صورت تغییر مقدار تنش‌های آبی و شوری (مدیریت تنش) در مراحل مختلف رشدی ذرت امکان تخمین عملکرد تر نسبی براساس مقدار تبخیر-تعرق نسبی وجود خواهد داشت. در تحقیقی مشابه در قزوین با خاک لوم شنی مدل بهینه استوارت و جنسن با کارایی به ترتیب  $۰/۹۹۴$  و  $۰/۹۹۲$  تشخیص داده شد (Hemati et al., 2014). در نواحی خشک چین پژوهشی در ارتباط با اثرات تنش خشکی (با ۱۵ تیمار) در مقایسه با تیمار شاهد (تأمین  $۱۰۰\%$  نیاز آبی گیاه) جهت انتخاب بذر رقم مناسب ذرت در مراحل رشد رویشی، گل‌دهی و پر شدن دانه‌ها صورت گرفت و نتایج نشان داد که از میان مدل‌های جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر گفته شده تنها مدل راثو با ضرایب رشدی  $۰/۷۷۲$ ،  $۰/۳۴۳$  و  $۰/۹۱۶$  به ترتیب در مراحل رشدی توسعه، میانی و پایانی بهترین

جدول ۵- پارامترهای آماری برای ارزیابی اعتبار مدل‌ها در سال ۱۳۹۹  
Table 5- Statistical Parameters for evaluating the validity of models in 2020

مدل Model	ME	RMSE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	EF	CRM
بلنک (Blank)	0.219 <sup>(2)</sup>	0.130 <sup>(2)</sup>	0.924 <sup>(2)</sup>	0.911 <sup>(2)</sup>	-1.591 <sup>(2)</sup>	0.125 <sup>(2)</sup>
استوارت (Stewart)	0.487 <sup>(5)</sup>	0.323 <sup>(5)</sup>	0.926 <sup>(1)</sup>	0.913 <sup>(1)</sup>	-15.020 <sup>(5)</sup>	0.323 <sup>(5)</sup>
سینگ (Singh)	0.087 <sup>(1)</sup>	0.065 <sup>(1)</sup>	0.891 <sup>(5)</sup>	0.873 <sup>(5)</sup>	0.361 <sup>(1)</sup>	-0.072 <sup>(1)</sup>
جنسن (Jensen)	0.319 <sup>(4)</sup>	0.203 <sup>(4)</sup>	0.919 <sup>(3)</sup>	0.905 <sup>(3)</sup>	-5.322 <sup>(4)</sup>	0.196 <sup>(4)</sup>
راثو (Rao)	0.263 <sup>(3)</sup>	0.165 <sup>(3)</sup>	0.914 <sup>(4)</sup>	0.900 <sup>(4)</sup>	-3.171 <sup>(3)</sup>	0.160 <sup>(3)</sup>
مینهاس (Minhas)	0.739 <sup>(6)</sup>	0.524 <sup>(6)</sup>	0.843 <sup>(6)</sup>	0.817 <sup>(6)</sup>	-41.103 <sup>(6)</sup>	0.541 <sup>(6)</sup>

توضیح: شماره بالانویس شده روی هر عدد بیانگر اولویت انتخاب مدل بر اساس شاخص‌های آماری است.

Explanation: The superscripted numbers in brackets indicate the priority of choosing a model based on statistical indices.



شکل ۵- مقایسه توان انواع مدل‌ها در برآورد عملکرد نسبی ذرت تحت شرایط تنش هم‌زمان آبی و شوری

Figure 5- The comparison of the potential of model types in estimating relative maize yield under simultaneous water and salinity stress

حساسیت مراحل رشدی گیاه بر کاهش میزان تبخیر-تعرق موثر می‌باشد به این شکل که در مرحله پایانی با متوسط کاهش ۱۳/۶ درصدی در سه گروه تیماری  $W_0$ ،  $W_1$  و  $W_2$  بیش‌ترین کاهش و بعد از آن با متوسط کاهش ۸/۴ درصدی در مرحله میانی در رتبه دوم قرار دارد. بنابراین در این دو مرحله رشدی به دلیل شروع آغاز گل‌دهی، تشکیل میوه و رسیدگی فیزیولوژیکی دانه بیش‌ترین کاهش شیب تبخیر-تعرق مشاهده شده است. دلایل این نتایج می‌تواند از نبود

همچنین عملکرد ذرت از ۵۰/۴ تن در هکتار در شرایط بدون تنشی با ۳۴/۰ درصد کاهش به ۳۳/۲ تن بر هکتار در تیمار  $W_2S_2$  رسیده است.

همان‌طوری که نتایج نشان داد تاثیر تنش آبی و شوری بر تبخیر و تعرق و عملکرد ذرت حداقل در سطح احتمال ۹۵ درصدی معنی‌دار بوده است و با بیشتر شدن تنش‌های گفته شده مقدار تبخیر و تعرق و عملکرد با شیب بیشتری کاهش می‌یابد و علاوه بر تاثیر تنش،

اعتبار سنجی نشان داد که سه مدل سینگ، پلنک، راتو به ترتیب رتبه‌های اول تا سوم را در تخمین عملکرد نسبی تر در شرایط تنش دوگانه آبی و شوری دارد. بنابراین نتایج نشان داد که نه تنها در شرایط تنش شوری با مدیریت مصرف آب در مراحل حساس رشدی می‌توان تبخیر-تعرق و عملکرد ذرت را افزایش داد بلکه در مورد تغییر میزان تنش‌های آبی و شوری در مراحل رشد، برآورد عملکرد نسبی ذرت بر اساس مقدار تبخیر و تعرق نسبی ممکن خواهد بود. کم کردن یک نوبت آبیاری (شش نوبت به جای هفت نوبت آبیاری) به ترتیب در مراحل جوانه‌زنی، به ساقه رفتن، پیدایش گل نر، پیدایش گل ماده، تشکیل دانه و شیرگی شدن دانه باعث کاهش حجم آب آبیاری خواهد شد.

ذخیره آب کافی و افزایش شوری آب آبیاری در خاک باشد. تنش‌های آبی و شوری به دلیل کاهش مقدار و پتانسیل آب موجود در خاک، باعث کاهش جذب آب و تبخیر-تعرق و نهایتاً کاهش تولید محصول خواهد شد و از دیگر نتایج به دست آمده از پژوهش می‌توان به اولویت اول تنش آبی نسبت به تنش شوری در کاهش تبخیر و تعرق و عملکرد تولید اشاره کرد. همچنین با مدیریت تنش‌های آبی و شوری در مراحل حساس رشد گیاه (خصوصاً مرحله میانی) که زمان گل‌دهی و آغاز شروع و تکمیل فرآیند تولید بلال می‌باشد، می‌توان از کاهش چشمگیر تولید کاست. بعلاوه در این تحقیق مدل‌های جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر برای مدل‌سازی روابط بین عملکرد و تبخیر-تعرق در طول دوره رشدی ذرت (حدود ۱۳۰ تا ۱۴۰ روز) استفاده گردید و نتایج

## منابع

- 1-Azizian, A., & Sepaskhah, A.R. (2014). Maize response to water, salinity and nitrogen levels: yield-water relation, water-use efficiency and water uptake reduction function. *International Journal of Plant Production* 8(2): 183-214. <https://doi.org/10.22069/IJPP.2014.1524>.
- 2- Abdoli, A., Nikpour, M., Hosseini, Y., & Ramezani Moghadam, J. (2018). Evaluation the effects of the irrigation water salinity and water stress on yield components of cherry tomato. *Journal of Water and Soil* 32(3): 489-500. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JSW.V32I3.70395>.
- 3- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation Drainage Paper No. 56: 1-326.
- 4- Blank, H. (1975). *Optimal irrigation decisions with limited water*. Ph. D. dissertation, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- 5- Doorenbos, J., & Pruitt, W.O. (1977). *Guidelines for predicting crop water requirements*. Food and agriculture organization (FAO) of the United Nations, irrigation and drainage paper No. 24. Room, Italy.
- 6- Heidarinia, M., Naseri, A., Boroomandnasab, S., & AlbaJi, M. (2016). The effect of irrigation with saline water on evapotranspiration and water use Efficiency of maize under different crop management. *Irrigation Science and Engineering* 40(11): 99-110. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22055/JSW.2017.12960>.
- 7-Hemati R., Maghsoudi, K., & Emam, Y. (2014). Morpho-physiological responses of maize to drought stress at different growth stages in northern semi-arid region of Fars. *JCPP* 4(11): 67-75. (In Persian with English abstract)
- 8- Jalali, V.R., Homaei, M., & Mirnia, S.KH. (1999). Modeling canola response to salinity in productive growth stages. *Journal of Water and Soil Science* 12(44): 111-121. (In Persian with English abstract)
- 9- Jensen, M.E. (1968). *Water consumption by agricultural plants*. In: T. T. Kozlowski (ed), *Water deficits in plant growth*. (pp. 1-22). Academic Press, New York, NY. <https://eprints.nwisrl.ars.usda.gov/id/eprint/742>.
- 10- Lacerda, C.F., Ferreira, J.F.S., Liu, X., & Suarez, D.L. (2016). Evapotranspiration as a criterion to estimate nitrogen requirement of maize under salt stress. *Journal of Agronomy and Crop Science* 202(2016): 192-202. <https://doi.org/10.1111/jac.12145>.
- 11- Minhas, B.S., Parikh, K.S., & Srinivasan, T.N. (1974). Toward the structure of a production function for wheat yields with dated inputs of irrigation water. *Journal of Water Resources Research* 10(3): 383-393. <https://doi.org/10.1029/WR010i003p00383>.
- 12- Mohammadi Behmadi, M., & Armin, M. (2017). Effect of drought stress on yield and yield components of different corn cultivars in delayed planting conditions. *Journal of Applied Research of Plant Ecophysiology* 4(1): 17-34. (In Persian)
- 13- Nicoullaud, B., King, D., & Tardieu, F. (1994). Vertical distribution of maize root in relation to permanent soil characteristics. *Plant Soil* 159: 245-254.
- 14- Rao, N.H., Sarma, P.B.S., & Chander, S. (1988). A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. *Agriculture Water Management* 13(1): 25-32. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(88\)90130-8](https://doi.org/10.1016/0378-3774(88)90130-8).
- 15- Saeidi, R. (2021). Effect of drought and salinity stress on estimation of forage maize yield through periodic evapotranspiration using different model. *Journal of Water Research in Agriculture* 35(2): 107-121. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/jwra.2021.355044.876>.
- 16- Saeidi, R., Sotoodehnia, A., Ramezani Etedali, H., Kaviani, A., & Nazari, B. (2018). Study of effect of water salinity and soil fertility stresses on evapotranspiration of Maize. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 49(4):

- 945-954. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.247876.667815>.
- 17- Saeidi, R., Ramezani Etedali, H., Sotoodehnia, A., Kaviani, A., & Nazari, B. (2021). Salinity and fertility stresses modify  $K_s$  and readily available water coefficients in maize (case study: Qazvin region). *Irrigation Science* 39(3): 299-313. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00711-1>.
- 18- Saeidi, R., & Sotoodehnia, A. (2021). Yield reaction to evapotranspiration of maize, under the effect of water stress at different growth stages (In Qazvin Plain). *Iranian Journal of Soil and Water Research* 52(3): 611-620. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.314850.668822>.
- 19- Stewart, J., Hagan, R., & Pruitt, W. (1976). *Production functions and predicted irrigation programmers for principal crops as required for water resources planning and increased water use efficiency*. Final Report. Department of Interior, Washington, D.C.
- 20- Sing, P., Wolkewits, H., & Kumar, R. (1987). Comparative performance of different crop production functions for wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Irrigation Science* 8(4): 273-290.
- 21- Shi, R., Tong, L., Du, T., & Shukla, M.K. (2020). Response and modeling of hybrid maize seed vigor to water deficit at different growth stages. *Journal of Water* 12(11): 3289. <https://doi.org/10.3390/w12113289>.
- 22- Unlukara, A., Kurunc, A., Duygu-Kesmez, G., Yurtseven, E., & Suarez, D.L. (2010). Effect of salinity on eggplant (*Solanum melongena*) growth and evapotranspiration. *Irrigation and Drainage* 59: 203-214. <https://doi.org/10.1002/ird.453>.
- 23- Unlukara, A., Kurunc, A., Kesmez, G., & Yurtseven, E. (2008). Growth and evapotranspiration of Orka as influenced by salinity of irrigation water. *Irrigation and Drainage Engineering* 2: 160-166. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2008\)134:2\(160\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:2(160)).
- 24- Xin, H., Peiling, Y., Shumei, R., Yankai, L., Guangyu, J., & Lianhao, L. (2016). Quantitative response of oil sunflower yield to evapotranspiration and soil salinity with saline water irrigation. *Journal of Agriculture and Biology Engineering* 9(2): 63-73. <http://doi.org/10.3965/j.ijabe.20160902.1683>.



## Numerical Estimation of Drinking Water Quality Index Using Tree Methods and Combined Wavelet Approaches and Principal Component Analysis

M.T. Sattari<sup>1\*</sup>, S. Javidan<sup>2</sup>

Received: 26-08-2022

Revised: 08-11-2022

Accepted: 28-11-2022

Available Online: 22-02-2023

### How to cite this article:

Sattari, M.T., & Javidan, S. (2023). Numerical Estimation of Drinking Water Quality Index Using Tree Methods and Combined Wavelet Approaches and Principal Component Analysis. *Journal of Water and Soil* 36(6): 695-709. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/jsw.2022.78452.1196](https://doi.org/10.22067/jsw.2022.78452.1196)

### Introduction

Surface and underground waters are one of the world's most important problems and environmental concerns. In the last few decades, due to the rapid growth of the population, the water needs have increased, followed by the input load to the water. In order to classify the quality of underground water and water level according to the type of consumption, there are many methods, one of the most used methods is the use of quality indicators. Considering the facilities available in water quality monitoring stations and the need to save time and money, using alternative methods of modern data mining methods can be good for predicting and classifying water quality. The process of water extraction for domestic use, agricultural production, mineral industrial production, electricity production, and ester methods can lead to the deterioration of water quality and quantity, which affects the aquatic ecosystem, that is, the set of organisms that live and interact. Therefore, it is very important to evaluate the quality of surface water in water-environmental management and in monitoring the concentration of pollutants in rivers. The aim of the current research was to estimate the numerical values of the drinking water quality index (WQI) using the tree method and investigate the effect of wavelet transformation, the Bagging method, and principal component analysis.

### Materials and Methods

In this research, to calculate the WQI index from the quality parameters of the Bagh Kalaye hydrometric station including total hardness (TH), alkalinity (pH), electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), calcium (Ca), sodium (Na), Magnesium (Mg), potassium (K), chlorine (Cl), carbonate (CO<sub>3</sub>), bicarbonate (HCO<sub>3</sub>) and sulfate (SO<sub>4</sub>) were used in the statistical period of 23 years (1998-2020). Quantitative values calculated with the WQI index were considered as target outputs. By using the relief and correlation method, the types of input combinations were determined. The random tree method was used to estimate the numerical values of the WQI index. Then, the capability of the combined approach of wavelet, principal component analysis, and Bagging method with random tree base algorithm was evaluated. To compare the values obtained from the data mining methods with the values calculated from the WQI index, the evaluation criteria of correlation coefficient (R), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and modified Wilmut coefficient (Dr) were used.

### Results and Discussion

The use of the wavelet transform method and the Bagging method has improved the modeling results. Considering that the Bagging classification method with the random tree base algorithm is a combination of the results of several random trees, so using this method has increased the accuracy of the RT model. So, in general, it was concluded that the use of wavelet transformation and classification methods increases accuracy and reduces errors. The best scenario with the highest accuracy and the lowest error was related to scenario 10 of the

1 and 2- Associate Professor and M.Sc Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [mtsattar@tabrizu.ac.ir](mailto:mtsattar@tabrizu.ac.ir))

W-B-RT model with Total Hardness, Electrical Conductivity, Total Dissolved Solid, Sulphate, Calcium, Bicarbonate, Magnesium, Chlorine, Sodium, and potassium parameters. The results showed that the effect impact of pH in estimating the numerical value of the WQI index is considered lower than other parameters. When the principal component analysis method was used, by reducing the value of the eigenvalue from F1 to F12, the value of the factor also decreased; As a result, so F1, F2, and F3 factors were selected as the basic components. Considering 3 main factors, modeling was done employed and  $R=0.98$ ,  $RMSE=2.17$ ,  $MAE=1.52$ , and  $Dr=0.97$  were obtained. In general, the results showed that the PCA method, despite reducing the dimension of the input vectors and simplifying it, can improve the accuracy and speed of the model and is introduced as the best method for estimating the numerical value of the WQI index.

## Conclusion

The results obtained from the present research showed that the use of wavelet transform, Bagging and PCA methods had a positive effect on improving the results and increasing higher the accuracy. In estimating the numerical values of WQI index, PCA-B-RT method considering 3 main factors, with correlation coefficient equal to 0.98, root mean square error equal to 2.17, average absolute value error equal to 1.52 and the modified Wilmot coefficient equal to 0.97 had the highest accuracy. Considering that all the methods used in the estimation of quantitative values had acceptable accuracy, therefore, in case of lack of data and lack of access to all chemical parameters, it is possible to obtain appropriate and acceptable results by using a limited number of parameters and data mining methods achieved.

**Keywords:** Bagging preprocessing approach, Modified Wilmot coefficient, Principal component analysis, Relief Algorithm, Wavelet transform

## مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۱، ص. ۷۰۹-۶۹۵

# تخمین عددی شاخص کیفی آب شرب با استفاده از روش‌های درختی و رویکردهای ترکیبی موجک و تحلیل مؤلفه اصلی

محمدتقی ستاری<sup>۱\*</sup> - سحر جاویدان<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۷

## چکیده

آگاهی از کیفیت آب، یکی از نیازهای مهم در برنامه‌ریزی، توسعه و حفاظت از منابع آب برای مصارف مختلف از جمله شرب به شمار می‌رود. استفاده از روش‌های مدرن داده‌کاوی، می‌تواند رویکرد مناسبی برای پیش‌بینی و طبقه‌بندی کیفیت آب باشد. در پژوهش حاضر، برای محاسبه شاخص کیفی آب شرب از پارامترهای شیمیایی شامل سختی کل، کلیاتیت، هدایت الکتریکی، کل مواد جامد محلول، کلسیم، سدیم، منیزیم، پتاسیم، کلر، کربنات، بی‌کربنات و سولفات ایستگاه هیدرومتری باغ کلایه استان قزوین، در دوره آماری ۲۳ ساله (۱۹۹۸-۲۰۲۰) استفاده شد. روش درخت تصادفی برای تخمین و مدل‌سازی مقادیر عددی شاخص کیفی آب شرب براساس ترکیب‌های مختلفی از پارامترهای شیمیایی به کار برده شد. ماتریس همبستگی و الگوریتم رلیف، مبنای انتخاب ترکیب‌های مختلفی از پارامترهای شیمیایی به‌عنوان ورودی روش‌های داده‌کاوی در قالب سناریوهای مختلف در نظر گرفته شدند. در جهت بهبود نتایج تخمین عددی شاخص کیفی آب شرب، از رویکردهای تبدیل موجک، دسته‌بندی مدل‌ها و تحلیل مؤلفه اصلی استفاده شد. بررسی نتایج نشان داد که ترکیب ۳ روش تحلیل مؤلفه اصلی (با در نظر گرفتن ۳ عامل اصلی)، رویکرد پیش‌پردازش Bagging و درخت تصادفی، با ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۸، ریشه میانگین مربعات خطا برابر با ۲/۱۷، میانگین خطای قدر مطلق برابر با ۱/۵۲ و ضریب وایلموت اصلاح شده برابر با ۰/۹۷ می‌تواند دقت بالایی در تخمین مقادیر عددی شاخص کیفی آب شرب داشته باشد. براساس نتایج کلی به دست آمده، در صورت کمبود نمونه‌های آزمایشگاهی و یا عدم دسترسی به تمام پارامترهای شیمیایی، روش‌های معرفی شده در این مطالعه، به علت دقت بالا جهت تخمین شاخص کیفی آب شرب قابل توصیه خواهند بود.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم رلیف، تبدیل موجک، تحلیل مؤلفه اصلی، رویکرد پیش‌پردازش Bagging، ضریب وایلموت اصلاح شده

## مقدمه

ورودی به منابع آب افزایش یافته‌است. جهت طبقه‌بندی کیفیت آب با توجه به نوع مصرف، روش‌های متعددی وجود دارد که یکی از روش‌های پرکاربرد، استفاده از شاخص‌های کیفی است. با توجه به کمبود امکانات در تمامی ایستگاه‌های رصد کیفیت آب و نیاز به صرفه جویی در زمان و هزینه، استفاده از روش‌های جایگزین مانند روش‌های مدرن داده‌کاوی می‌تواند رویکرد مناسبی برای پیش‌بینی و طبقه‌بندی کیفیت آب باشد (Kavita and Jagdish, 2012). فرآیند برداشت آب برای مصارف خانگی، تولید کشاورزی، تولید صنعتی - معدنی، تولید برق و غیره می‌تواند منجر به بدتر شدن کیفیت آب شده و بر اکوسیستم آبی تأثیر منفی بگذارد. بنابراین ارزیابی کیفیت آب‌های

آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی از مهم‌ترین معضلات جهان و نگرانی‌های زیست محیطی محسوب می‌شود. در چند دهه اخیر به علت رشد سریع جمعیت، نیازهای آبی و به دنبال آن بار آلودگی

۱ و ۲- به ترتیب دانشیار و دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

(Email: mtsattar@tabrizu.ac.ir

\*) نویسنده مسئول:

DOI: 10.22067/jsw.2022.78452.1196

محلول ( $DO^{10}$ ) را به عنوان مؤثرترین پارامتر در تعیین کیفیت آب معرفی کردند. نیهالانی و مروتی (Nihalani and Meeruty, 2020) شاخص کیفیت آب رودخانه‌های اصلی در گجرات هند را ارزیابی نمودند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که مقدار شاخص کیفیت آب برای رودخانه ماهی ۳۰ تا ۵۰، برای رودخانه سابارماتی ۴۲ تا ۶۵، برای رودخانه نارمادا ۲۸ تا ۵۲ و برای رودخانه تاپی ۳۵ تا ۷۰ است. بر اساس WQI، استنباط کردند که دلیل اصلی کاهش کیفیت آب رودخانه، تخلیه فاضلاب، پساب صنعتی و رواناب شهری بوده است. چن و همکاران (Chen et al., 2020) به تحلیل مقایسه‌ای عملکرد پیش‌بینی کیفیت آب سطحی در چین و شناسایی پارامترهای کلیدی آب با استفاده از مدل‌های مختلف یادگیری ماشین بر اساس داده‌های بزرگ پرداختند. آن‌ها برای پیش‌بینی کیفیت آب در آینده و ارائه هشدار به موقع کیفیت آب، روش درخت تصمیم<sup>۱۱</sup>، جنگل تصادفی<sup>۱۲</sup> و آشکار عمیق<sup>۱۳</sup> را در اولویت قرار دادند. خوی و همکاران (Khoi et al., 2022) برای پیش‌بینی شاخص کیفیت آب در رودخانه لا بوونگ ویتنام، از مدل‌های یادگیری ماشین استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که مدل تقویت گرادیان شدید<sup>۱۴</sup> (XGBoost) با  $R=0.989$  و  $RMSE=0.107$ ، عملکرد خوبی در پیش‌بینی WQI داشت. یافته‌های آن‌ها این استدلال را تقویت کرد که مدل‌های یادگیری ماشین، به ویژه XGBoost، ممکن است برای پیش‌بینی WQI با سطح بالایی از دقت، مورد استفاده قرار گیرند و مدیریت کیفیت آب را بهبود بخشند.

هدف پژوهش حاضر، محاسبه مقادیر عددی شاخص WQI با استفاده از داده‌های مربوط به پارامترهای کیفی آب ایستگاه هیدرومتری باغ کلابه در استان قزوین در دوره آماری ۲۳ ساله (۱۹۹۸-۲۰۲۰) است. مقادیر عددی این شاخص با استفاده از روش درخت تصادفی، تخمین زده شده و قابلیت رویکرد پیش‌پردازش Bagging، تبدیل موجک، تحلیل مؤلفه اصلی نیز در جهت بهبود نتایج مدل‌سازی مورد بررسی قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

استان قزوین در بخش شمال غربی کشور ایران واقع شده و مساحت آن حدود ۱۵۸۲۰ کیلومتر مربع است. باغ کلابه، روستایی از

سطحی در مدیریت آبی-محیطی و در پایش غلظت آلاینده‌ها در رودخانه‌ها بسیار حائز اهمیت است. بررسی منابع نشان می‌دهد؛ تحقیقات زیادی در زمینه تخمین کیفیت آب‌های سطحی و پیش‌بینی شاخص کیفی آب با استفاده از روش‌های داده‌مبنا در سطح ملی و بین‌المللی انجام یافته است. سلیمان‌پور و همکاران (Soleimanpour et al., 2018) برای تعیین مؤثرترین عامل کیفیت آب آشامیدنی دشت کازرون، از تکنیک داده‌کاوی درخت تصمیم<sup>۱</sup> CART استفاده کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که دو پارامتر کل جامدات محلول و مقدار کلسیم بر کیفیت آب آشامیدنی، تأثیر بیشتری داشته است که علت آن را ساختار سازنده‌های زمین‌شناسی منطقه و وجود کربنات کلسیم در ترکیب آن‌ها دانسته‌اند. باتور و مکتاو (Bature and Maktav, 2019) کیفیت آب‌های سطحی را در دریاچه گالا کشور ترکیه با استفاده از فیوژن تصاویر ماهواره‌ای بر اساس روش تحلیل مؤلفه اصلی، ارزیابی نمودند. آن‌ها پس از انجام تجزیه و تحلیل‌های لازم، نتیجه گرفتند که روش رگرسیون سطح پاسخ<sup>۲</sup> (RSR) مبتنی بر PCA نسبت به مدل‌های داده‌کاوی<sup>۳</sup> MLR، ANN<sup>۴</sup> و SVM<sup>۵</sup> برای تخمین دقیق پارامترهای کیفیت آب در دریاچه‌ها برتری دارد. آل مختار و آل یاسین (Al- Mukhtar and Al- Yaseen, 2019) با استفاده از مدل‌های داده‌محور، پارامترهای کیفیت آب را مدل‌سازی کردند. آن‌ها روش ANFIS<sup>۶</sup> را به عنوان یک مدل پیش‌بینی‌کننده برای TDS<sup>۷</sup> و EC در عراق پیشنهاد کردند. همچنین نتیجه گرفتند که نیترات، کلسیم، منیزیم، سختی کل<sup>۸</sup> (TH)، سولفات و کلرید، تأثیرگذارترین ورودی‌ها در TDS و کلسیم، منیزیم، سختی کل، سولفات و کلرید بیشترین تأثیر را روی EC دارند. حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2019) برای ارزیابی کیفی آب سطحی استان سیستان و بلوچستان، شاخص کیفیت آب (WQI) را به کار بردند. نتایج تحلیل‌های آماری انجام شده، مشخص کرد که همبستگی میان پارامترهایی مانند کلرید، نیترات، سولفات و کلر با شاخص کیفیت آب، زیاد بوده است. اتهمان و همکاران (Othman et al., 2020) به پیش‌بینی شاخص کیفیت آب رودخانه با در نظر گرفتن حداقل تعداد متغیرهای ورودی پرداختند. نتایج، بیانگر توانایی استثنایی مدل شبکه عصبی مصنوعی برای محاسبه WQI<sup>۹</sup> بود. همچنین آن‌ها اکسیژن

- 1- Classification And Regression Trees
- 2- Response Surface Regression
- 3- Multiple Linear Regression
- 4- Artificial Neural Network
- 5- Support Vector Machines
- 6- Adaptive Neuro Fuzzy Inference System
- 7- Total Dissolved Solid
- 8- Total Hardness
- 9- Water Quality Index

10- Dissolved Oxygen

11- Decision Tree

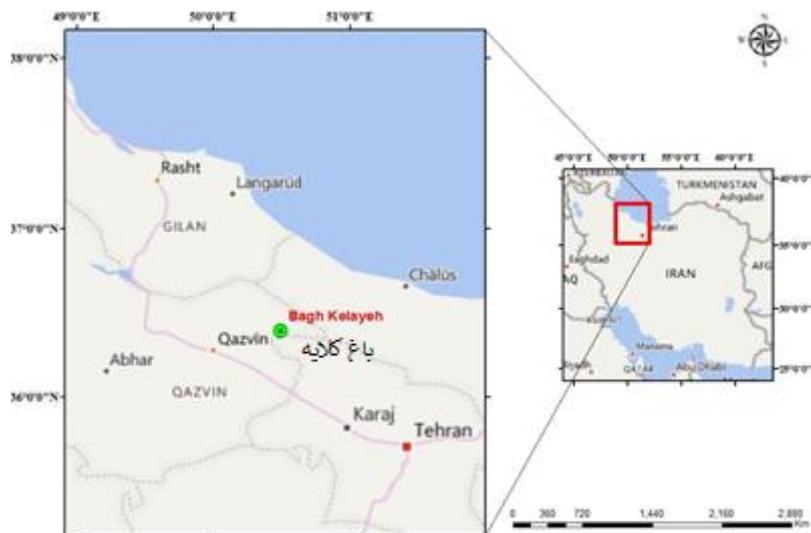
12- Random Forest

13- Deep Cascade Forest

14- Extreme Gradient Boosting

ارتفاع ۱۲۸۷ متر از سطح دریا واقع شده است. موقعیت مکانی ایستگاه مورد مطالعه در شکل ۱ آورده شده است.

توابع بخش رودبارالموت شهرستان قزوین در استان قزوین است. ایستگاه هیدرومتری باغ کلاویه در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۳ دقیقه و ۳۸ ثانیه، طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۲۹ دقیقه و ۵۱ ثانیه و



شکل ۱- موقعیت مکانی ایستگاه مورد مطالعه

Figure 1- Location of the studied station

جدول ۱- مشخصات آماری پارامترهای مورد استفاده

Table 1- Statistical characteristics of implemented parameters

حداقل Minimum	حداکثر Maximum	میانگین Mean	واریانس Variance	ضریب تغییرات Coefficient Variation	معیارهای آماری Statistical criteria
95.00	481.50	278.15	3407.38	0.210	سختی کل (میلی‌گرم بر لیتر) TH (mg.L <sup>-1</sup> )
4.50	8.40	7.83	0.11	0.042	قلیابیت pH
279.00	1048.00	627.94	17480.87	0.211	هدایت الکتریکی (میکروموس بر سانتی‌متر) Ec (μ mho/cm)
186.00	663.00	388.05	5983.81	0.199	کل مواد جامد محلول (میلی‌گرم بر لیتر) TDS (mg. L <sup>-1</sup> )
0.00	159.80	73.94	380.24	0.264	کلسیم (میلی‌اکی‌والان بر لیتر) Ca (meq. L <sup>-1</sup> )
0.46	60.49	17.26	82.98	0.528	سدیم (میلی‌اکی‌والان بر لیتر) Na (meq. L <sup>-1</sup> )
2.76	58.20	22.18	0.9370	0.436	منیزیم (میلی‌اکی‌والان بر لیتر) Mg (meq. L <sup>-1</sup> )
0.39	19.50	1.99	2.79	0.839	پتاسیم (میلی‌اکی‌والان بر لیتر) K (meq. L <sup>-1</sup> )
0.00	89.60	27.36	198.61	0.515	کلر (میلی‌اکی‌والان بر لیتر) Cl (meq. L <sup>-1</sup> )
0.00	33.00	0.21	4.17	9.808	کربنات (میلی‌اکی‌والان بر لیتر) CO <sub>3</sub> (meq. L <sup>-1</sup> )
22.08	374.88	140.21	2129.19	0.329	سولفات (میلی‌اکی‌والان بر لیتر) SO <sub>4</sub> (meq. L <sup>-1</sup> )
50.02	391.62	163.60	1565.21	0.242	بی کربنات (میلی‌اکی‌والان بر لیتر) HCO <sub>3</sub> (meq. L <sup>-1</sup> )

واحد به نام شاخص کیفیت آب (WQI) بودند. این شاخص برای تسهیل مدیریت عملیاتی منابع آب و تخصیص آن‌ها برای مصارف مختلف در نظر گرفته شده است. هدف WQI طبقه‌بندی آب‌ها نسبت به ویژگی‌های بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی است که کاربردهای احتمالی آن‌ها را تعریف می‌کند و تخصیص آن‌ها را مدیریت می‌کند (Khalil et al., 2011). برای این منظور، متغیرهای تحلیلی باید موزون و تجمیع شوند. WQI‌ها را می‌توان به‌عنوان مدل‌هایی از کیفیت آب در نظر گرفت.

در مقاله حاضر، شاخص کیفیت آب شرب با استفاده از فرمول‌های ۱ تا ۳ محاسبه گردید. در این فرمول‌ها  $w$  وزن مربوط به هر پارامتر با توجه به اهمیت آن در شرب و  $W$  وزن نسبی هر پارامتر،  $C$  غلظت هر پارامتر،  $S$  غلظت استاندارد هر پارامتر،  $q$  رتبه کیفی هر پارامتر و WQI نیز شاخص کیفیت آب شرب می‌باشد (Singh 1992).

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

$$q_i = \left( \frac{C_i}{S_i} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$WQI = \sum_{i=1}^n W_i q_i \quad (3)$$

مقادیر WQI محاسبه شده معمولاً به پنج دسته آب عالی، خوب، بد، بسیار ضعیف و نامناسب برای آشامیدن تقسیم می‌شوند (جدول ۳):

### روش درخت تصادفی

درخت تصادفی یک طبقه‌بندی‌کننده تحت نظارت است و از یک ایده جمع‌آوری برای تولید مجموعه‌ای تصادفی از داده‌ها برای ساخت درخت تصمیم استفاده می‌کند. طبقه‌بندی به این صورت عمل می‌کند که طبقه‌بندی‌کننده، درختان تصادفی بردار ویژگی ورودی را می‌گیرد، آن را با هر درخت در جنگل، طبقه‌بندی می‌کند و برچسب کلاسی را که اکثریت «رای» را دریافت کرده است، به‌عنوان خروجی به ما می‌دهد. در مورد رگرسیون، پاسخ طبقه‌بندی‌کننده، میانگین پاسخ‌ها در تمام درختان جنگل است. همه درختان با پارامترهای یکسان اما در مجموعه‌های آموزشی متفاوت آموزش داده می‌شوند (Ajayram 2021). برای ساختن یک درخت تصادفی، سه انتخاب اصلی وجود دارد که عبارتند از: روش تقسیم برگ‌ها، نوع پیش‌بینی‌کننده برای استفاده در هر برگ و روش تزریق تصادفی به درختان. یک تکنیک رایجی که برای معرفی تصادفی بودن در یک درخت می‌توان به آن اشاره کرد؛ ساخت هر درخت با استفاده از یک مجموعه داده بوت استرپ یا زیر نمونه‌برداری است.

در پژوهش حاضر برای محاسبه شاخص WQI از پارامترهای کیفی ایستگاه هیدرومتری باغ کلایه شامل سختی کل (TH)، قلیائیت (pH)، هدایت الکتریکی (EC)، کل مواد جامد محلول (TDS)، کلسیم (Ca)، سدیم (Na)، منیزیم (Mg)، پتاسیم (K)، کلر (Cl)، کربنات ( $CO_3$ )، بی‌کربنات ( $HCO_3$ ) و سولفات ( $SO_4$ ) در دوره آماری ۲۳ ساله (۱۹۹۸-۲۰۲۰) استفاده شد. مشخصات آماری متغیرهای مورد استفاده در جدول ۱ ارائه گردید.

مقادیر کمی محاسبه شده با شاخص WQI به‌عنوان خروجی‌های هدف مدل درخت تصمیم در نظر گرفته شدند. با استفاده از روش رلیف و همبستگی، انواع ترکیب‌های ورودی مشخص گردید. این ترکیب‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. کیرا و رندل (Kira and Rendell, 1992) استفاده از الگوریتم رلیف را که یک الگوریتم انتخاب ویژگی برای کاهش ابعاد مسئله پیشنهاد دادند. این الگوریتم نکات قوتی دارد که می‌توان به ساده بودن اصول و عدم پیچیدگی آن، قابل حل بودن با توابع چندجمله‌ای مرتبه پایین، قابل استفاده بودن برای داده‌های پیوسته و نیاز به تعداد کم داده‌های آموزشی اشاره کرد. در یک مجموعه داده با تعداد  $N$  نمونه (داده مشاهده‌ای) و تعداد  $P$  ویژگی که مربوط به دو طبقه مختلف هستند، هر ویژگی باید در بازه  $(0, 1)$  قرار گیرد. الگوریتم مذکور،  $m$  بار تکرار شده و در هر مرتبه از یک بردار وزنی متفاوت که از صفر شروع می‌گردد، استفاده می‌کند. در هر تکرار، الگوریتم مذکور بردار ویژگی  $X$  را که متعلق به یک نمونه تصادفی است و بردارهای ویژگی نزدیک‌ترین نمونه به نمونه  $X$  در طبقه مورد نظر را توسط تابع فاصله اقلیدسی<sup>۲</sup> انتخاب می‌کند. پس از  $m$  تکرار، هر یک از عناصر بردار وزن توسط  $m$  تقسیم‌بندی می‌شوند. نتیجه این عمل این است که یک بردار مرتبط به دست می‌آید؛ چنانچه مقدار بردار مرتبط یک ویژگی، از آستانه تعریف شده بیشتر گردد، آن ویژگی انتخاب می‌گردد. از بین داده‌های موجود، ۷۰٪ برای واسنجی و ۳۰٪ برای صحت‌سنجی در نظر گرفته شدند. برای برآورد مقادیر عددی شاخص WQI از روش درخت تصادفی<sup>۳</sup> استفاده شد. سپس قابلیت رویکرد پیش‌پردازش Bagging، تبدیل مویک و تحلیل مؤلفه اصلی ارزیابی شد.

### روش‌های مورد مطالعه

#### شاخص کیفیت آب شرب

از زمان هورتون در سال ۱۹۶۵، بسیاری از نویسندگان به دنبال تجمیع متغیرهای مختلف توصیف‌کننده وضعیت آب در یک مقدار

- 1- Relief
- 2- Euclidean Distance Function
- 3- Random Tree

جدول ۲- پارامترهای دخیل در هر سناریو و روش انتخاب سناریوها

Table 2- The parameters involved in each scenario and the method of selecting scenarios

روش انتخاب سناریو (Scenario selection method)	ورودی (Input)	شماره سناریو (Scenario Number)
Correlation Matrix	TH	1
	TH, EC	2
	TH, EC, TDS	3
	TH, EC, TDS, SO <sub>4</sub>	4
	TH, EC, TDS, SO <sub>4</sub> , Ca	5
	TH, EC, TDS, SO <sub>4</sub> , Ca, HCO <sub>3</sub>	6
	TH, EC, TDS, SO <sub>4</sub> , Ca, HCO <sub>3</sub> , Mg	7
	TH, EC, TDS, SO <sub>4</sub> , Ca, HCO <sub>3</sub> , Mg, Cl	8
	TH, EC, TDS, SO <sub>4</sub> , Ca, HCO <sub>3</sub> , Mg, Cl, Na	9
	TH, EC, TDS, SO <sub>4</sub> , Ca, HCO <sub>3</sub> , Mg, Cl, Na, K	10
	TH, EC, TDS, SO <sub>4</sub> , Ca, HCO <sub>3</sub> , Mg, Cl, Na, K, CO <sub>3</sub>	11
	TH, EC, TDS, SO <sub>4</sub> , Ca, HCO <sub>3</sub> , Mg, Cl, Na, K, CO <sub>3</sub> , PH	12
Relief	TH, K	13
	TH, K, SO <sub>4</sub>	14
	TH, K, SO <sub>4</sub> , TDS	15
	TH, K, SO <sub>4</sub> , TDS, EC	16

برخی از نمونه‌های جمعیت مرجع، چندین بار در یک مجموعه بوت استرپ ظاهر شوند؛ اما برخی دیگر اصلاً انتخاب نشوند. تعداد مشاهدات، در بوت استرپ‌ها یکسان است؛ ولی هر مجموعه بوت استرپ از دیگری متفاوت خواهد بود (Kheirabadi et al., 2017). خروجی‌های این یادگیرندگان پایه با رأی اکثریت (برای طبقه‌بندی) یا میانگین‌گیری (برای رگرسیون) برای به‌دست آوردن خروجی نهایی جمع می‌شوند. چنان‌چه یادگیرندگان پایه در یک گروه، دقیق و متنوع باشند، می‌توان به عملکردی بهتر و قوی‌تر دست یافت. در ادبیات علم داده و داده‌کاوی روش دسته‌بندی یا Bagging یکی از روش‌های یادگیری جمعی<sup>۲</sup> است. منظور از روش دسته‌بندی یا Bagging میانگین‌گیری از نتیجه پیش‌بینی چندین روش طبقه‌بندی است تا دقت پیش‌بینی‌ها افزایش یابد (Breiman, 1996).

### تبدیل موجک

موجک<sup>۳</sup> دسته‌ای از توابع ریاضی، برای تجزیه سیگنال پیوسته به مؤلفه‌های فرکانسی آن است. در تبدیل موجک، سطح تفکیک هر مؤلفه برابر با مقیاس آن در نظر گرفته می‌شود. تبدیل موجک تجزیه یک تابع بر مبنای توابع موجک است. موجک‌ها که به‌عنوان موجک‌های مادر شناخته می‌شوند؛ نمونه‌های انتقال‌یافته و مقیاس‌شده یک تابع (موجک مادر) با طول متناهی و نوسانی شدیداً میرا هستند. تابع موجک، تابعی است که دو ویژگی مهم نوسانی بودن و کوتاه‌مدت بودن را دارد (Lau and Weng, 1995). موجک‌ها یکی از ساده‌ترین روش‌ها و موجک متعارف پرکاربرد با پشتیبانی فشرده است که

جدول ۳- طبقه بندی کیفیت آب بر اساس ارزش WQI

Table 3- Water quality classification based on WQI value

طبقه‌بندی کیفیت آب آشامیدنی Classification of Drinking Water Quality		
نوع آب (Type of Water)	کلاس (Class)	دامنه WQI (WQI Range)
عالی (Excellent water)	I	below 50 (زیر ۵۰)
خوب (Good water)	II	50-100
ضعیف (Poor water)	III	100-200
خیلی ضعیف (Very poor water)	IV	200-300
غیر قابل شرب (Water unsuitable for drinking)	V	above 300 (بالای ۳۰۰)

به این ترتیب، هر درخت در جنگل، بر روی داده‌های کمی متفاوتی آموزش داده می‌شود، که تفاوت‌های بین درختان را معرفی می‌کند (Denil et al., 2014).

### روش دسته‌بندی

اولین بار، بریمن در سال ۱۹۹۶ روش دسته‌بندی را ارائه داد، در این روش، چندین یادگیر پایه به‌صورت موازی به هم متصل می‌شوند تا واریانس مجموعه کاهش یابد. هر یادگیر پایه با استفاده از الگوریتم یادگیری یکسان بر روی یک نسخه بوت استرپ<sup>۱</sup> آموزش می‌بیند. مجموعه داده بوت استرپ، مجموعه‌ای است که به‌طور تصادفی و همراه با جایگزینی تمام اطلاعات مربوط به یکی از افراد جمعیت مرجع، استخراج می‌شود. این فرآیند تا زمان یکسان شدن تعداد مشاهدات مجموعه جدید با جمعیت مرجع ادامه پیدا می‌کند. به‌دلیل دادن شانس انتخاب مجدد به هر نمونه از جمعیت اصلی، ممکن است

2- Ensemble

3- Wavelet

1- Bootstrap

### معیارهای ارزیابی

برای مقایسه مقادیر به دست آمده از روش‌های داده‌کاوی با مقادیر محاسبه شده از شاخص WQI از معیارهای ارزیابی ضریب همبستگی (R)، ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup> (RMSE)، میانگین خطای مطلق<sup>۳</sup> (MAE) و ضریب ویلموت اصلاح شده<sup>۴</sup> (Dr) استفاده شد. فرمول‌های آماره‌های فوق به ترتیب در روابط (۵) تا (۸) ارائه گردیده است:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N |y_i - x_i| \quad (7)$$

$$Dr = \begin{cases} \frac{C \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}|}{\sum_{i=1}^N |y_i - x_i|} - 1 & \text{when } \sum_{i=1}^N |y_i - x_i| > C \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}| \\ 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - x_i|}{C \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}|} & \text{when } \sum_{i=1}^N |y_i - x_i| \leq C \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}| \end{cases} \quad (8)$$

در روابط فوق،  $y_i$  مقدار برآورد شده از مدل،  $x_i$  مقدار محاسبه شده از شاخص کیفی آب و  $N$  تعداد داده‌ها می‌باشند. با استفاده از نرم‌افزار Visio 2016 روندنمای مراحل انجام تحقیق ترسیم و در شکل ۲ نشان داده شد.

### نتایج و بحث

در پژوهش حاضر برای برآورد مقادیر کمی WQI، از پارامترهای  $TH$ ،  $pH$ ،  $EC$ ،  $TDS$ ،  $Ca$ ،  $Na$ ،  $Mg$ ،  $K$ ،  $Cl$ ،  $CO_3$ ،  $HCO_3$  و  $SO_4$  ایستگاه هیدرومتری باغ کلاویه در دوره آماری ۲۳ ساله استفاده شد. روش رلیف و همبستگی برای انتخاب ترکیب‌های ورودی مختلف به کار برده شد. مدل‌سازی برای برآورد مقادیر کمی WQI با روش درخت تصادفی انجام شد، سپس کارایی رویکرد پیش‌پردازش

از نظر ریاضی در بین همه خانواده‌ها موجک‌ها ساده است. موجک‌ها بر اساس جفت توابع تکه‌ای ثابت، ساخته شده است که به راحتی ادغام می‌شوند. ویژگی‌های شناخته شده موجک‌ها، عبارات صریح برای توابع موجک و مقیاس است. همچنین متعامد بودن، پشتیبانی فشرده و پراکندگی ماتریس‌ها از دیگر ویژگی‌های موجک‌ها در نظر گرفته می‌شود (Vishwanath et al., 2021). در پژوهش حاضر از تبدیل موجک‌ها<sup>۱</sup> استفاده شده است. تعداد موجک‌ها ایجادشده تابعی از تعداد پارامترهای ورودی مدل می‌باشد. به عنوان مثال وقتی تعداد پارامترهای ورودی چهار تا باشد، در آن صورت به تعداد ۴ مورد‌ها ایجاد می‌شود؛ اما وقتی تعداد پارامتر ورودی ۵ تا باشد، تعداد‌ها ایجادشده برابر ۸ خواهد بود. به عبارت دیگر تعداد موجک‌ها، توانی از ۲ در نظر گرفته می‌شود (Haar, 1910).

### روش تحلیل مؤلفه اصلی

تحلیل مؤلفه اصلی از جمله روش‌های آماری چند پارامتریست که با برقراری یک ارتباط خطی بین ویژگی‌های متغیرهای ورودی اولیه مدل، از حجم اطلاعات ورودی کاسته و مؤثرترین بردارهای با ضریب همبستگی صفر را انتخاب می‌کند. یک مؤلفه اصلی را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$\begin{aligned} PC_1 &= a_1^1 A_1 + a_1^2 D_1 + a_1^n X_n \\ PC_2 &= a_2^1 A_1 + a_2^2 D_1 + a_2^n X_n \\ &: \end{aligned} \quad (4)$$

$$PC_n = a_n^1 A_1 + a_n^2 D_1 + a_n^n X_n$$

در روابط فوق پارامترهای  $PC_1$  تا  $PC_n$  تعداد مؤلفه‌های اصلی،  $a_i^j$  ضریب  $i$  آمین مؤلفه اصلی و  $Z$  آمین متغیر را نشان می‌دهند (Abdi and Williams, 2010).

در تکنیک PCA با استفاده از یک تبدیل خطی، داده‌ها از داده‌های چندبعدی به مختصات دیگر منتقل می‌شوند. این انتقال بر اساس حداکثر واریانس و حداقل ارتباط انجام خواهد شد. بدین منظور ابتدا ماتریس کواریانس داده‌ها تشکیل شده و سپس مقادیر ویژه و بردارهای ویژه ماتریس استخراج گردیده و مرتب می‌شوند. سرانجام چند بردار ویژه که بیشترین میزان مقادیر ویژه را دارند، نگه داشته شده و بقیه حذف می‌شوند. کاهش داده سبب سادگی مدل پیشگو شده و زمان پردازش داده‌ها نیز کمتر خواهد شد (Mat Nawi et al., 2013).

2- Root Mean Square Error

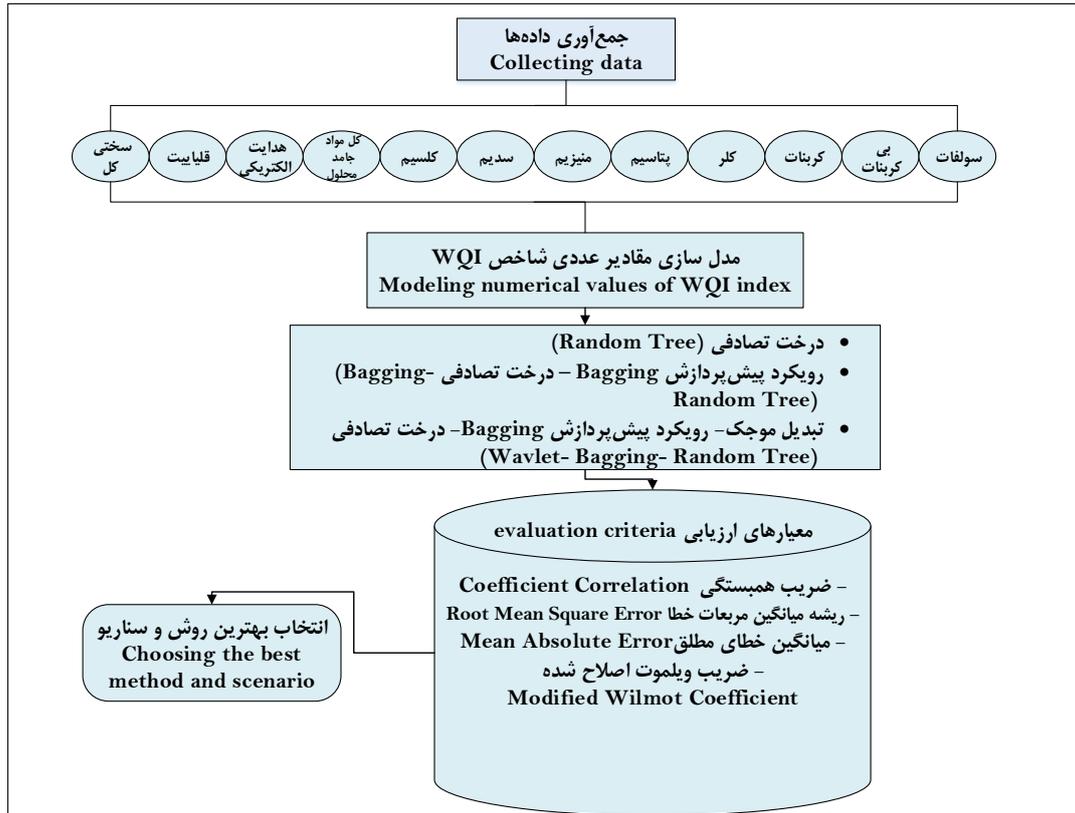
3- Mean Absolute Error

4- Modified Wilmot Coefficient

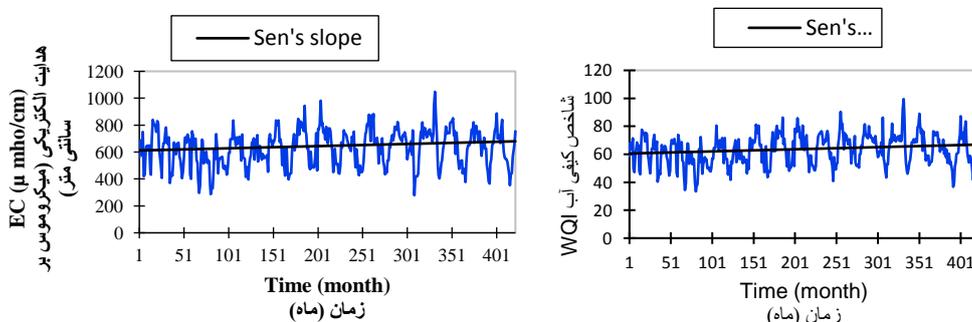
1- Haar

میزان شوری آن به مرور زمان، افزایش یافته است. بنابراین یکی از دلایل کاهش کیفیت آب در این ایستگاه را می‌توان افزایش شوری آب در نظر گرفت. جهت بررسی چگونگی نوسانات توام شاخص کیفی آب با مقدار هدایت الکتریکی، شاخص شیب Sen در محیط نرم‌افزار اکسل استت محاسبه و شکل ۳ رسم گردید. نتایج نشان داد که هر دو پارامتر از روند نسبی افزایشی برخوردار می‌باشند و این موضوع حکایت از کاهش نسبی کیفیت آب با هدف شرب در منطقه مورد مطالعه دارد.

Bagging، تبدیل مویک، و PCA در جهت بهبود نتایج مدل‌سازی، بررسی شد. از بین ۴۲۲ نمونه مشاهداتی، ۷۰ درصد (۲۹۵ نمونه) برای آموزش و ۳۰ درصد (۱۲۷ نمونه) برای آزمون در نظر گرفته شد. بررسی روند مقادیر عددی شاخص WQI، نشان داد که این شاخص، روندی افزایشی داشته و در گذر زمان با افزایش مقدار عددی آن، کیفیت آب شرب ایستگاه مورد مطالعه کمتر شده است. پس از بررسی پارامترهای تاثیرگذار در کیفیت آب شرب، مشخص گردید که مقدار هدایت الکتریکی باغ کلايه نیز روند افزایشی داشته و در نتیجه



شکل ۲- شمای کلی مراحل انجام تحقیق  
Figure 2- Outline of the research processes



شکل ۳- نمودار سری زمانی هدایت الکتریکی و شاخص WQI  
Figure 3- Time series chart of electrical conductivity and WQI index

جدول ۴- معیارهای ارزیابی برای برآورد مقادیر کمی WQI در بخش آزمون

Table 4- Evaluation criteria for estimating quantitative WQI values in the test section

Scenario	Method											
	RT				B-RT				W-B-RT			
	R	RMSE	MAE	Dr	R	RMSE	MAE	Dr	R	RMSE	MAE	Dr
1	0.94	3.63	2.65	0.90	0.95	3.45	2.54	0.91	0.95	3.11	2.37	0.92
2	0.92	4.21	2.89	0.89	0.93	4.01	2.66	0.90	0.96	2.80	1.99	0.95
3	0.89	4.85	3.19	0.86	0.95	3.55	2.34	0.92	0.97	2.67	1.77	0.96
4	0.91	4.30	2.77	0.89	0.94	3.56	2.32	0.93	0.97	2.77	1.90	0.95
5	0.89	4.89	3.06	0.87	0.95	3.37	2.19	0.93	0.96	3.06	2.13	0.94
6	0.93	3.98	2.60	0.91	0.97	2.80	1.86	0.95	0.98	2.28	1.48	0.97
7	0.94	3.64	2.68	0.90	0.97	2.77	1.74	0.96	0.98	2.39	1.38	0.97
8	0.93	3.77	2.68	0.90	0.96	3.15	2.03	0.94	0.97	2.74	1.78	0.96
9	0.94	3.50	2.52	0.91	0.96	2.87	1.87	0.95	0.97	2.71	1.69	0.96
10	0.94	3.74	2.61	0.91	0.97	2.79	1.85	0.95	0.98	2.29	1.46	0.97
11	0.96	2.90	2.17	0.93	0.97	2.45	1.63	0.96	0.98	2.34	1.59	0.96
12	0.91	4.32	2.91	0.88	0.97	2.58	1.69	0.96	0.98	2.29	1.47	0.97
13	0.73	7.44	4.10	0.77	0.86	5.52	3.73	0.81	0.95	3.16	2.42	0.92
14	0.82	6.30	3.74	0.81	0.91	4.38	3.03	0.87	0.95	3.21	2.23	0.93
15	0.89	4.87	3.03	0.87	0.95	3.59	2.35	0.92	0.97	2.76	2.01	0.94
16	0.92	4.22	2.70	0.90	0.96	3.14	2.05	0.92	0.98	2.44	1.73	0.96

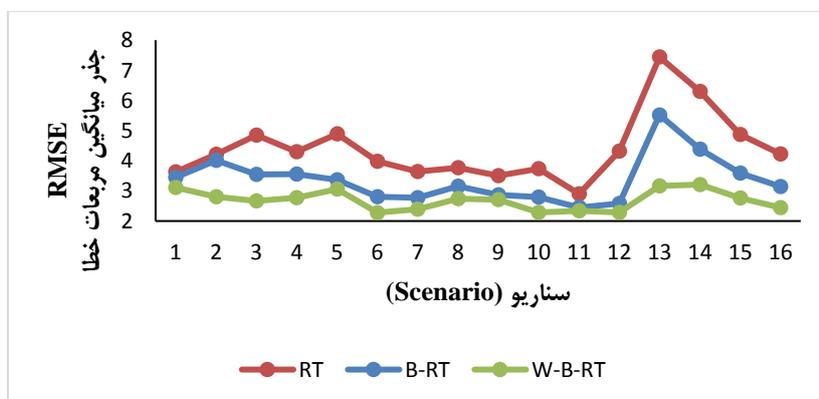
ترکیب روش RT با رویکرد پیش‌پردازش Bagging و تبدیل موجک، مقدار R به ترتیب برابر ۰/۹۷ و ۰/۹۸ شده است که نشان از افزایش دقت مدل دارد. بهترین سناریو با بالاترین دقت و کمترین خطا مربوط به سناریو ۱۰ مدل W- B- RT با پارامترهای TH, EC, TDS, SO<sub>4</sub>, Ca, HCO<sub>3</sub>, Mg, Cl, Na, K است. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر pH در برآورد مقدار عددی شاخص WQI کمتر از سایر پارامترها در نظر گرفته می‌شود. سناریو ۱ با یک ورودی (TH) دقت بالاتری از سناریو ۱۳ با دو ورودی (TH, K) داشته است. یعنی تأثیر پارامتر TH بیشتر از K بوده است.

برای درک بهتر تفاوت بین نتایج سناریوهای مختلف، مقدار خطای RMSE تمام سناریوهای مورد مطالعه در هر سه روش، در شکل ۴ نشان داده شد.

در ابتدا برای بهبود نتایج مدل‌سازی با روش RT از رویکردهای پیش‌پردازش Bagging و تبدیل موجک استفاده شد. نتایج به دست آمده از مدل‌سازی کمی WQI در جدول ۴ آورده شد.

با توجه به جدول ۴، نتیجه گرفته شد که استفاده از رویکرد پیش‌پردازش Bagging و تبدیل موجک باعث بهبود نتایج مدل‌سازی شده است. با توجه به این‌که رویکرد پیش‌پردازش Bagging با الگوریتم پایه درخت تصادفی، ترکیبی از نتایج چندین درخت تصادفی است، بنابراین استفاده از این روش، باعث افزایش دقت مدل RT شده است. پس به‌طور کلی نتیجه گرفته شد که استفاده از روش تبدیل موجک و دسته‌بندی، باعث افزایش دقت و کاهش خطا می‌شود.

از بین ترکیب‌های ورودی مورد مطالعه، تمامی ترکیب‌ها دقت قابل قبولی را داشتند. در روش RT سناریو ۱۱ شامل پارامترهای TH, EC, TDS, SO<sub>4</sub>, Ca, HCO<sub>3</sub>, Mg, Cl, Na, K, CO<sub>3</sub> با R=0.96 بالاترین دقت را در برآورد مقدار WQI داشته است. با



شکل ۴- مقادیر خطای RMSE روش‌های مورد مطالعه

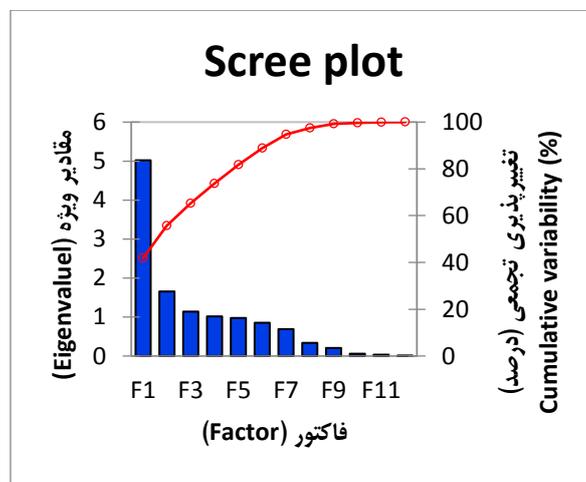
Figure 4- RMSE error of the studied methods

در نهایت عامل اصلی و تأثیرگذار استخراج شده از PCA، به‌عنوان ورودی روش Bagging با الگوریتم پایه RT در نظر گرفته شد. مقادیر ارزش ویژه و حالت تجمعی آن در نمودار Scree Plot نشان داده شد (شکل ۵). با توجه به این شکل نیز می‌توان نتیجه گرفت که از F1 به F12 با کاهش مقدار ارزش ویژه، تأثیر و ارزش عامل نیز کم شده است؛ بنابراین عامل F1، F2 و F3 به‌عنوان مؤلفه‌های اساسی انتخاب شدند.

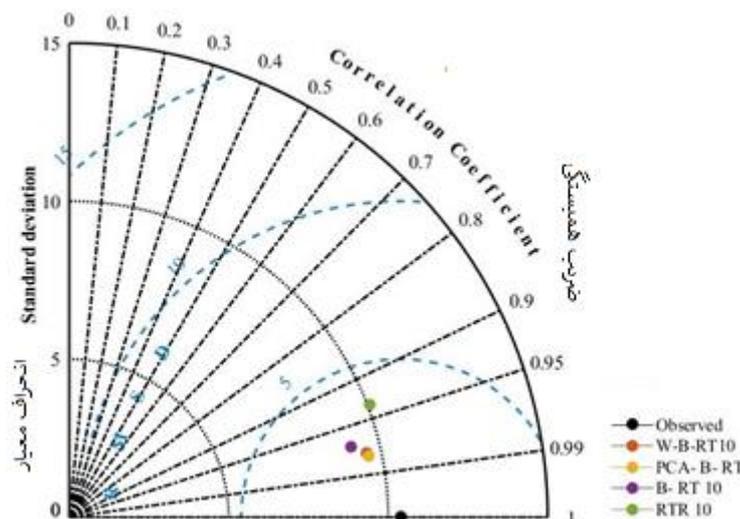
با در نظر گرفتن ۳ عامل اصلی، مدل‌سازی انجام شد و مقدار  $R=0.98$ ،  $RMSE=2.17$ ،  $MAE=1.52$  و  $Dr=0.97$  به دست آمد.

همان‌طور که از جدول ۴ نیز مشاهده می‌شود؛ سناریو ۱۰ در روش W- B- RT کمترین مقدار RMSE را دارد که مقدار آن برابر است. سناریوهای انتخاب شده با استفاده از روش همبستگی، نتایج بهتری از روش رلیف داشتند. می‌توان نتیجه گرفت که وجود همبستگی بین پارامترهای شیمیایی تأثیر به‌سزایی در مدل‌سازی عددی شاخص WQI دارد.

یکی دیگر از کارهایی که در پژوهش حاضر برای بهبود نتایج مدل‌سازی انجام شد، به‌کارگیری روش تحلیل مؤلفه اصلی بود. به کمک روش PCA، مؤثرترین ترکیبات خطی از پارامترهای ورودی شناسایی شده و به‌عنوان بردارهای ورودی، مورد استفاده قرار گرفتند.



شکل ۵- نمودار Scree Plot پارامترهای شیمیایی مورد مطالعه  
Figure 5- Scree plot diagram of the studied chemical parameters



شکل ۶- دیاگرام تیلور برای بررسی تأثیر تبدیل موجک، رویکرد پیش‌پردازش Bagging و تحلیل مؤلفه اصلی

Figure 6- Taylor diagram to investigate the effect of wavelet transform, Bagging method and principal component analysis

شد.

با توجه به شکل ۷، برآورد مقادیر حداقل و حداکثر شاخص WQI در مدل PCA-B-RT بهتر از مدل W-B-RT بوده است. همچنین بیشترین فراوانی WQI (بیشترین عرض نمودار ویلونی) در هر دو روش، حول چارک سوم تغییر نموده و نزدیک به مقادیر مشاهده‌ای برآورد شده است.

برای نشان دادن بهتر تغییرات داده‌های مشاهده‌ای و مدل برتر (PCA-B-RT) در شکل ۸ نمودار سری زمانی ارائه شد.

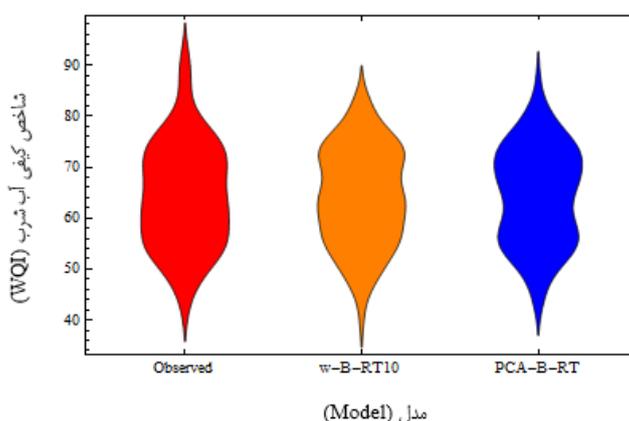
همان طور که از شکل ۸ مشخص است، روش مذکور با دقت بالایی شاخص WQI را برآورد کرده است.

بررسی منابع نشان می‌دهد، از روش‌های داده‌محور در مدل‌سازی کیفی آب به کرات استفاده گردیده و اکثر محققین بر توانمندی این مدل‌ها تاکید نموده‌اند.

همان طور که اشاره شد، سناریوی ۱۰ روش ترکیبی W-B-RT و روش PCA-B-RT بالاترین دقت و کمترین خطا را داشتند. برای نشان دادن بهتر تأثیر استفاده از رویکرد پیش‌پردازش Bagging و تبدیل موجک در سناریو ۱۰ و همچنین تأثیر روش تحلیل مؤلفه اصلی، در شکل ۶ دیاگرام تیلور روش‌های مذکور، ترسیم گردید.

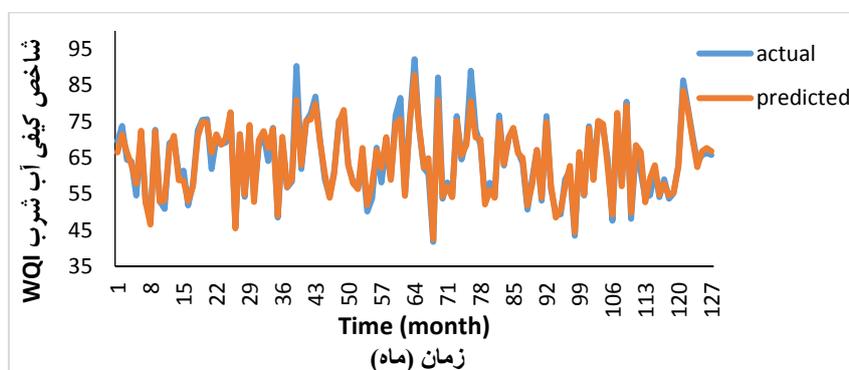
با توجه به شکل ۶، ملاحظه گردید که استفاده از رویکرد پیش‌پردازش Bagging و تبدیل موجک، باعث بهبود نتایج درخت تصادفی شده است. همچنین در حالت کلی نتایج نشان داد که روش PCA علی‌رغم کاهش بعد بردارهای ورودی و ساده‌سازی آن، می‌تواند دقت و سرعت عملکرد مدل را ارتقا بخشد و به‌عنوان بهترین روش برای تخمین مقدار عددی شاخص WQI معرفی شود.

در شکل ۷ نیز نمودار ویلونی برای مقادیر شاخص WQI که به‌عنوان مقادیر مشاهده‌ای در نظر گرفته شدند؛ سناریوی برتر روش ترکیبی W-B-RT (سناریو ۱۰ شامل پارامترهای TH, EC, TDS, SO<sub>4</sub>, Ca, HCO<sub>3</sub>, Mg, Cl, Na, K) و روش PCA-B-RT رسم



شکل ۷- نمودار ویلونی سناریو برتر روش ترکیبی W-B-RT و روش PCA-B-RT

Figure 7- Villon diagram of the best scenario of the combined W-B-RT method and PCA-B-RT method



شکل ۸- نمودار سری زمانی داده‌های مشاهده‌ای و مدل برتر

Figure 8- Time series plot of observational data and superior model

در پژوهش حاضر، کیفیت آب ایستگاه هیدرومتری باغ کلاویه مورد بررسی قرار گرفت. برای طبقه‌بندی کمی آب از ۱۲ پارامتر شیمیایی شامل pH، EC، TDS، Ca، Na، Mg، K، Cl، CO<sub>3</sub>، HCO<sub>3</sub> و SO<sub>4</sub> در دوره آماری ۲۳ ساله در سناریوهای مختلف استفاده شد. ابتدا مقادیر کمی شاخص WQI محاسبه شد. پس از بررسی روند مقادیر عددی شاخص WQI، مشخص شد که این شاخص، روندی افزایشی داشته و در گذر زمان با افزایش مقدار عددی آن، کیفیت آب شرب ایستگاه مورد مطالعه کمتر شده است. با توجه به روند افزایشی هدایت الکتریکی در ایستگاه مورد مطالعه، نتیجه گرفته شد که افزایش شوری آب، می‌تواند به‌عنوان یکی از دلایل کاهش کیفیت آب در نظر گرفته شود. برآورد مقادیر عددی شاخص WQI با استفاده از روش درخت تصادفی انجام شد؛ همچنین تأثیر استفاده از رویکرد پیش‌پردازش Bagging، تبدیل موجک و تحلیل مؤلفه اصلی در بهبود نتایج، بررسی شد. ارزیابی روش‌ها با آماره‌های ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین خطای مطلق و ضریب ویلموت اصلاح شده انجام گرفت. نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر، نشان داد که استفاده از رویکرد پیش‌پردازش Bagging، تبدیل موجک و PCA در بهبود نتایج و افزایش دقت، تأثیر مثبتی داشتند. در برآورد مقادیر عددی شاخص WQI، روش PCA- B- RT با در نظر گرفتن ۳ عامل اصلی، بالاترین دقت را داشت. با توجه به این‌که تمام روش‌های مورد استفاده در برآورد مقادیر کمی، دقت قابل قبولی داشتند، لذا در صورت کمبود داده و عدم دسترسی به تمام پارامترهای شیمیایی، می‌توان با استفاده از تعداد محدودی از پارامترها و روش‌های داده‌کاوی، نتایج مناسب و قابل قبولی را به دست آورد. با توجه به محدودیت تهیه داده و محدودیت صفحات، این مطالعه روی یک ایستگاه انجام گرفته است. جهت ارزیابی‌های دقیق‌تر، مطالعه روی ایستگاه متفاوت با طول دوره آماری زیاد منجر به نتایج جامع‌تر و کامل‌تری خواهد شد. این مطالعه در اقلیم خشک و نیمه‌خشک انجام گرفت در حالی که مطالعه روی اقلیم‌های متفاوت باعث ارائه نتایج تکمیلی می‌گردد. امکان استفاده از همه مدل‌ها از جمله مدل‌های یادگیری عمیق، برنامه‌ریزی بیان ژن و مقایسه آن‌ها وجود نداشت. لذا پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی، این روش‌ها نیز مورد توجه قرار گیرند.

آل مختار و یاسین (Al- Mukhtar and Al- Yaseen, 2019)، ستاری و همکاران (Sattari et al., 2017)، ضمن انجام مطالعاتی مشابه با مطالعه حاضر در حالت کلی به این نتیجه رسیدند که با عنایت به عملکرد مطلوب مدل‌های داده‌محور در مدل‌سازی پارامترهای کیفی آب، استفاده از این روش‌ها برای موارد مشابه قابل توصیه است. همچنین سلگی و همکاران (Solgi et al., 2017) برای تحلیل کیفیت آب رودخانه کارون واقع در غرب ایران طی مطالعه‌ای به مدل‌سازی و پیش‌بینی اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که مدل SVM با ضریب تبیین ۰/۸۴ و جذر میانگین مربعات خطای ۰/۳۳۸ میلی‌گرم بر لیتر عملکرد نسبتاً مطلوبی ارائه می‌کند. ایشان پس از اعمال تبدیل موجک روی داده‌های ورودی مدل، باعث شدند تا ضریب تبیین افزایش و به مقدار ۰/۹۴ و جذر میانگین مربعات خطا کاهش و به مقدار ۰/۲۱۰ میلی‌گرم بر لیتر برسد. بنابراین آن‌ها نتیجه گرفتند که ترکیب ماشین بردار پشتیبان با تبدیل موجک باعث بهبود نتایج پیش‌بینی مقدار BOD در رودخانه کارون می‌گردد. کرباسی و دیندار (Karbasi and Dindar, 2019) نیز برای پیش‌بینی هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم در رودخانه زاینده‌رود مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی MLP و GMD را به صورت ترکیبی و همراه با تبدیل موجک به کار بردند. نتایج به دست آمده از تحقیق آن‌ها نیز بیانگر بهبود عملکرد مدل‌ها در اثر استفاده از تبدیل موجک بود. همچنان که ملاحظه می‌گردد، با مقایسه نتایج تحقیق حاضر با سایر تحقیقات انجام یافته می‌توان دریافت که استفاده از تبدیل موجک و روش‌های داده‌مبنا نتایج قابل قبولی در بررسی کیفیت آب‌های سطحی داشته است. تفاوت تحقیق حاضر با سایر تحقیقات انجام شده در انتخاب نوع پارامتر هدف مورد مطالعه برای بررسی کیفیت آب بوده است. در تحقیقات بررسی شده فوق پارامترهایی از جمله اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی، هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم با استفاده از روش‌های داده‌مبنا مدل‌سازی شده و تأثیر تبدیل موجک در بهبود نتایج مورد بررسی قرار گرفته است؛ اما در این پژوهش ابتدا شاخص کیفی آب با استفاده از ۱۲ پارامتر شیمیایی محاسبه شده و سپس با روش‌های داده‌مبنا مدل‌سازی شده و همانند تحقیقات مشابه فوق‌الذکر تأثیر تبدیل موجک در بهبود نتایج مورد ارزیابی و تأکید قرار گرفته است.

## نتیجه‌گیری

## منابع

1. Abdi, H., & Williams, L.J. (2010). Principal component analysis, Wiley interdisciplinary reviews: *Computational Statistics* 2(4): 433-459.
2. Ajayram, K.A., Jegadeeshwaran, R., Sakthivel, G., Sivakumar, R., & Patange, A.D. (2021). *Condition monitoring*

- of carbide and non-carbide coated tool insert using decision tree and random tree – A statistical learning.* Materials Today. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.065>.
3. Al-Mukhtar, M., & Al-Yaseen, F. (2019). Modeling water quality parameters using data-driven models, a case study Abu-Ziriq Marsh in South of Iraq. *Hydrology* 6(24). <https://doi.org/10.3390/hydrology6010024>.
  4. Batur, E., & Maktav, D. (2019). Assessment of surface water quality by using satellite images fusion based on PCA method in the Lake Gala, Turkey. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 57(5): 2983–2989. <http://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2879024>.
  5. Breiman, L. (1996). Bagging predictors. *Machine Learning* 24: 123–140.
  6. Chen, K., Chen, H., Zhou, C., Huang, Y., Qi, X., Shen, R., & Ren, H. (2020). Comparative analysis of surface water quality prediction performance and identification of key water parameters using different machine learning models based on big data. *Water Research* 115454. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115454>.
  7. Denil, M., Matheson, D., & de Freitas, N. (2014). *Narrowing the Gap: Random Forests in Theory and in Practice*. Proceedings of the 31<sup>st</sup> International Conference on Machine Learning, Beijing, China. JMLR: W and P. Vol.32. 9 pages.
  8. Hameed, M., Shargi, S., Yaseen, Z., Afan, H., Hussain, A., & Elshafie A. (2017). Application of artificial intelligence (AI) techniques in water quality index prediction: a case study in a tropical region, Malaysia. *Neural Computing and Applications* 28: 893-905. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2404-7>.
  9. Haar, A. (1910). The theory of orthogonal function systems. *Mathematical Annals* 69(3): 331-371. <http://doi.org/10.1007/BF01456326>.
  10. Hosseini, H., Shakeri, A., Rezaei, M., Dashti Barmaki, M., & Shahraki, M. (2019). Application of water quality index (WQI) and hydro-geochemistry for surface water quality assessment, Chahnimeh reservoirs in the Sistan and Baluchestan Province. *Iranian Journal of Health and Environment* 11(4): 575-586.
  11. Karbasi, M., & Dindar, S. (2019). Comparison of wavelet-MLP and wavelet-GMDH models in forecasting EC and SAR at Zayandeh-Rood River. *Environmental Sciences* 16(4): 135-152. (In Persian with English abstract)
  12. Kavita, D., & Jagdish, S. (2012). *Water resources management and water quality, case of Bhopa 1%*, International Conference on Chemical, Ecology and Environmental Sciences (ICEES'2012) 17-18march, Bangkok.
  13. Khalil, B., Ouarda, T., & St-Hilaire, A. (2011). Estimation of water quality characteristics at ungauged sites using artificial neural networks and canonical correlation analysis. *Journal of Hydrology* 405: 277–287.
  14. Kheirabadi, Kh., Fayazi, J., Roshanfekar, H., & Abdollahi-Arpanahi, R. (2017). Evaluation of the effectiveness of bootstrap aggregating sampling technique in the accuracy of the genomic best linear unbiased prediction method. *Iranian Journal of Animal Science* 48(4): 573-584. <http://doi.org/10.22059/ijas.2018.248547.653596>.
  15. Khoi, D.N., Quan, N.T., Linh, D.Q., Nhi, P.T.T., & Thuy, N.T.D. (2022). Using Machine Learning Models for Predicting the Water Quality Index in the La Buong River, Vietnam. *Water* 14. <https://doi.org/10.3390/w14101552>.
  16. Kira, K., & Rendell, L.A. (1992). *The feature selection problem: traditional methods and a new algorithm*. AAAI-92 Proceedings of the tenth national conference on Artificial intelligence, Menlo Park, California. 129-134.
  17. Kolli, K., & Seshadri, R. (2013). Ground water quality assessment using data mining techniques. *International Journal of Computer Applications* 76(15): 39-45.
  18. Lau, K.M., & Weng, H.Y. (1995). Climate signal detection using wavelet transform, How to make time-series sing, *Bulletin of the American Meteorological Society* 76: 2391-2402.
  19. Mat Nawi, N., Chen, G., Jensen, T., & Abdanan Mehdizadeh, S. (2013). Prediction and classification of sugarcane Brix based on skin scanning using visible and shortwave near infrared. *Biosystems Engineering* 115(2): 154–161.
  20. Nihalani, S.M., & Meeruty, A. (2020). Water quality index evaluation for major rivers in Gujarat. *Environmental Science and Pollution Research* 28: 63523–63531. <http://doi.org/10.1007/s11356-020-10509-5>.
  21. Othman, F., Alaaeldin, M., Seyam, M., Ahmed, A., Teo, F., Ming, Fai, Ch., Afan, H., Sherif, M., Sefelnasr, A., & Shafie, A. (2020). Efficient river water quality index prediction considering a minimal number of inputs variables. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 14(1): 751-763. <https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1760942>.
  22. Sattari, M.T., Mirabbasi, R., & Abbasgholi, M. (2017). The use of data mining in predicting the quality of surface water (case study: the rivers of the northern slopes of Sahand). *Ecohydrology* 4(2): 407-419. (In Persian)
  23. Singh, D.F. (1992). Studies on the water quality index of some major rivers of Pune, Maharashtra. *Proceedings Academy Environmental Biology* 1: 61–66.
  24. Soleimanpour, S.M., Mesbah, S.H., & Hedayati, B. (2018). Application of CART decision tree data mining to determine the most effective drinking water quality factors (case study: Kazeroon plain, Fars province). *Iranian Journal of Health and Environment* 11(1): 1-14. (In Persian with English abstract)
  25. Solgi, A., Pourhaghi, A., Zarei, H., & Ansari, H. (2017). Modeling and forecast biological oxygen demand (BOD) using combination support vector machine with wavelet transform. *Journal of Water and Soil* 31(1): 86-100.
  26. Trabelsi, F., & Hadj Ali, S. (2022). Exploring machine learning models in predicting irrigation groundwater quality indices for effective decision making in Medjerda River Basin, Tunisia. *Sustainability* 14.

<https://doi.org/10.3390/su14042341>.

27. Vishwanath, V., Mahesh Kumar, N., & Wakif, A. (2021). *Haar wavelet scrutinization of heat and mass transfer features during the convective boundary layer flow of a nanofluid moving over a nonlinearly stretching sheet*. *Partial Differential Equations in Applied Mathematics* 4, <https://doi.org/10.1016/j.padiff.2021.100192>.



## Evaluating Reference Evapotranspiration Using Data Mining Methods and Comparing it with the Results of Water Requirement System in Qazvin Province

A. Sedaghat<sup>1\*</sup>, N.A. Ebrahimi Pak<sup>2</sup>, A. Tafteh<sup>3</sup>, S.N. Hosseini<sup>4</sup>

Received: 05-09-2022

Revised: 03-12-2022

Accepted: 06-12-2022

Available Online: 22-02-2023

### How to cite this article:

Sedaghat, A., Ebrahimi Pak, N.A., Tafteh, A., & Hosseini, S.N. (2023). Evaluating Reference Evapotranspiration Using Data Mining Methods and Comparing it with the Results of Water Requirement System in Qazvin Province. *Journal of Water and Soil* 36(6): 711-727. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/jsw.2022.78652.1200](https://doi.org/10.22067/jsw.2022.78652.1200)

### Introduction

The accuracy of determining reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) is an important factor in estimating agricultural and garden water requirements. The complexity of the evapotranspiration process and its dependence on meteorological data have made it difficult to accurately estimate this variable. Non-linearity, inherent uncertainty and the need for diverse climatic information in  $ET_0$  estimation have been the reasons that have made researchers interested in data mining methods such as artificial neural network (ANNs), random forest (RF) and support vector machine (SVM). Dos et al. (2020) evaluated the performance of machine learning methods to estimate daily  $ET_0$  with limited meteorological data. Their results showed that machine learning methods estimate  $ET_0$  with high accuracy, even in the absence of some variables. The use of artificial intelligence models in estimating  $ET_0$  with high accuracy has become popular in recent years, but the complexity of these models makes it difficult to apply them to regions with different climatic conditions (Feng and Tian, 2021). Therefore, the aim of this study is to show that different data mining methods are suitable for daily  $ET_0$  estimation, which can reach a comprehensive and simple model with high accuracy by using minimal weather data.

### Materials and Methods

In this research, the accuracy of data mining methods in estimating  $ET_0$  was evaluated in comparison with the plant water requirement system (FAO-Penman-Monteith standard method). For this purpose, data related to meteorological parameters such as sunshine hour, air temperature, wind speed, and relative humidity air were collected from ten synoptic stations and five climatology stations of Qazvin province in a period of 10 years (1389-1399). The  $ET_0$  extracted from the plant water requirement system was calculated based on the Penman-Moanteith method of FAO 56 and on a daily time scale, which is the actual value (measured) with the estimated values obtained by data mining methods (ANNs, RF and SVM) were evaluated. In order to validate the obtained results, the data of each station was divided into two sets of training (two-thirds of data) and testing (one-third of data). Finally, the generalizability of the mentioned methods in estimating  $ET_0$  was investigated based on NRMSE, R<sup>2</sup>, RMSE, MBE, EF and d Criteria.

### Results and Discussion

1, 2, 3 and 4- Researcher, Associate Professor, Assistant Professor and Researcher of Department of on Farm Water Management, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [Azadehsedaghat65@gmail.com](mailto:Azadehsedaghat65@gmail.com))

The results showed that the  $ET_0$  values of the plant water requirement system have a good correlation with the estimated  $ET_0$  values of ANNs, RF, and SVM methods. In this research, the accuracy of the results of ANNs method was relatively higher than the other two methods. The results of statistical investigations and diagrams showed that ANNs, RF and SVM methods, considering all meteorological parameters (mean air temperature, average relative humidity, sunshine hours and wind speed) as input to the model, in Qazvin synoptic station with altitude 1279 meters and the climatology station of Rajaei power plant with a height of 1318 meters, estimated  $ET_0$  with higher accuracy in both training and testing steps. In the ANNs method, the values of NRMSE and  $R^2$  at Qazvin synoptic station in both training and testing steps are equal to 0.11 and 0.97, respectively, and at Rajaei Power Plant climatology station in both training and testing steps are equal to 0.10 and 0.97, respectively. In this research, the accuracy of estimating the value of  $ET_0$  in two ANNs and RF methods is close to each other and higher than the SVM method. On the other hand, the fitting speed of the ANNs method is very long compared to the RF method, and considering all aspects, it can be said that the RF method has a more suitable approach for estimating the  $ET_0$  value. The results of this research showed that the value of  $ET_0$  is not only based on air temperature, but may change under the influence of other factors such as air pollution, and is also strongly influenced by regional conditions such as topography and altitude.

## Conclusion

The results of this research, in addition to better investigation of  $ET_0$ , help to know more influential factors in each region and can be used in regions with similar climatic conditions. For example, in the current study area, it was found that the role of average air temperature is greater than other climatic parameters and has a greater impact on  $ET_0$ . Therefore, it can be said that increasing the average daily air temperature will increase  $ET_0$  and subsequently increase the water requirement of plants. As a result, by using these methods and paying attention to these points, it is possible to avoid water stress and possible reduction of the production.

**Keywords:** Data mining, Reference evapotranspiration, Water requirement system

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۱، ص. ۷۱۱-۷۲۷

## ارزیابی تبخیرتعرق مرجع با استفاده از روش‌های داده‌کاوی و مقایسه آن با نتایج سامانه نیازآب در استان قزوین

آزاده صداقت<sup>۱\*</sup> - نیازعلی ابراهیمی پاک<sup>۲</sup> - آرش تافته<sup>۳</sup> - سیده نرگس حسینی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۵

### چکیده

برآورد دقیق تبخیرتعرق مرجع ( $ET_0$ ) یکی از عوامل مهم برای محاسبه نیاز آبی و آب مصرفی گیاهان زراعی و باغی است. پیچیدگی فرآیند تبخیرتعرق و وابستگی آن به داده‌های هواشناسی برآورد دقیق این متغیر را دشوار کرده است. ویژگی غیرخطی، عدم قطعیت ذاتی و نیاز به اطلاعات اقلیمی متنوع در برآورد  $ET_0$  از دلایلی بوده‌اند که باعث شده پژوهشگران به‌سوی روش‌های داده‌کاوی همچون شبکه عصبی مصنوعی (ANNs)، جنگل تصادفی (RF) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) روی آورند. در این تحقیق، داده‌های هواشناسی در بازه زمانی ده ساله (۱۳۸۹-۱۳۹۹) از ایستگاه‌های هواشناسی استان قزوین جمع‌آوری شد. ابتدا مقادیر  $ET_0$  در سامانه نیاز آب که از روش پنمن-مانتیت محاسبه شد، استخراج گردید. سپس این مقادیر به‌عنوان مقادیر واقعی (اندازه‌گیری شده) با مقادیر تخمینی بدست آمده با روش‌های داده‌کاوی (ANNs، RF و SVM) ارزیابی شد. جهت اعتبارسنجی نتایج بدست آمده، داده‌های هر ایستگاه به دو مجموعه آموزش (دوسوم داده‌ها) و آزمون (یک‌سوم داده‌ها) تقسیم شدند. نتایج بررسی‌های آماری و دیاگرام نشان دادند، در هر سه روش استفاده شده با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای هواشناسی (میانگین دمای هوا، میانگین رطوبت نسبی، ساعت آفتابی و سرعت باد) به‌عنوان ورودی مدل، در ایستگاه سینوپتیک قزوین و ایستگاه کلیماتولوژی نیروگاه رجایی، در هر دو مرحله آموزش و آزمون،  $ET_0$  با دقت بالاتری برآورد شد. همچنین در این تحقیق دقت نتایج روش ANNs نسبت به روش دیگر به‌طور نسبی بالاتر بوده است. در هر دو مرحله آموزش و آزمون مقادیر NRMSE و  $R^2$  بدست آمده از روش ANNs، در ایستگاه سینوپتیک قزوین برابر و به ترتیب برابر ۰/۱۱ و ۰/۹۷، و در ایستگاه کلیماتولوژی نیروگاه رجایی برابر و به ترتیب برابر ۰/۱۰ و ۰/۹۷ می‌باشد. به‌طور کلی نتایج نشان داد که میانگین دمای هوای روزانه مهمترین پارامتر هواشناسی تأثیرگذار در برآورد  $ET_0$  می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** تبخیرتعرق مرجع، داده‌کاوی، سامانه نیاز آب

### مقدمه

تبخیرتعرق فرآیند از دست رفتن آب از خاک و سطوح محصول به اتمسفر توسط فرآیندهای تبخیر و تعرق است. تبخیرتعرق یکی از

مهم‌ترین اجزای چرخه آب است و عامل کلیدی برای کشاورزی، برنامه‌ریزی آبیاری و منابع آب است. پیش‌بینی دقیق و سریع  $ET_0$  به تجزیه و تحلیل تغییرات محیطی کمک می‌کند و برای آبیاری گیاه، انتقال آب آبیاری، مدیریت منابع آب در حوضه‌های رودخانه‌ای، ارزیابی محیط‌زیست، در مقیاس‌های مختلف و هیدرولوژیکی و مدل اکوسیستمی ضروری و بسیار مهم است (Feng and Tian, 2021). پیچیدگی فرآیند تبخیرتعرق و وابستگی آن به متغیرهای هواشناسی، عدم دسترسی به تمامی داده‌های هواشناسی و عدم تعمیم‌پذیری یک مدل برای اقلیم‌های مختلف، برآورد دقیق این متغیر را دشوار کرده

۱، ۲، ۳ و ۴- به ترتیب محقق، دانشیار، استادیار و محقق بخش مدیریت آب در مزرعه موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران  
(\*)- نویسنده مسئول: (Email: Azadehsedaghat65@gmail.com)  
DOI: 10.22067/jsw.2022.78652.1200

روش‌های یادگیری ماشین، حتی در غیاب برخی متغیرها،  $ET_0$  را با دقت بالا برآورد می‌کنند. متار (Mattar, 2018) هشت مدل برای تخمین  $ET_0$  با استفاده از الگوریتم ژنتیک ایجاد کرد. نتایج این تحقیق نشان داد، نتایج برآورد بسیار نزدیک به تخمین با مدل FAO-PM-56 بوده است.

استفاده از روش‌های هوش مصنوعی در تخمین  $ET_0$  با دقت بالا در سال‌های اخیر رواج یافته است، اما پیچیدگی این روش‌ها و نیاز آن‌ها به داده‌های هواشناسی بیشتر، کاربرد آن‌ها را برای مناطق مختلف دشوار می‌کند (Feng and Tian, 2021). بنابراین، در مقاله حاضر  $ET_0$  از چهار متغیر هواشناسی (میانگین دمای هوای  $T_{mean}$ ، میانگین رطوبت نسبی  $(RH_{mean})$ ، سرعت وزش باد در ارتفاع دو متری  $(W.S)$  و ساعت آفتابی  $(Sun)$  که از ده ایستگاه هواشناسی سینوپتیک و پنج ایستگاه کلیماتولوژی استان قزوین به دست آمده است، با استفاده از روش‌های داده‌کاوی تخمین زده شد. هدف از این مطالعه نشان دادن شایستگی روش‌های داده‌کاوی جهت رسیدن به یک مدل جامع و ساده، و معتبر با حداقل داده‌های آب و هوایی برای تخمین  $ET_0$  روزانه می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### موقعیت محدوده مورد مطالعه

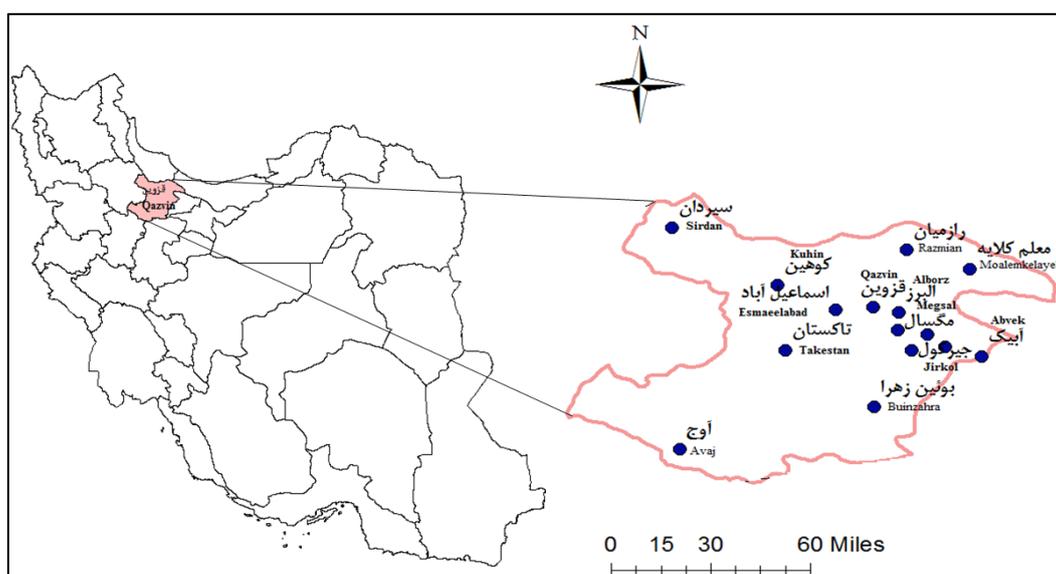
استان قزوین در حوزه مرکزی ایران بین ۴۸ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵۱ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ و ۳۵ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۸ دقیقه عرض شمالی نسبت به خط استوا قرار دارد (شکل ۱). استان قزوین یکی از استان‌های مرتفع ایران است و ارتفاع بیش از ۹۰ درصد سطح استان بیش از متوسط ارتفاع (۱۲۰۰ متر) است. اختلاف شدید ارتفاع و وجود ناهمواری از عوامل اصلی تنوع آب‌وهوای استان قزوین است. بیش از نیمی از استان قزوین یعنی ۵۳ درصد دارای اقلیم خشک فراسرد تا سرد و ۱۸ درصد از سطح استان دارای اقلیم مدیترانه‌ای فراسرد تا سرد می‌باشد. در این پژوهش از داده‌های مربوط به دوره ده ساله (۱۳۸۹-۱۳۹۹) استفاده شد.

است. به‌طور کلی برآورد  $ET_0$  را می‌توان از طریق روش‌های مستقیم و غیرمستقیم انجام داد (Jing et al., 2019).  $ET_0$  را می‌توان به‌طور مستقیم بر اساس روش‌های تراز انرژی و انتقال جرم بخار آب اندازه‌گیری کرد، با این حال، هزینه زیادی دارد. روش‌های غیرمستقیم برای تخمین  $ET_0$  با توسعه معادلات تجربی مانند Penman-Monteith (PM) آغاز شد (Monteith, 1965). بر اساس روش PM، FAO56 یک روش استاندارد برای تخمین  $ET_0$  منتشر کرد. روش PM ارائه شده در FAO56 توسط بسیاری از محققین به‌عنوان روش پایه در محاسبه  $ET_0$  استفاده شده است (Saggi and Jain, 2019). Shiri et al., 2019 روش PM علاوه بر دقت بالا در تخمین  $ET_0$ ، دارای محدودیت‌هایی مانند نیاز داشتن به پارامترهای آب و هوایی زیاد، می‌باشد، از طرفی ایستگاه هواشناسی کمی وجود دارد که همه این پارامترها را باهم ارائه دهد (Panaitescu et al., 2014). برای غلبه بر این مشکل، بسیاری از محققان مدل‌های تجربی را توسعه داده‌اند که نیازهای کمتری به داده‌های آب و هوایی دارد.

رویکردهای دیگری که اخیراً توجه محققین را به خود جلب کرده است، روش‌های مبنی بر هوش مصنوعی مانند شبکه عصبی مصنوعی (ANNs) (Gavili et al., 2018)، ماشین بردار پشتیبان (SVM) (Tabari et al., 2013)، و درخت‌های تصمیم‌گیری مانند (RF) (Raza et al., 2020) می‌باشد، که کاربردهای زیادی در تخمین  $ET_0$  داشته‌اند. با ظهور فناوری یادگیری ماشین و هوش مصنوعی، محققان شروع به کشف چگونگی ترکیب الگوریتم‌های هوشمند با روش‌های تخمین سنتی برای تخمین دقیق‌تر و مؤثرتر  $ET_0$  کردند. یونس و همکاران (Üneş et al., 2020)،  $ET_0$  روزانه را بر اساس شرایط آب و هوایی با استفاده از معادلات تجربی و روش‌های مختلف داده‌کاوی پیش‌بینی کردند. با توجه به نتایج آن‌ها، معادله مبتنی بر تابش بهتر از سایر معادلات تجربی و بالاترین ضریب همبستگی برای روش شبکه عصبی و حداقل خطاها برای تابع مبنای شعاعی SVM به دست آمده است. چن و همکاران (Chen et al., 2020)،  $ET_0$  روزانه را بر اساس داده‌های هواشناسی محدود با استفاده از سه روش یادگیری عمیق، دو روش یادگیری ماشین و هفت معادله تجربی برآورد کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که وقتی ویژگی‌های مبتنی بر دما در دسترس باشد، مدل‌های یادگیری عمیق به‌طور قابل توجهی بهتر از مدل‌های تجربی مبتنی بر دما عمل می‌کنند. دوس سانتوس فاریاس و همکاران (dos Santos Farias et al., 2020) عملکرد روش‌های یادگیری ماشین برای تخمین  $ET_0$  روزانه در کشور برزیل ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که

- 4- Mean temperature
- 5- Mean relative humidity
- 6- Wind Speed
- 7- Sunshine

- 1- Artificial Neural Networks
- 2- Support Vector Mashine
- 3- Random Forest



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان قزوین  
Figure 1- Geographical location of Qazvin province

آموزش (دوسوم داده‌ها) و آزمون (یک‌سوم داده‌ها) تقسیم شدند. در این پژوهش از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANNs)، ماشین بردار پشتیبان (SVM) و جنگل تصادفی (RF) جهت مدل‌سازی  $ET_0$  استفاده شد. در این پژوهش برای مدل‌سازی  $ET_0$  با روش‌های ANN، SVM و RF از نرم‌افزار STATISTICA12 استفاده شد. شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP)<sup>3</sup> و تابع پایه‌ی شعاعی (RBF)<sup>4</sup>، دو نوع شبکه از روش ANN می‌باشد که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت (Hagan et al., 1996; Picton, 2000). روش ANN در ۱۰۰ تکرار جهت کاهش خطا در مدل‌سازی، تنظیم شد. میانگین ۵۰ خروجی از ۱۰۰ تکرار که خطای کمتری دارند، به‌عنوان خروجی نهایی برای تخمین  $ET_0$  انتخاب شد. روش SVM دارای عامل‌های تنظیم‌کننده شامل C و nu هسته می‌باشد که دارای چهار نوع کرنل شامل کرنل خطی، چندجمله‌ای، شعاعی و حلقوی است (Vapnik, 2000). روش RF یک روش جدید و قدرتمند است که پیشرفت‌های فراوانی را در فن‌آوری داده‌کاوی داشت. اساس این روش توسط Breiman, (2001) ارائه شده است.

#### معیارهای ارزیابی دقت و قابلیت اعتماد مدل‌ها

برای بررسی دقت و قابلیت اعتماد مدل‌های ایجادشده از معیارهای آماره‌های ضریب تعیین ( $R^2$ )<sup>5</sup>، مجذور میانگین مربعات خطا

#### برآورد مقدار $ET_0$ سامانه نیاز آب گیاهان

مقدار  $ET_0$  در این پژوهش از بانک اطلاعاتی سامانه نیاز آب مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور که به‌منظور تعیین نیاز آبی استاندارد و واقعی گیاهان باغی و زراعی طراحی شده است، استفاده شد (<http://niwr.ir>). استفاده از این سامانه به‌این‌علت می‌باشد که در حال حاضر دانش فنی جامعی که بتواند از بانک‌های اطلاعات کلان کشور برای برآورد و تعیین نیاز آبی، آب مصرفی و برنامه‌ریزی آبیاری در مناطق مختلف، استفاده شود، وجود ندارد. این سامانه بانک اطلاعاتی خوبی می‌باشد که در زمان کم، حجم زیادی از اطلاعات منطقه را در اختیار کاربران قرار می‌دهد. مقدار  $ET_0$  استخراج‌شده از سامانه نیاز آب بر اساس روش پنمن-مانتیث فائو ۱۵۶ و در مقیاس زمانی روزانه محاسبه شده است، که به‌عنوان مقدار واقعی (اندازه‌گیری شده) در مدل‌سازی با روش‌های داده‌کاوی در نظر گرفته شد.

#### توصیفی از مراحل تخمین $ET_0$ و روش‌های مدل‌سازی

برای ایجاد مدل در تمام ایستگاه‌های هواشناسی، هم‌راستایی بین متغیرهای مستقل (فرض صحت رگرسیون خطی) از طریق آماره عامل تورم واریانس (VIF)<sup>2</sup> و با استفاده از نرم‌افزار SPSS.26 بررسی شد. متغیرهایی که VIF آن‌ها کمتر از ۱۰ باشد مشکل هم‌راستایی نخواهند داشت (Hocking, 2013). جهت اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق، داده‌های هر ایستگاه به دو مجموعه

3- Multilayer perceptron's  
4- Radial basis function  
5- Coefficient of determination

1- FAO-56 Penman-Monteith  
2- Variance Inflation Factor

همچنین مقدار EF از منفی بی‌نهایت تا یک به ترتیب برای بدترین و بهترین برآورد تغییرمی‌کند و کفایت و کارایی مدل را نشان می‌دهد و بالای ۰/۵ عملکرد قابل قبول مدل را نشان می‌دهد (Karimipour and Banitalebi, 2020).

## نتایج و بحث

### توصیف آماری

ویژگی‌های آماری متغیرهای مورد مطالعه در همه ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی در جدول ۱ آورده شده است. تمامی داده‌های ورودی و خروجی در همه ایستگاه‌ها در این تحقیق، دارای دامنه تغییرات بالایی (اختلاف بین کمترین و بیشترین مقدار) می‌باشند، که نشان‌دهنده این است که باعث افزایش قابلیت تعمیم‌پذیری مدل می‌شود (جدول ۱). به منظور نشان دادن پراکندگی نسبی داده‌ها به میانگین، از ضریب تغییرات (CV) استفاده شد. همبستگی بین عامل-های ورودی مدل با ET<sub>0</sub> بررسی شد (جدول ۲). نتایج همبستگی نشان داد، ET<sub>0</sub> در همه ایستگاه‌ها با ساعت آفتابی، سرعت باد، میانگین دمای هوا همبستگی مثبت و معنی‌دار، و با میانگین رطوبت نسبی همبستگی منفی و معنی‌داری دارد (جدول ۲). با افزایش تابش خورشید و بالا رفتن دمای هوا و همچنین افزایش سرعت باد، مقدار ET<sub>0</sub> افزایش یافته و با افزایش رطوبت هوا مقدار ET<sub>0</sub> کاهش می‌یابد (Ndiaye et al., 2020).

### ویژگی‌های روش مورد استفاده در این پژوهش

شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP) و تابع پایه‌ی شعاعی (RBF)، دو نوع شبکه از روش ANNs می‌باشد که در این پژوهش در ایجاد مدل مورد استفاده قرار گرفت (Picton, 2000). در نتایج بدست آمده از روش ANNs، در همه ایستگاه‌ها، تعداد شبکه MLP استفاده شده بیشتر از شبکه RBF می‌باشد. بنابراین شبکه MLP نسبت به RBF در برآورد مقدار ET<sub>0</sub> از عملکرد بهتری برخوردار است. در روش ANNs از توابع فعال‌سازی مختلفی در لایه‌های میانی و خروجی استفاده شد، که Exponential و Tanh تابع فعال‌سازی غالب در لایه پنهان و Identity تابع فعال‌سازی غالب در لایه خروجی بوده و بهترین تابع برای توصیف روابط بین متغیرهای ورودی و ET<sub>0</sub> می‌باشند (جدول ۳). یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های روش RF، ساده سازی مدل از طریق تعیین اهمیت عامل<sup>۳</sup> (تخمین‌گرها) می‌باشد (جدول ۴).

(RMSE<sup>۱</sup>)، و میانگین انحراف خطای (MBE<sup>۲</sup>)، مجذور میانگین خطای نرمال شده (NRMSE) و ضریب کارایی مدل (EF) بهره‌گیری شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (۱)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2} \quad (۲)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \quad (۳)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}}{\bar{X}} \quad (۴)$$

$$d = 1 - \quad (۵)$$

$$EF = 1 - \frac{\left[ \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|x_i - \bar{X}| + |y_i - \bar{Y}|)^2} \right]}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2} \quad (۶)$$

از لحاظ آماری حداقل مقدار RMSE زمانی مقادیر تخمینی با مقادیر اندازه‌گیری برابر صفر باشد، مدل دارای دقت بیشتری خواهد بود (Adab et al., 2020). MBE عمدتاً برای نشان دادن ارباب در مدل، استفاده می‌شود. وقتی مقدار آن مثبت باشد نشان‌دهنده بیش برآوردی و مقدار منفی آن نشان‌دهنده کم‌برآوردی تخمین می‌باشد (Gopinathan, 1988). از NRMSE به عنوان شاخص خطای پیش بینی مدل استفاده می‌شود، اگر مقدار آن کمتر از ۱۰٪ باشد، نتیجه تخمین عالی، بین ۱۰ تا ۲۰٪، خوب؛ بین ۲۰ تا ۳۰٪، قابل قبول؛ و برای مقادیر بیشتر از ۳۰٪، ضعیف می‌باشد (Sandhu and Irmak, 2020). شاخص d، شاخص توافق و یلموت می‌باشد که از دامنه صفر (بدون توافق) تا یک (توافق کامل) می‌باشد که میزان درستی و صحت برآوردها را نشان می‌دهد (Willmott et al., 2012).

1- Root mean square error

2- Mean Bias Error

3- Important parameter

جدول ۱- عوامل آماری متغیرهای مورد مطالعه  
Table 1- Statistical factors of the studied variables

نام ایستگاه Station name	نام ایستگاه Station name	ضریب تغییرات CV	انحراف استاندارد SD*	میانگین Mean	حداکثر Max	حداقل Min	عامل‌های اقلیمی Climatic factors	میانگین Mean	حداکثر Max	حداقل Min	ضریب تغییرات CV	انحراف استاندارد SD*	ضریب تغییرات CV
ایستگاه‌های سینوپتیکی Synoptic stations													
رازمیان Razmian (n=2192)	میانگین دمای هوا $T_{mean}$ (°C)	0.5	8.9	17.1	35.9	-6.8	میانگین دمای هوا $T_{mean}$ (°C)	13.2	37.0	-10.1	0.5	8.5	0.6
	میانگین رطوبت نسبی RH <sub>mean</sub> (%)	0.30	16.89	55.80	98	0.00	میانگین رطوبت نسبی RH <sub>mean</sub> (%)	63.43	100	0.00	0.30	22.60	0.36
	سرعت باد W.S (ms <sup>-1</sup> )	0.48	0.64	1.35	5.23	0.00	سرعت باد W.S (ms <sup>-1</sup> )	1.17	5.87	0.00	0.48	0.76	0.65
	ساعت آفتابی Sun (h)	0.63	4.11	6.50	12.90	0.00	ساعت آفتابی Sun (h)	9.11	14.51	0.00	0.63	3.57	0.39
	تبخیرتوق مرجع ET <sub>0</sub> (mm day <sup>-1</sup> )	0.60	2.01	3.37	9.45	0.46	تبخیرتوق مرجع ET <sub>0</sub> (mm day <sup>-1</sup> )	3.00	8.54	0.29	0.60	1.88	0.63
	میانگین دمای هوا $T_{mean}$ (°C)	0.6	9.5	15.9	36.0	-7.5	میانگین دمای هوا $T_{mean}$ (°C)	12.7	40.5	-12.8	0.6	9.1	0.7
بون زهرا Buinzahra (n=4018)	میانگین رطوبت نسبی RH <sub>mean</sub> (%)	0.37	18.29	49.02	100	6.50	میانگین رطوبت نسبی RH <sub>mean</sub> (%)	61.26	100	10.50	0.37	20.06	0.33
	سرعت باد W.S (ms <sup>-1</sup> )	0.40	0.63	1.60	4.30	0.00	سرعت باد W.S (ms <sup>-1</sup> )	1.89	7.92	0.74	0.40	0.85	0.45
	ساعت آفتابی Sun (h)	0.40	3.44	8.62	13.85	0.00	ساعت آفتابی Sun (h)	7.49	13.20	0.00	0.40	3.69	0.49
	تبخیرتوق مرجع ET <sub>0</sub> (mm day <sup>-1</sup> )	0.57	2.23	3.88	9.78	0.41	تبخیرتوق مرجع ET <sub>0</sub> (mm day <sup>-1</sup> )	3.27	12.15	0.29	0.57	2.01	0.62
	میانگین دمای هوا $T_{mean}$ (°C)	0.6	9.23	14.87	34.80	-9.10	میانگین دمای هوا $T_{mean}$ (°C)	15.0	34.9	-9.7	0.6	9.4	0.6
	میانگین رطوبت نسبی RH <sub>mean</sub> (%)	0.34	17.34	51.58	100.00	14.50	میانگین رطوبت نسبی RH <sub>mean</sub> (%)	53.66	99.50	0.00	0.34	17.79	0.33
تاکستان Takeshan (n=4018)	سرعت باد W.S (ms <sup>-1</sup> )	0.49	0.85	1.72	9.72	0.00	سرعت باد W.S (ms <sup>-1</sup> )	1.39	3.73	0.00	0.49	0.45	0.32
	ساعت آفتابی Sun (h)	0.48	3.67	7.69	13.50	0.00	ساعت آفتابی Sun (h)	8.20	13.10	0.00	0.48	3.62	0.44
	تبخیرتوق مرجع ET <sub>0</sub> (mm day <sup>-1</sup> )	0.60	2.19	3.65	10.56	0.37	تبخیرتوق مرجع ET <sub>0</sub> (mm day <sup>-1</sup> )	3.61	8.95	0.41	0.60	2.20	0.61
	میانگین دمای هوا $T_{mean}$ (°C)	0.6	9.22	15.11	34.00	-8.15	میانگین دمای هوا $T_{mean}$ (°C)	15.6	38.4	-10.8	0.6	9.5	0.6
	میانگین رطوبت نسبی RH <sub>mean</sub> (%)	0.31	16.60	53.61	99.50	15.00	میانگین رطوبت نسبی RH <sub>mean</sub> (%)	53.33	100	0.00	0.31	19.63	0.37
	سرعت باد W.S (ms <sup>-1</sup> )	0.30	0.42	1.42	4.71	0.40	سرعت باد W.S (ms <sup>-1</sup> )	1.48	5.16	0.00	0.30	0.51	0.35
قزوين Qazvin (n=4018)	ساعت آفتابی Sun (h)	0.44	3.62	8.20	13.10	0.00	ساعت آفتابی Sun (h)	8.93	14.45	0.00	0.44	3.43	0.38
	تبخیرتوق مرجع ET <sub>0</sub> (mm day <sup>-1</sup> )	0.61	2.21	3.64	8.94	0.38	تبخیرتوق مرجع ET <sub>0</sub> (mm day <sup>-1</sup> )	3.82	9.63	0.39	0.61	2.30	0.60

نام ایستگاه	Min	Max	Mean	SD	CV	نام ایستگاه	Min	Max	Mean	SD	CV
معلم کلایه Moalemkelayeh (n=4018)	-9.95	33.3	13.8	8.8	0.6	اوج Avaj (n=4018)	-14.0	30.0	10.9	9.1	0.8
میانگین دمای هوا T <sub>mean</sub> (°C)						میانگین دمای هوا T <sub>mean</sub> (°C)					
میانگین رطوبت نسبی RH <sub>mean</sub> (%)	13.50	100	57.70	18.68	0.32	میانگین رطوبت نسبی RH <sub>mean</sub> (%)	1.00	100	51.11	19.74	0.39
سرعت باد W.S (ms <sup>-1</sup> )	0.00	3.92	1.49	0.55	0.37	سرعت باد W.S (ms <sup>-1</sup> )	0.00	8.37	1.54	0.62	0.40
ساعت آفتابی Sun (h)	0.00	13.00	6.42	3.92	0.61	ساعت آفتابی Sun (h)	0.00	13.40	5.23	4.14	0.79
تبخیر متوق مرجع ET <sub>0</sub> (mm day <sup>-1</sup> )	0.34	8.23	3.17	1.92	0.60	تبخیر متوق مرجع ET <sub>0</sub> (mm day <sup>-1</sup> )	0.35	8.98	2.95	1.73	0.59
عمل‌های اقلیمی						عمل‌های اقلیمی					
ایستگاه کلیماتولوژی Climatology stations											
باغ کوسر Bagh kosar (n=4018)	-9.25	35.70	15.46	9.17	0.59	جیرکول Jirkol (n=4018)	-9.25	36.55	15.52	9.12	0.59
میانگین دمای هوا T <sub>mean</sub> (°C)						میانگین دمای هوا T <sub>mean</sub> (°C)					
میانگین رطوبت نسبی RH <sub>mean</sub> (%)	10.50	100	60.98	15.62	0.26	میانگین رطوبت نسبی RH <sub>mean</sub> (%)	7.50	100	59.51	18.49	0.31
سرعت باد W.S (ms <sup>-1</sup> )	0.00	2.50	0.81	0.63	0.78	سرعت باد W.S (ms <sup>-1</sup> )	0.00	3.55	0.83	0.62	0.74
ساعت آفتابی Sun (h)	0.53	14.26	9.47	3.02	0.32	ساعت آفتابی Sun (h)	0.00	14.26	8.99	3.05	0.34
تبخیر متوق مرجع ET <sub>0</sub> (mm day <sup>-1</sup> )	0.42	9.31	3.37	2.13	0.63	تبخیر متوق مرجع ET <sub>0</sub> (mm day <sup>-1</sup> )	0.42	9.30	3.29	2.05	0.62
مگسال Magsal (n=4018)	-9.25	35.70	15.46	9.17	0.59	البرز Alborz (n=4018)	-9.70	34.85	15.14	9.41	0.62
میانگین دمای هوا T <sub>mean</sub> (°C)						میانگین دمای هوا T <sub>mean</sub> (°C)					
میانگین رطوبت نسبی RH <sub>mean</sub> (%)	10.50	100	60.98	15.62	0.26	میانگین رطوبت نسبی RH <sub>mean</sub> (%)	11.50	99.50	53.27	17.62	0.33
سرعت باد W.S (ms <sup>-1</sup> )	0.00	2.50	0.81	0.63	0.78	سرعت باد W.S (ms <sup>-1</sup> )	0.40	2.50	1.42	0.41	0.29
ساعت آفتابی Sun (h)	0.53	14.26	9.47	3.02	0.32	ساعت آفتابی Sun (h)	0.00	13.10	8.23	3.58	0.44
تبخیر متوق مرجع ET <sub>0</sub> (mm day <sup>-1</sup> )	0.42	9.31	3.37	2.14	0.63	تبخیر متوق مرجع ET <sub>0</sub> (mm day <sup>-1</sup> )	0.43	8.95	3.65	2.22	0.61
نیروگاه راجای Rajai power plant (n=4018)	-9.25	35.70	15.47	9.10	0.59						
میانگین دمای هوا T <sub>mean</sub> (°C)											
میانگین رطوبت نسبی RH <sub>mean</sub> (%)	0.00	100	51.38	16.89	0.33						
سرعت باد W.S (ms <sup>-1</sup> )	0.00	6.82	1.05	0.46	0.44						
ساعت آفتابی Sun (h)	0.00	14.09	9.10	3.08	0.34						
تبخیر متوق مرجع ET <sub>0</sub> (mm day <sup>-1</sup> )	0.37	8.74	3.47	2.07	0.60						

انحراف استاندارد: SD  
SD: Standard Deviation

جدول ۲- رابطه همبستگی بین عامل‌های هواشناسی با مقدار ET<sub>0</sub>  
Table 2- Correlation between meteorological factors and ET<sub>0</sub>

ایستگاه‌ها Stations	میانگین دمای هوا T <sub>mean</sub> (°C)	میانگین رطوبت نسبی RH <sub>mean</sub> (%)	سرعت باد W.S (ms <sup>-1</sup> )	ساعت آفتابی Sun (h)	ایستگاه‌ها Stations	میانگین دمای هوا T <sub>mean</sub> (°C)	میانگین رطوبت نسبی RH <sub>mean</sub> (%)	سرعت باد W.S (ms <sup>-1</sup> )	ساعت آفتابی Sun (h)
ET <sub>0</sub> آبیک Abyek	0.92**	-0.69**	0.46**	0.70**	کوهین Kuhin	0.91**	-0.60**	0.29**	0.53**
ET <sub>0</sub> اسماعیل آباد Esmael Abad	0.93**	-0.60**	0.46**	0.71**	معلم کلاهی Moalemkelayeh	0.91**	-0.53**	0.45**	0.57**
ET <sub>0</sub> آوج Avaj	0.89**	-0.72**	0.11**	0.47**	البرز Alborz	0.93**	-0.72**	0.48**	0.70**
ET <sub>0</sub> بوین زهرا Buinzahra	0.93**	-0.78**	0.21**	0.56**	باغ کوسر Bagh kosar	0.92**	-0.75**	0.39**	0.81**
ET <sub>0</sub> تاختستان Takestan	0.91**	-0.75**	0.39**	0.50**	جیرکول Jirkol	-0.64**	0.89**	0.42**	0.73**
ET <sub>0</sub> رازمیان Razmian	0.88**	-0.51**	0.52**	0.48**	مگسال Megsal	0.92**	-0.75**	0.39**	0.81**
ET <sub>0</sub> سیردان Sirdan	0.87**	-0.35**	0.44**	0.54**	نیروگاه رجایی Rajai power plant	0.90**	-0.75**	0.30**	0.84**
ET <sub>0</sub> قزوین Qazvin	0.93**	-0.72**	0.45**	0.71**	کوهین Kuhin	0.91**	-0.60**	0.29**	0.53**

\* و \*\* به ترتیب همبستگی معنی‌دار در سطوح ۵ و ۱ درصد را نشان می‌دهند.  
\* and \*\* Significant correlation at levels of 5 and 1 percent, respectively

روش RF و ANNs تقریباً مشابه و کمتر از روش SVM می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد (جدول ۵) که میانگین خطای سه روش به کاررفته در این پژوهش در بوئین زهرا، قزوین و تاختستان که تقریباً ارتفاع یکسانی نسبت به سایر ایستگاه‌های سینوپتیک دارند، در هر دو مرحله آموزش و آزمون کمتر می‌باشد. افزایش دما، افزایش ET<sub>0</sub> و تغییرات زمانی بارش در دشت‌ها باعث کاهش منابع آب و افزایش نیاز آبی گیاهان شده و در صورت تصمیم‌گیری نامناسب برای سازگاری با شرایط آبی باعث خسارات جبران‌ناپذیر خواهد شد (Fazeli Khiavi et al., 2020). بنابراین با توجه به اینکه این سه منطقه به صورت دشت هستند و میانگین دما، سرعت باد و ET<sub>0</sub> در این ایستگاه‌ها نسبت به سایر ایستگاه‌ها بالاتر می‌باشد (جدول ۱)، بنابراین جهت تأمین نیاز آبی گیاهان این مناطق نیاز به تصمیم‌گیری مناسب جهت مدیریت منابع آب می‌باشد. در جدول ۱ مشاهده می‌شود، ضریب تغییرات دما برای ایستگاه‌های بوئین زهرا، قزوین و تاختستان برابر ۰/۶ و ضریب تغییرات ET<sub>0</sub> برای ایستگاه‌های بوئین زهرا، قزوین و تاختستان به ترتیب ۰/۵۷، ۰/۶۰ و ۰/۶۱ می‌باشد. با توجه به یکسان بودن ضریب تغییرات دما و ET<sub>0</sub> و همچنین در ارتفاع تقریباً یکسانی از سطح دریا قرار دارند، دقت تخمین ET<sub>0</sub> در این سه ایستگاه تقریباً یکسان می‌باشد (شکل ۲).

در جدول ۴ مشاهده می‌شود در همه ایستگاه‌ها به جز جیرکول میانگین دمای هوا بیشترین سهم و مهم‌ترین مؤلفه را در افزایش دقت تخمین ET<sub>0</sub> یا به عبارت دیگر بیشترین سهم را در کاهش خطای تخمین ET<sub>0</sub> دارد. اجزای و همکاران (Majozhi et al., 2021) نتایج مشابهی را ارائه نمودند. همچنین سرعت باد کمترین سهم را در افزایش دقت تخمین مقدار ET<sub>0</sub> دارد. در این تحقیق از رگرسیون بردار پشتیبان نوع دوم استفاده شده است. رگرسیون بردار پشتیبان دارای پارامترهای تنظیم C و nu و پارامترهای هسته (γ) است. در این پژوهش نوع کرنل، از هسته تابع پایه شعاعی (RBF) استفاده شده است که این هسته شامل پارامتر گاما (γ) است.

با توجه به جدول ۵، نتایج مقایسه سه روش در برآورد مقدار ET<sub>0</sub>، نشان داد که در هر دو مرحله آموزش و آزمون دقت روش ANNs نسبت به دو روش SVM و RF به طور نسبی بهتر بود. مقایسه میانگین نتایج حاصل از سه روش بر اساس آماره NRMSE در ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی استان قزوین در مرحله آزمون، در شکل ۲ ارائه شده است. در شکل ۲ مشاهده می‌شود در ایستگاه‌های سینوپتیک نتایج روش RF و SVM مشابه و با نتایج روش ANNs تفاوت معنی‌داری دارند. در ایستگاه‌های کلیماتولوژی نتایج سه روش تفاوت معنی‌داری ندارند ولی میانگین خطای دو

جدول ۳- ویژگی‌های روش ANNs بکار رفته در این پژوهش  
Table 3- Characteristics of ANNs method used in this study

Stations	نوع شبکه* Network type		تعداد سلول‌های پنهان Number of hidden cells of MLP		تعداد سلول‌های پنهان Number of hidden cells of RBF		تولیع لایه‌های خروجی Output layer function				تولیع لایه‌های پنهان Hidden layer function						
	MLP	RBF	Range	Range	Range	Range	Tanh	Identity	Sine	Exponential	Logistic	Gaussian	Identity	Sine	Exponential	Tanh	Logistic
آبیک Abyek	47	3	3-10	24-29			9	14	11	8	8	3	7	11	5	16	8
اسماعیل آباد Esmacel Abad	41	9	3-10	21-29			7	24	5	7	7	9	8	4	9	9	11
البرز Alborz	38	12	3-10	21-30			7	21	8	9	5	12	3	6	11	5	13
اوج Avaj	48	2	3-10	21-25			9	13	7	9	12	2	6	4	14	13	11
باغ کوسر Bagh kosar	49	1	3-10	29			9	18	6	6	11	1	11	7	10	13	8
بوئین زهرا Buinzahra	46	4	3-10	21-30			9	16	4	10	11	4	10	4	9	9	14
تکستان Takestan	48	2	3-10	23-29			7	13	4	10	16	2	5	3	8	15	17
جیرکول Jirkol	42	8	3-9	14-29			9	15	9	9	8	8	6	6	10	11	9
رازمیان Razmian	45	5	3-10	22-28			14	17	6	4	9	5	3	8	13	11	10
سیردان Sirdan	31	19	3-10	21-30			5	27	6	6	6	19	0	4	6	6	15
قزوین Qazvin	47	3	3-10	22-27			6	18	8	10	8	3	7	5	13	12	10
کوهپایه Kuhin	47	3	3-10	24-30			11	9	10	11	9	3	2	3	15	18	9
معلم کلابه Moalemkelayeh	43	7	2-8	15-25			10	13	9	10	8	7	4	6	9	13	11
مگسال Magsal	48	2	3-10	22-23			8	9	9	11	13	2	5	13	12	11	7
نیروزگاه رجایی Rajai power plant	50	0	3-10	0			9	11	9	9	12	0	9	11	10	8	12

\*در این ستون نوع و تعداد شبکه استفاده شده از خروجی شبکه را نشان می‌دهد.

\* The network type and number of outputs used are shown in this column.

جدول ۴- اهمیت عامل به‌دست‌آمده با روش RF

Table 4- Importance of the factor obtained by RF method

ایستگاه‌ها	میانگین دما	میانگین رطوبت نسبی	سرعت باد	ساعت آفتابی	ایستگاه‌ها	میانگین دما	میانگین رطوبت نسبی	سرعت باد	ساعت آفتابی
Stations	T <sub>mean</sub>	RH <sub>mean</sub>	W.S	Sun	Stations	T <sub>mean</sub>	RH <sub>mean</sub>	W.S	Sun
ایستگاه‌های سینوپتیک Synoptic stations					ایستگاه‌های کليما تولوژی Climatology stations				
آبیک Abyek	1.00	0.61	0.37	0.65	البرز Alborz	1.00	0.53	0.32	0.68
اسماعیل آباد Esmaeel Abad	1.00	0.40	0.34	0.70	باغ کوسر Bagh kosar	1.00	0.78	0.34	0.95
اوج Avaj	1.00	0.58	0.19	0.57	جیرکول Jirkol	0.57	1.00	0.36	0.80
بوئین زهرا Buinzahra	1.00	0.62	0.18	0.53	مگسال Magsal	1.00	0.80	0.35	0.98
تاکستان Takestan	1.00	0.31	0.57	0.43	نیروگاه راجایی Rajai power plant	1.00	0.80	0.43	0.99
رازمیان Razmian	1.00	0.47	0.45	0.56					
سیردان Sirdan	1.00	0.24	0.39	0.58					
قزوین Qazvin	1.00	0.59	0.34	0.74					
کوهین Kuhin	1.00	0.42	0.24	0.46					
معلم کلايه Moalemkelayeh	1.00	0.39	0.37	0.49					

RMSE، R<sup>2</sup> و NRMSE به ترتیب برای آموزش برابر با ۰/۴۵، ۰/۹۴ و ۰/۱۵، و برای آزمون برابر با ۰/۴۷، ۰/۹۳ و ۰/۱۶ می‌باشد. در روش SVM مقادیر آماره‌های RMSE، R<sup>2</sup> و NRMSE به ترتیب برای آموزش برابر با ۰/۴۶، ۰/۹۴ و ۰/۱۵، و برای آزمون برابر با ۰/۴۷، ۰/۹۴ و ۰/۱۵ می‌باشد (جدول ۵).

با توجه به جدول ۵، اگر همه آماره‌های بکار رفته در این تحقیق را در نظر بگیریم، در هر دو مرحله آموزش و آزمون بیشترین دقت تخمین ET<sub>0</sub> در ایستگاه قزوین مشاهده می‌شود. در ایستگاه قزوین، در روش ANNs مقادیر آماره‌های RMSE، R<sup>2</sup> و NRMSE به ترتیب برای آموزش برابر با ۰/۴۰، ۰/۹۷ و ۰/۱۱، و برای آزمون برابر با ۰/۴۰، ۰/۹۷ و ۰/۱۱ می‌باشد. در روش RF مقادیر آماره‌های RMSE، R<sup>2</sup> و NRMSE به ترتیب برای آموزش برابر با ۰/۴۲، ۰/۹۶ و ۰/۱۲، و برای آزمون برابر با ۰/۴۳، ۰/۹۶ و ۰/۱۲ می‌باشد. در روش SVM مقادیر آماره‌های RMSE، R<sup>2</sup> و NRMSE به ترتیب برای آموزش برابر با ۰/۴۴، ۰/۹۶ و ۰/۱۲، و برای آزمون برابر با ۰/۴۴، ۰/۹۶ و ۰/۱۲ می‌باشد (جدول ۵). با توجه به شکل ۳ و ۴، مقادیر NRMSE در ایستگاه‌های کليما تولوژی کمتر از سینوپتیک می‌باشد، بنابراین دقت تخمین ET<sub>0</sub> ایستگاه‌های کليما تولوژی بالاتر است.

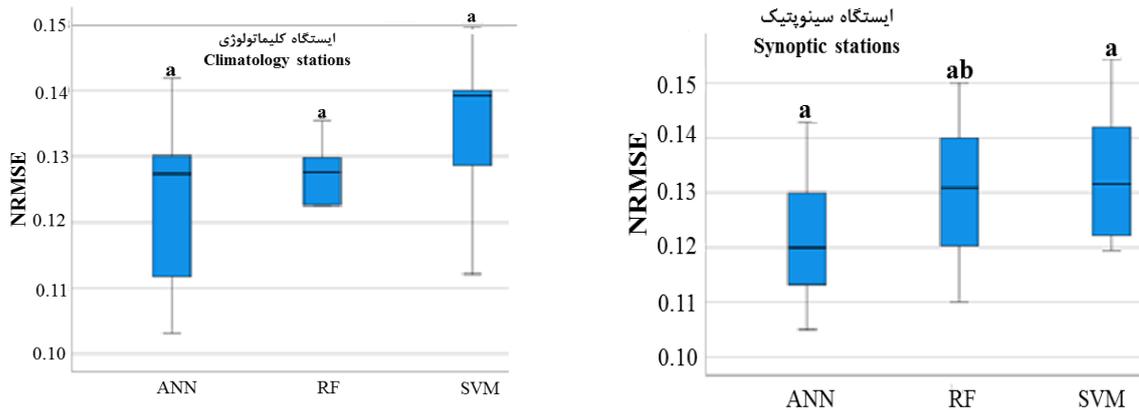
با توجه به جدول ۵ و شکل ۳، دو ایستگاه رازمیان و سیردان با وجود اینکه ارتفاع از سطح دریای آن‌ها نسبت به سایر ایستگاه‌های سینوپتیک کمتر می‌باشد، اما در هر دو مرحله آموزش و آزمون NRMSE آن‌ها بیشتر از سایر ایستگاه‌ها است، و در نتیجه دقت تخمین ET<sub>0</sub> در این ایستگاه پایین‌تر است. از یک طرف تعداد داده‌های هواشناسی در دسترس در این دو ایستگاه (n=2192) محدود بوده است. از طرف دیگر با توجه به نتایج حاصل از تحقیقات شهرباری و همکاران (Shahryar et al., 2019) که ایستگاه‌های سینوپتیک استان قزوین را از نظر عوامل اقلیمی بررسی کردند، مشاهده شد بیشترین درصد رطوبت نسبی (۶۰ درصد) را ایستگاه سیردان و کمترین درصد رطوبت نسبی را بوئین‌زهرا (۴۴ درصد) و تاکستان (۴۸ درصد) دارند و همچنین بیشترین سرعت متوسط باد سالانه را ایستگاه‌های سیردان و کوهین دارند.

با توجه به جدول ۱، ضریب تغییرات سرعت باد در ایستگاه سیردان (۰/۶۵) بالا می‌باشد. بنابراین احتمالاً به علت شرایط اقلیمی ویژه‌ای که در سیردان و رازمیان وجود دارد و همچنین محدود بودن داده‌های در دسترس، مقدار تخمین ET<sub>0</sub> در این ایستگاه‌ها پایین می‌باشد (شکل ۳). مقادیر آماره‌های RMSE، R<sup>2</sup> و NRMSE روش ANNs در سیردان، به ترتیب برای هر دو مرحله آموزش و آزمون برابر با ۰/۴۳، ۰/۹۵ و ۰/۱۴ می‌باشد. در روش RF مقادیر آماره‌های

جدول ۵- نتایج روش‌های مختلف در برآورد مقدار ET<sub>0</sub> در ایستگاه‌های هواشناسی

Table 5- The results of different methods used for estimating of ET<sub>0</sub> in the meteorological stations

آموزش (Train)							آزمون (Test)						
ایستگاه‌های سینوپتیک													
Synoptic stations													
		RMSE	R <sup>2</sup>	MBE	NRMSE	d	EF	RMSE	R <sup>2</sup>	MBE	NRMSE	d	EF
اوج Avaj	RF	0.36	0.96	-0.002	0.12	0.99	0.96	0.39	0.95	0.017	0.13	0.99	0.94
	ANNs	0.36	0.96	-0.003	0.12	0.99	0.96	0.36	0.95	0.012	0.12	0.99	0.95
	SVM	0.40	0.95	-0.064	0.13	0.99	0.95	0.39	0.95	-0.058	0.13	0.99	0.94
آبیک Abyek	RF	0.48	0.96	-0.025	0.13	0.99	0.96	0.52	0.95	-0.069	0.13	0.99	0.95
	ANNs	0.47	0.96	-0.025	0.12	0.99	0.96	0.47	0.96	-0.036	0.12	0.99	0.96
	SVM	0.50	0.95	-0.002	0.13	0.99	0.95	0.50	0.96	-0.018	0.13	0.99	0.95
اسماعیل آباد Esmacel Abad	RF	0.42	0.96	-0.016	0.12	0.99	0.96	0.44	0.96	-0.030	0.12	0.99	0.96
	ANNs	0.42	0.96	-0.012	0.12	0.99	0.96	0.41	0.97	-0.030	0.11	0.99	0.96
	SVM	0.47	0.96	0.047	0.13	0.99	0.95	0.47	0.96	0.026	0.13	0.99	0.95
بوئین زهرا Buinzahra	RF	0.44	0.96	-0.006	0.11	0.99	0.96	0.44	0.96	-0.005	0.12	0.99	0.96
	ANNs	0.43	0.96	-0.010	0.11	0.99	0.96	0.45	0.96	0.000	0.11	0.99	0.96
	SVM	0.48	0.96	0.018	0.12	0.99	0.95	0.47	0.96	0.024	0.12	0.99	0.95
تاکستان Takestan	RF	0.44	0.96	-0.003	0.12	0.99	0.96	0.48	0.96	0.001	0.13	0.99	0.96
	ANNs	0.43	0.96	0.000	0.11	0.99	0.96	0.43	0.97	0.003	0.11	0.99	0.96
	SVM	0.45	0.96	0.023	0.12	0.99	0.96	0.46	0.96	0.024	0.12	0.99	0.96
رازمیان Razmian	RF	0.45	0.95	-0.010	0.13	0.99	0.95	0.46	0.95	-0.018	0.14	0.99	0.95
	ANNs	0.47	0.95	-0.012	0.14	0.99	0.95	0.47	0.95	-0.045	0.14	0.99	0.95
	SVM	0.49	0.94	0.025	0.14	0.98	0.94	0.48	0.95	-0.010	0.14	0.98	0.94
سیردان Sirdan	RF	0.45	0.94	-0.001	0.15	0.98	0.94	0.47	0.93	-0.012	0.16	0.98	0.93
	ANNs	0.43	0.95	-0.016	0.14	0.99	0.95	0.43	0.95	-0.044	0.14	0.99	0.95
	SVM	0.46	0.94	0.033	0.15	0.98	0.94	0.47	0.94	-0.005	0.15	0.98	0.94
قزوین Qazvin	RF	0.42	0.96	-0.005	0.12	0.99	0.96	0.43	0.96	-0.012	0.12	0.99	0.96
	ANNs	0.40	0.97	0.001	0.11	0.99	0.97	0.40	0.97	-0.004	0.11	0.99	0.97
	SVM	0.44	0.96	0.017	0.12	0.99	0.96	0.44	0.96	0.005	0.12	0.99	0.96
کوهین Kuhin	RF	0.44	0.95	0.002	0.13	0.99	0.95	0.48	0.95	0.001	0.15	0.98	0.94
	ANNs	0.41	0.96	-0.005	0.13	0.99	0.96	0.41	0.96	0.001	0.13	0.99	0.96
	SVM	0.47	0.95	0.040	0.14	0.98	0.94	0.48	0.95	0.048	0.15	0.98	0.94
معلم کلاهی Moalemkelayeh	RF	0.43	0.95	-0.005	0.14	0.99	0.95	0.46	0.95	-0.028	0.14	0.98	0.94
	ANNs	0.42	0.95	-0.008	0.13	0.99	0.95	0.42	0.95	-0.024	0.13	0.99	0.95
	SVM	0.45	0.95	0.032	0.14	0.98	0.94	0.44	0.95	0.008	0.14	0.99	0.95
ایستگاه‌های کلیماتولوژی													
Climatology stations													
		RMSE	R <sup>2</sup>	MBE	NRMSE	d	EF	RMSE	R <sup>2</sup>	MBE	NRMSE	d	EF
مگسال Megsal	RF	0.39	0.97	-0.002	0.12	0.99	0.97	0.42	0.96	0.012	0.13	0.99	0.96
	ANNs	0.41	0.96	-0.015	0.12	0.99	0.96	0.42	0.96	-0.014	0.13	0.99	0.96
	SVM	0.45	0.95	0.035	0.13	0.99	0.96	0.46	0.95	0.043	0.14	0.99	0.96
نیروگاه رجایی Rajai power plant	RF	0.33	0.97	0.001	0.09	0.99	0.97	0.35	0.97	0.001	0.10	0.99	0.97
	ANNs	0.35	0.97	0.020	0.10	0.99	0.97	0.35	0.97	0.022	0.10	0.99	0.97
	SVM	0.39	0.97	0.014	0.11	0.99	0.96	0.38	0.97	0.003	0.11	0.99	0.97
البرز Alborz	RF	0.42	0.97	-0.011	0.11	0.99	0.96	0.44	0.96	-0.022	0.12	0.99	0.96
	ANNs	0.39	0.97	-0.009	0.11	0.99	0.97	0.40	0.97	0.000	0.11	0.99	0.97
	SVM	0.46	0.96	-0.019	0.13	0.99	0.96	0.46	0.96	-0.004	0.13	0.99	0.96
باغ کوثر Bagh kosar	RF	0.38	0.97	-0.003	0.11	0.99	0.97	0.44	0.96	0.003	0.13	0.99	0.96
	ANNs	0.42	0.96	-0.014	0.13	0.99	0.96	0.44	0.96	0.000	0.13	0.99	0.96
	SVM	0.45	0.96	0.109	0.14	0.99	0.95	0.48	0.96	0.121	0.14	0.99	0.95
جیرکول Jirkol	RF	0.43	0.96	0.002	0.13	0.99	0.96	0.44	0.95	0.012	0.14	0.99	0.95
	ANNs	0.46	0.95	-0.007	0.14	0.99	0.95	0.46	0.95	0.014	0.14	0.99	0.95
	SVM	0.49	0.94	-0.017	0.15	0.99	0.94	0.49	0.94	0.004	0.15	0.99	0.94

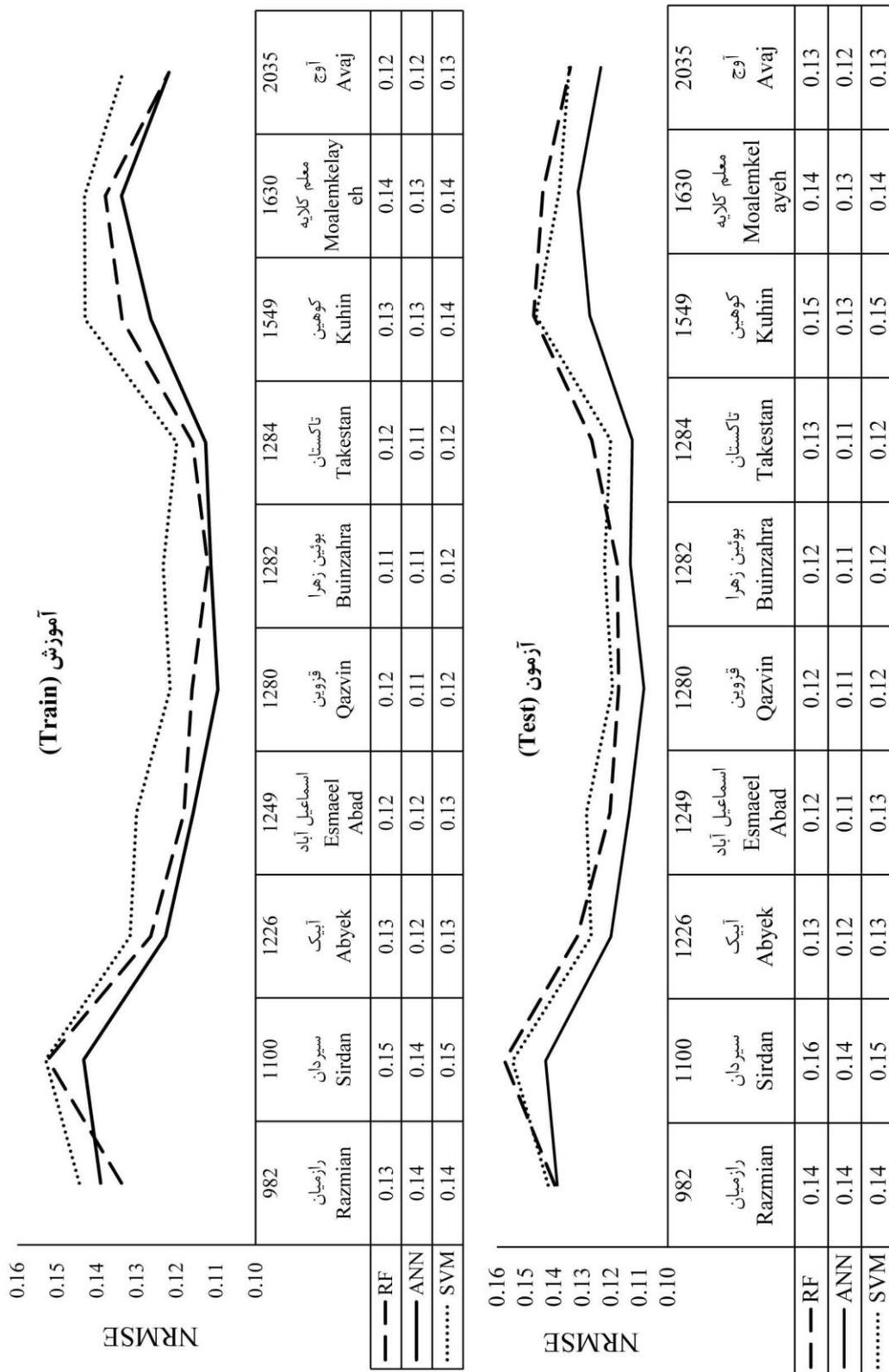


شکل ۲- مقایسه NRMSE سه روش در برآورد  $ET_0$  در مرحله آزمون  
Figure 2- Comparison the NRMSE of three methods for estimating of  $ET_0$  in the test steps

خطا به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (شکل ۳). علت آن هم احتمالاً به دلیل تغییرات دمای هوا با افزایش رطوبت و تأثیر آن بر مقدار  $ET_0$  می‌باشد. ساعت آفتابی که تابعی از عرض جغرافیایی می‌باشد، در فصول مختلف سال متفاوت است. به طوری که در تمامی فصول با افزایش عرض جغرافیایی از میزان تشعشع ورودی به زمین کاسته می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود که مقدار  $ET_0$  در عرض‌های جغرافیایی بالاتر، کمتر از عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر به دست آید، از جمله دلایل این امر می‌تواند مرتبط با در نظر گرفتن عواملی مانند عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا در محاسبات مقدار  $ET_0$  باشد در اثر تغییرات اقلیمی، مقدار  $ET_0$  نه تنها بر اساس دمای هوا بلکه بر اساس سایر متغیرهای آب و هوایی دست‌خوش تغییرات قرار می‌گیرد (Yang et al., 2017). بنابراین نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهند که اثر ارتفاع بر تغییرات مقدار  $ET_0$  تحت شرایط آب و هوایی متغیر، نامشخص است. کنگ و همکاران (Kang et al., 2021) نتایج مشابهی ارائه کردند.

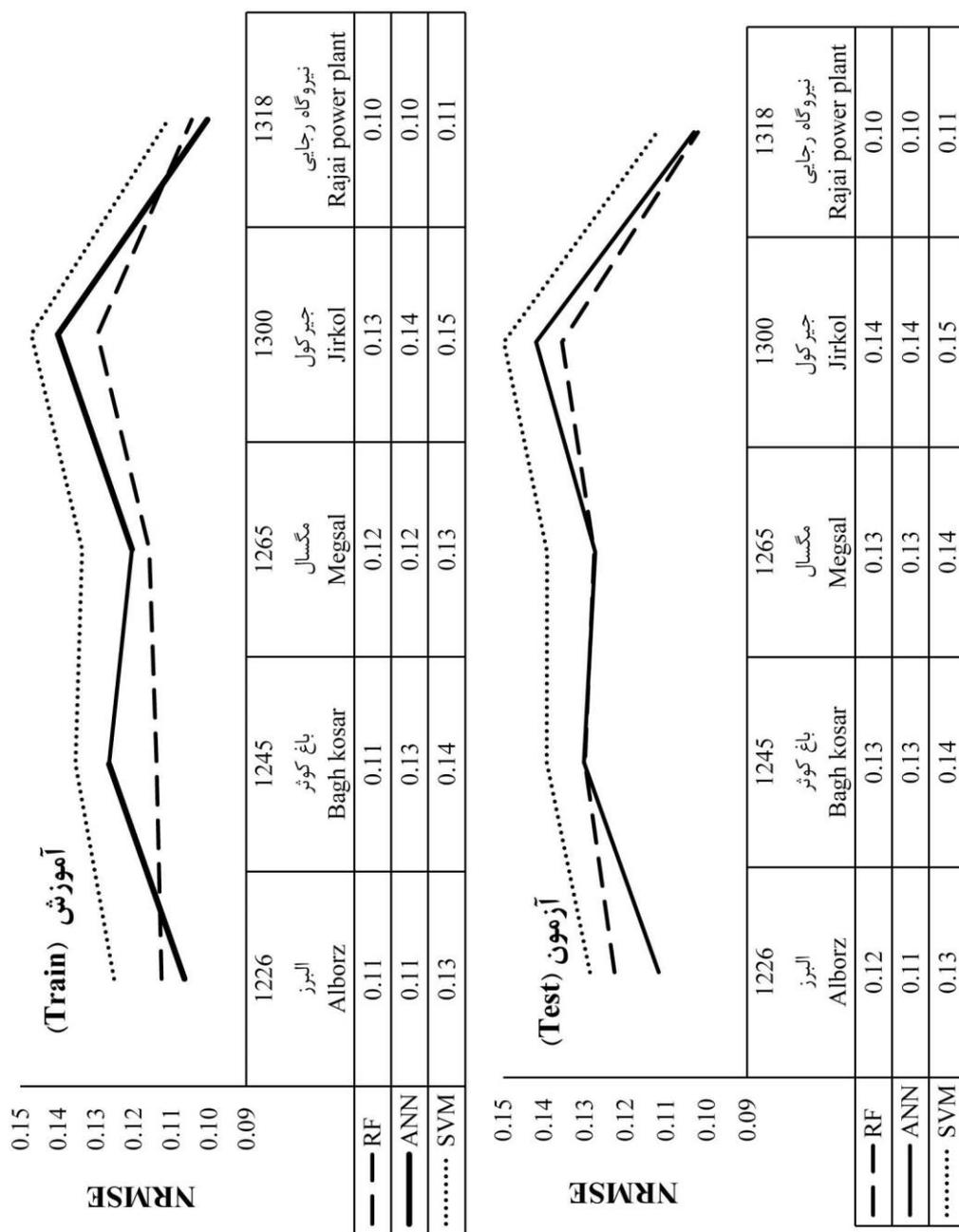
با توجه به جدول ۵، مقادیر آماره MBE در مرحله آموزش و آزمون اکثراً مقادیر کوچک و نزدیک به صفر می‌باشد. بنابراین با توجه به کم بودن مقادیر آماره MBE، نمی‌توان گفت مدل کم‌برآوردی یا بیش برآوردی قابل توجهی داشته است و در نتیجه می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد (Singh et al., 2020). در جدول ۵ مشاهده می‌شود آماره EF در همه ایستگاه‌ها در هر دو مرحله آموزش و آزمون بالای ۰/۹۴ می‌باشد و هم‌چنین شاخص d هم در همه ایستگاه‌ها در هر دو مرحله آموزش و آزمون بین ۰/۹۸-۰/۹۹ می‌باشد، که نشان از صحت و کارایی بالای روش‌های استفاده در این پژوهش در تخمین مقدار  $ET_0$  می‌باشد. از طرفی فاکتورهای مختلفی بر عملکرد روش‌های یادگیری ماشین مانند الگوریتم آموزش ANNs، یا تنظیمات فرا پارامترهای روش‌های مورد استفاده، دخیل هستند (Ferreira et al., 2019). بنابراین در این تحقیق انتخاب عوامل مؤثر در تخمین مقدار  $ET_0$  مناسب بوده است که مقادیر آماره‌های EF و d بالا بوده است.

نتایج نشان می‌دهد (جدول ۵) که دقت سه روش به کاررفته در این پژوهش در ایستگاه نیروگاه رجایی نسبت به سایر ایستگاه‌های کليماٲولوژی، در هر دو مرحله آموزش و آزمون بیشتر می‌باشد، و NRMSE روش‌های بکار رفته در این ایستگاه نسبت به بقیه کمتر می‌باشد. و همچنین دقت تخمین در ایستگاه جیرکول نسبت به سایر ایستگاه‌های کليماٲولوژی در هر دو مرحله آموزش و آزمون کمتر و میانگین خطای بیشتری دارد. افزایش ارتفاع سبب کاهش دما و به تبع آن کاهش مقدار  $ET_0$  و افزایش رطوبت نسبی می‌شود (Raziei et al., 2005). در ایستگاه جیرکول به علت افزایش ارتفاع و کاهش مقدار  $ET_0$ ، کاهش دقت تخمین در این ایستگاه منطقی می‌باشد. اما در ایستگاه نیروگاه رجایی که با افزایش ارتفاع، دقت تخمین افزایش یافته است نیاز به بررسی بیشتری می‌باشد. در این منطقه به علت فعالیت نیروگاه رجایی و تولید فراوان آلاینده‌های مضر که از ترسیب آن‌ها موجب آلودگی آب سطحی، خاک و گیاه می‌شود. حضور این آلاینده‌ها باعث باران اسیدی و در نتیجه نابودی پوشش‌های گیاهی و ساختار خاک می‌شود (Rai et al., 2011). در این منطقه باغات و مزارع کشاورزی در جنوب، جنوب شرقی، جنوب غربی این نیروگاه قرار دارند، از طرفی جهت باد غالب در استان قزوین به سمت جنوب شرقی بوده (Shahryar et al., 2019) و بیشترین میزان ترسیب آلاینده‌ها در این جهت می‌باشد که باعث افزایش  $ET_0$  و کاهش رطوبت نسبی و همچنین خسارت به پوشش گیاهی می‌شود. این مسئله در جدول ۱ مشاهده می‌شود، میانگین رطوبت نسبی در ایستگاه نیروگاه رجایی با وجود ارتفاع بالاتر، کمتر از سایر ایستگاه‌ها است. کیخسروی و همکاران (Keikhosravi et al., 2014) در ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمانشاه  $ET_0$  را محاسبه کردند، و نشان دادند که عامل ارتفاع باعث اختلاف در عناصر اقلیمی و به تبع آن مقادیر  $ET_0$  شده است. در پژوهش حاضر با افزایش ارتفاع از ۱۳۰۰ متر به بالا، میانگین



شکل ۳- تغییرات خطا با افزایش ارتفاع در تخمین  $ET_0$  در ایستگاه‌های سینوپتیک

Figure 3- Error changes with increasing altitude in  $ET_0$  estimation



شکل ۴- تغییرات خطا با افزایش ارتفاع در تخمین ET<sub>0</sub> در ایستگاه‌های کليما تولوژی

### نتیجه‌گیری

همچنین به شدت تحت تأثیر شرایط منطقه‌ای مانند توپوگرافی و ارتفاع می‌باشد. نتایج این تحقیق علاوه بر بررسی بهتر ET<sub>0</sub> به شناخت عوامل تأثیرگذارتر در هر منطقه کمک فراوان می‌کند و می‌توان در مناطق با اقلیم‌های مشابه از آن استفاده کرد. به‌عنوان مثال در منطقه مطالعاتی حاضر، مشخص شد که میانگین دمای هوا بیشتر از سایر پارمترهای اقلیمی بر ET<sub>0</sub> تأثیر می‌گذارد. با درک این مسئله، چنانچه دمای هوای یک منطقه زیاد شود، باعث افزایش شدید در

نتایج پژوهش حاضر نشان داد مقادیر ET<sub>0</sub> سامانه نیاز آب، همبستگی خوبی با مقادیر ET<sub>0</sub> تخمینی روش‌های RF، ANNs و SVM دارد. در این پژوهش دقت تخمین مقدار ET<sub>0</sub> با دو روش RF و ANNs نزدیک به هم و نسبت به روش SVM بالاتر بوده است. نتایج نشان داد، مقدار ET<sub>0</sub> نه تنها بر اساس دمای هوا بلکه ممکن است تحت تأثیر عامل‌های دیگر مانند آلودگی هوا تغییر کند،

نقش ارتفاع و عرض جغرافیایی است. نتیجه نهایی اینکه الگوریتم‌های مختلف روش‌های داده‌کاوی، در شرایطی منطقه‌ای مانند سیردان و رازمیان که داده‌های اقلیمی محدودی در دسترس می‌باشد، می‌توانند در مطالعات آینده برای توسعه مدل‌های تخمینی  $ET_0$  مناسب باشند.

مقدار  $ET_0$  و متعاقباً افزایش نیاز آبی گیاهان خواهد شد. توجه به این نکته خواهد توانست از بروز تنش آبی و کاهش احتمالی محصول جلوگیری کند. با توجه به متفاوت بودن ارتفاع و عرض جغرافیایی ایستگاه‌ها، و از طرفی شرایط اقلیمی متفاوت در این ایستگاه‌ها، می‌توان چنین نتیجه گرفت که نقش اقلیم در تخمین  $ET_0$  مهم‌تر از

## منابع

1. Adab, H., Morbidelli, R., Saltalippi, C. Moradian, M., & Ghalhari, G.A.F, (2020). Machine learning to estimate surface soil moisture from remote sensing data. *Water* 12(11): 3223. <https://doi.org/10.3390/w12113223>.
2. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learn.* 45: 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
3. Chen, Z., Zhu, Z., Jiang, H., & Sun, S. (2020). Estimating daily reference evapotranspiration based on limited meteorological data using deep learning and classical machine learning methods. *Journal of Hydrology* 591: 125286. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125286>.
4. Dos Santos Farias, D.B., Althoff, D., Rodrigues, L.N., & Filgueiras, R. (2020). Performance evaluation of numerical and machine learning methods in estimating reference evapotranspiration in a Brazilian agricultural frontier. *Theoretical and Applied Climatology* 142: 1481-1492. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03380-4>.
5. Fazeli Khiavi, A., Salahi, B., & Goodarzi, M. (2020). Assessment effects of climate change on changes in potential evapotranspiration in the Moghan Plain by rcp. *Watershed Engineering and Management* 12: 977-993. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2019.126245.1649>.
6. Feng, K., & Tian, J. (2021). Forecasting reference evapotranspiration using data mining and limited climatic data. *European Journal of Remote Sensing* 54: 363-371. <https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1801355>.
7. Ferreira, L.B., da Cunha, F.F., de Oliveira, R.A., & Fernandes Filho, E.I. (2019). Estimation of reference evapotranspiration in Brazil with limited meteorological data using ANN and SVM—A new approach. *Journal of Hydrology* 572: 556-570. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.028>.
8. Gavili, S., Sanikhani, H., Kisi, O., & Mahmoudi, M.H. (2018). Evaluation of several soft computing methods in monthly evapotranspiration modelling. *Meteorological Applications* 25: 128-138. <https://doi.org/10.1002/met.1676>.
9. Gopinathan, K.K. (1988). A general formula for computing the coefficients of the correlation connecting global solar radiation to sunshine duration. *Solar Energy* 41: 499-502. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(88\)90052-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(88)90052-7).
10. Hagan, M.T., Demuth, H.B., & Beale, M.H. (1996). *Neural Network*. Design PWS Publishing Co.
11. Hocking, R.R. (2013). *Methods and applications of linear models: regression and the analysis of variance*, John Wiley & Sons.
12. Jing, W., Yaseen, Z.M., Shahid, S., Saggi, M.K., Tao, H., Kisi, O., Salih, S.Q., Al-Ansari, N., & Chau, K.-W. (2019). Implementation of evolutionary computing models for reference evapotranspiration modeling: short review, assessment and possible future research directions. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 13: 811-823. <https://doi.org/10.1080/19942060.2019.1645045>.
13. Kang, T., Li, Z., & Gao, Y. (2021). Spatiotemporal variations of reference evapotranspiration and its determining Climatic factors in the Taihang Mountains, China. *Water* 13: 3145. <https://doi.org/10.3390/w13213145>.
14. Karimipour, A., & Banitalebi, G. (2020). Sensitivity analysis of meteorological data in estimating reference evapotranspiration with the minimum data using wavelet-neuro-fuzzy, ANN and ANFIS models. *Journal of Soil and Water Resources Conservation* 9(3):47-72. (In Persian).
15. Keikhosravi, G., Rezaee, A., Mohamadi, Z., & Baghaee, M. (2014). *The Estimation of Reference Evapotranspiration in (reference grass) 5 synoptic Station province of Kermanshah with using REF-ET Model. National conference of new ideas in sustainable agriculture*. Islamic Azad University, Borujerd branch 1-18, (In Persian).
16. Majoji, N.P., Mannaerts, C.M., Ramoelo, A., Mathieu, R., & Verhoef, W. (2021). Uncertainty and sensitivity analysis of a remote-sensing-based penman–Monteith model to meteorological and land surface input variables. *Remote Sensing* 13: 882. <https://doi.org/10.3390/rs13050882>.
17. Mattar, M.A., (2018). Using gene expression programming in monthly reference evapotranspiration modeling: a case study in Egypt. *Agricultural Water Management* 198: 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.017>.
18. Monteith, J. (1965). *The state and movement of water in living organisms*. In: 19<sup>th</sup> Symposia of the Society for Experimental Biology. Cambridge University Press, London 205–234.
19. Ndiaye, P.M., Bodian, A., Diop, L., Deme, A., Dezetter, A., Djaman, K., & Ogilvie, A. (2020). Trend and sensitivity analysis of reference evapotranspiration in the Senegal river basin using NASA meteorological data. *Water* 12: 1957. <https://doi.org/10.3390/w12071957>.

20. Panaitescu, L., Ilie, C., Lungu, M., Popescu, M., Lungu, D., & Nita, S. (2014). Modern approach to the phenomenon of drought and aridity in Central and South Dobrudja. *Journal of Environmental Protection and Ecology* 15: 110-122.
21. Picton, P. (2000). *Neural Networks*, 2nd edn. Palgrave, New York.
22. Rai, R., Rajput, M., Agrawal, M., & Agrawal, S. (2011). Gaseous air pollutants: a review on current and future trends of emissions and impact on agriculture. *Journal of Scientific Research* 55(771): 1.
23. Raza, A., Shoaib, M., Khan, A., Baig, F., Faiz, M.A., & Khan, M.M. (2020). Application of non-conventional soft computing approaches for estimation of reference evapotranspiration in various climatic regions. *Theoretical and Applied Climatology* 139: 1459-1477. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03007-3>.
24. Raziei, T., Daneshkar Arasteh, P., & Saghafian, B. (2005). Annual rainfall trend analysis in arid and semi-arid regions of central and eastern Iran. *Water and Wastewater* 54: 73-81 (In Persian).
25. Saggi, M.K., & Jain, S. (2019). Reference evapotranspiration estimation and modeling of the Punjab Northern India using deep learning. *Computers and Electronics in Agriculture* 156: 387-398. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.11.031>.
26. Shahryar, F., Gandomkar, A., & Hashempour, R. (2019). Optimal locating of the new towns in Qazvin Province based on climatic parameters. *Geography and Environmental Planning* 29: 19-34. (In Persian). <https://doi.org/10.22108/gep.2018.98275.0>.
27. Shiri, J., Marti, P., Karimi, S., & Landeras, G. (2019). Data splitting strategies for improving data driven models for reference evapotranspiration estimation among similar stations. *Computers and Electronics in Agriculture* 162: 70-81. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.03.030>.
28. Singh, A., Haghverdi, A., Öztürk, H.S., & Durner, W. (2020). Developing pseudo continuous pedotransfer functions for international soils measured with the evaporation method and the HYPROP system: I. The soil water retention curve. *Water* 12: 3425. <https://doi.org/10.3390/w12123425>.
29. Sandhu, R., & Irmak, S. (2020). Performance assessment of hybrid-maize model for rainfed, limited and full irrigation conditions. *Agricultural Water Management* 242: 106402. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106402>.
30. Tabari, H., Martinez, C., Ezani, A., & Hosseinzadeh Talae, P. (2013). Applicability of support vector machines and adaptive neurofuzzy inference system for modeling potato crop evapotranspiration. *Irrigation science* 31: 575-588. <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0332-6>.
31. Üneş, F., Kaya, Y.Z., & Mamak, M. (2020). Daily reference evapotranspiration prediction based on climatic conditions applying different data mining techniques and empirical equations. *Theoretical and Applied Climatology* 141: 763-773. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03225-0>.
32. Vapnik, V.N. (2000). *The nature of statistical learning theory, ser. Statistics for engineering and information science*, Springer, New York, 21:1003–1008.
33. Willmott, C.J., Robeson, S.M., & Matsuura, K. (2012). A refined index of model performance. *International Journal of climatology* 32: 2088-2094. <https://doi.org/10.1002/joc.2419>.
34. Yang, L., Feng, Q., Li, C., Si, J., Wen, X., & Yin, Z. (2017). Detecting climate variability impacts on reference and actual evapotranspiration in the Taohe River Basin, NW China. *Hydrology Research* 48: 596-612. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.252>.



## The Combined Role of GIS, RS and Geoelectric in Determining the Susceptible Areas of Underground Dam Construction (Case Study: Pashueeyeh Basin of Kerman Province)

N. Hajseyedalikhani<sup>1\*</sup>, H. Saeediyani<sup>2</sup>

Received: 04-10-2022

Revised: 07-12-2022

Accepted: 18-12-2022

Available Online: 22-02-2023

### How to cite this article:

Hajseyedalikhani, N., & Saeediyani, H. (2023). The Combined Role of GIS, RS and Geoelectric in Determining the Susceptible Areas of Underground Dam Construction (Case Study: Pashueeyeh Basin of Kerman Province). *Journal of Water and Soil* 36(6): 729-742. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/jsw.2022.79034.1207](https://doi.org/10.22067/jsw.2022.79034.1207)

### Introduction

Control and extraction of water using underground dams in arid regions has been of interest to researchers since not too long ago. Construction of underground dams does not require surface water storage and does not change land use. Therefore, they are environmentally suitable. The lack of groundwater resources on the one hand and indiscriminate and unscientific harvesting on the other hand, and the increasing needs associated with population growth, will cause scientific communities to revise and provide appropriate solutions for managing the exploitation of groundwater aquifers and creating new resources or renewable reservoirs in the country. Nowadays, in many countries of the world, the construction of underground dams has been considered as a new method for utilization of water resources. Several criteria such as physical, socio-economic and hydrological criteria are involved in the location of underground dams. Underground dams have wide applications for feeding groundwater aquifers and water storage, as well as preventing soil erosion and increasing groundwater quality. Due to the limitation of water resources and the lack of equality of the world's share in exploiting this divine gift, it is anticipated that most countries will soon suffer from severe water shortages, so that it is firmly believed that if this problem continues, many international conflicts will be over water for centuries to come. One of the strategies to deal with water shortage is to extract water from new resources, especially the discovery of underground, which can be done by constructing different underground dams and with the knowledge of the world.

### Materials and Methods

In this study, to determine the susceptible areas of underground dam construction using field visits was selected Pashueeyeh watershed. To communicate between effective criteria and save time and money, a method based on combining maps in GIS and RS system has been used. In the first step, investigations were carried out to identify suitable areas for the construction of underground dam. For this purpose, data extracted from basic maps, findings in this field and expert opinions were used.

### Results and Discussion

Therefore, a combination of new sciences such as GIS, RS and geoelectrics was used in determining the susceptible areas of underground dam construction, which in turn is a valuable research that provides the situation for creating other combined researches in different climates of the country, stating that a combination of different sciences in addition to the sciences mentioned in this research can increase the quality of studies related to underground dams and even large groundwater discovery are effective and in case of mild to severe droughts

1 and 2- Researcher and Assistant Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Kerman Agricultural and Natural Resource Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Kerman, Iran

(\*- Corresponding Author Email: [n.sedalikhani@areeo.ac.ir](mailto:n.sedalikhani@areeo.ac.ir))

can be a way to solve the country's problems in the field of using quality water and lower extraction costs. The results showed that Pashueeyeh watershed is not a susceptible place for underground dam construction in Lut desert region for water storage. According to the results of geoelectric sondages and field evidences, the bedrock at the proposed location has dense clay that have many salts and the depth of impact on the bedrock varies between at least 2.6 meters and a maximum of 7 meters. On the bedrock is a river alluvial layer consisting of two wet and dry horizons. Also, the river alluvial layer consists of sequences of layers with different aggregation and permeability. The results show that the electrical resistance of different layers rarely reaches more than 30 ohms per meter; this is due to fine grain texture and high density of sediments as well as water salinity.

### **Conclusion**

One of the strategies to deal with water shortage is to extract water from new resources, especially the discovery of underground aqueous, which can be done by constructing different underground dams and with the new knowledge of the world. Underground dams in the world are expanding in different climates, especially in arid and semi-arid regions, which are likely to become one of the most important sources of water extraction in the future years, especially if they are associated with new technologies and combination of GIS, RS and geoelectric. the results showed that the combined role of GIS, RS and geoelectric in determining the susceptible areas of underground dam construction makes the accuracy of proper site construction of underground dams and even the discovery of underground aquifers much higher and achieved valuable results.

**Keywords:** Geographical system, Pashueeyeh watershed, Sondage, Underground dam

## مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۶، بهمن - اسفند ۱۴۰۱، ص. ۷۴۲-۷۲۹

# نقش تلفیقی GIS، RS و ژئوالکترونیک در تعیین مناطق مستعد احداث سد زیرزمینی (مطالعه موردی: حوزه پشویی استان کرمان)

نجمه حاج سید علی خانی<sup>۱\*</sup> - حمزه سعیدیان<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۷/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۹/۲۷

## چکیده

کنترل و استحصال آب با استفاده از سدهای زیرزمینی در مناطق خشک از زمان‌های نه چندان دور مورد توجه پژوهشگران و محققین بوده است. در این تحقیق برای تعیین مناطق مستعد احداث سد زیرزمینی با استفاده از بازدیدهای میدانی حوزه آبخیز پشویی انتخاب شد. برای برقراری ارتباط میان معیارهای تاثیرگذار و صرفه‌جویی در وقت و هزینه از روشی مبتنی بر تلفیق نقشه‌ها در سامانه اطلاعات جغرافیایی GIS و RS استفاده شده است. نتایج نشان داد که حوزه آبخیز پشویی مکانی مستعد برای ساخت سد زیرزمینی در منطقه کویر لوت به منظور ذخیره آب نیست. با توجه به نتایج سونداژهای ژئوالکترونیک و شواهد صحرایی سنگ کف در محل گزینه پیشنهادی از نوع رس متراکم دارای املاح فراوان می‌باشد و عمق برخورد به سنگ کف نیز بین حداقل ۲/۶ متر و حداکثر ۷/۰ متر متغیر است. بر روی سنگ بستر یک لایه آبرفت رودخانه‌ای مشتمل بر دو افق آبدار و خشک قرار دارد. همچنین لایه آبرفت رودخانه‌ای شامل توالی لایه‌هایی با دانه‌بندی و نفوذپذیری متفاوت می‌باشند. چنانچه نتایج برداشت‌ها نشان می‌دهد مقاومت الکتریکی لایه‌های مختلف به ندرت به بیش از ۳۰ اهم بر متر می‌رسد که این امر ناشی از بافت ریز دانه و تراکم بالای رسوبات و نیز شوری آب می‌باشد. ضمناً نتایج نشان داد نقش تلفیقی GIS، RS و ژئوالکترونیک در تعیین مناطق مستعد احداث سد زیرزمینی باعث می‌شود دقت احداث مکان‌یابی درست احداث سدهای زیر زمینی و حتی کشف سفره‌های زیر زمینی بسیار بالاتر رود و به نتایج ارزشمندی دست پیدا کرد.

**واژه‌های کلیدی:** حوزه آبخیز پشویی، سامانه جغرافیایی، سد زیر زمینی، سونداژ

## مقدمه

زیر زمینی نیازی به ذخیره سطحی آب ندارد و سبب تغییر کاربری اراضی نیز نمی‌شود. بنابراین از لحاظ ابنیه‌ای سازگار با شرایط زیست محیطی می‌باشند (Telmer and Best, 2004). کمبود منابع آب زیرزمینی از یکسو و برداشت بی‌رویه و غیر علمی از سوی دیگر و افزایش روز افزون نیازهای مرتبط با رشد جمعیت جوامع علمی را به بازنگری و ارائه راهکارهای مناسب در خصوص مدیریت بهره‌برداری از سفره‌های آب زیرزمینی و ایجاد منابع جدید یا مخازن تجدیدشونده در کشور وا می‌دارد (Fazelpour Aqda'i et al., 2013). گستردگی مناطق خشک در جهان، افزایش روز افزون جمعیت، توسعه فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی، گرم شدن هوای کره زمین و در نتیجه تغییرات اقلیمی حاصل از آن یک سو و محدود بودن منابع قابل استفاده در جهان از سوی دیگر، تامین آب برای فعالیت‌های بشری را

باتوجه به محدودیت منابع آب و عدم تساوی سهم مردم جهان در بهره‌برداری از این موهبت الهی، پیش‌بینی شده است که اغلب کشورها به زودی از کمبود شدید آب رنج خواهند برد به طوری که اعتقاد راسخ بر آن است که در صورت ادامه این معضل، بسیاری از نزاع‌های بین‌المللی قرن‌های آینده بر سر آب باشد. ساختن سدهای

۱ و ۲- به ترتیب محقق و استادیار پژوهشی بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران

\* - نویسنده مسئول: (Email: [n.sedalikhani@areeo.ac.ir](mailto:n.sedalikhani@areeo.ac.ir))

DOI: [10.22067/jsw.2022.79034.1207](https://doi.org/10.22067/jsw.2022.79034.1207)

تقویت سفره آب‌های زیرزمینی و همچنین تقویت پوشش گیاهی و مصارف کشاورزی می‌باشد. بنابراین تلفیقی از علوم جدید مانند GIS، RS و ژئوالکترونیک در تعیین مناطق مستعد احداث سد زیرزمینی استفاده شد که به نوبه خود کاری ارزشمند می‌باشد که زمینه ایجاد پژوهش‌های ترکیبی دیگر را در اقلیم‌های مختلف کشور فراهم می‌کند و بیان می‌دارد که ترکیبی از علوم مختلف علاوه بر علوم ذکر شده در این پژوهش می‌تواند در بالا بردن کیفیت مطالعات مربوط به سدهای زیرزمینی و حتی کشف سفره‌های آبی بزرگ زیرزمینی موثر باشد و در مواقع خشکسالی‌های خفیف تا شدید می‌تواند راه‌گشای حل مشکلات کشور در زمینه استفاده از آب با کیفیت و هزینه استخراج کمتر باشد.

## مواد و روش‌ها

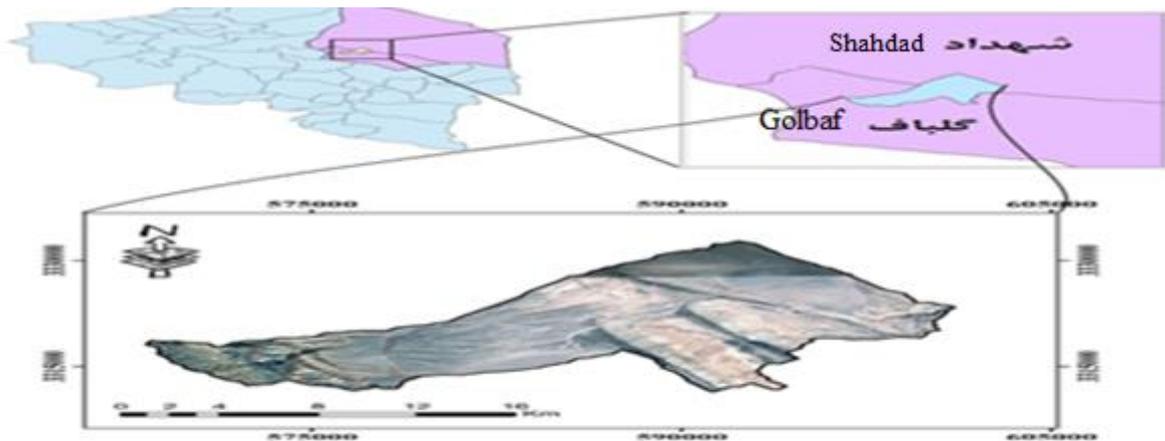
### منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز پشوییته به مساحت ۳۱۷/۷ کیلومتر مربع در حد فاصل بخش شهداد و گلباف، در شرق روستای جوشان متعلق به استان کرمان واقع شده است. محل پیشنهادی سد زیرزمینی در فاصله کمتر از دویست متری غرب پشوییته قرار داد. روستای پشوییته در جنوب اندوهجرد و در شمال روستای کشت قرار دارد و دارای ۱۱۵ نفر جمعیت می‌باشد. محدوده مورد مطالعه واقع در ۳۳۱۱۱۰۲ تا ۳۳۳۲۹۷۲ عرض شمالی و ۵۶۷۹۰۳ تا ۶۰۱۳۹۶ طول شرقی می‌باشد. بیشترین ارتفاع منطقه ۲۶۷۸ متر و کمترین ارتفاع آن معادل ۳۷۸ متر از سطح دریا و متوسط وزنی ارتفاع ۱۰۴۴ متر است. شیب عمومی منطقه به سمت شرق و به عبارتی به سمت دشت لوت می‌باشد. براساس محاسبات انجام شده شیب متوسط وزنی منطقه مورد مطالعه برابر با ۷/۵ درصد می‌باشد. بارندگی کم و تبخیر زیاد بیانگر اقلیم منطقه و خشکی آن است. متوسط بارندگی سالانه حوزه ناچیز بوده و مقدار آن در ارتفاع متوسط حوزه برابر ۶۸ میلی‌متر برآورد شده است. دمای منطقه دارای نوسانات زیاد بوده و مقدار متوسط سالانه آن در ارتفاع متوسط حوزه ۲۲ درجه سانتی‌گراد است. تنگه پشوییته در فاصله کمتر از دویست متری غرب روستای پشوییته قرار دارد و در حقیقت محل خروجی زهکش حوزه آبخیز بالادست به سمت کویر لوت می‌باشد که در برخی نقاط تنگه به صورت چشمه بیرون زده‌اند بر اساس بررسی‌های انجام شده هدایت الکتریکی آب این چشمه‌ها حدود ۳۷۰۰ تا ۴۰۰۰ میکرو موس می‌باشد. دسترسی به این گزینه به سادگی و از میان رودخانه امکان‌پذیر بوده است.

بیش از پیش دشوار نموده است. امروزه در بسیاری از کشورهای دنیا ساخت بندهای زیرزمینی به عنوان روشی جدید در بهره‌برداری از منابع آب مورد توجه قرار گرفته است. معیارهای متعددی مانند معیارهای فیزیکی، اقتصادی - اجتماعی و هیدرولوژیکی در مکان‌یابی سدهای زیرزمینی دخالت دارند (Nilsson, 1988). سدهای زیرزمینی برای تغذیه سفره‌های آب‌های زیرزمینی و ذخیره آب و همچنین جلوگیری از فرسایش خاک و افزایش کیفیت آب‌های زیرزمینی (Sagvand Hassanabadi and Modabber, 2006) کاربردهای وسیعی دارد. از دیگر توانایی‌های سدهای زیرزمینی برای جلوگیری از نفوذ آب دریاچه شور به سفره‌های آب شیرین است که در یوگسلاوی (Pavlin, 1973) و یونان (Garagunis, 1981) در سال ۱۹۷۳ پیشنهاد شدند. بندهای زیرزمینی به دلیل تنوع، در صورت اجرای مناسب، می‌توانند نقش موثری در مدیریت و توسعه منابع آبی کوچک به ویژه در دوران خشکسالی ایفا نماید. این روش کاربردهای متفاوتی داشته و در شرایط مختلف قابل اجرا می‌باشد (Majidi, 2006) و اگر به صورت علمی و درست ساخته شوند علاوه بر کمک به محیط زیست، جبران آب‌های سطحی و گسترش زمین‌های زیر کشت را به وجود خواهند آورد (Budagpour and Bageri, 2010). ضمناً سدهای زیرزمینی در همه کشورها به خصوص ایران که سطح آب زیرزمینی نوسان زیادی در فصل خشک و مرطوب دارد، مفید خواهد بود (Hasani et al., 2013). امروزه با توجه به اهمیت سدهای زیرزمینی در اقلیم‌های مختلف دنیا، محققان بسیاری با تمرکز بر روی سدهای زیرزمینی به دنبال یافتن راه‌حلی برای مکان‌یابی درست و همچنین احداث سدهای زیرزمینی مقرون به صرفه و با کیفیت بالا می‌باشند. داس گوپتا (Das Gupta, 2000) در جزیره ساحلی فاکت<sup>۱</sup> در تایلند مطالعه‌ای با استفاده از مدل تفاضل محدود مادفلو بر روی حوزه آب زیرزمینی در دو حالت وجود و عدم وجود سد انجام داد و ارزیابی سد زیرزمینی بر میزان آب قابل برداشت مطمئن با کیفیت مناسب از لایه آبدار را انجام دادند. آشیدا و همکاران (Ishida et al., 2011) با مطالعه بر روی سدهای زیرزمینی، اثر سدهای زیرزمینی را توسعه پایدار منابع زیرزمینی مورد بررسی قرار دادند. اس کی<sup>۲</sup> و همکاران (SK et al., 2018) مناطق حاوی آب زیرزمینی قابل بهره‌برداری در اقیولیت‌های منطقه جنوب آندمان را در اعماق ۳ تا ۲۰ متری به کمک روش ژئو الکتریک شناسایی کردند و با انجام گمانه‌های اکتشافی در نقاط پیشنهادی، نتایج حاصل از مطالعات ژئو الکتریک را تصدیق نمودند. هدف از این مطالعه استفاده ترکیبی از فناوری‌های نوین برای مکان‌یابی درست سدهای زیرزمینی به منظور

1- Fauket

2- SK



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز پشوئییه در استان کرمان  
Figure 1- Pashueyeh watershed location in Kerman province



شکل ۲- مکان پیشنهادی احداث سد زیرزمینی و آبادی پشوئییه  
Figure 2- The proposed location of the underground dam and the village of Pashueyeh

استخراج شده از نقشه‌های پایه، یافته‌های موجود در این زمینه و همچنین نظرات کارشناسی استفاده گردید. مناطق مناسب شامل بستر آبرفتی رودخانه‌هایی است که دارای شیب‌های حداکثر ۶ درصد می باشند و زمین‌های کشاورزی، صنعتی، مسکونی و کوره قنات در آنجا وجود ندارد. علاوه بر شرایط بالا این بسترهای آبرفتی نباید منطبق بر ساختارهای خطی مانند گسل‌ها باشند. برای تسریع در امر تصمیم گیری و همچنین پرهیز از جمع‌آوری اطلاعات مازاد بر نیاز درباره مسئله مورد بررسی ابتدا لازم است که با در نظر گرفتن تعدادی از معیارها و عوامل کلیدی، نقاط نامناسب حذف گردد. به طور نمونه یکی از این معیارها برای انتخاب مناطق مناسب احداث بند زیرزمینی، شیب بستر آبراهه می‌باشد. طبق بررسی‌ها و مطالعاتی که در سایر کشورها توسط محققین و کارشناسان صاحب نظر در مورد بندهای زیرزمینی به عمل آمده است (Wiplinger, Nilsson, 1988; 1982). شیب مناسب بستر آبراهه به جهت این که بتوان مخزن

همچنین وجود پوشش گیاهی شامل درختان گز، کهور و نیز نی در بخشی از منطقه دیده می‌شود. عرض تنگه در محل پیشنهادی جهت احداث سد زیرزمینی حدود هشتاد و پنج متر است و به دلیل ایجاد مآندر و انحنای مسیر رودخانه در قوس داخلی یا ساحل جنوبی تراس آبرفتی کم ارتفاعی ایجاد گردیده که از بستر رودخانه بین ۱ تا ۱/۵ متر ارتفاع دارد. موقعیت محل پیشنهادی در ۶۰۰۶۰۲ طول شرقی و ۳۳۲۲۸۴۶ عرض شمالی قرار دارد و ارتفاع محل گزینه پیشنهادی نیز حدود ۳۷۸ متر از سطح دریا است. وجود درختان کهنسال بر روی تراس آبرفتی موید فعالیت کشاورزی در سنوات قدیم می‌باشد.

#### روش تحقیق

در گام نخست، بررسی‌ها برای شناسایی محدوده‌های مناسب برای احداث بند زیرزمینی انجام گرفت. برای این منظور از داده‌های

سدهای زیرزمینی و یا سایر عملیات آبخیزداری، عملیات تامین و توسعه منابع آب صورت گرفته است که نقش قابل ملاحظه‌ای در کنترل رواناب حوزه‌های مذکور داشته است اما هنوز برخی از زیر حوزه های این حوزه آبخیز بزرگ اقدامات خاصی صورت نگرفته است که ضرورت دارد بررسی لازم جهت کنترل رواناب این زیر حوزه‌ها صورت گیرد که با توجه به تبخیر بسیار بالا، احداث سدهای زیر زمینی می تواند در اولویت کاری قرار گیرد. به منظور برآوردی از وضعیت آب زیرزمینی در بستر و تکیه گاه‌ها، در بحث‌های مربوط به گیاهشناسی و اکولوژی گیاهی، هر گونه رفتار خاصی نشان می‌دهد که مختص آن گونه یا تعدادی گونه یا جنس خاص می‌باشد. گاهی مواقع محقق می تواند با توجه به این موارد برخی ویژگی‌های خاک شناختی، هیدرولوژیکی، زمین شناختی و غیره پی ببرد. حضور گونه‌های گیاهی آبدوست و رودخانه روی مانند نی (*Aroundo spp.*) و خرزهره (*Nerium oleander*) نشان از وجود منابع غنی آب زیرسطحی و زیرقشری در بستر رودخانه دارد. گونه‌های دیگر مانند گز رودخانه‌ای (*Tamarix stricta*) نیز شاهد دیگری بر این مدعاست. روی دامنه‌ها گونه‌های خاصی که وجود آب زیر قشری را تأیید کند دیده نمی‌شود و به نظر می رسد به علت کمی بارش در مناطق پایبندست رودخانه دامنه‌ها چندان آبدار نباشند. بنابراین نتیجه‌گیری می‌شود که جریان های زیر قشری و سطحی روخانه اصلی پوشش ناشی از بارش‌های ارتفاعات بالادست است.

در بعضی قسمت‌های دشتی حوزه پوشش گونه‌هایی از قبیل دک<sup>۱</sup> که غنچه آن ارزش اقتصادی دارد دیده می‌شود. در قسمت‌های مرتفع تر گونه‌های درمنه به چشم می‌خورد. از دیگر گونه‌های گیاهی موجود در منطقه می‌توان به انواع گز و گونه‌های شور پسند اشاره نمود. اما در مجموع پوشش منطقه فقیر و کمتر از ۵ درصد می‌باشد. اما در بعضی نقاط از بستر آبراهه‌ها بخصوص مناطقی که محل تقاطع رسوبات دوران چهارم با لایه رسی پوشش گیاهی متراکم تر و حتی بیش از ۵۰ درصد که به صورت لکه‌هایی در تصاویر ماهواره‌ای قابل رویت می‌باشند که خود دلیلی محکم بر وجود آب زیرقشری در دل کویر لوت است.

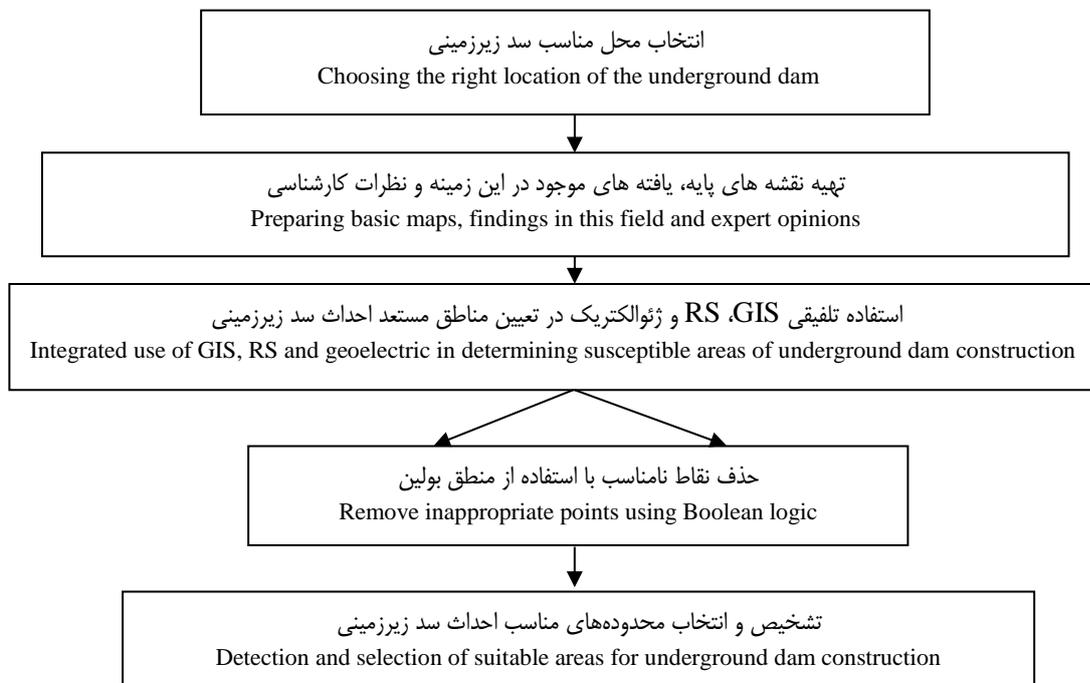
بعد از تهیه نقشه‌های پایه زمین شناسی، شیب و کاربری اراضی با استفاده از منطق بولین، مناطق دارای ارزش ۱ جز مناطق مستعد بند زیرزمینی مشخص می‌شوند. در این مرحله محورهای باقیمانده بایستی از سه جهت ارزیابی گردند. محور مورد نظر در هر محدوده علاوه بر داشتن کمترین عرض جهت حجم کار سازه ای کم، باید دارای حجم مخزن مناسب نیز باشد.

مناسب آب زیرسطحی را با احداث بند زیرزمینی در آن ایجاد کرد نباید بیشتر از ۵٪ باشد البته با این فرض که شیب سنگ کف رودخانه از شیب بستر تبعیت می‌نماید. به علاوه در این مناطق به دلیل کم شدن سرعت آب زمان نفوذ آب افزایش می‌یابد. در نتیجه مناطقی از رودخانه که شیب بستر آن بیش از ۵٪ باشد جهت احداث بند زیرزمینی مناسب نمی‌باشند. استخراج این معیارها و مشخص کردن مناطق پتانسیل دار را می‌توان با استفاده از تفسیر تصاویر ماهواره‌ای و برداشت‌های زمینی همزمان، نقشه‌های توپوگرافی، نقشه‌های زمین شناسی و دیگر اطلاعات انجام داد. در این تحقیق برای حذف نقاط نامناسب از منطق بولین استفاده گردید. منطق بولین یا منطق صفر و یک، برگرفته از نام ریاضیدان مطرح جورج بولی بوده است که در آن وزن دهی به واحدها در هر لایه اطلاعاتی براساس امتیاز صفر و یک می‌باشد (*Farhoudi et al., 2005*). روش بولین دارای محدوده‌ای صریح است و ماهیتی قطعی و دقیق دارد. در منطق بولین دو نتیجه محتمل است: صفر و یک. صفر نشان دهنده آن است که عنصر مورد بررسی به مجموعه تعلق ندارد و یک یعنی عنصر به مجموعه تعلق دارد. از نظر منطق بولین مکان انتخاب شده خوب یا بد خواهد بود نه نسبتاً خوب یا بد. به هر حال از آنجایی که اکثر پدیده‌های جغرافیایی به تدریج در زمان و فضا تغییر می‌کنند، اعمال حدود صریح بین طبقات نامناسب است (*Tang, 2006*). با استفاده از این منطق کاربر هیچ ایده‌ای در مورد بهترین و بدترین مکانی که کلیه محدودیت‌ها را در نظر بگیرد نخواهد داشت زیرا نتایج حاصل از آنالیز بولین ۰ و ۱ است که تنها نشان می‌دهد آیا مناطق مناسب هستند یا نه (*Yanar and Akyurek, 2004*). این منطق ساده‌ترین و شناخته‌ترین منطق GIS است که بر اساس عملیات بولین عمل می‌کند. مدل بولین دارای دو عملگر بولین AND و بولین OR می‌باشد که بر اساس نظریه‌ها، مجموعه‌ها عملگر AND، اشتراک و عملگر OR، اجتماع مجموعه‌ها را استخراج می‌کند (*Grimm F, 2000*). با توجه به هدف تحقیق که انتخاب مناطقی است که از لحاظ تمامی پارامترها مناسب باشند، از عملگر AND استفاده گردید. حوزه آبخیز کویر لوت با مساحت ۱۴/۵ میلیون هکتار بزرگترین حوزه آبخیز فلات ایران است که حدود ۹ میلیون هکتار آن را دشت‌های پهناور کویری تشکیل می‌دهند. بخشی از حوزه آبخیز کویر لوت که در استان کرمان واقع شده ۸۶۵۱۴/۷۵ کیلومتر مربع وسعت دارد که در حد فاصل ۵۹ درجه ۴۱ دقیقه و ۳۷/۵ ثانیه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۳۷/۲ دقیقه و ۲۸/۲ ثانیه عرض شمالی از نصف النهار گرینویچ واقع شده است. این حوزه از چندین زیر حوزه تشکیل شده است که مهمترین آنها به شرح ذیل می‌باشند. لازم به ذکر است در بخش قابل ملاحظه‌ای از حوزه‌های آبخیز کویر لوت مانند حوزه آبخیز نساء (احداث سد مخزنی نساء)، حوزه آبخیز آب باریک (احداث پخش سیلاب آب باریک)، حوزه آبخیز قدرونی (احداث سد مخزنی قدرونی) و در برخی از حوزه‌ها مانند حرمک، راور احداث

1- *Capparis spinosa*



شکل ۳- نمایی از پوشش گیاهی رودخانه ای در محل حوزه پشویه  
Figure 3- A view of river vegetation in the Pashueeyeh area



شکل ۴- فلوچارت کلی انجام تحقیق  
Figure 4- Total flowchart of research

بالا دست محور باشند. از طرفی قنوات از جمله مهمترین منابع تأمین آب در این مناطق می باشند که برای ساکنین موجود در آن مناطق دارای اهمیت شایانی می باشند و تخریب این منابع آبی با ارزش به هر دلیلی با چالش های محلی شدیدی همراه خواهد بود. هدف اصلی از احداث بند زیرزمینی در این مناطق نیز کمک به بهبود وضعیت منابع آبی موجود در منطقه و استفاده بهینه از جریان های زیرزمینی موجود

از طرفی بایستی وجود منابع آبی حساس در این محدوده ها بررسی گردند. بعد از تعیین این مناطق با استفاده از بازدیدهای میدانی تنگه های موجود در این مناطق مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به این که هر چه طول محور کمتر باشد حجم کار سازه ای کاهش می یابد و عملیات اجرا با سرعت پیش می رود مناسب ترین محورها آنهایی می باشند که علاوه بر طول کم دارای گسترش سطحی زیاد مخزن در

### خصوصیات تکتونیکی منطقه

منطقه مورد مطالعه از نظر تکتونیکی بسیار فعال و پیچیده می‌باشد و عامل تکتونیک تاثیر بسزایی در ایجاد شکل کنونی حوزه مورد مطالعه داشته و دارد بررسی‌های ساختاری نشان می‌دهد که اگرچه منطقه لوت به پایداری نسبی رسیده و به همین دلیل از آن به عنوان بلوک لوت یاد می‌شود اما حواشی این بلوک بسیار فعال و پویاست و به همین دلیل همواره زمین لرزه‌های بزرگی در این مناطق روی می‌دهد. چنانچه گفته شد حرکت صفحه عربستان در جهت جنوب غربی به شمال شرقی باعث ایجاد رژیم فشاری به ویژه در ایران مرکزی گردیده که این امر کوتاه شدگی پوسته و ایجاد گسل‌هایی از نوع راندگی را در پی دارد در منطقه مورد مطالعه نیز رژیم فشاری و کوتاه شدگی بصورت ایجاد راندگی‌های موازی مشخص شده که رانده شدن بلوک لوت به زیر بخش غربی را باعث شده است. از سوی دیگر آخرین کوهزایی رخ داده در منطقه مورد مطالعه مربوط به کوهزایی پاسادنین است که در اواخر پلیوسن رخ داده و واحدهای قدیمی تر بخصوص لایه‌های زیرین سازند لوت را چین داده است. علاوه بر ویژگی‌های ساختاری از مهمترین تاثیرات گسل‌ها، خردشدن سنگ‌ها و افزایش نفوذپذیری است ضمن اینکه با خردشدن سنگ‌ها شرایط مناسب برای افزایش تاثیر عوامل هوازدگی و فرسایش نیز فراهم می‌گردد، گسل‌ها و شکستگی‌های متعددی در داخل و مجاور حوزه وجود دارد.

در بستر رودخانه می‌باشد (Tabatabai Yazdi and Nabi Peylaskarian, 2003). منتهی با این فرض که ایجاد یک منبع آبی جدید نباید با تخریب منبع آبی قدیمی منطقه همراه باشد. لذا با این پیش فرض که هیچ قناتی نباید به واسطه احداث بندزیرزمینی در معرض تخریب یا کاهش شدید دبی قرار بگیرد، مناطقی که در آنها کوره قنات وجود دارد، در این مرحله از پتانسیل‌یابی جزء مناطق نامناسب احداث بند زیرزمینی در نظر گرفته شده‌اند. از طرفی باید به این نکته توجه کرد که به دلیل قرار گرفتن مخزن در زیر سطح زمین و عدم توانایی تکنیک‌های موجود در تعیین دقیق خصوصیات مخزن به خصوص آب بند بودن آن، ریسک پرنشیدن مخزن آب زیرزمینی می‌تواند وجود داشته باشد، بنابراین منطقی است که از تخریب قنوات تا حد ممکن جلوگیری شود. البته باید متذکر شد که احداث بند زیرزمینی در برخی مناطق برای قنواتی که در بالا دست محور بند قرار دارند یک امتیاز مثبت نیز محسوب می‌شود، چراکه احداث بند باعث بالا آمدن سطح ایستابی سفره‌های آبی موجود در منطقه و بالطبع افزایش طول بخش تره‌کار قنات و آبدهی بیشتر این قنوات می‌گردد. همچنین ضروری است که تمهیدات لازم برای قنوات پائین دست بند که ممکن است با کاهش دبی همراه باشند در نظر گرفته شود. با توجه به این عوامل و با بازدیدهای صحرائی در این محورها، محورهای مناسب از حوزه آبخیز کویر لوت شناسایی گردید.



شکل ۵- وضعیت گسل‌های حوزه آبخیز پشوئیه

Figure 5- The status of faults in the Pashueyeh watershed

بررسی ۱۵ متر مد نظر بود بنابراین فاصله الکترودهای جریان بین ۸۰ تا ۱۰۰ متر انتخاب گردید تا بتوان حداقل به عمق نفوذ ۲۰ متر دست یافت. شایان ذکر است با وجود عوارض سطحی همچون عرض محدود تنگه، پستی و بلندی، انحنای آبراهه، وجود تراس‌های آبرفتی ناهموار و پوشش گیاهی انبوه امکان نصب الکترودها در یک نوار منظم وجود ندارد. در نتیجه تعداد سونداژها محدود و توزیع آنها در عرض تنگه مناسب نیست. گفتنی است تعیین مقاومت ویژه به روش سونداژ زنی و با استفاده از آرایه شومبرژه انجام گردیده به طوری که همزمان با ارسال جریان الکتریکی مستقیم به الکترودهای جریان، اختلاف پتانسیل الکتریکی بین الکترودهای پتانسیل اندازه‌گیری شده است. دستگاهی که برای این مطالعات استفاده شده دستگاه Syscal R2 ساخت کشور فرانسه به همراه سایر تجهیزات مربوطه (کابل، الکترو و.....) می‌باشد در این دستگاه پتانسیل خودزای زمین قبل از ارسال جریان مشخص می‌شود که حاصل اندازه‌گیری بدست آمده مقدار خواهد بود نتیجه اینکه ضریب هندسی  $k$  با بعد متر بدست می‌آید. سپس داده‌های بدست آمده با استفاده از نرم‌افزار (IPI2WIN) مورد پردازش قرار گرفته و در نهایت نتایج پردازش شده تفسیر گردیده است. معمولاً به منظور تدقیق بررسی‌های ژئوالکترونیک، نتایج حاصل با داده‌های منتج از دیگر روش‌های مطالعه همچون ژئوتکنیک مقایسه و کنترل می‌گردد اما در مطالعات حاضر با توجه به عدم وجود حداقل شرایط جهت احداث سد از انجام عملیات ژئوتکنیک صرف نظر گردید.

## نتایج و بحث

مطالعات ژئوفیزیکی بخش مهمی از بررسی‌های تحت‌الارضی را تشکیل می‌دهد چرا که با استفاده از این روش‌ها می‌توان بدون انجام حفاری و روش‌های پرخرج دیگر تصویر جامع و مفیدی از اعماق زمین بدست آورد و برای ابهاماتی همچون لیتولوژی، عمق سنگ کف، محل شکستگی‌ها و گسله‌ها، همبری لایه‌ها، تعیین ضرایب دینامیکی و... پاسخ مناسب یافت. از جمله این روش‌ها می‌توان به تعیین خواص الکتریکی زمین اشاره نمود که با شاخص مقاومت ویژه الکتریکی و یا عکس آن (رسانندگی) سنجیده می‌شود. مقاومت ویژه الکتریکی از جمله ویژگی‌های متنوع مواد تشکیل دهنده زمین است که مقدار آن متناسب با قابلیت هدایت الکتریکی مواد گوناگون تغییر می‌نماید. این روش که از جمله متداول‌ترین روش‌ها برای بررسی در اعماق محدود است به علت هزینه کم کاربرد زیادی دارد. از این روش در بررسی کیفی و کمی آب‌های زیرزمینی، مطالعات مهندسی در محدوده سدها و نیروگاه‌ها و پالایشگاه‌ها و مجتمع‌های صنعتی استفاده می‌شود. از دیگر کاربردهای این روش استفاده از آن در جهت

زمین‌شناسی و ساختار تکتونیکی ساختگاه سد زیرزمینی واحدهای سنگی ساختگاه سد زیرزمینی شامل توالی از لایه‌های یک تا چندمتری مارن، سیلتستون و مادستون می‌باشند که در برخی افق‌ها و بصورت محلی به کنگلومرایی ریزدانه تبدیل می‌شوند کنگلومرای موجود عمده‌تاً دارای ماتریکس رسی و سیلیتی بوده در نتیجه کنگلومرای گلی تشکیل شده است به نظر می‌رسد بدلیل عوامل تکتونیکی و در نتیجه تغییرات ایجاد شده در کف حوضه رسوبی که از نوع دریاچه‌ای بوده شرایط محیط به وفور تغییر نموده و باعث بروز تغییرات جانبی در فواصل کوتاه شده است. آبرفت‌های رودخانه‌ای موجود در بستر رودخانه پشوئیته عموماً شامل شن، ماسه، قله سنگ و البته رس و سیلت بوده می‌باشند. در برخی افق‌ها هم با توجه به تغییر شرایط رسوبگذاری میزان رسوبات ریزدانه بصورت محلی افزایش می‌یابد. همچنین سنگ دانه‌ها و قله سنگ‌ها با توجه به طی کردن مسیر طولانی معمولاً گردشده و صاف می‌باشند. ساختگاه سد زیرزمینی پشوئیته از نظر تکتونیکی تحت تاثیر گسله شه‌داد است. تحت رژیم فشاری موجود در منطقه و در مجاورت این راندگی اصلی، تعداد زیادی گسله کوچک تر با امتدادهای مختلف ایجاد شده به طوری که دره پشوئیته در اثر عملکرد یکی از این گسله‌ها بوجود آمده است. همچنین برخی گسله‌های کوچکتر مرتبط با گسل شه‌داد مشاهده می‌گردند که به صورت عرضی رسوبات و واحدهای سنگی را قطع کرده‌اند بخصوص این امر در دامنه جنوبی رودخانه و در محل ساختگاه به خوبی دیده می‌شود. بنا براین فرار آب از طریق گسله موجود در سنگ بستر محتمل بوده و در این خصوص تنها پس از مطالعات تکمیلی می‌توان اظهار نظر نمود. در نقشه زیر موقعیت این گسل‌ها در ارتباط با ساختگاه سد نشان داده شده است. لایه‌بندی سنگ‌ها به صورت افقی و یا دارای شیب کم ( $<30^\circ$ ) به سمت غرب و جنوب غرب می‌باشند. درزه‌های موجود در واحدهای سنگی عمدتاً از نوع تکتونیکی بوده که با تاثیر عوامل فیزیکی در سطح سنگ‌ها توسعه یافته‌اند اما در عمق توده گسترش چندانی ندارند بنابراین امکان فرار آب از طریق سیستم‌های درزه قابل توجه نمی‌باشد. مضافاً بر اینکه با توجه به جنس سنگ‌ها و وجود ذرات رس، امکان آب‌بندی تقریبی و عدم ایجاد جریان زیرقشری از طریق درزه‌های موجود قابل انتظار می‌باشد.

## اندازه‌گیری مقاومت ویژه

برداشت‌های ژئوالکترونیک در محل تنگه پشوئیته صورت گرفت و در مجموع تعداد ۴ سونداژ الکتریکی با فواصل متفاوت در محدوده پروژه به انجام رسید بطوری که بتوان حداقل یک مقطع طولی مورد نیاز را ترسیم نمود با توجه به اینکه حداقل عمق مورد نیاز جهت

## تشخیص و انتخاب محدوده‌های مناسب احداث بند زیرزمینی

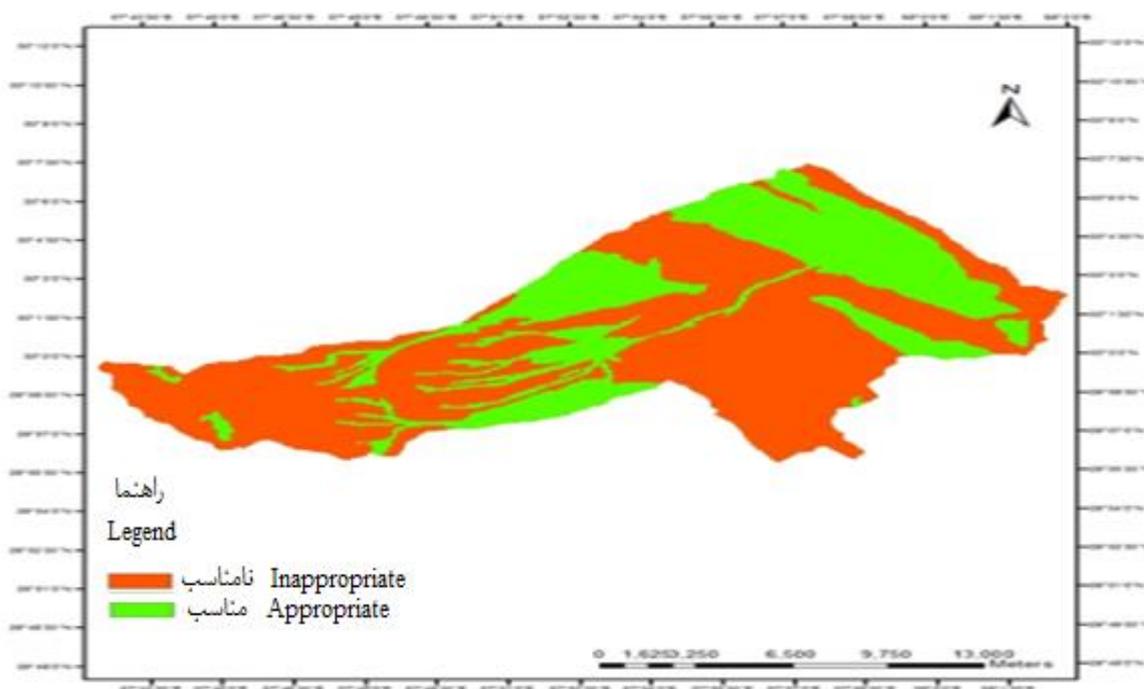
شاخص‌های تعیین محور مناسب برای احداث بند زیرزمینی در این پژوهش بدین صورت می‌باشد، که ابتدا عوامل تأثیرگذار که در فصل قبل مفصل بیان گردید، در شناسایی محدوده‌های مناسب احداث بند زیرزمینی بررسی گردید. به طوری که در آغاز نقشه‌های پایه شامل زمین‌شناسی، کاربری اراضی و شیب تهیه گردید و در محیط نرم‌افزاری ArcGIS از طریق منطق بولین با هم تلفیق گردید. در نقشه زمین‌شناسی سازندهای کواترنری دارای ارزش یک می‌باشند که این مناطق مناسب برای احداث بند زیرزمینی می‌باشد.

پس از تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی، شیب و کاربری اراضی هر منطقه و تلفیق آنها در نرم‌افزار Arc GIS، با استفاده از منطق بولین، مناطقی که از نظر زمین‌شناسی، شیب و کاربری اراضی مناسب احداث سد زیرزمینی می‌باشند در یک نقشه تلفیق، با ارزش عددی (۱) و موارد غیر مناسب با ارزش عددی (۰) مشخص گردد. که در نهایت این نقشه کلی با نقشه‌های توپوگرافی و آبراهه تلفیق داده شده است.

تعیین خوردگی خاک است. اهداف تعیین ژئوالکتریک منطقه بر پایه تعیین ویژگی‌های آبرفت محل پیشنهادی احداث سد زیر زمینی و مخزن سدهای زیرزمینی، تعیین خصوصیات سنگ بستر مادری و تعیین عمق آبرفت استوار است.

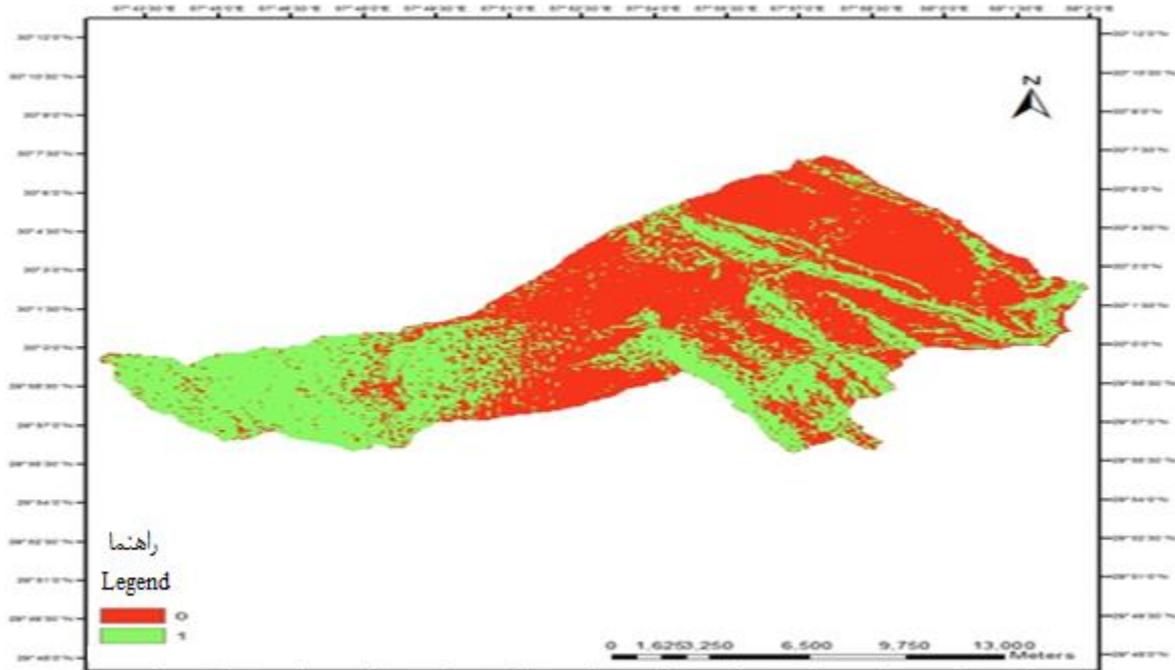
## مقیاس مقاومت مخصوص لایه‌ها

با مقایسه مقادیر مقاومت الکتریکی در سونداژهای مختلف لایه های نفوذپذیر و نفوذ ناپذیر قابل تفکیک می‌باشد به نظر می‌رسد لایه های نفوذپذیر از جنس آبرفت ماسه‌ای و شنی و دارای مقاومت مخصوص الکتریکی بیش از ۳۰ اهم متر و لایه‌های نفوذناپذیر از جنس ریزدانه و رسی دارای مقاومت مخصوص کمتر از ۲۰ اهم متر می‌باشد. البته دلیل وجود املاح نمکی و گچی در رسوبات مقادیر ارائه شده کمتر از میزان معمول می‌باشد و این امر کاملاً طبیعی است. همچنین به دلیل تغییرات جانبی زیاد حالات حد واسط نیز دیده می‌شود. در مجموع با توجه به نتایج سونداژهای ژئوالکتریک و شواهد صحرایی سنگ کف در محل گزینه پیشنهادی از نوع رس متراکم دارای املاح فراوان می‌باشد.



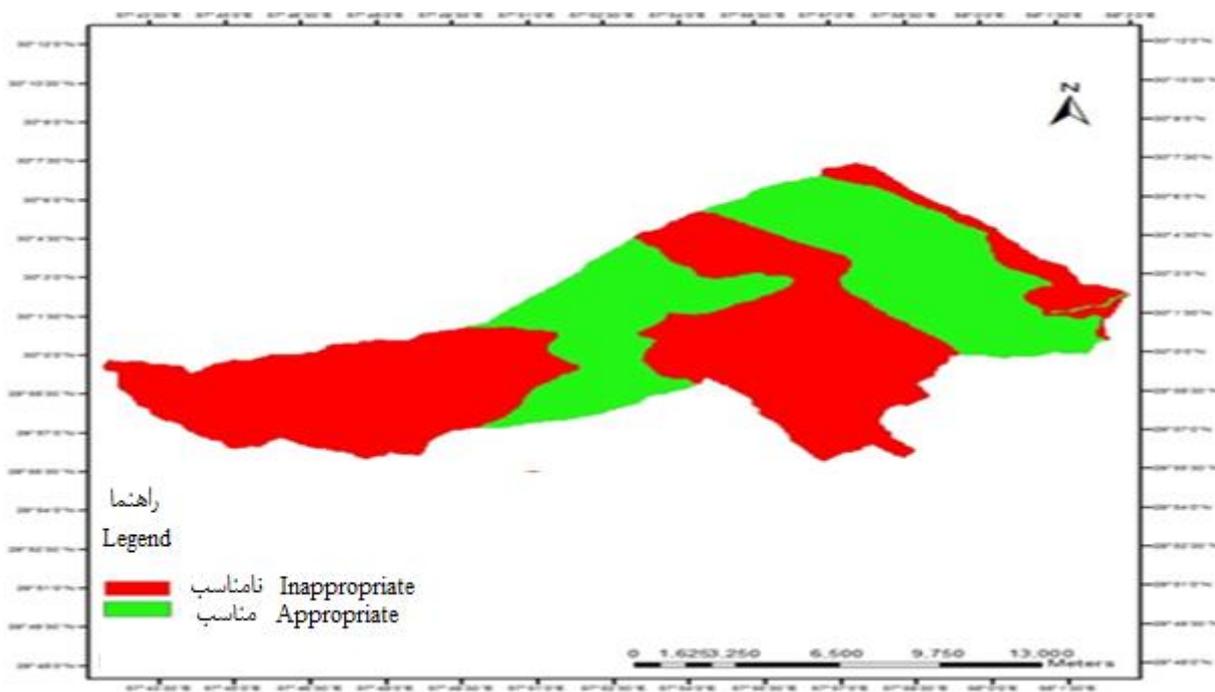
شکل ۶- نقشه محدوده‌های مناسب و نامناسب زمین‌شناسی جهت احداث بند زیرزمینی در حوزه آبخیز پشویه

Figure 6- Map of suitable and unsuitable geological areas for construction of underground dam in Pashueyeh watershed



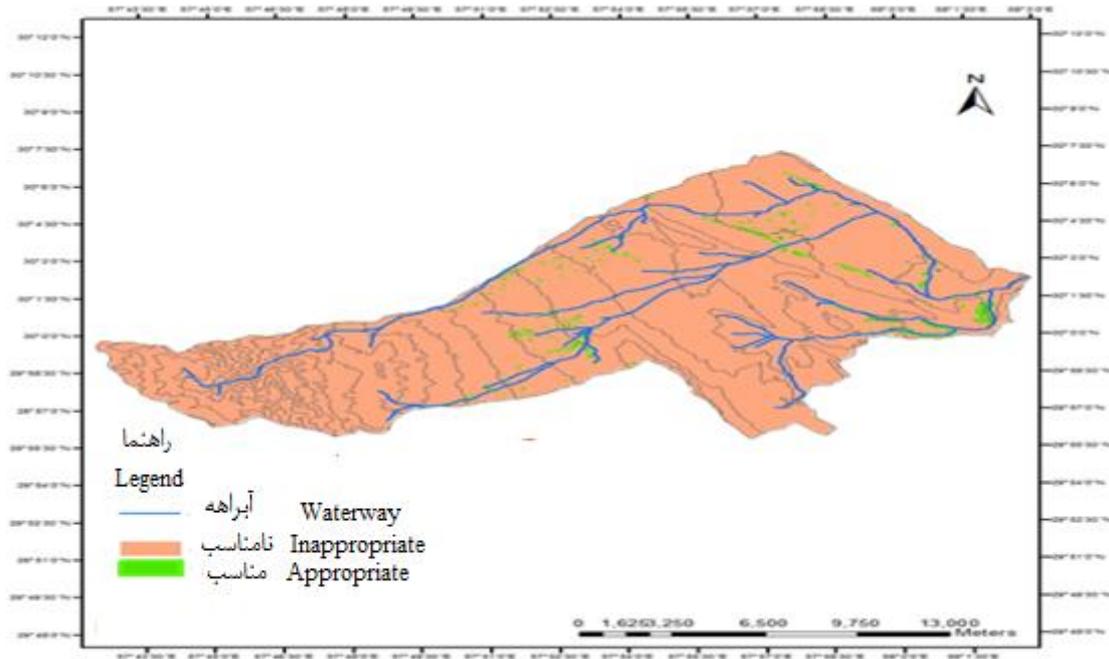
شکل ۷- نقشه محدوده های مناسب و نامناسب شیب جهت احداث بند زیرزمینی در حوزه آبخیز پشوینه

Figure 7- Map of suitable and unsuitable slope areas for construction of underground dam in Pashueeyeh watershed



شکل ۸- نقشه محدوده های مناسب و نامناسب کاربری اراضی جهت احداث بند زیرزمینی در حوزه آبخیز پشوینه

Figure 8- Map of suitable and unsuitable land use areas for construction of underground dam in Pashueeyeh watershed



شکل ۹- نقشه تلفیق محدوده‌های مناسب و نامناسب با خطوط آبراهه و توپوگرافی احداث بند زیرزمینی پشویئه

Figure 9 - Map of combining suitable and unsuitable areas with waterway lines and topography of Pashueeyeh underground dam construction

چنانچه نتایج برداشتها نشان می‌دهد مقاومت الکتریکی لایه‌های مختلف به ندرت به بیش از ۳۰ اهم بر متر می‌رسد که این امر ناشی از بافت ریز دانه و تراکم بالای رسوبات و نیز شوری آب می‌باشد. با توجه به محدودیت عرض بستر رودخانه (حدود ۴۵ متر)، بالا بودن سنگ کف و نیز نتایج در خصوص نفوذپذیری محدود رسوبات آبرفتی، مخلوط رسوبات شنی با رس به نظر می‌رسد در محل این گزینه انتخابی حداقل شرایط برای ایجاد مخزن سد زیرزمینی مناسب از نظر کمیت و کیفیت آب قابل استحصال وجود ندارد. اگر چه بررسی‌های محلی نشان می‌دهد که بند سنگ و سیمانی موجود در بالادست گزینه پیشنهادی بر روی سنگ کف بنا نگردیده و بنابراین از زیر آن فرار آب وجود دارد اما حجم این نشست آب آنچنان نیست که احداث سد زیرزمینی را توجیه نماید. در مجموع استفاده از روش ژئوالکتریک برای کشف لایه‌های آبدار می‌تواند در حال و آینده بسیار مورد استفاده قرار گیرد که با نتایج تحقیقات یوگو و همکاران (Ugwu *et al.*, 2016) و اس کای و همکاران (Sk *et al.*, 2018) که از روش ژئوالکتریک برای کشف لایه‌های آبدار با عمق‌های مختلف استفاده کرده و نتایج معقولی گرفتند، مطابقت دارد.

### نتیجه‌گیری

یکی از راهکارهای مقابله با کم آبی، استحصال آب از منابع جدید به خصوص سفره‌های زیر زمینی خلاصه می‌شود که این مهم

با توجه به نقشه‌های ترسیم شده در حوزه آبخیز پشویئه از حوزه های آبخیز کویر لوت، مکان‌های مناسب احداث بند خاکی با توجه به ترسیم نقشه‌های زمین‌شناسی، شیب و کاربری اراضی در نرم‌افزار GIS مشخص گردید. با وجود این نقشه‌ها و بازدیدهای میدانی و انجام آزمایشات ژئوتکنیک مربوطه در مجموع تعداد ۴ سونداژ الکتریک با فواصل متفاوت در محدوده پروژه به انجام رسید به طوری که بتوان حداقل یک مقطع طولی مورد نیاز را ترسیم نمود. شایان ذکر است با وجود عوارض سطحی همچون عرض محدود تنگه، پستی و بلندی، انحنا آبراهه، وجود تراس‌های آبرفتی ناهموار و پوشش گیاهی انبوه امکان نصب الکترودها در یک نوار منظم وجود ندارد. در نتیجه تعداد سونداژها محدود و توزیع آنها در عرض تنگه مناسب نیست. گفتنی است تعیین مقاومت ویژه به روش سونداژ زنی و با استفاده از آرایه شلومبرژه انجام گردیده به طوری که همزمان با ارسال جریان الکتریکی مستقیم به الکترودهای جریان، اختلاف پتانسیل الکتریکی بین الکترودهای پتانسیل اندازه‌گیری شده است. با توجه به نتایج سونداژهای ژئوالکتریک و شواهد صحرایی سنگ کف در محل گزینه پیشنهادی از نوع رس متراکم دارای املاح فراوان می‌باشد و عمق برخورد به سنگ کف نیز بین حداقل ۲/۶ متر و حداکثر ۷/۰ متر متغیر است. بر روی سنگ بستر یک لایه آبرفت رودخانه‌ای مشتمل بر دو افق آبدار و خشک قرار دارد. همچنین لایه آبرفت رودخانه‌ای شامل توالی لایه‌هایی با دانه‌بندی و نفوذپذیری متفاوت می‌باشند.

نفوذپذیری متفاوت می‌باشند. چنانچه نتایج برداشت‌ها نشان می‌دهد مقاومت الکتریکی لایه‌های مختلف به ندرت به بیش از ۳۰ اهم بر متر می‌رسد که این امر ناشی از بافت ریز دانه و تراکم بالای رسوبات و نیز شوری آب می‌باشد. به نظر می‌رسد در محل این گزینه انتخابی حداقل شرایط برای ایجاد مخزن سد زیرزمینی مناسب از نظر کمیت و کیفیت آب قابل استحصال وجود ندارد. نقش تلفیقی GIS، RS و ژئوالکترونیک در تعیین مناطق مستعد احداث سد زیرزمینی باعث می‌شود دقت احداث مکان‌یابی درست احداث سدهای زیر زمینی و حتی کشف سفره‌های زیرزمینی بسیار بالاتر رود و به نتایج ارزشمندی دست پیدا کرد و حتی مکان‌هایی که محققان فکر می‌کنند با توجه به شرایط منطقه گزینه مناسبی برای ایجاد سد زیرزمینی هستند با دقت بالای این روش حذف می‌شوند و گزینه‌های بهتر و مناسب تر کشف می‌شوند.

می‌تواند با احداث سدهای زیر زمینی مختلف و با علم روز دنیا به وقوع بپیوندد. سدهای زیر زمینی برای اهداف مختلف از جمله تقویت سفره آب‌های زیرزمینی، تقویت پوشش گیاهی و همچنین مصارف کشاورزی کاربردهای زیادی دارند که در این تحقیق مد نظر قرار گرفتند. سدهای زیر زمینی در سراسر دنیا در اقلیم‌های مختلف به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک در حال گسترش می‌باشند که احتمالاً در سال‌های آینده به یکی از مهمترین منابع استحصال آب تبدیل می‌شوند به خصوص اگر با فناوری‌های نوین و تلفیقی از GIS، RS و ژئوالکترونیک همراه باشند. با توجه به نتایج سونداژهای ژئوالکترونیک و شواهد صحرایی سنگ کف در محل گزینه پیشنهادی از نوع رس متراکم دارای املاح فراوان می‌باشد و بر روی سنگ بستر یک لایه آبرفت رودخانه‌ای مشتمل بر دو افق آبدار و خشک قرار دارد. همچنین لایه آبرفت رودخانه‌ای شامل توالی لایه‌هایی با دانه‌بندی و

## منابع

1. Budagpour, S., & Bageri, H. (2010). *Investigating the environmental effects of building underground dams on groundwater*. 4<sup>th</sup> Conference, exhibition on environmental engineering, Tehran, Iran. (In Persian)
2. Das Gupta, A. (2000). Assessment of groundwater potential with underground dam in Phuket Island of Thailand.
3. Farhoudi, R., Habibi, K., & Zandi Bakhtiari, P. (2005). Locating the landfill of municipal solid wastes using fuzzy logic in GIS environment (Case study: Sanandaj city), *Journal of Fine Arts* 23: 24-15.
4. Fazelpour Aqda'i, M., Dastomani, M., Talebi, A., & Piri Ardakani, M. (2013). *Underground dam, a suitable solution for water management in droughts (Case study: Ardkan city mil Safid basin)*, 9<sup>th</sup> National Watershed Management Conference of Yazd University.
5. Garagunis, C.N. (1981). Construction of an impervious diaphragm for improvement of a Subsurface water reservoir and simulations protection from migrating salt water, *Bulletin of International Association Engineering Geology* 24: 169-172.
6. Grimm, F.M. (2000). *Geographical information systems for geoscience scholars (GIS modeling)*, translated by Geo-Reference Group (GIS) of Geological Survey of Iran, 562 pp.
7. Hasani, A., Hasani, H., & Shirkhani, H. (2013). *Underground dam building methods*. 1<sup>st</sup> National conference on drainage and sustainable agriculture, Tehran, Iran. (In Persian)
8. Ishida, S., Tsuchihara, T., Yoshimoto, S., & Imaizumi, M. (2011). Sustainable use of groundwater with underground dams, *JARQ* 45: 51-61. <https://doi.org/10.6090/jarq.45.51>.
9. Majidi, A.R. (2006). Management of underground water resources using underground dams method, *Journal of Soil and Water Conservation* 2(1).
10. Nilsson, A. (1988). *Groundwater dams for small-scale water supply*, Intermediate Technology Publications, London. 78 pp.
11. Pavlin, B. (1973). *Establishment of subsurface dams and utilization of natural subsurface Barriers for realization of underground storage in the coastal karst spring zones and their protection against seawater intrusion*. In Trans. 11<sup>th</sup> Int. Congress on large dams, 1, 487-501.
12. Sagvand Hassanabadi, L., & Modabber, L. (2006). *Storage and collection with the construction of underground dams*, the first regional conference on optimal utilization of water resources in Karun and Zayandehrud basins, Shahrekord.
13. SK, M., Ramanujam, N., Champoil, V., Biswas, S.K., Rasool, Q.A., & Ojha, C. (2018). Identification of groundwater in hard rock terrain using 2D electrical resistivity tomography imaging technique: Securing water scarcity at the time of seasonal rainfall failure, South Andaman. *International Journal of Geosciences* 9: 59-70. <https://doi.org/10.4236/ijg.2018.91004>.
14. Tabatabai Yazdi, J., & Nabi Peylaskarian, S. (2003). *Groundwater dams for small scale water supply*, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute Publications, 63 pp.

15. Tang, Z. (2006). *Selecting optimal residential locations using fuzzy GIS modeling*. University of north Texas.
16. Telmer, K., & Best, M. (2004). *Underground dams: A practical solution for the water needs of small communities in semi-arid regions*. School of earth and oceans sciences. University of Victoria.
17. Wiplinger, O. (1982). Water storage in semi-arid regions, Unpublished paper. 30 pp.
18. Yanar, T., & Akyurek, Z. (2004). *The enhancement of ArcGIS with Fuzzy set theory*, ESRI International User Conference.
19. Ugwu, N.U., Ranganai, R.T., Simon, R.E., & Ogubazghi, G. (2016). Geoelectric evaluation of groundwater potential and vulnerability of overburden aquifers at Onibu Eja active open dump site, Osogbo, Southwestern Nigeria. *Journal of Water Resource and Protection* 8: 311-329.



## Antibiotic Resistance Index of Heterotrophic and Coliform Bacteria in Water and Sediment of Goharood River

F. Saberinia<sup>1</sup>, M.B. Farhangi<sup>2\*</sup>, N. Yaghmaeian Mahabadi<sup>3</sup>, R. Shokati<sup>4</sup>, N. Ghorbanzadeh<sup>5</sup>

Received: 04-09-2021

Revised: 31-10-2022

Accepted: 29-11-2022

Available Online: 22-02-2023

### How to cite this article:

Saberinia, F., Farhangi, M.B., Yaghmaeian Mahabadi, N., Shokati, R., & Ghorbanzadeh, N. (2023). Antibiotic Resistance Index of Heterotrophic and Coliform Bacteria in Water and Sediment of Goharood River. *Journal of Water and Soil* 36(6): 743-759. (In Persian with English abstract)  
DOI: [10.22067/jsw.2022.72320.1088](https://doi.org/10.22067/jsw.2022.72320.1088)

### Introduction

Overuse of antibiotics and their entry into the environment is a global concern today. Much of the antibiotics taken by animals and humans are excreted unchanged and found in their feces which enter the environment through livestock waste and municipal wastewater disposal. Uncontrolled release and continuous introduction of antibiotics to the environment induced antibiotic resistance in microorganisms living in other habitats which pose a potential hazard to existing aquatic ecosystems and animals. Rivers act as the main sink for the effluents that distribute antibiotics and antibiotic resistant microorganisms in the environment. This study aimed to investigate the antibiotic resistant index (ARI) in Goharood River. Seasonal variations and source of contamination, focusing on urban surface wastewater of Rasht, were investigated through sampling of river water and sediment in different points along the river during four seasons of a year.

### Materials and Methods

The water and sediment of the river were sampled at three points along the river (focused on river course in Rasht city), in autumn, 2016 and in winter, spring and summer, 2017. The number of antibiotic resistant heterotrophic and coliform bacteria were counted via colony count method in the antibiotic supplemented 100 µg/mL Nutrient Agar and Eosine-Methylene Blue agar media respectively. Cephalixin, gentamicin, doxycycline, ciprofloxacin, and trimethoprim antibiotics were tested in this study. ARI was calculated by dividing number of bacteria colonies (heterotrophic and coliform bacteria) in plates supplemented with antibiotics to the number of colonies in control plate (without antibiotic). *Escherichia coli* as an indicator coliform bacterium was isolated from water and sediment samples (12 strains; 4 season and 3 sampling points) and their resistant pattern to these antibiotic was also tested by disk diffusion (Kirby-Bauer) method in Mueller-Hinton agar medium. The inhibition zone (ZOI) of *E. coli* growth was measured and its sensitivity/resistant was assessed based on CLSI standard protocol. The calculated ARI of heterotrophic and coliform bacteria of water and sediment of the River and the determined ZOI of *E. coli* isolated from water and sediment were analyzed by repeated measures of factorial arrangement in a completely randomized design format by SAS software package.

1, 2 and 5- Master's Degree in Soil Science, Assistant Professor and Associate Professor of Soil Biology and Biotechnology, Soil Science and Engineering Department, Faculty of Agricultural Science, University of Guilan, Rasht, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [m.farhangi@guilan.ac.ir](mailto:m.farhangi@guilan.ac.ir))

3- Associate Professor of Soil and Land Evaluation, Soil Science and Engineering Department, Faculty of Agricultural Science, University of Guilan, Rasht, Iran

4- Ph.D. Student in Soil Science, Soil Biology and Biotechnology, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

Factors included sampling point at 3 levels (before entering river to the Rasht city; A, in the Rasht city; B, and after river exit from the Rasht city; C), and antibiotics at 5 levels (cephalexin, gentamicin, doxycycline, ciprofloxacin, and trimethoprim) as main plot and sampling time at 4 levels (autumn, winter, spring, and summer) as sub-plot.

## Results and Discussion

The highest ARI value of water heterotrophic bacteria was obtained to cephalexin at the sampling point C. Mean ARI of water heterotrophic bacteria to all antibiotics (regardless of type of antibiotic) at three points of A, B and C was 3.77, 4.54 and 7.53%, respectively. The highest ARI levels of heterotrophic and coliform bacteria in water were obtained in the summer season. In fact, the change of seasons and clearly the summer season controlled the ARI in water bacteria rather than the type of antibiotics. So that in this season 30.78% of water heterotrophic bacteria were resistant to ciprofloxacin antibiotic and about half (50.78) of the river water coliforms were resistant to cephalexin. Although ARI for heterotrophic and coliform bacteria was lower in sediment rather than that in water, the highest ARI levels of heterotrophic and coliform bacteria in sediment were obtained against cephalexin in autumn and winter, respectively. In general, the mean ARI in water and sediment bacteria was as follows: cephalexin > gentamicin > ciprofloxacin > doxycycline > trimethoprim. The lowest ZOI value for *E. coli* was obtained against cephalexin. Therefore, in all three sampling points, isolated *E. coli* bacteria from water and sediment were resistant to cephalexin. In the study of the sampling time and sampling point interaction, it was also seen that the lowest ZOI of *E. coli* was in autumn and at sampling point C. Therefore, it seems that *E. coli* has become resistant to antibiotics when river crosses the city.

## Conclusion

According to the results of this study, Goharood river is contaminated with antibiotic-resistant, especially cephalexin resistant bacteria and it may distribute pollution downstream. If the river water is used in aquaculture and irrigation of downstream agriculture fields, the antibiotic resistant bacteria may be spread in the other ecosystems and finally may enter the human food chain.

**Keywords:** Cephalexin, *Escherichia coli*, Rasht, Zone of growth inhibition

## مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۱، ص. ۷۵۹-۷۴۳

# مطالعه شاخص مقاومت به آنتی‌بیوتیک در باکتری‌های هتروتروف و کلی‌فرم آب و رسوب رودخانه گوهررود

فاطمه صابری نیا<sup>۱</sup> - محمدباقر فرهنگی<sup>۲\*</sup> - نفیسه یغمائیان مهابادی<sup>۳</sup> - ریحانه شوکتی<sup>۴</sup> - نسرین قربانزاده<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳/۰۶/۱۴۰۰

تاریخ پذیرش: ۲۷/۰۹/۱۴۰۱

## چکیده

استفاده بی‌رویه از آنتی‌بیوتیک‌ها یک نگرانی جهانی است چرا که سبب ایجاد مقاومت آنتی‌بیوتیکی در ریزجانداران می‌شود. این پژوهش با هدف مطالعه باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک در رودخانه گوهررود انجام شد. از آب و رسوب رودخانه گوهررود در سه نقطه در طول رودخانه و در چهار فصل نمونه‌برداری شد. مقاومت باکتری‌های هتروتروف و کلی‌فرم آب و رسوب به ترتیب با کشت روی محیط NA و EMB با و بدون آنتی‌بیوتیک بررسی و شاخص مقاومت آنتی‌بیوتیکی (ARI) با تقسیم تعداد کلنی‌ها روی پتری دارای آنتی‌بیوتیک بر پتری کنترل محاسبه شد. از آنتی‌بیوتیک‌های پرکاربرد سفالکسین، جنتامایسین، داکسی‌سایکلین، سیپروفلوکساسین و تری‌متوپریم استفاده شد. قطر ناحیه بازدارندگی رشد برای باکتری/یشرشیا کولی به عنوان باکتری شاخص در محیط مولر-هینتون اندازه‌گیری شد. روند مقاومت باکتری‌های آب و رسوب در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها به صورت سفالکسین < جنتامایسین < سیپروفلوکساسین < داکسی‌سایکلین < تری‌متوپریم بود. در باکتری‌های هتروتروف، ARI با عبور رودخانه از شهر افزایش یافت ولی برای کلی‌فرم‌ها در وسط شهر بیشتر بود. فصل تابستان بیشترین تاثیر را بر ARI داشت به طوری که ۳۰/۷۸٪ هتروتروف‌ها و ۵۰/۷۸٪ کلی‌فرم‌های آب در تابستان در برابر سیپروفلوکساسین و سفالکسین مقاوم بودند. باکتری/یشرشیا کولی در همه نقاط نمونه‌برداری به سفالکسین مقاوم بود. بنابراین، آب رودخانه گوهررود در مسیر عبور از شهر رشت به ویژه در فصل تابستان، به باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک آلوده شده و این آلودگی را به پایین‌دست منتقل می‌کند و برای جلوگیری از ورود آلودگی به زنجیره غذایی، استفاده از آب رودخانه در آبی‌پروری و آبیاری در تابستان باید مدیریت شود.

واژه‌های کلیدی: یشرشیا کولی، رشت، سفالکسین، ناحیه بازدارندگی

## مقدمه

واژه آنتی‌بیوتیک نخستین بار در سال ۱۸۸۹ برای نشان دادن

۱، ۲ و ۵- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد استادیار و دانشیار بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

\*- نویسنده مسئول: (Email: m.farhangi@guilan.ac.ir)

۳- دانشیار ارزیابی خاک‌ها و اراضی، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۴- دانشجوی دکتری بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

DOI: 10.22067/jsw.2022.72320.1088

رقابت در جوامع زیستی که در آن فقط قوی‌ترین‌ها زنده می‌ماند به کار برده شد (Bockstael and Van Aerscht, 2009). اگرچه آنتی‌بیوتیک‌ها پس از شناسایی در ۱۹۲۸ جان انسان‌های زیادی را نجات داده‌اند اما دیری نپایید که در سال ۱۹۴۰ عدم درمان عفونت و بیماری با آنتی‌بیوتیک‌ها گزارش شد. برای مثال/استافیلوکوکوس در برابر پنی‌سیلین مقاوم شده بود که این امر آغازگر مقاومت آنتی‌بیوتیکی بود (Mirhoseini et al., 2016). مقاومت میکروبی یا باکتریایی نوعی مقاومت دارویی است که در طی آن یک ریزجاندار در حضور آنتی‌بیوتیک در محیط می‌تواند زنده بماند. توانایی آنتی‌بیوتیک‌ها برای درمان بیماری‌ها بستگی به توان آنها در از بین بردن باکتری و عوامل بیماری‌زا دارد. باکتری‌ها ریزجانداران هوشمندی هستند که پس از قرار گرفتن در معرض آنتی‌بیوتیک‌ها به مرور زمان در برابر

های بیمارستانی، صنایع داروسازی، فضولات دامها، فاضلاب شهری و پساب‌های کشاورزی وارد طبیعت می‌شوند (Emad and Chaudhuri, 2011). ورود مداوم آنتی‌بیوتیک‌ها و تجمع آنها در محیط خطر بالقوه‌ای را برای زیست‌بوم‌های آبی و جانوران ساکن در آنها به دنبال دارد (Wang et al., 2020; Singh et al., 2019). تمرتمن و همکاران (Temmerman et al., 2003) در مجموع ۵۵ فرآورده پروبیوتیک تولید شده در اروپا را از منظر هویت و مقاومت سویه‌های (جدایه) باکتریایی جدا شده از این فرآورده‌ها، مورد ارزیابی قرار دادند. با استفاده از روش انتشار دیسک مشخص شد که از ۱۸۷ جدایه، ۷۹ درصد آنها در برابر آنتی‌بیوتیک کانامایسین، ۶۵ درصد در برابر ونکومایسین، ۲۶ درصد در برابر تتراسایکلین، ۲۳ درصد در برابر پنی‌سیلین، ۱۶ درصد در برابر اریترومایسین مقاوم بوده و در کل ۶۸/۴ درصد از جدایه‌ها نسبت به آنتی‌بیوتیک‌ها مقاومت ذاتی یا غیر فعال داشتند.

در پژوهشی میزان مقاومت آنتی‌بیوتیکی *E. coli* بیماری‌زا در فضولات گاوی گاو‌داری‌های اطراف شهرکرد بررسی شد. پس از آزمایش‌های میکروبی و بیوشیمیایی روی ۴۰۰ نمونه فضولات گاوی سروتپ O157:H7 باکتری *E. coli* در هیچ کدام از نمونه‌ها یافت نشد اما از ۳۸۴ سویه جدا شده، ۸۷/۱ درصد به آنتی‌بیوتیک تتراسایکلین، ۵۱/۶۲ درصد به آنتی‌بیوتیک آمپی‌سیلین، ۲۵/۸۱ درصد به جنتامایسین، ۳/۲۲ درصد به سیپروفلوکساسین و ۳/۲۲ درصد به سولفامتوکسازول مقاوم بودند (Bonyadian et al., 2017). نتایج پژوهشی که درباره‌ی مقاومت آنتی‌بیوتیکی باکتری‌های گرم-منفی جدا شده از روده ماهی‌های کپور تالاب انزلی انجام شده بود نشان داد که ۹۳/۵ درصد باکتری‌های گرم-منفی نسبت به آنتی‌بیوتیک آمپی‌سیلین مقاوم بودند که بالاترین سطح مقاومت بین آنتی‌بیوتیک‌های بررسی شده بود. در حالی که ۵۱/۱۵ درصد این باکتری‌ها به استریپتومایسین، ۴۶/۵ درصد به تتراسایکلین و ۱۲/۱۵ درصد به کلرامفنیکل مقاوم بودند (Safaeian et al., 2013). در بررسی مقاومت این باکتری‌ها به چند آنتی‌بیوتیک مشخص شد که ۸۰ درصد از باکتری‌های جدا شده از روده ماهیان نسبت به آنتی‌بیوتیک‌های مصرفی چند مقاومتی هستند. بنابراین، به نظر می‌رسد باکتری‌های مقاوم در محیط به دستگاه گوارش جانوران آبی راه پیدا کرده باشند. این پژوهش نشان می‌دهد که در مجموع باکتری‌های گرم-منفی درصد مقاومت بالایی به آنتی‌بیوتیک‌ها نشان دادند که ناشی از مصرف بی‌رویه آنتی‌بیوتیک‌ها در صنعت دام‌پروری، آبی‌پروری و فاضلاب‌های وارده از رودخانه‌ها به تالاب می‌باشد (Safaeian et al., 2013).

بررسی آلودگی کلی فرمی رودخانه حویق (Khatib Haghghi and Ghane, 2017) و کرگانرود (Khatib Haghghi et al., 2017) در غرب استان گیلان نیز نشان داد در پی عبور رودخانه از

آنها مقاوم می‌شوند و این توانایی را به نسل بعدی خود نیز منتقل می‌کنند (Madigan et al., Keen and Montforts, 2012; Keen and Montforts, 2012). مقاومت آنتی‌بیوتیکی نتیجه‌ی اجتناب‌ناپذیر تعادل شکننده بین باکتری‌ها و داروها است و باکتری‌ها به دلیل زمان تکثیر (رشد) کوتاه، در مقایسه با انسان و جانوران، فرصت بیشتری برای دریافت ژن مقاومت و مقاوم شدن نسبت به آنتی‌بیوتیک جدید را دارند (Huttner et al., 2016).

باکتری‌ها از راه سازگاری (تطبیق)، به دست آوردن (اکتساب) ژن‌های مقاومت به آنتی‌بیوتیک<sup>۱</sup> (ARGs) و یا به طور طبیعی و با توان ذاتی خود برای مقاومت در برابر فعالیت‌های آنتی‌بیوتیک‌ها تکامل می‌یابند. باکتری‌هایی که غالباً در معرض غلظت غیرکشنده‌ی آنتی‌بیوتیک‌ها قرار دارند، می‌توانند نوعی مقاومت گذرا در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها نشان دهند (Motta et al., 2015). این گونه از مقاومت، مقاومت تطبیقی<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. زیرا هنگامی که آنتی‌بیوتیک‌ها یا مواد شیمیایی محرک دیگر در محیط نباشند، باکتری‌ها تمایل دارند به حالت حساس به آنتی‌بیوتیک بازگردند. در باکتری‌هایی که به طور ذاتی در برابر عوامل ضد میکروبی مقاومت می‌کنند، این کار از راه فیزیولوژیک یا یک ساختار ذاتی که اجازه تحمل به عوامل ضد میکروبی را می‌دهد، انجام می‌شود. نمونه آن تولید طبیعی آنزیم‌هایی است که داروها را غیرفعال می‌کنند. در سوی دیگر، باکتری‌ها با دستیابی به ژن‌ها و یا سایر عوامل مقاومت مانند ترانسپوزون‌ها<sup>۳</sup>، اینتگرئون‌ها<sup>۴</sup> و پلاسمیدها<sup>۵</sup> و به روش انتقال افقی ژن<sup>۶</sup> در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها مقاوم می‌شوند. این فرایند منجر به افزایش سریع پخش (انتشار) مقاومت آنتی‌بیوتیکی در محیط می‌شود (Fernández, and Hancock, 2012).

امروزه استفاده بی‌رویه از آنتی‌بیوتیک و ورود آن‌ها به محیط زیست یک نگرانی جهانی است (Calero-Caceres et al., 2017; Cheng et al., 2016; Keen, and Danner et al., 2019; Montforts, 2012). سالانه چیزی در حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ هزار تن آنتی‌بیوتیک در جهان استفاده می‌شود (Zhang et al., 2010). به طور کلی ۱۵٪ از سرانه مصرف دارو مربوط به آنتی‌بیوتیک‌ها است (Kulik et al., 2008). ایران یکی از پر مصرف‌ترین کشورها از نظر تجویز و مصرف آنتی‌بیوتیک است. مصرف آنتی‌بیوتیک در ایران ۱۶ برابر استاندارد جهانی است، که این آنتی‌بیوتیک‌ها از راه‌های زباله

- 1- Antibiotic resistant genes
- 2- Adaptive resistance
- 3- Transposons
- 4- Integrons
- 5- Plasmids
- 6- Horizontal gene transfer

رودخانه در ظروف سترون برداشته شده و بلافاصله به آزمایشگاه منتقل شدند.

### شاخص مقاومت آنتی‌بیوتیکی<sup>۱</sup> (ARI)

شاخص مقاومت آنتی‌بیوتیکی نسبت تعداد باکتری‌ها در محیط کشت در حضور یک آنتی‌بیوتیک با غلظت بازدارنده نسبتاً بالا به تعداد باکتری‌ها در محیط کشت بدون آنتی‌بیوتیک است. برای به دست آوردن ARI کشت باکتری‌های هتروتروف و کلی‌فرم از نمونه‌های آب و رسوب به روش پخش در پلیت<sup>۲</sup> و به ترتیب در محیط‌های کشت NA و EMB انجام شد. در نمونه‌های رسوب ابتدا سوسپانسیون با یک گرم رسوب و نه میلی‌لیتر نمک سدیم پیروفسفات ۰/۱۸ درصد ساخته شد. سپس از نمونه‌های آب و رسوب سری رقت ده-برابری تهیه شد و مایه‌زنی هم‌زمان از رقت مناسب در محیط‌های کشت NA و EMB بدون آنتی‌بیوتیک و دارای آنتی‌بیوتیک‌های سفالکسین، جنتامایسین، داکسی‌سایکلین، سیپروفلوکساسین و تری‌متوپریم هر کدام به طور جداگانه و با غلظت ۱۰۰ میکروگرم در میلی‌لیتر محیط کشت انجام شد (Safari Sinangani et al., 2011). پس از انکوباسیون و رشد باکتری‌ها، پتری‌هایی که تعداد کلنی‌های رشد کرده روی آنها در دامنه ۳۰ تا ۳۰۰ کلنی (طبق قرارداد) بود برای محاسبه شاخص انتخاب شدند. شاخص مقاومت آنتی‌بیوتیکی (ARI) در برابر هر کدام از آنتی‌بیوتیک‌ها با تقسیم میانگین تعداد کلونی‌های رشد کرده (CFU) روی پتری دارای آنتی‌بیوتیک بر میانگین تعداد کلونی‌های رشد کرده روی پتری کنترل (بدون آنتی‌بیوتیک) به دست آمد. با ضرب نسبت محاسبه شده در ۱۰۰، درصد مقاومت نیز محاسبه شد (Van Den Bogaard et al., 2000).

برای بررسی مقاومت در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها، سعی شد از آنتی‌بیوتیک‌هایی که پرکاربرد هستند استفاده شود به طوری که از هر کلاس آنتی‌بیوتیک یک نمونه باشد. ضمن این‌که از هر دو گروه باکتریوساید و باکتریواستاتیک هم نمونه‌هایی باشند. بنابراین آنتی‌بیوتیک سفالکسین از سفالوسپورین‌های نسل اول و از گروه بتا-لاکتام‌ها که باکتریوساید است، جنتامایسین از آمینوگلیکوسیدها که آن هم باکتریوساید است، داکسی‌سایکلین از تتراسایکلین‌ها که باکتریواستاتیک است، سیپروفلوکساسین از فلوروکینولون‌ها که باکتریوساید است و تری‌متوپریم از سولفونامیدها که باکتریواستاتیک است (Diwan et al., 2018; CLSI, 2014)، انتخاب شدند.

مناطق شهری و تخلیه پساب‌های کشاورزی آب رودخانه به کلی‌فرم‌ها آلوده شده است. آب سطحی و رسوب این رودخانه‌ها در چهار فصل یک سال مورد بررسی قرار گرفت و دیده شد که بیشترین آلودگی کلی‌فرمی در رسوب رودخانه و در فصل تابستان بود (Khatib Haghghi et al., Haghghi and Ghane, 2017). یکی از منابع پخش باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک در طبیعت دام‌داری‌ها و فضولات آنهاست که به صورت کود در کشاورزی استفاده می‌شوند (Van Den Bogaard et al., 2000; Rieke et al., 2018). تاکنون بررسی‌های چندی درباره آلودگی رودخانه‌های شهرگذر رشت مانند زرچوب و گوهررود انجام شده است (Bagherzadeh et al., 2018). اما به بررسی باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک کمتر پرداخته شده است. با این حال، فرهنگی و همکاران (Farhangi et al., 2021) در بررسی کلی‌فرم‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک در رودخانه زرچوب گزارش کردند که ۳۵ درصد کلی‌فرم‌ها به سیپروفلوکساسین مقاوم بودند. با توجه به اهمیت موضوع مقاومت باکتری‌ها به آنتی‌بیوتیک‌ها، هدف این پژوهش بررسی شاخص مقاومت باکتری‌های هتروتروف و کلی‌فرم نسبت به آنتی‌بیوتیک‌های مختلف و همین‌طور بررسی مقاومت/ایشریشیا کولی (E. coli) به عنوان باکتری شاخص آلودگی مدفوعی به آنتی‌بیوتیک‌ها در رودخانه گوهررود استان گیلان بود.

## مواد و روش‌ها

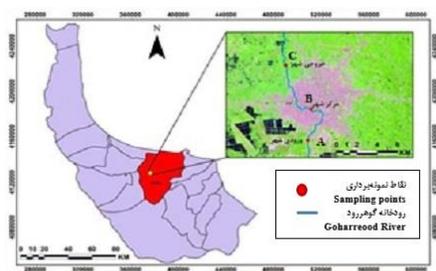
### نمونه‌برداری

رودخانه گوهررود از جنوب کوه عزیزکیان به ارتفاع ۲۵۰۰ متر سرچشمه می‌گیرد (شکل ۱). مساحت حوضه آبریز این رودخانه تا ایستگاه هیدرومتری لاکان، ۳۱ کیلومتر مربع است. میانگین سالانه آبدهی این رودخانه در محل ایستگاه هیدرومتری لاکان حدوداً ۲۸ میلیون مترمکعب است (Rezaei, 2018).

نمونه‌برداری از آب و رسوب کنار رودخانه گوهررود در سه نقطه و در چهار فصل از سال (۱۳۹۶ و ۱۳۹۷) انجام شد. برای بررسی منشأ احتمالی آلودگی و نقش پساب شهری در آن، نقاط نمونه‌برداری از رودخانه به این صورت انتخاب شدند که یک نقطه پیش از ورود رودخانه به شهر باشد (نقطه ورودی؛ A) یک نقطه در وسط شهر که در پارک قدس بود (وسط شهر؛ B) و یک نقطه پس از خروج رودخانه از شهر (نقطه خروجی؛ C). برای بررسی نوسان‌های فصلی روند مقاومت آنتی‌بیوتیکی رودخانه نیز نمونه‌برداری در چهار فصل پاییز، زمستان، بهار و تابستان و در ماه‌های میانی هر فصل انجام شد. نمونه‌برداری در هر فصل در سه تکرار و از همان نقاط انجام گرفت. در شکل ۱ موقعیت رودخانه گوهررود و نقاط نمونه‌برداری آورده شده است. نمونه‌های آب از آب جاری و نمونه‌های رسوب از رسوبات کنار

1- Antibiotic resistant index

2- Spread plate



شکل ۱- نقشه رودخانه گوهررود و نقاط نمونه برداری شده در رشت، استان گیلان

Figure 1- Map of Goharrood River and sampling points in Rasht, Guilan province

A, B and C are the sampling points at the entrance, middle and exit of the river from the city, respectively.

بهره گیری شد. با این روش امکان بررسی مقاومت چندگانه باکتری *E. coli* به عنوان نماینده کلی فرم‌ها بررسی می‌شود. آزمون حساسیت (مقاومت) به روش کربی-بائر انجام شد که یک سیستم نیمه کمی است. یعنی بر اساس آن باکتری آزمون شده در برابر آنتی‌بیوتیک مورد نظر، بر اساس قطر ناحیه بازدارندگی رشد (ZOI) تشکیل شده، به صورت مقاوم، نیمه مقاوم یا نیمه حساس و حساس گزارش می‌شود. طبق استاندارد اگر باکتری قطر ZOI کوچکتر از ۱۴ و بزرگتر از ۱۸ mm برای دیسک Ceph 30 داشته باشد در برابر آنتی‌بیوتیک سفالکسین به ترتیب مقاوم یا حساس است. به همین ترتیب دامنه مقاومت-حساسیت برای جنتامایسین (GM 10) به ترتیب ZOI کوچکتر از ۱۲ و بزرگتر از ۱۵ mm، برای داکسی‌سایکلین (D 30)، کوچکتر از ۱۰ و بزرگتر از ۱۴ mm و برای تری‌متوپریم (SXT 5) کوچکتر از ۱۰ و بزرگتر از ۱۶ mm است. دامنه ZOI بین این دو عدد در هر آنتی‌بیوتیک نشانه‌دهنده‌ی نیمه حساس بودن باکتری به آن است (CLSI, 2014).

#### آنالیز آماری

آنالیز داده‌ها به روش اندازه‌های تکرار شده<sup>۲</sup> با آرایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل نقاط نمونه برداری در سه سطح (ورودی، میانه و خروجی شهر) و سطوح آنتی‌بیوتیک در پنج سطح (سفالکسین، جنتامایسین، داکسی‌سایکلین، سیپروفلوکساسین و تری‌متوپریم) به عنوان واحد اصلی بودند. زمان نمونه برداری در چهار سطح (پاییز، زمستان، بهار، تابستان) نیز به عنوان فاکتور فرعی در نظر گرفته شد. در بخش مربوط به بررسی ZOI باکتری *E. coli*، آنتی‌بیوتیک سیپروفلوکساسین بررسی نشد. بنابراین سطوح آنتی‌بیوتیک از ۵ به ۴ تغییر کرد. نتایج به دست آمده با نرم‌افزار SAS 9.4 آنالیز شد و مقایسه میانگین داده‌ها نیز با آزمون

برای بررسی مقاومت در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها، سعی شد از آنتی‌بیوتیک‌هایی که پرکاربرد هستند استفاده شود به طوری که از هر کلاس آنتی‌بیوتیک یک نمونه باشد. ضمن این‌که از هر دو گروه باکتریوساید و باکتریواستاتیک هم نمونه‌هایی باشند. بنابراین آنتی‌بیوتیک سفالکسین از سفالوسپورین‌های نسل اول و از گروه بتا-لاکتام‌ها که باکتریوساید است، جنتامایسین از آمینوگلیکوسیدها که آن‌هم باکتریوساید است، داکسی‌سایکلین از تتراسایکلین‌ها که باکتریواستاتیک است، سیپروفلوکساسین از فلوروکینولون‌ها که باکتریوساید است و تری‌متوپریم از سولفونامیدها که باکتریواستاتیک است (CLSI, 2014; Diwan et al., 2018)، انتخاب شدند.

#### اندازه‌گیری قطر ناحیه بازدارندگی رشد<sup>۱</sup> (ZOI)

برای سنجش اندازه‌ی مقاومت باکتری‌های کلی فرم به آنتی‌بیوتیک‌ها، *یش‌ریشیا کولی* (*E. coli*) از آنها به عنوان باکتری شاخص در این پژوهش بررسی شد. بنابراین، کلونی‌های سبز با جلای فلزی با ویژگی‌های تیپیک کلونی‌های *E. coli* از پتری‌های بدون آنتی‌بیوتیک آب و رسوب (در هر فصل و نقطه نمونه برداری یک سویه و در کل ۱۲ سویه) برای این بخش پژوهش انتخاب شد. سپس سوسپانسیونی از جدایه آن بر اساس محلول مک‌فارلند (۰/۵ مک‌فارلند) ساخته شد. با گوش پاک‌کن سوسپانسیون باکتری در سطح محیط کشت مولر-هینتون آگار به روش کشت چمنی مایه‌زنی شد. آزمون مقاومت به آنتی‌بیوتیک به روش پخشیدگی قرص (روش کربی-بائر)، بنا بر راهنمای موسسه استانداردهای آزمایشگاهی و کلینیکی (CLSI, 2014) انجام شد. سپس قطر ناحیه (هاله) بازدارندگی رشد (ZOI) آنتی‌بیوتیکی اندازه‌گیری گردید. در این بخش از دیسک آنتی‌بیوتیک‌های سفالکسین (Ceph 30)، جنتامایسین (GM 10)، داکسی‌سایکلین (D 30) و تری‌متوپریم (SXT 5)

2- Repeated measures

1- Zone of growth inhibition

چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

## نتایج و بحث

### تأثیر نقاط نمونه‌برداری و زمان بر تغییرات تعداد

#### باکتری‌های هتروتروف و کلی‌فرم آب و رسوب

نتایج جداول تجزیه واریانس (جدول ۱) نشان داد که تأثیر نقطه نمونه‌برداری و زمان نمونه‌برداری (تأثیر فصل) بر تعداد کل باکتری‌های رسوب و هتروتروف آب معنی‌دار نبوده و برهم‌کنش آنها نیز بر لگاریتم تعداد کلی‌فرم‌های آب معنی‌دار نشد. از این رو بررسی شاخص مقاومت به خوبی می‌تواند تغییرات مقاومت به آنتی‌بیوتیک در باکتری‌های هتروتروف و کلی‌فرم آب و رسوب را مستقل از تعداد کل ارائه دهد.

#### شاخص مقاومت آنتی‌بیوتیکی (ARI)

تأثیر نقطه نمونه‌برداری (L) تنها بر ARI هتروتروف‌های آب ( $p < 0.05$ ) و برهم‌کنش آن با زمان (L × T) تنها بر ARI باکتری‌های آب معنی‌دار بود ( $p < 0.01$ ). تأثیر نوع آنتی‌بیوتیک (A) و زمان نمونه‌برداری (T) هم تنها بر ARI هتروتروف رسوب معنی‌دار نبود. تأثیر برهم‌کنش نوع آنتی‌بیوتیک در زمان نمونه‌برداری (A × T) بر همه پارامترها و برهم‌کنش سه‌تایی نقطه نمونه‌برداری در آنتی‌بیوتیک

در زمان نمونه‌برداری (L × A × T) بر ARI باکتری‌های (هتروتروف و کلی‌فرم) آب معنی‌دار بودند ( $p < 0.01$ ) (جدول ۲). دلیل معنی‌دار نبودن تأثیر فاکتورها و برهم‌کنش آنها بر ARI هتروتروف‌های رسوب ممکن است به دلیل تغییرات کم باکتری‌های مقاوم در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها در فصول گوناگون در مقایسه با شاهد باشد که با توجه به پایدار بودن محیط رسوب در مقایسه با آب دور از انتظار نیست.

#### تأثیر نقاط نمونه‌برداری و نوع آنتی‌بیوتیک بر ARI

بالاترین مقدار ARI باکتری‌های هتروتروف (۱۵/۶٪) در برابر آنتی‌بیوتیک سفالکسین و در نقطه خروجی از شهر (C) به دست آمد که البته تفاوت آماری معنی‌دار با ARI در برابر داکسی‌سایکلین در نقطه وسط شهر (B) نداشت. کم‌ترین مقدار ARI هم در برابر تری‌متوپریم به دست آمد که در هر سه نقطه نمونه‌برداری به هم نزدیک بود. میانگین مقدار ARI در نقطه خروجی (C) برای باکتری‌های هتروتروف بیشتر بود. بنابراین، به نظر می‌رسد در نقطه خروجی رودخانه از شهر، باکتری‌های هتروتروف آب مقاومت بیشتری به آنتی‌بیوتیک‌ها داشته‌اند. میانگین ARI باکتری‌های هتروتروف آب در برابر همه آنتی‌بیوتیک‌ها (بدون توجه به نوع آنتی‌بیوتیک) در سه نقطه ورودی، وسط و خروجی به ترتیب؛ ۳/۷۷، ۵/۰۴ و ۷/۵۳ درصد بود (شکل ۲).

جدول ۱- تجزیه واریانس تأثیر نقاط و فصول نمونه‌برداری و برهم‌کنش آنها بر لگاریتم تعداد باکتری‌های هتروتروف و کلی‌فرم آب و رسوب

Table 1- Analysis of variance for the effect of sampling points, sampling time and their interactions on the number (Log unit) of heterotrophic and coliform bacteria in water and sediment

منابع تغییر Source of variations	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربع‌ها Mean squares			
		آب Water		رسوب Sediment	
		باکتری‌های هتروتروف Heterotrophic bacteria	کلی‌فرم‌ها Coliforms	باکتری‌های هتروتروف Heterotrophic bacteria	کلی‌فرم‌ها Coliforms
نقطه نمونه‌برداری (L) Sampling point	2	0.19 <sup>ns</sup>	0.53*	0.11 <sup>ns</sup>	0.27 <sup>ns</sup>
زمان نمونه‌برداری (T) Sampling time	3	1.62 <sup>ns</sup>	3.80**	0.53 <sup>ns</sup>	0.64 <sup>ns</sup>
L × T خطا Error	6 12	0.21 <sup>ns</sup> 0.26	0.08 <sup>ns</sup> 0.07	0.16 <sup>ns</sup> 0.62	0.13 <sup>ns</sup> 0.59

\*\* و \* به ترتیب بیان‌گر معنی‌دار بودن در سطح ۱ و ۵ درصد و <sup>ns</sup> معنی‌دار نبودن در سطح ۵ درصد است.

\*\* and \* indicate significant effect at  $p < 0.01$  and  $p < 0.05$  respectively, and <sup>ns</sup> indicates non-significant effect at  $p < 0.05$ .

جدول ۲- تجزیه واریانس تاثیر نقاط نمونه برداری، آنتی بیوتیک، زمان نمونه برداری و برهم کنش آنها بر شاخص مقاومت آنتی بیوتیکی باکتری های هتروتروف و کلی فرم آب و رسوب

Table 2- Analysis of variance for the effect of sampling points, antibiotics, sampling time and their interactions on the antibiotic resistance index of heterotrophic and coliform bacteria in water and sediment

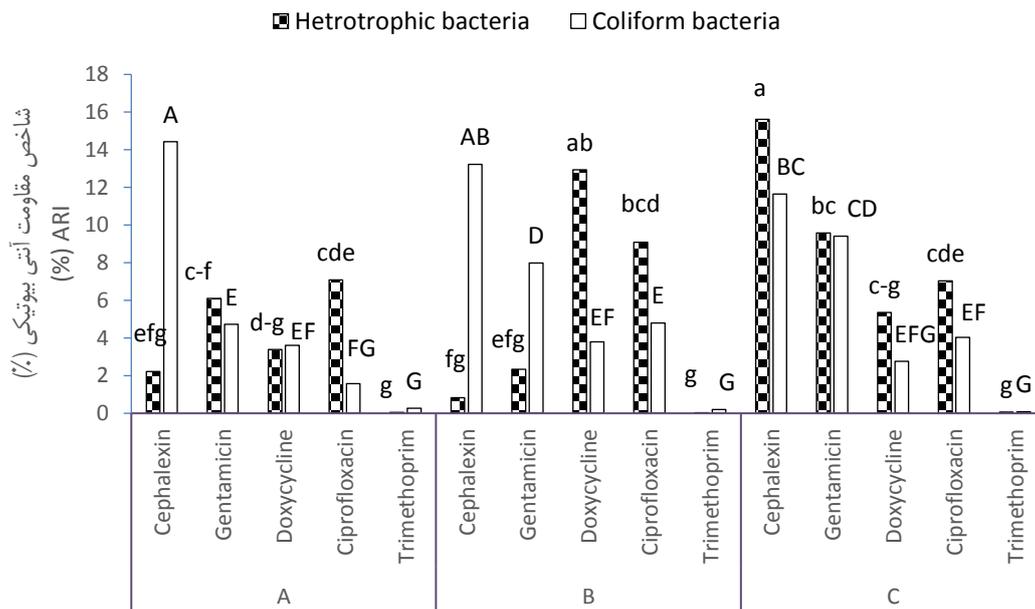
منابع تغییر Source of variations	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربع ها Mean squares			
		آب Water		رسوب Sediment	
		باکتری های هتروتروف Heterotrophic bacteria	کلی فرم ها Coliforms	باکتری های هتروتروف Heterotrophic bacteria	کلی فرم ها Coliforms
نقطه نمونه برداری (L) Sampling point	2	146.4*	11.83 <sup>ns</sup>	8.32 <sup>ns</sup>	1.01 <sup>ns</sup>
آنتی بیوتیک (A) Antibiotic	4	230.8**	588.8**	35.5 <sup>ns</sup>	5.54*
L × A	8	176.3**	18.68*	8.15 <sup>ns</sup>	2.56 <sup>ns</sup>
زمان نمونه برداری (T) Sampling time	3	3451**	3280**	23.6 <sup>ns</sup>	9.92**
L × T	6	144.8**	15.15 <sup>ns</sup>	16.3 <sup>ns</sup>	1.51 <sup>ns</sup>
A × T	12	230.2**	555.1**	25.9*	11.9**
L × A × T	24	175.8**	17.21**	10.1 <sup>ns</sup>	1.42 <sup>ns</sup>
خطا Error	45	25.54	6.950	12.9	1.09

\*\* و \* به ترتیب بیان گر معنی دار بودن در سطح ۱ و ۵ درصد و <sup>ns</sup> معنی دار نبودن در سطح ۵ درصد است.

\*\* and \* indicate significant effect at  $p < 0.01$  and  $p < 0.05$  respectively, and <sup>ns</sup> indicates non-significant effect at  $p < 0.05$ .

سفالکسین (۱۴/۴۲٪) در نقطه ورودی شهر (A) به دست آمد که تفاوت آماری معنی دار با مقدار ARI در برابر همین آنتی بیوتیک در نقطه وسط شهر (B) نداشت. کمترین مقدار ARI همانند هتروتروف ها در برابر تری متوپریم در نقطه خروجی رودخانه از شهر (C) به دست آمد. این یافته نشان می دهد که منشا کلی فرم های مقاوم به سفالکسین بیرون شهر و احتمالاً زهاب دامداری هاست. در کل، میانگین ARI کلی فرم ها در برابر آنتی بیوتیک ها در هر سه نقطه نمونه برداری تفاوت چندانی باهم نداشت اگرچه در وسط شهر بیشتر بود. میانگین ARI کلی فرم ها در سه نقطه نمونه برداری ورودی، وسط و خروجی به ترتیب؛ ۴/۹۲، ۶ و ۵/۵۹ درصد بود (شکل ۲). درصد شاخص مقاومت هتروتروف ها به سفالکسین در طول عبور رودخانه از شهر بیشتر شده است اما عکس این روند برای کلی فرم ها دیده می شود. ضمن اینکه ARI برای داکسی سایکلین و سیپروفلوکسازین برای هر دو گروه باکتری ها در وسط شهر بیشتر از دو نقطه دیگر بوده است (شکل ۲). گزارش شده است که در دو نقطه نمونه برداری به فواصل ۶۴۰ و ۲۰۰۰ متر پایین دست نقطه آلودگی در رودخانه، ARI کلی فرم ها به آمپی سیلین حدود دو برابر (از ۸ به ۱۶٪)، برای تری متوپریم حدود ۷ برابر (از ۲ به ۱۴٪) و برای سولفامتوکسازول حدود ۱۹ برابر (از ۱ به ۱۹٪) افزایش یافت. ضمن این که ARI کلی فرم ها برای تتراسایکلین بین دو نقطه نمونه برداری افزایش بسیار کمی داشت (Akiyama and Savin, 2010).

آکیاما و ساوین (Akiyama and Savin, 2010) گزارش کردند که شاخص مقاومت باکتری *E. coli* در یکی از سرشاخه های رودخانه ایلینویز، پیش از نقطه آلودگی حدود ۷ درصد بوده، در پیرامون نقطه آلودگی (منبع فاضلاب) در رودخانه به ۳۷ درصد رسیده و سپس در طول رودخانه روند کاهشی داشت. به طوری که در ۲ کیلومتر پایین دست منبع آلودگی به حدود ۱۲ درصد رسید. از آنجا که در پژوهش ما نیز روند شاخص درصد مقاومت در طول رودخانه افزایشی بود، به نظر می رسد منبع آلودگی پیوسته در طول رودخانه وجود دارد؛ اگرچه به طور کلی شاخص درصد مقاومت پایین بود. نتایج مشابهی در دیگر پژوهش ها (Farhangi et al., 2021; Tripathi and Sharma, 2011) نیز گزارش شده است. آکیاما و ساوین (Akiyama and Savin, 2010) مقاومت باکتری *E. coli* را به آمپی سیلین، تتراسایکلین، تری متوپریم-سولفامتوکسازول سنجیدند. در پژوهش ما نیز تری متوپریم یکی از آنتی بیوتیک های مورد بررسی بود. ضمن این که داکسی سایکلین هم خانواده تتراسایکلین بوده و هر دو آنتی بیوتیک بازدارنده رشد باکتری ها با سازوکار بلاک کردن tRNA هستند. هم چنین سفالکسین مورد بررسی در این پژوهش نیز اگرچه از نسل اول سفالوسپورین ها و باکتریواستاتیک است اما مانند آمپی سیلین با جلوگیری از ساخت دیواره در باکتری ها سبب از بین رفتن آنها می شود. بالاترین مقدار ARI کلی فرم های آب در برابر آنتی بیوتیک



شکل ۲- مقایسه میانگین تاثیر برهم‌کنش نقاط نمونه‌برداری در نوع آنتی‌بیوتیک بر شاخص مقاومت باکتری‌های هتروتروف و کلی‌فرم آب

ستون‌های با حرف مشابه در هر سری تفاوت آماری معنی‌دار ندارند ( $p < 0.05$ ). A, B و C به ترتیب نقاط نمونه‌برداری در ورودی، وسط و خروجی رودخانه از شهر هستند.

Figure 2- Mean comparisons for the effect of sampling point and antibiotic interaction on the antibiotic resistance index (ARI) of heterotrophic and coliform bacteria in water

Columns with the same letter in each series are not significantly different ( $p < 0.05$ ). A, B and C are the sampling points at the entrance, middle and exit of the river from the city, respectively.

Tripathi and Khatib Haghghi *et al.*, 2017; 2017

(Sharma, 2011). در پژوهشی دیگر نیز گزارش شده است که ARI کلی‌فرم‌ها به آنتی‌بیوتیک‌های بررسی شده در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور به ترتیب از حدود ۲، ۴ و ۳ درصد در ۶۴۰ متر پایین دست نقطه آلودگی به ۱۱، ۸ و ۲۰ درصد در ۲ کیلومتر پایین دست نقطه آلودگی در همین ماه‌ها افزایش یافت. ضمن این‌که شاخص مقاومت *E. coli* در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها در این دو نقطه پایین دست آلودگی در ماه شهریور افزایش نیافت. ولی در ماه‌های تیر و مرداد افزایش یافت که اندازه افزایش شاخص در مرداد بیشتر از تیر بود (Akiyama and Savin, 2010).

#### تاثیر نوع آنتی‌بیوتیک و زمان نمونه‌برداری بر ARI

در جدول ۳ مقایسه میانگین تاثیر برهم‌کنش نوع آنتی‌بیوتیک در زمان نمونه‌برداری بر ARI باکتری‌های هتروتروف و کلی‌فرم آب و رسوب آورده شده است. بالاترین اندازه ARI باکتری‌های هتروتروف آب در برابر آنتی‌بیوتیک سیپروفلوکسازین در فصل تابستان به دست آمد که با شاخص مقاومت در برابر آنتی‌بیوتیک داکسی‌سایکلین در همین فصل تفاوت آماری معنی‌داری نداشت. در واقع بیشتر تغییر

#### تاثیر نقاط نمونه‌برداری و زمان نمونه‌برداری بر ARI

مقایسه میانگین تاثیر برهم‌کنش نقطه نمونه‌برداری در زمان نمونه‌برداری بر ARI باکتری‌های هتروتروف آب تاثیر فصل تابستان در نقطه خروجی شهر را نشان داد به طوری که بالاترین اندازه ARI باکتری‌های هتروتروف با تفاوت آماری معنی‌داری ( $p < 0.05$ ) در نقطه خروجی از شهر در فصل تابستان (۲۹/۸ درصد) به دست آمد. البته در دو نقطه ورودی و وسط شهر در فصل تابستان نیز ARI باکتری‌ها بالا و به ترتیب ۱۴/۸ و ۲۰ درصد بود. در سوی دیگر، کم‌ترین اندازه ARI باکتری‌های هتروتروف آب نیز در نقطه خروجی رودخانه شهر و در فصل زمستان به دست آمد که تنها با هر سه نقطه نمونه‌برداری در فصل تابستان تفاوت آماری معنی‌داری داشت ( $p < 0.05$ ) (شکل ۱- داده‌های تکمیلی). بنابراین، به نظر می‌رسد فصل تابستان کنترل‌کننده‌ی شاخص مقاومت باکتری‌های هتروتروف در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها بوده و در فصل تابستان شاخص مقاومت آنتی‌بیوتیکی با عبور رودخانه افزایش چشم‌گیر یافته است. در پژوهش‌های دیگر نیز گزارش شده است که فصل تابستان با فراهم کردن شرایط رشد و زنده‌مانی بهتر برای باکتری‌ها سبب افزایش تعداد آنها می‌شود (Farhangi *et al.*, 2021; Khatib Haghghi and Ghane,

شاخص مقاومت کلی فرم‌ها به این صورت بود: سفالکسین < جنتامایسین < سیپروفلوکساسین < داکسی‌سایکلین. در واقع در فصل تابستان حدود نیمی از (۵۰/۷۸) کلی فرم‌های آب رودخانه به سفالکسین مقاوم بودند. به طور کلی ARI هتروتروف‌ها در برابر سیپروفلوکساسین و ARI کلی فرم‌ها در برابر سفالکسین از همه بالاتر بود (جدول ۳).

سفالکسین از نسل اول سفالوسپورین‌ها بوده و برای درمان *استافیلوکوک* و برخی از باکتری‌های گرم-منفی مانند *E. coli* و *کلبسیلا* به کار می‌رود.

فصل و به طور واضح فصل تابستان کنترل کننده شاخص مقاومت در هتروتروف‌های آب بود تا نوع آنتی‌بیوتیک به طوری که در این فصل ARI باکتری‌های هتروتروف آب به این صورت بود: سیپروفلوکساسین < داکسی‌سایکلین < سفالکسین < جنتامایسین. در فصل تابستان ۳۰/۷۶ درصد باکتری‌های هتروتروف آب به آنتی بیوتیک سیپروفلوکساسین مقاوم شده بودند (جدول ۳).

ARI کلی فرم‌های آب در برابر آنتی‌بیوتیک سفالکسین در فصل تابستان به طور معنی‌داری ( $p < 0.05$ ) از همه بیشتر بود. درباره شاخص مقاومت کلی فرم‌ها به آنتی‌بیوتیک‌ها نیز پیامد فصل، به ویژه فصل تابستان بسیار روشن‌تر از نوع آنتی‌بیوتیک بود. در فصل تابستان

جدول ۳- مقایسه میانگین‌های تاثیر برهم‌کنش آنتی‌بیوتیک در زمان نمونه‌برداری بر شاخص مقاومت آنتی‌بیوتیکی باکتری‌های هتروتروف و کلی فرم آب و رسوب

Table 3- Mean comparisons for the effect of antibiotic and sampling time interaction on the antibiotic resistance index (ARI) of heterotrophic and coliform bacteria in water and sediment

آنتی‌بیوتیک Antibiotic	زمان نمونه برداری Sampling point	آب Water		رسوب Sediment	
		باکتری‌های هتروتروف Heterotrophic bacteria	کلی فرم‌ها Coliforms	باکتری‌های هتروتروف Heterotrophic bacteria	کلی فرم‌ها Coliforms
		Mean میانگین	Mean میانگین	Mean میانگین	Mean میانگین
سفالکسین Cephalexin	پاییز Autumn	8.07 <sup>a</sup>	0.38 <sup>e</sup>	0.11 <sup>c</sup>	0.02 <sup>d</sup>
	زمستان Winter	4.29 <sup>b</sup>	4.60 <sup>a</sup>	0.05 <sup>c</sup>	0.21 <sup>d</sup>
	بهار Spring	0.11 <sup>b</sup>	0.16 <sup>e</sup>	0.29 <sup>c</sup>	1.39 <sup>d</sup>
	تابستان Summer	0.51 <sup>b</sup>	1.50 <sup>de</sup>	24.42 <sup>b</sup>	50.78 <sup>a</sup>
جنتامایسین Gentamicin	پاییز Autumn	1.63 <sup>b</sup>	0.79 <sup>de</sup>	0.06 <sup>c</sup>	0.01 <sup>d</sup>
	زمستان Winter	0.8 <sup>b</sup>	0.43 <sup>e</sup>	0.03 <sup>c</sup>	0.11 <sup>d</sup>
	بهار Spring	0.21 <sup>b</sup>	0.19 <sup>e</sup>	0.20 <sup>c</sup>	0.70 <sup>d</sup>
	تابستان Summer	3.32 <sup>b</sup>	3.04 <sup>bc</sup>	23.72 <sup>b</sup>	28.67 <sup>b</sup>
داکسی‌سایکلین Doxycycline	پاییز Autumn	0.12 <sup>b</sup>	0.32 <sup>e</sup>	0.01 <sup>c</sup>	0.005 <sup>d</sup>
	زمستان Winter	0.07 <sup>b</sup>	0.09 <sup>e</sup>	0.01 <sup>c</sup>	0.03 <sup>d</sup>
	بهار Spring	0.02 <sup>b</sup>	0.07 <sup>e</sup>	0.14 <sup>c</sup>	0.44 <sup>d</sup>
	تابستان Summer	1.44 <sup>b</sup>	2.03 <sup>cd</sup>	28.73 <sup>ab</sup>	13.09 <sup>c</sup>
سیپروفلوکساسین Ciprofloxacin	پاییز Autumn	0.24 <sup>b</sup>	0.34 <sup>e</sup>	0.04 <sup>d</sup>	0.004 <sup>d</sup>
	زمستان Winter	3.51 <sup>b</sup>	0.90 <sup>de</sup>	0.01 <sup>c</sup>	0.03 <sup>d</sup>
	بهار Spring	0.05 <sup>b</sup>	0.10 <sup>e</sup>	0.09 <sup>c</sup>	0.66 <sup>d</sup>
	تابستان Summer	0.23 <sup>b</sup>	0.32 <sup>e</sup>	30.78 <sup>a</sup>	13.18 <sup>c</sup>
تری متوپریم Trimethoprim	پاییز Autumn	0.66 <sup>b</sup>	3.40 <sup>ab</sup>	0.07 <sup>d</sup>	0.1
	زمستان Winter	0.55 <sup>b</sup>	0.32 <sup>e</sup>	0.02 <sup>d</sup>	0.07 <sup>d</sup>
	بهار Spring	0.78 <sup>b</sup>	0.06 <sup>e</sup>	0.09 <sup>c</sup>	0.45 <sup>d</sup>
	تابستان Summer	-	-	-	-

اعداد با حروف مشترک در هر ستون تفاوت آماری معنی‌دار ندارند ( $p < 0.05$ ). خطوط تیره در جدول داده‌های از دست رفته است.

Figures with the same letter in each column are not significantly different ( $p < 0.05$ ). Dash line are missed data.

آنتی‌بیوتیکی در آب نسبت به رسوب نشان‌دهنده این است که هنوز رسوبات به مخزن بالقوه این باکتری‌ها تبدیل نشده و عامل آلودگی بیشتر در آب جاری است که از منبع دیگری وارد رودخانه می‌شود. در رسوبات با شرایط دیگری مانند تشکیل بیوفیلم توسط باکتری‌ها و چسبیدن آنتی‌بیوتیک‌ها به رویه‌ی ذرات جامد رسوب روبرو هستیم که شرایط را برای مقاومت آنتی‌بیوتیکی هم از راه افزایش ماندگاری آنتی‌بیوتیک‌ها و تجزیه نشدن ساختار شیمیایی آنها و هم از راه زنده ماندن بیشتر باکتری‌های مقاوم و غیره، بهتر می‌سازد. باکتری‌ها ساختار میکروبی پیچیده‌ای به نام بیوفیلم ایجاد می‌کنند که در آن اعضا گرد هم آمده و از تنش‌های محیطی از جمله آسیب آنتی‌بیوتیک‌ها در امان می‌مانند (Anderl *et al.*, 2000; Diwan *et al.*, 2018). برخی آنتی‌بیوتیک‌ها مانند سولفونامیدها می‌توانند در رسوبات جذب شده و غلظت آنها با گذشت زمان افزایش یابد (Massey *et al.*, 2010; Thiele-Bruhn *et al.*, 2004). در کل در رسوبات تعداد باکتری‌های بیشتری در مقایسه با آب می‌توانند وجود داشته باشند (Calero-Caceres *et al.*, 2017; Schmidt *et al.*, 2000). تعداد باکتری‌های آب ممکن است در اثر رهاسازی باکتری‌ها از بیوفیلم، رسوبات کف آب، و ورود از زمین‌های کنار رودخانه در اثر بالا آمدن سطح آب، افزایش یابد (Diwan *et al.*, 2018; Khatib Haghghi and Ghane, 2017; Khatib Haghghi *et al.*, 2017). اگر رسوبات کف بستر منبع باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک باشد، مقاومت آنتی‌بیوتیکی در پایین دست مجاری آب بیشتر خواهد شد.

#### قطر ناحیه بازدارندگی باکتری رشد (ZOI) / ایشریشیا کولی

در این بخش تاثیر نقاط نمونه‌برداری (L)، آنتی‌بیوتیک (A) و زمان نمونه‌برداری (T) بر قطر ناحیه بازدارندگی رشد (ZOI) باکتری *E. coli* جدا شده از آب و رسوب در برابر آنتی‌بیوتیک‌های بررسی شده است. تاثیر نقاط نمونه‌برداری (L) و برهم‌کنش آن با آنتی‌بیوتیک ( $L \times A$ ) بر ZOI باکتری *E. coli* جدا شده از رسوب معنی‌دار نبود اما بر ZOI باکتری *E. coli* جدا شده از آب معنی‌دار شد ( $p < 0.01$ ). تاثیر آنتی‌بیوتیک (A)، زمان (T) و برهم‌کنش آنها ( $A \times T$ ) و هم چنین برهم‌کنش نقطه نمونه‌برداری در زمان ( $L \times T$ ) و برهم‌کنش سه‌تایی نقطه نمونه‌برداری در نوع آنتی‌بیوتیک در زمان نمونه‌برداری ( $L \times A \times T$ ) بر ZOI باکتری *E. coli* جدا شده از آب و رسوب معنی‌دار بود ( $p < 0.05$ ) (جدول ۴).

اما سیپروفلوکساسین از نسل دوم فلوروکینولون‌ها است که بیشتر برای مبارزه با/سترپتوکوک، مایکوپلاسما، گرم-مثبت‌های هوازی و سودوموناس استفاده می‌شود (Pegler and Healy, 2007). در پژوهش دیگری (Akiyama and Savin, 2010) شاخص مقاومت کلی‌فرم‌ها در برابر آنتی‌بیوتیک آمپی‌سیلین بین ۱۳ تا ۲۳ درصد در ماه‌های گوناگون گزارش شده است. در مطالعه اکبری و همکاران (Akbari *et al.*, 2016) میزان مقاومت در آنتی‌بیوتیک‌های گروه پنی‌سیلین بالاتر از سایر آنتی‌بیوتیک‌ها بود. همچنین این پژوهشگران نشان دادند که مقاومت به چهار آنتی‌بیوتیک سفالکسین، آمپی‌سیلین، متی‌سیلین و آموکسی‌سیلین بین ۶۰ تا ۱۰۰ برابر میزان مقاومت در تمامی گونه‌ها در پساب نسبت به فاضلاب ورودی افزایش یافته بود. بالاترین اندازه ARI باکتری‌های هتروتروف رسوب در برابر آنتی‌بیوتیک سفالکسین در فصل پاییز به دست آمد که با سایر تیمارها تفاوت آماری معنی‌داری داشت ( $p < 0.05$ ). شاخص مقاومت در باکتری‌های هتروتروف رسوب کمتر از آب بود به طوری که بالاترین شاخص مقاومت در هتروتروف‌های آب حدود چهار برابر آن در هتروتروف‌های رسوب بود. روند شاخص مقاومت با فصول در هتروتروف‌های رسوب واضح نبود اما برای همه آنتی‌بیوتیک‌های بررسی شده به جز تری‌متوپریم، شاخص مقاومت هتروتروف‌های رسوب در فصل بهار از سایر فصول کمتر بود. واضح نبودن روند می‌تواند به دلیل این باشد که رسوبات، زیستگاه پایدارتری هستند و کمتر تحت تاثیر تغییرات وابسته به دما یا مواد غذایی که ناشی از تغییر فصول است قرار می‌گیرند. میانگین شاخص مقاومت در برابر آنتی-بیوتیک‌ها در هتروتروف‌های رسوب به این صورت بود: سفالکسین < جنتامایسین < سیپروفلوکساسین < داکسی‌سایکلین < تری‌متوپریم. در کل میانگین ARI در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها در باکتری‌های هتروتروف رسوب بسیار کمتر از آن در باکتری‌های هتروتروف آب بود.

بالاترین اندازه ARI کلی‌فرم‌های رسوب در برابر آنتی‌بیوتیک سفالکسین در فصل زمستان به دست آمد که با شاخص مقاومت در برابر تیمار تری‌متوپریم-پاییز تفاوت آماری معنی‌داری نداشت. شاخص مقاومت کلی‌فرم‌های رسوب نیز همانند هتروتروف‌ها بسیار کمتر از شاخص مقاومت کلی‌فرم‌های آب بود. به طوری که بالاترین شاخص مقاومت در کلی‌فرم‌های آب حدود ۱۱ برابر آن در کلی‌فرم‌های رسوب بود. به طور کلی، شاخص مقاومت کلی‌فرم‌های رسوب در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها در فصل تابستان بیشتر از همه و در فصل بهار از سایر فصول کمتر بود. روند شاخص مقاومت در کلی‌فرم‌های رسوب به این صورت بود: سفالکسین < جنتامایسین < تری‌متوپریم < داکسی‌سایکلین < سیپروفلوکساسین. بالاتر بودن شاخص مقاومت

جدول ۴- تجزیه واریانس تاثیر نقاط نمونه برداری، آنتی بیوتیک، زمان نمونه برداری و برهم کنش آنها بر بر قطر ناحیه بازدارندگی رشد (ZOI) باکتری /یشیریشیا کولی جدا شده از آب و رسوب

Table 4- Analysis of variance for the effect of sampling points, antibiotics, sampling time and their interactions on the zone of growth inhibition diameter (ZOI) of *E. coli* isolated from water and sediment

منابع تغییر Source of variations	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربع ها Mean squares	
		آب Water	رسوب Sediment
		باکتری های هتروتروف Heterotrophic bacteria	کلی فرم ها Coliforms
نقطه نمونه برداری (L) Sampling point	2	0.90**	0.27 <sup>ns</sup>
آنتی بیوتیک (A) Antibiotic	3	38.83**	33.31**
L × A	6	0.37**	0.24 <sup>ns</sup>
زمان نمونه برداری (T) Sampling time	3	7.94**	4.03**
L × T	6	0.19*	0.55**
A × T	9	2.99**	0.93**
L × A × T	18	0.21**	0.32**
خطا Error	72	0.07	0.05

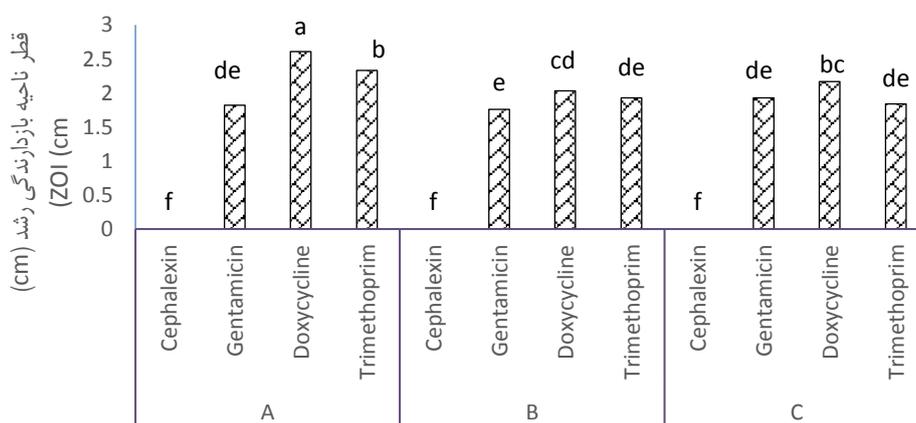
\*\* و \* به ترتیب بیانگر معنی دار بودن در سطح ۱ و ۵ درصد و <sup>ns</sup> معنی دار نبودن در سطح ۵ درصد است.

\*\* and \* indicate significant effect at  $p < 0.01$  and  $p < 0.05$  respectively, and <sup>ns</sup> indicates non-significant effect at  $p < 0.05$ .

شده از آب در شکل ۳ نشان داده شده است. کمترین اندازه ZOI برای *E. coli* در برابر سفالکسین به دست آمد که در هر سه نقطه نمونه برداری همانند هم بود و تفاوتی نداشتند.

### تاثیر نقاط نمونه برداری و نوع آنتی بیوتیک بر ZOI باکتری *E. coli*

مقایسه میانگین تاثیر برهم کنش نقاط نمونه برداری در آنتی بیوتیک بر قطر ناحیه بازدارندگی رشد باکتری /یشیریشیا کولی جدا



شکل ۳- مقایسه میانگین تاثیر برهم کنش نقاط نمونه برداری در نوع آنتی بیوتیک بر ZOI باکتری *E. coli* جدا شده از آب

ستون های با حرف مشابه تفاوت آماری معنی دار ندارند ( $p < 0.05$ ). A، B و C به ترتیب نقاط نمونه برداری در ورودی، وسط و خروجی رودخانه از شهر هستند.

Figure 3- Mean comparisons for the effect of sampling point and antibiotic interaction on the ZOI of *E. coli* isolated from water

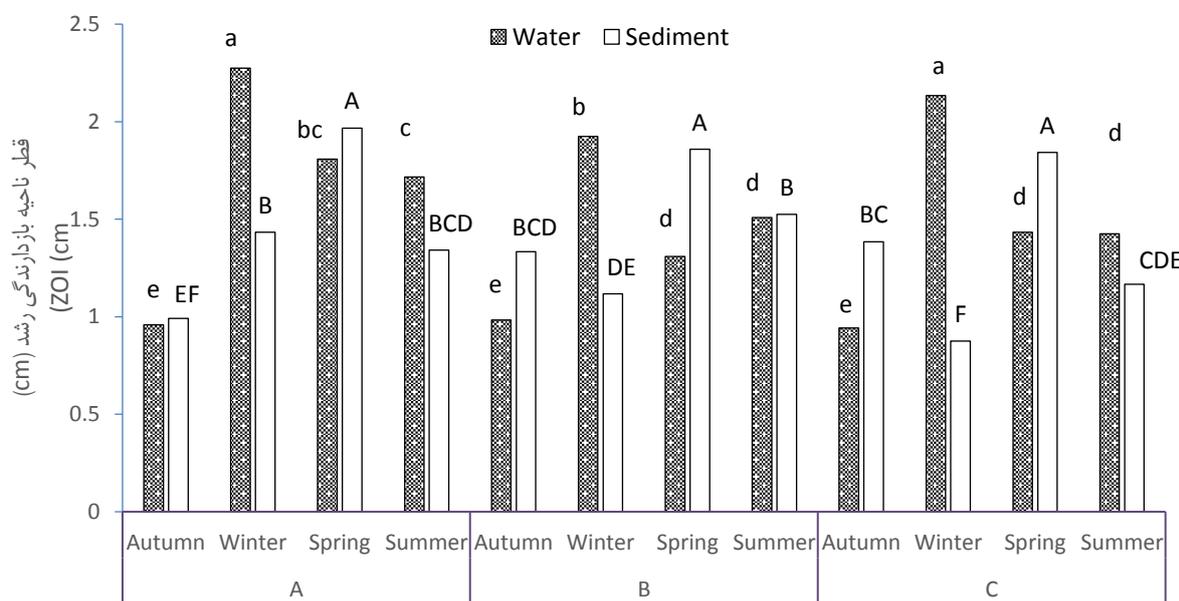
Columns with the same letter are not significantly different ( $p < 0.05$ ). A, B and C are the sampling points at the entrance, middle and exit of the river from the city, respectively.

در همین فصل تفاوت آماری معنی‌داری نداشت. بالاترین اندازه ZOI برای *E. coli* نیز در نقطه ورودی به شهر و در فصل زمستان بود که البته تفاوت آماری معنی‌دار با نقطه خروجی شهر در همین فصل نداشت. با توجه به شکل دیده می‌شود که میانگین ZOI برای *E. coli* در فصل زمستان بیشتر از تابستان، بهار و پاییز بوده است، اما در فصل بهار و تابستان، اندازه ZOI برای *E. coli* در مسیر عبور رودخانه از شهر کاهش پیدا کرده است. یعنی باکتری *E. coli* جدا شده از آب در این فصول در بیرون شهر مقاوم به آنتی‌بیوتیک نبوده است اما احتمالاً در داخل شهر مقاومت به آنتی‌بیوتیک‌های گوناگون را کسب نموده و شاخص ZOI آن کاهش یافته است. اما به نظر می‌رسد که در فصل پاییز، باکتری *E. coli* جدا شده از آب در همان نقطه بیرون شهر مقاوم به آنتی‌بیوتیک‌ها بوده است. بنابراین، می‌توان گفت منشأ ایجاد مقاومت آنتی‌بیوتیکی برای باکتری شاخص *E. coli* در فصل پاییز پیش از ورود رودخانه به شهر بوده است. کاربرد کودهای دامی در مزارع کشاورزی و رسیدن زهاب این مزارع به رودخانه‌ها می‌تواند این نوع آلودگی را توجیه کند. در دهه‌های اخیر در دامداری‌ها به طور گسترده از آنتی‌بیوتیک‌ها استفاده می‌شود (Van Wang et al., 2020; Den Bogaard et al., 2000).

بالاترین اندازه ZOI برای *E. coli* در برابر آنتی‌بیوتیک داکسی‌سایکلین و در نقطه ورودی شهر به دست آمد که با سایر تیمارها تفاوت آماری معنی‌داری داشت ( $p < 0.05$ ). بنابراین، با توجه به میانگین ZOI به دست آمده و بر اساس تقسیم بندی درجه حساسیت، در هر سه نقطه نمونه‌برداری، باکتری *E. coli* جدا شده از آب به سفالکسین مقاوم بود اما در برابر جنتامایسین، داکسی‌سایکلین و تری-متوپریم حساس بود (CLSI, 2014). بدون توجه به مکان اندازه‌گیری میانگین ZOI برای *E. coli* در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها در نقطه ورودی شهر، بیشتر از خروجی و آن هم بیشتر از نقطه وسط شهر بود. یعنی در کل، در نقطه وسط شهر باکتری‌ها حساسیت کمتری به آنتی-بیوتیک‌های بررسی شده داشتند.

#### تاثیر نقاط نمونه‌برداری و زمان نمونه‌برداری بر ZOI باکتری *E. coli*

مقایسه میانگین تاثیر برهم‌کنش نقاط در زمان نمونه‌برداری بر قطر ناحیه بازدارندگی رشد *E. coli* در نقاط مختلف رودخانه از آب و رسوب در شکل ۴ نشان داده شده است. کم‌ترین اندازه ZOI برای *E. coli* جدا شده از آب در نقطه خروجی فصل پاییز بود که با سایر نقاط



شکل ۴- مقایسه میانگین پیامد برهم‌کنش نقاط نمونه‌برداری در زمان نمونه‌برداری بر ZOI باکتری *E. coli* جدا شده از آب و رسوب ستون‌های با حرف مشابه در هر سری تفاوت آماری معنی‌دار ندارند ( $p < 0.05$ ). A، B و C به ترتیب نقاط نمونه‌برداری در ورودی، وسط و خروجی رودخانه از شهر هستند.  
**Figure 4- Mean comparisons for the effect of sampling point and sampling time interaction on the ZOI of *E. coli* isolated from water and sediment**  
 Columns with the same letter in each series are not significantly different ( $p < 0.05$ ). A, B and C are the sampling points at the entrance, middle and exit of the river from the city, respectively.

جنتامایسین نیمه حساس بوده و در سایر فصول به این آنتی بیوتیک حساس شده است. اما در برابر داکسی سایکلین در هر چهار فصل حساس بوده است. این باکتری در برابر آنتی بیوتیک تری متوپریم در فصل پاییز مقاوم بوده و در سه فصل دیگر حساس بوده است. بنابراین باکتری *E. coli* جدا شده از آب به سفالکسین و تری متوپریم مقاوم بوده است.

در باکتری *E. coli* جدا شده از رسوب، همانند باکتری جدا شده از آب، اندازه ZOI برای *E. coli* در برابر سفالکسین در هر چهار فصل برابر با صفر بود. بالاترین اندازه ZOI رسوب نیز در برابر آنتی بیوتیک تری متوپریم و در فصل بهار به دست آمد که با سایر تیمارها تفاوت آماری معنی داری داشت ( $p < 0.05$ ). بدون توجه به زمان نمونه برداری، به طور میانگین روند ZOI برای *E. coli* به این صورت بود: تری متوپریم < داکسی سایکلین < جنتامایسین < سفالکسین (شکل ۵). با توجه به معیارهای سنجش مقاومت باکتری های خانواده انتروباکتریاسه در برابر آنتی بیوتیک ها (CLSI, 2014)، باکتری *E. coli* جدا شده از رسوب در فصل پاییز و زمستان به جنتامایسین نیمه حساس بوده و در سایر فصول به این آنتی بیوتیک حساس شده است. اما در برابر داکسی سایکلین و تری متوپریم در هر چهار فصل حساس بوده است.

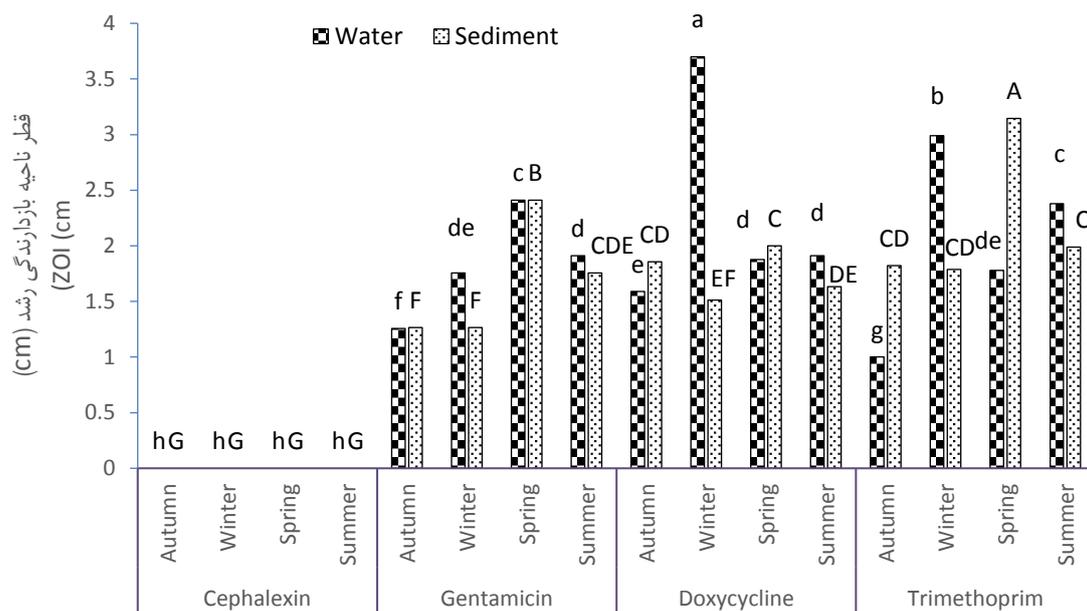
امروزه گزارش زیادی درباره مقاوم شدن یک باکتری به چند آنتی بیوتیک وجود دارد (Singh et al., Diwan et al., 2018; Tripathi and Sharma, 2011; 2019). تریپاتی و شارما (Tripathi and Sharma, 2011) با بررسی مقاومت *E. coli* به چند آنتی بیوتیک گزارش کردند که سوبه های مختلف این باکتری به ۳ تا ۹ آنتی بیوتیک از ۱۰ آنتی بیوتیک مورد بررسی مقاومت نشان دادند. دیده شده است که مهم ترین سازوکار افزایش مقاومت به چند آنتی بیوتیک به صورت هم زمان، فعال کردن پمپ های برون ریز دارو در باکتری ها است. در حالی که این پمپ ها در هردو گروه از باکتری ها دیده شده است اما باکتری های گرم منفی در این زمینه فعال تر از گرم مثبت ها هستند. باکتری های خانواده انتروباکتریاسه در این زمینه شناخته شده هستند (Khameneh et al., 2016). گزارش شده که فرایند دیگر افزایش مقاومت هم زمان به چند آنتی بیوتیک، کاهش نفوذپذیری آنتی بیوتیک به یاخته است که توسط یک ژن کنترل می شود. این فرایند در مقاومت/ایشیریشیا کولی و انتروباکتر در برابر بتا-لاکتامها که آنتی بیوتیک های بازدارنده ساخت دیواره سلولی و باکتریوساید هستند، کاملاً شناخته شده است (Davin-Regli et al., 2008; Madigan et al., 2019).

سیاری از این آنتی بیوتیک ها از بدن دامها دفع شده و در فضولات دیده می شوند. ضمن این که فلور میکروبی دستگاه گوارش دامها به دلیل قرار گرفتن طولانی مدت در معرض آنتی بیوتیک ها به آنها مقاوم می شوند. در صورت استفاده از فضولات دامی در مزارع به صورت کودهای دامی نپوسیده، آنتی بیوتیک های دفع شده به همراه باکتری های مقاوم به آنها به مزارع راه پیدا می کنند و بر فلور میکروبی خاک تاثیر می گذارند. غلظت بالایی از باکتری های مقاوم به آنتی بیوتیک هایی مانند جنتامایسین در رودخانه هایی که پساب در آنها ریخته می شود گزارش شده است (Watkinson et al., 2007).

کمترین اندازه ZOI برای *E. coli* جدا شده از رسوب در نقطه خروجی فصل زمستان بود که با نقطه ورودی در فصل پاییز تفاوت آماری معنی داری نداشت. بالاترین اندازه ZOI برای *E. coli* نیز در نقطه ورودی به شهر و در فصل بهار بود که تفاوت آماری معنی دار با سایر نقاط نمونه برداری در همین فصل نداشت. میانگین ZOI برای *E. coli* در فصل بهار بیشتر از تابستان، پاییز و زمستان بوده است (شکل ۴). در واقع با یک فصل تاخیر نسبت به آب، باکتری *E. coli* جدا شده از رسوب در فصل بهار در بیرون از شهر مقاوم به آنتی بیوتیک نبوده و وارد رودخانه شده است و در مسیر عبور رودخانه از شهر هم مقاومت آنتی بیوتیکی را کسب نکرده است اگرچه اندکی از قطر ZOI آن کم شده است، اما در زمستان، اندازه ZOI برای *E. coli* در مسیر عبور رودخانه از شهر کاهش پیدا کرده است به طوری که این باکتری در رسوب نقطه نمونه برداری پیش از شهر به آنتی بیوتیک ها حساس بوده اما در طول مسیر از حساسیت آن کاسته شده تا جایی که حتی در نقطه خروجی رودخانه از شهر به آنتی بیوتیک ها مقاوم شده است (شکل ۴).

### تاثیر نوع آنتی بیوتیک و زمان نمونه برداری بر ZOI باکتری *E. coli*

در شکل ۵ مقایسه میانگین تاثیر برهم کنش نوع آنتی بیوتیک در زمان نمونه برداری بر قطر ناحیه بازدارندگی رشد باکتری/ایشیریشیا کولی جدا شده از آب نشان داده شده است. اندازه ZOI برای *E. coli* جدا شده از آب در برابر سفالکسین در هر چهار فصل مساوی با صفر بود (شکل ۵). بالاترین اندازه ZOI برای *E. coli* در برابر آنتی بیوتیک داکسی سایکلین و در فصل زمستان به دست آمد که با سایر تیمارها تفاوت آماری معنی داری داشت ( $p < 0.05$ ). بدون توجه به فصل نمونه برداری، به طور میانگین روند ZOI برای *E. coli* به این صورت بود: داکسی سایکلین < تری متوپریم < جنتامایسین < سفالکسین. با توجه به معیارهای سنجش مقاومت باکتری های خانواده انتروباکتریاسه (CLSI, 2014)، باکتری *E. coli* جدا شده از آب در فصل پاییز به



شکل ۵- مقایسه میانگین پیامد برهم‌کنش نوع آنتی‌بیوتیک در زمان نمونه‌برداری بر ZOI باکتری *E. coli* جدا شده از آب و رسوب ستون‌های با حرف مشابه در هر سری تفاوت آماری معنی‌دار ندارند ( $p < 0.05$ ).

Figure 5- Mean comparisons for the effect of antibiotic and sampling time interaction on the ZOI of *E. coli* isolated from water and sediment

Columns with the same letter in each series are not significantly different ( $p < 0.05$ ).

## نتیجه‌گیری

مقاومت (ARI) در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها در باکتری‌های آب بسیار بیشتر از باکتری‌های رسوب بود و در کلی‌فرم‌های آب بیشتر از هتروتروف‌های آب، به نظر می‌رسد بیشتر باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک کلی‌فرم‌هایی باشند که در آب رودخانه حضور دارند نه آنهایی که در رسوبات به عنوان زیستگاه دائمی ساکن شده‌اند. بنابراین، نتایج حکایت از آلودگی مقطعی (نه دائمی) آب رودخانه دارد و مدیریت آن در مقایسه با شرایطی که باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک در رسوبات ساکن شده باشند، آسان‌تر است. به هر روی، با توجه به رسیدن آب رودخانه به منابع آب پایین دست مانند تالاب انزلی، در صورت کنترل نکردن مصرف آنتی‌بیوتیک‌ها و رها شدن زهاب در رودخانه گوه‌رود روند مقاوم شدن باکتری‌ها نسبت به آنتی‌بیوتیک‌ها افزایش یافته و در آینده‌ای نزدیک به یک معضل منطقه‌ای و ملی تبدیل خواهد شد.

در این پژوهش به بررسی شاخص مقاومت باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک‌های مختلف در رودخانه گوه‌رود واقع در رشت پرداخته شد. شاخص مقاومت (ARI) در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها در باکتری‌های هتروتروف (آب و رسوب) با عبور رودخانه از شهر افزایش یافت ولی این شاخص در کلی‌فرم‌ها در نقطه وسط شهر رودخانه بیشتر از نقطه خروجی رودخانه از شهر و آن هم بیشتر از نقطه ورودی رودخانه به شهر بود. فصل تابستان بیشترین تاثیر را بر آلودگی داشت و به ویژه در نقطه خروجی رودخانه در این فصل ARI بزرگتری ثبت شد. بالاترین ARI در هتروتروف‌ها و کلی‌فرم‌های آب به ترتیب در برابر آنتی‌بیوتیک‌های سیپروفلوکساسین و سفالکسین به دست آمد. با توجه به ZOI باکتری *E. coli* نیز دیده شد که این باکتری در آب و رسوب در همه فصل‌ها در برابر سفالکسین مقاوم و تنها در فصل پاییز در برابر تری‌متوپریم مقاوم بود. به طور کلی، با توجه به اینکه شاخص

## منابع

1. Akbari, Z., Shaker Khatibi, M., Mosaferi, M., Asl Rahnema Akbari, N., Shiri, Z., & Farshchian, M.R. (2016). Isolation and identification of dominant microorganisms in activated sludge of ABS effluent treatment plant and evaluation of their potential for acrylonitrile biodegradation. *Journal of Urmia University of Medical Sciences* 27(5): 375-383. (In Persian) URL: <http://umj.umsu.ac.ir/article-1-3550-fa.html>.
2. Akiyama, T., & Savin, M.C. (2010). Populations of antibiotic-resistant coliform bacteria change rapidly in a

- wastewater effluent dominated stream. *Science of the Total Environment* 408: 6192-6201. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.08.055>.
3. Anderl, J.N., Franklin, M.J., & Stewart, P.S. (2000). Role of antibiotic penetration limitation in *Klebsiella pneumoniae* biofilm resistance to ampicillin and ciprofloxacin. *Antimicrobial Agents Chemotherapy* 52: 3648-3663. <https://doi.org/10.1128/AAC.44.7.1818-1824.2000>.
  4. Bagherzadeh, A., Pirouz, B., & Sabet, A. (2018). *Urban, industrial and agricultural pollutant sources on the water quality of Goharroud river in Rasht city-Gilan province*, 8<sup>th</sup> International Engineering Seminar, Ahvaz. (In Persian).
  5. Bockstael, K., & Van Aerschot, A. (2009). Antimicrobial resistance in bacteria. *Central European Journal of Medicine* 4(2): 141-155. <http://doi.org/10.2478/s11536-008-0088-9>.
  6. Bonyadian, M., Moshtaghi, H., & Behroozi, P. (2017). Occurrence of verotoxigenic *E. coli* in cow feces and antimicrobial resistance of the isolates in cattle farms in Shahrekord area. *Biological Journal of Microorganism* 6(21): 75-84. (In Persian)
  7. Calero-Caceres, W., Mendez, J., Martín-Díaz, J., & Muniesa, M. (2017). The occurrence of antibiotic resistance genes in a Mediterranean river and their persistence in the riverbed sediment. *Environmental Pollution* 223: 384-394. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.035>.
  8. Cheng, G., Dai, M., Ahmed, S., Hao, H., Wang, X., & Yuan, Z. (2016). Antimicrobial drugs in fighting against antimicrobial resistance. *Frontiers in Microbiology* 7: 470. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00470>.
  9. CLSI, Clinical & Laboratory Standards Institute. (2014). *Performance Standards for Antimicrobial Susceptibility Testing*, Twenty-Fourth Informational Supplement. M100-S24. 230 p.
  10. Danner, M.C., Robertson, A., Behrends, V., & Reiss, J. (2019). Antibiotic pollution in surface fresh waters: occurrence and effects. *Science of the Total Environment* 664: 793-804. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.406>.
  11. Davin-Regli, A., Bolla, J.M., James, C.E., Lavigne, J.P., Chevalier, J., Garnotel, E., & Molitor, A. (2008). Membrane permeability and regulation of drug "influx and efflux" in enterobacterial pathogens. *Current Drug Targets* 9(9): 750-759.
  12. Diwan, V., Hanna, N., Purohit, M., Chandran, S., Riggi, E., Parashar, V., Tamhankar, A.J., & Stålsby Lundborg, C. (2018). Seasonal variations in water-quality, antibiotic residues, resistant bacteria and antibiotic resistance genes of *Escherichia coli* isolates from water and sediments of the Kshipra River in Central India. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15(6): 1281. <https://doi.org/10.3390/ijerph15061281>.
  13. Emad, S.E., & Chaudhuri, M. (2011). The feasibility of using combined tioz photoeatalysis-SBR process for Antibiotic wastewater treatment. *Desalination* 272: 218-224. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.01.020>.
  14. Farhangi, M., Ghorbanzadeh, N., Amini, M., & Ghovvati, S. (2021). Investigation of antibiotic resistant coliform bacteria in Zarjoub River. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 52(8): 2061-2076. (In Persian). <http://doi.org/10.22059/IJSWR.2021.322755.668946>.
  15. Fernández, L., & Hancock, R.E.W. (2012). Adaptive and mutational resistance: role of porins and efflux pumps in drug resistance. *Clinical Microbiology Reviews* 25(4): 661-681. <https://doi.org/10.1128/CMR.00043-12>.
  16. Huttner, A., Harbarth, S., Carlet, J., Cosgrove, S., Goossens, H., Holmes, A., Jarlier, V., Voss, A., & Pittet, D. (2013). Antimicrobial resistance: a global view from the 2013 World Healthcare-Associated Infections Forum. *Antimicrobial Resistance and Infection Control* 1: 13. <http://doi.org/10.1186/2047-2994-2-31>.
  17. Keen, P.L., & Montforts, M. (2012). *Antimicrobial Resistance in the Environment*. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwe.l
  18. Khameneh, B., Diab, R., Ghazvini, K., & Bazzaz, B.S.F. (2016). Breakthroughs in bacterial resistance mechanisms and the potential ways to combat them. *Microbial Pathogenesis* 95: 32-42. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2016.02.009>.
  19. Khatib Haghighi, M., & Ghane, A. (2017). Study of coliform contamination of Havigh River in the west of Guilan province. *Journal of Aquatic Caspian Sea* 2(3): 55-66. (In Persian)
  20. Khatib Haghighi, S., Faeed, M., Ghane, A., & Malaki Shomali, S. (2017). Study of coliform contamination of Karganrood River in the west of Guilan province. *Advanced Aquaculture Sciences Journal* 1(2): 87-98. (In Persian)
  21. Kulik, N., Trapido, M., Goi, A., Veressinina, Y., & Munter, R. (2008). Combined chemical treatment of pharmaceutical effluents from medical ointment production. *Chemosphere* 70(8): 1525-1531. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.08.026>.
  22. Madigan, M.T., Bender, K.S., Buckley, D.H., Sattley, W.M., & Stahl, D.A. (2019). *Brock Biology of Microorganisms* (15<sup>th</sup> ed). Harlow Pearson Education Limited.
  23. Massey, L.B., Haggard, B.E., Galloway, J.M., Loftin, K.A., Meyer, M.T., & Green, W.R. (2010). Antibiotic fate and transport in three effluent-dominated Ozark streams. *Ecological Engineering* 36: 930-8. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.04.009>.
  24. Mirhoseini, S.H., Nikaeen, M., Khanahmad, H., & Hassanzadeh, A. (2016). Occurrence of airborne vancomycin-

- and gentamicin-resistant bacteria in various hospital wards in Isfahan, Iran. *Advanced Biomedical Research* 5: 143-148. URL: <https://www.advbiores.net/text.asp?2016/5/1/143/187399>.
25. Motta, S.S., Cluzel, P., & Aldana, M. (2015). Adaptive resistance in bacteria requires epigenetic inheritance, genetic noise, and cost of efflux pumps. *PloS One* 10(3): p.e0118464. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118464>.
  26. Pegler, S., & Healy, B. (2007). In patients allergic to penicillin, consider second and third generation cephalosporins for life threatening infections. *BMJ* 335(7627): 991-991. <http://doi.org/10.1136/bmj.39372.829676.47>.
  27. Rezaei, P. (2018). Determination of flood catchment area using GIS and HEC-RAS hydraulic model (Case study: Goharood River in the city of Rasht). *Geography and Environmental Hazards* 27: 41-56. (In Persian). <http://doi.org/10.22067/geo.v0i0.69052>.
  28. Rieke, E.L., Moorman, T.B., Douglass, E.L., & Soupir, M.L. (2018). Seasonal variation of macrolide resistance gene abundances in the South Fork Iowa River Watershed. *Science of the Total Environment* 610: 1173-1179. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.116>.
  29. Safari Sinemani, A.A., Sharifi, Z., & Safari Sinemani, M. (2011). *Experimental Methods in Soil Microbiology*. (1<sup>st</sup> ed), Bu Ali Sina University Press, Hamadan, 457 p. (In Persian)
  30. Safaeian, S., Moghadam, Z., Hosseini, H., & Ismaili, A. (2013). Antibiotic resistance in gram negative bacteria isolated from intestinal organ of Anzali Wetland wild carp. *Journal of Environmental Science and Technology* 15(4): 65-75. (In Persian)
  31. Schmidt, A.S., Bruun, M.S., Dalsgaard, I., Pedersen, K., & Larsen, J.L. (2000). Occurrence of antimicrobial resistance in fish-pathogenic and environmental bacteria associated with four Danish rainbow trout farms. *Applied and Environmental Microbiology* 66: 4908-15. <https://doi.org/10.1128/AEM.66.11.4908-4915.2000>.
  32. Singh, R., Singh, A.P., Kumar, S., Giri, B.S., & Kim, K.H. (2019). Antibiotic resistance in major rivers in the world: a systematic review on occurrence, emergence, and management strategies. *Journal of Cleaner Production* 234: 1484-1505. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.243>.
  33. Temmerman, R., Pot, B., Huys, G., & Swings, J. (2003). Identification and antibiotic susceptibility of bacterial isolates from probiotic products. *International Journal of Food Microbiology* 81(1): 1-10. [http://doi.org/10.1016/s0168-1605\(02\)00162-9](http://doi.org/10.1016/s0168-1605(02)00162-9).
  34. Thiele-Bruhn, S., Seibicke, T., Schulten, H.R., & Leinweber, P. (2004). Sorption of sulfonamide pharmaceutical antibiotics on whole soils and particle-size fractions. *Journal of Environmental Quality* 33: 1331-42. <http://doi.org/10.2134/jeq2004.1331>.
  35. Tripathi, K., & Sharma, A.K. (2011). Seasonal variation in bacterial contamination of water sources with antibiotic resistant faecal coliforms in relation to pollution. *Journal of Applied and Natural Science* 3(2): 298-302. <https://doi.org/10.31018/jans.v3i2.202>.
  36. Van Den Bogaard, A.E.J.M., London, N., & Stobberingh, N.N. (2000). Antimicrobial resistance in pig faecal samples from The Netherlands (five abattoirs) and Sweden. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy* 45: 663-671. <http://doi.org/10.1093/jac/45.5.663>.
  37. Wang, G., Zhou, S., Han, X., Zhang, L., Ding, S., Li, Y., Zhang, D., & Zarin, K. (2020). Occurrence, distribution, and source track of antibiotics and antibiotic resistance genes in the main rivers of Chongqing city, southwest China. *Journal of Hazardous Materials* 389: 122110. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122110>.
  38. Watkinson, A.J., Micalizzi, G.B., Graham, G.M., Bates, J.B., & Constanzo, S.D. (2007). Antibiotic resistant *Escherichia coli* in wastewaters, surface waters and oysters from an urban riverine system. *Applied and Environmental Microbiology* 73: 5667-5670. <http://doi.org/10.1128/AEM.00763-07>.
  39. Zhang, J., Fu, D., Xu, Y., & Liu, C. (2010). Optimization of parameters on photocatalytic degradation of chloramphenicol using TiO<sub>2</sub> as photocatalyst by response surface methodology. *Journal of Environmental Sciences* 22(8): 1281-1289. [http://doi.org/10.1016/s1001-0742\(09\)60251-5](http://doi.org/10.1016/s1001-0742(09)60251-5).



## Evaluation of Zn[Mn]-Al LDHs as Matrices for Release of B, Zn and Mn in A Simulated Soil Solution

H. Hatami<sup>1\*</sup>, A. Fotovat<sup>2</sup>

Received: 31-10-2021

Revised: 13-12-2021

Accepted: 18-12-2022

Available Online: 22-02-2023

### How to cite this article:

Hatami, H., & Fotovat, A. (2023). Evaluation of Zn[Mn]-Al LDHs as Matrices for Release of B, Zn and Mn in A Simulated Soil Solution. *Journal of Water and Soil* 36(6): 761-771. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/jsw.2022.73093.1109](https://doi.org/10.22067/jsw.2022.73093.1109)

### Introduction

Boron (B) has a dual effect on living systems, so that the concentration range within which B is changed from a nutrient to a pollutant is rather narrow. Although B plays essential roles in all living organisms, its long-term excessive uptake has adverse effects on either human beings or plants and animals. Furthermore, part of the B that can be used as fertilizer is highly soluble and easily leached into the soil profile leading to some problems such as decrease of fertilizer efficiency. Therefore, to improve agricultural productivity through its gradual uptake by plants, the increase of B adsorption in the soil solution is necessary. Many adsorbents have been used for the adsorption of B from aqueous solutions; however, layered double hydroxides (LDHs) have been considered as one of the most effective adsorbents as well as slow releaser fertilizers of inorganic anions such as nitrate, phosphate, etc. The formula of LDHs are typically denoted as  $[M_1-x M_2 M_x M_3 (OH)_2]_{x+} (An^-)_{x/n} \cdot n(H_2O)$ , where  $M_2^+$  and  $M_3^+$  are divalent and trivalent cations, respectively, the significance of  $x$  is the molar ratio of  $M_3^+/(M_3^+ + M_2^+)$  and  $An^-$  is the intercalated anion. Although LDH materials are commonly prepared by combining two divalent and trivalent metals, more metals can be introduced in the brucite layer to achieve a large variety of composition and higher adsorption capacity. Stability of LDHs in soil can be affected by numerous factors (e.g. low molecular weight organic acids (LMWOAs)) leading to release of structural cations in addition to interlayer anion. However, there are scarce investigations that have evaluated the potential of ternary LDHs (e.g. Zn-Mn-Al LDH) in desorption of B (as interlayer anion) and release of Zn and Mn (as structural anions) in a simulated soil solution. Therefore, the objectives of this study were, i) to compare the desorption of B capacity of binary LDH (Zn-Al LDH) and ternary LDH (Zn-Mn-Al LDH) in the simulated soil solution, and ii) to investigate the effect of three different electrolytes (potassium nitrate, oxalic acid, and citric acid) on the release of Zn and Mn from synthesized LDHs.

### Materials and methods

A modified urea hydrolysis method was employed to synthesize Zn-Al and Mn-substituted Zn-Al LDHs with Zn(+Mn)/Al molar ratio of 2. Herein the contents of Mn with respect to Zn corresponded to 2% and 10% molar ratio. Accordingly, the synthesized materials denoted as Zn-Al, Zn-Mn<sub>1</sub> and Zn-Mn<sub>2</sub> for the samples without Mn, with 2 and 10 mol% Mn with respect to Zn content. For investigation of B desorption at a concentration of 10 mM, 15 mL from equilibrium solutions were substituted with 15 mL of 0.03 M KNO<sub>3</sub> and shaken for 240 min. Substitution was repeated four times and A modified urea hydrolysis method was employed to synthesize Zn-Al and Mn-substituted Zn-Al LDHs with Zn (+Mn)/Al molar ratio of 2. Herein the contents of Mn with respect to Zn corresponded to 2% and 10% molar ratio. Accordingly, the synthesized materials denoted as Zn-Al, Zn-Mn<sub>1</sub> and Zn-Mn<sub>2</sub> for the samples without Mn, with 2 and 10 mol% Mn with respect to Zn content. For investigation of B desorption at a concentration of 10 mM, 15 mL from equilibrium solutions were substituted with 15 mL of 0.03 M KNO<sub>3</sub> and shaken for 240 min. Substitution was repeated four times and

1- Assistant Professor, National Salinity Research Center (NSRC), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran

(\*- Corresponding Author Email: [h.hatami@areeo.ac.ir](mailto:h.hatami@areeo.ac.ir))

2- Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

B concentrations in extracts were measured by Azomethine-H method. Furthermore, the supernatant Zn and Mn concentrations were determined by GF-AAS (PG 900). This process was repeated for 1.25 mM oxalic acid and 1.25 mM citric acid to study the effect of these compounds on B desorption as well as release of Zn and Mn. B concentrations in extracts were measured by Azomethine-H method. Furthermore, the supernatant Zn and Mn concentrations were determined by GF-AAS (PG 900). This process was repeated for 1.25 mM oxalic acid and 1.25 mM citric acid to study the effect of these compounds on B desorption as well as release of Zn and Mn.

## Results and Discussion

The adsorption and desorption isotherm were carried out to describe the distribution of B between the liquid and adsorbent. The isotherm data of synthesized LDHs were matched with Freundlich model. The values of  $1/n$  in this model were found between 0 and 1 for all LDHs indicating favorable sorption of B on these compounds. The highest adsorption was observed for ternary LDHs (particularly Zn-Mn<sub>2</sub>) due to their higher specific surface area and also due to the ion exchange mechanism in combination with surface adsorption. However, the results showed that the percentages of B desorption by potassium nitrate, oxalic acid and citric acid were lower for Zn-Mn<sub>1</sub> (19.4, 29.1 and 38.2%, respectively) and Zn-Mn<sub>2</sub> (18.6, 28.2 and 35.9 %, respectively) than Zn-Al (30.8, 41.2 and 46.2%, respectively). This observation suggests that the type of LDH, B adsorption mechanism and background electrolyte can affect the amount of B desorption. Furthermore, after 4 successive desorption cycles, the concentration of Zn and Mn increased in the supernatants (particularly in organic acid electrolytes) suggesting dissolution mechanism possibility happened for the studied LDHs. Among the background electrolytes, citric acid was the most effective compound in releasing Zn and Mn, followed by oxalic acid and potassium nitrate. A reason for this such observations could be that with respect to chemical structure, citric acid by three carboxyl groups can form more chelate rings compared to oxalic acid, which contain two carboxyl groups. Therefore, it seems that B containing Zn-Mn-Al LDH may have potential to be used as a slow release fertilizer in soils to supply three essential elements, including B, Zn and Mn simultaneously. However, further studies are required to support such a hypothesis.

**Keywords:** Adsorption-desorption isotherms, Boron, Layered double hydroxides, Organic acids

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۱، ص. ۷۶۱-۷۷۱

## امکان‌سنجی کاربرد Zn[Mn]-Al LDHs به عنوان ماتریکسی برای رهاسازی B، Zn و Mn در محیط شبیه‌سازی شده محلول خاک

حدیث حاتمی<sup>۱\*</sup> - امیر فتوت<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۷

### چکیده

این پژوهش با هدف بررسی تاثیر نوع هیدروکسید مضاعف لایه‌ای (LDH) و نوع محلول زمینه بر واجذب B در محیط شبیه‌سازی شده محلول خاک و نیز رهاسازی کاتیون‌های ساختاری (Mn و Zn) در این محیط انجام شد. بدین منظور ابتدا هم‌دماهای جذب B در محلول ۰/۰۳ مولار نیترات پتاسیم حاوی غلظت‌های ۰/۲۵ تا ۱۰ میلی‌مولار B برای سه ترکیب Zn-Al LDH، Zn-Mn<sub>1</sub>-Al LDH و Zn-Mn<sub>2</sub>-Al LDH (نسبت مولی) و Zn-Mn<sub>2</sub>-Al LDH (نسبت مولی) برابر با ۰/۱ (به اختصار به ترتیب Zn-Al، Zn-Mn<sub>1</sub> و Zn-Mn<sub>2</sub>) بررسی شد. سپس واجذب B از این ترکیبات در بیش‌ترین غلظت و تحت تاثیر محلول‌های ۰/۰۳ مولار نیترات پتاسیم، ۱/۲۵ میلی‌مولار اسید اگزالیک و ۱/۲۵ میلی‌مولار اسید سیتریک اندازه‌گیری شد. همچنین غلظت کاتیون‌های Zn و Mn در محلول واجذب تعیین گردید. بر اساس نتایج، داده‌های جذب و واجذب B در تمام LDHs برآزش خوبی با معادله فرندلیچ نشان دادند. علاوه‌براین، تاثیر کاربرد LDHs سه‌تایی بر میزان جذب و واجذب B معنی‌دار بود. بدین صورت که Zn-Mn<sub>1</sub> و Zn-Mn<sub>2</sub> در مقایسه با Zn-Al دارای جذب بیشتر (۰/۵۷-۰/۴۶ میلی‌مول بر گرم) و واجذب کمتری در هر سه محلول زمینه (۳۸/۲-۱۸/۶ درصد) بودند. این امر می‌تواند به متفاوت بودن مکانیسم جذب B در LDHs سنتز شده نسبت داده شود. اسیدهای آلی به دلیل ایجاد کی‌لیت با کاتیون‌های ساختاری LDHs و افزایش احتمال انحلال آن، سبب افزایش واجذب B و همچنین رهاسازی Zn و Mn در مقایسه با نیترات پتاسیم گردید. با توجه به رهاسازی آهسته B و همچنین Zn و Mn در شرایط شبیه‌سازی شده محلول خاک، ممکن است LDHs قادر به تامین این سه عنصر غذایی برای گیاهان باشند که بررسی آن نیازمند مطالعه در شرایط واقعی خاک و در حضور گیاه می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** اسیدهای آلی، ایزوترم‌های جذب-واجذب، بور، هیدروکسید مضاعف لایه‌ای

### مقدمه

بور (B) به عنوان یکی از عناصر کم‌مصرف مورد نیاز گیاه دارای

اثراتی دوگانه بر موجودات زنده می‌باشد. بدین معنی که به‌رغم نقش‌های مهم و متعدد این عنصر در فرایند رشد گیاه (مانند متابولیسم کربوهیدرات‌ها، انتقال قندها و فعالیت هورمون‌ها)، به علت نزدیکی محدوده کمبود و بیش‌بود عنصر B، این عنصر غذایی به سرعت از یک عنصر ضروری به سمی تبدیل شده و موجب بروز اثرات سوئی بر گیاهان، حیوانات و انسان‌ها می‌گردد (Cao and Guo, 2013). علاوه بر این، با توجه به حلالیت بالای کودهای حاوی B، بخشی از کود مصرفی به دلیل آب‌شویی از دسترس گیاه خارج می‌شود که این امر سبب کاهش کارایی مصرف کود، بروز مشکلات زیست محیطی و افزایش شوری خاک می‌شود. بنابراین، در چنین شرایطی مدیریت

۱- استادیار پژوهشی، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران

\*- نویسنده مسئول: (Email: h.hatami@areeo.ac.ir)

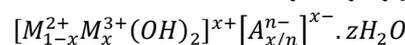
۲- استاد، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

Mg- (López-Rayó *et al.*, 2017; Jiang *et al.*, 2007) LDH Ca-Al LDH (Guo *et al.*, 2013; Ay *et al.*, 2011) و (Ay *et al.*, 2007) LDH می‌باشد. با این وجود مطالعاتی وجود دارد که نشان می‌دهد LDHs قادر به رهاسازی آهسته آنیون بین لایه‌ای جذب شده (مانند فسفات) هم در محیط آبی (Hatami *et al.*, 2018; Novillo *et al.*, 2014; Woo *et al.*, 2011; Benício *et al.*, 2017; Everaert Azimzadeh *et al.*, 2021) و هم در سیستم خاک (et *al.*, 2016; Hatami *et al.*, 2021) می‌باشند. به عبارت دیگر این ترکیبات علاوه بر جذب آنیون، قادر به واجذب تدریجی آن نیز بوده و به همین دلیل از LDHs به عنوان نسل جدیدی از کودهای کندرها<sup>۳</sup> نام برده می‌شود. در این زمینه مطالعاتی نیز در ارتباط با رهاسازی B از LDHs صورت گرفته است (Castro *et al.*, 2018; Songkhum *et al.*, 2018).

علاوه بر آنیون بین لایه‌ای، خروج و رهاسازی کاتیون Zn کاربرد خاکی ترکیب Mg-Zn-Al LDH توسط لویز-رایو و همکاران (López-Rayó *et al.*, 2017) گزارش شده است. همچنین در مطالعه‌ای دیگر حاتمی و همکاران (Hatami *et al.*, 2021) نشان دادند افزودن Zn-Al LDH به یک خاک آهکی علاوه بر تامین تدریجی P، در تامین Zn مورد نیاز گیاه ذرت نیز نقش آفرین بود. نتایج این مطالعات پیشنهاد دهنده این نکته است که با توجه به پیچیده بودن محیط خاک و حضور برخی ترکیبات در خاک، احتمالاً LDHs تحت تاثیر مکانیسم حلالیت قرار می‌گیرند و به همین دلیل بخشی از کاتیون‌های ساختاری آزاد می‌شود. اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم یا به اصطلاح LMWOAs<sup>۴</sup> یکی از فاکتورهایی است که می‌تواند پایداری LDHs را در سیستم خاک تحت تاثیر قرار دهد. این ترکیبات توسط میکروارگانیزم‌های خاک، ریشه گیاهان و همچنین در طی تجزیه مواد آلی خاک تولید می‌شوند و به صورت طبیعی در خاک یافت می‌شوند (Essington, 2004). بنابراین با توجه به مطالب عنوان شده این سوال مطرح می‌شود که در صورت کاربرد LDH سه تایی مانند Zn-Mn-Al LDH که دارای دو عنصر غذایی کم‌مصرف مورد نیاز گیاه در ترکیب ساختاری خود می‌باشد، نحوه رفتار این ترکیب در آزادسازی این عناصر تحت تاثیر قدرت یونی محلول خاک و اسیدهای آلی چگونه است. با توجه به این که نتایج مطالعه قبلی حاکی از موفقیت Zn-Mn-Al LDH در جذب B در محیط شبیه-سازی شده محلول خاک بود (Hatami *et al.*, 2020) و از طرف دیگر از آن جایی که مطالعات محدودی درباره آزادسازی B جذب شده توسط LDHs در شرایط شبیه‌سازی شده و یا واقعی خاک صورت

استفاده از کودهای حاوی B دارای اهمیت دوچندان خواهد بود. یکی از راه‌کارهای پیشنهادی برای کاهش چنین مشکلاتی تامین آهسته و یا کنترل شده B در سیستم خاک با هدف کاهش آب‌شویی و یا افزایش جذب توسط گیاه می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های ساختاری و نتایج تحقیقات منتشر شده به نظر می‌رسد که هیدروکسیدهای مضاعف لایه‌ای و یا به اختصار LDHs<sup>۱</sup> از جمله ترکیبات مناسب جهت کاربرد در این زمینه محسوب شوند.

LDHs گروهی از ترکیبات غیرسیلیکاتی دارای صفحات شبه بروسایت (Mg(OH)<sub>2</sub>) با بار مثبت هستند که در آن کاتیون دو ظرفیتی در هشت وجهی توسط گروه‌های هیدروکسیل هم‌آرایی شده است. جانشینی هم‌شکل در این ورقه توسط کاتیون سه ظرفیتی انجام می‌شود و بار مثبت ایجاد شده با ورود آنیون بین لایه‌ای خنثی می‌گردد (Goh *et al.*, 2008). بر این اساس فرمول عمومی LDHs را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:



در این فرمول، M<sup>2+</sup> و M<sup>3+</sup> بیانگر کاتیون‌های دو ظرفیتی (کلسیم، منیزیم، روی و غیره) و سه ظرفیتی (آهن، آلومینیوم و غیره) می‌باشند و A<sup>n-</sup> آنیون بین لایه‌ای با n بار منفی است. X نیز عبارتست از نسبت (M<sup>2+</sup>+M<sup>3+</sup>)/M<sup>3+</sup>. با توجه به فرمول ساختاری مشخص است که می‌توان با تغییر نوع و نسبت کاتیون دو و سه ظرفیتی و همچنین نوع آنیون بین لایه‌ای طیف وسیعی از LDHs با ویژگی‌های جذبی متفاوت سنتز نمود. علاوه بر این برخی مطالعات گزارش کرده‌اند که امکان ساخت LDHs با بیش از دو کاتیون دو و سه ظرفیتی (عمدتاً سه کاتیون که LDHs سه‌تایی<sup>۲</sup> نامیده می‌شوند) نیز وجود دارد (Chitrakar *et al.*, 2010). این امکان افزون بر افزایش تنوع LDHs ساخته شده، بر اساس نتایج برخی تحقیقات موجب بهبود ظرفیت جذب LDHs سه‌تایی در مقایسه با دو تایی نیز شده است. به عنوان مثال، بهارالی و دکا (Bharali and Deca, 2017) نشان دادند که حضور کاتیون Cu<sup>2+</sup> در ساختار Mg-Cu-Al LDH موجب افزایش جذب آلاینده‌های آلی آنیونی در مقایسه با ترکیب Mg-Al LDH گریده است. از این رو به نظر می‌رسد که ساخت LDHs سه‌تایی یکی از راه‌کارهای افزایش ظرفیت جذب این دسته از ترکیبات سنتزی می‌باشد.

به طور کلی بخش وسیعی از تحقیقات انجام شده در زمینه کاربرد LDHs در حوزه زیست‌محیطی مربوط به جذب و یا حذف آنیون‌ها (آلی و یا معدنی) از سیستم‌های آبی توسط این ترکیبات می‌باشد. در این حوزه مطالعات بسیاری نیز حاکی از جذب B توسط Zn-Al

3- Slow (Controlled) release fertilizer  
4- Low molecular weight organic acids

1- Layered Double Hydroxides  
2- Ternary LDHs

۲۴۰ دقیقه (معادل با زمان تعادل به دست آمده در مطالعه سینتیک جذب B توسط این ترکیبات (Hatami et al., 2020) در ۲۰۰ دور در دقیقه و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، غلظت B باقی‌مانده در محیط با استفاده از روش Azomethine-H تعیین گردید (López-Rayó et al., 2017). از کسر غلظت اولیه و غلظت باقی‌مانده، مقدار جذب B توسط هر یک از ترکیبات مورد مطالعه محاسبه شد. داده‌های به دست آمده توسط مدل‌های لانگ‌مویر و فرن‌دلیچ برازش داده شد. فرم ریاضی این معادلات و پارامترهای آن‌ها در جدول ۱ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که انتخاب بهترین مدل برازش داده شده با توجه به ضریب تعیین ( $R^2$ ) و ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) انجام شد که فرمول محاسبه RMSE در ذیل آورده شده است (Zhang and Selim, 2005):

$$RMSE = [(\sum(q_t - q_t^*))^2 / (n-p)]^{0.5}$$

در این معادله  $q_t$  و  $q_t^*$  به ترتیب مقدار B اندازه‌گیری شده و برآورد شده در زمان  $t$ ، تعداد اندازه‌گیری‌ها و  $p$  تعداد پارامترهای برازش شده می‌باشند.

به منظور بررسی هم‌دماهای واجذب، محلول با غلظت اولیه ۱۰ میلی‌مولار B مورد استفاده قرار گرفت. به این صورت که بعد از جذب B در این محلول، ۱۵ میلی‌لیتر از محلول رویی پس از سانتی‌فیوژ شدن، خارج و به جای آن ۱۵ میلی‌لیتر محلول ۰/۰۳ مولار نیترات پتاسیم به نمونه اضافه شد. این نمونه مجدداً به مدت ۲۴۰ دقیقه تکان داده شد و سانتی‌فیوژ گردید. مراحل سانتی‌فیوژ و جایگزینی محلول خارج شده با نیترات پتاسیم در مجموع ۴ مرتبه انجام شد و در هر چرخه غلظت B جذب شده و تعادلی تعیین گردید. علاوه بر غلظت B، غلظت فلزات Zn و Mn نیز توسط روش جذب اتمی (PG 900) اندازه‌گیری شد. به جهت بررسی تاثیر اسیدهای آلی اگزالیک و سیتریک بر میزان واجذب B، Zn و Mn تمام مراحل فوق در شرایط مشابه انجام شد با این تفاوت که در هر چرخه از ۱۵ میلی‌لیتر محلول ۱/۲۵ میلی‌مولار اسید اگزالیک (یا اسید سیتریک) به جای نیترات پتاسیم استفاده شد. در این نمونه‌ها نیز غلظت B و غلظت فلزات Zn و Mn مطابق روش‌های ذکر شده اندازه‌گیری شد. داده‌های حاصل از واجذب توسط مدل‌های لانگ‌مویر و فرن‌دلیچ (جدول ۱) برازش داده شدند و ضرایب مورد نظر تعیین گردید. همچنین نرم‌افزار Excel 2016 برای رسم نمودارها مورد استفاده قرار گرفت.

گرفته است بنابراین، مطالعه‌ای جامع در این زمینه ضروری است. در این راستا پژوهش حاضر با هدف بررسی تاثیر سه ترکیب Zn-Al LDH، Zn-Mn<sub>1</sub>-Al LDH (Mn/Zn برابر با ۲ درصد نسبت مولی) و Zn-Mn<sub>2</sub>-Al LDH (Mn/Zn برابر با ۱۰ درصد نسبت مولی) در آزادسازی B و کاتیون‌های ساختاری (Zn و Mn) در محیط شبیه-سازی شده محلول خاک و تحت تاثیر اسیدهای آلی اگزالیک و سیتریک انجام شد.

## مواد و روش‌ها

برای ساخت سه ترکیب Zn-Al LDH، Zn-Mn<sub>1</sub>-Al LDH و Zn-Mn<sub>2</sub>-Al LDH (نسبت مولی) و (Mn/Zn برابر با ۰/۰۲) و (Mn/Zn برابر با ۰/۱ نسبت مولی) با آیون بین لایه‌ای نیترات و نسبت کاتیون دو به سه ظرفیتی ۲ به ۱ از روش هیدرولیز اوره<sup>۱</sup> استفاده شد (Inayat et al., 2011). مراحل کلی سنتز هر یک از ترکیبات به این صورت بود که پس از حل شدن نمک‌های نیترات آلومینیوم (۰/۱۶۵ مولار)، نیترات روی و نیترات منگنز (بسته به نوع LDH: ۰/۳۳۵ مولار نیترات روی و یا ۰/۳۳۵ مولار نیترات روی + نیترات منگنز) در محلول یک مولار نیترات آمونیوم، به این محلول اوره با غلظت ۱/۶۵ مولار اضافه شد. سپس این محلول در دمای ۹۰ درجه سلسیوس و در شرایط هم زدن دائم به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد. رسوبات سفید تشکیل شده پس از چندین بار شست و شو با آب مقطر، در آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس خشک شدند. در نهایت رسوبات خشک شده در هاون خرد شدند و ذرات عبور داده شده از الک مش ۵۰ در آزمایش مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین ساختار بلوری و گروه‌های عاملی سه ترکیب Zn-Al LDH، Zn-Mn<sub>1</sub>-Al LDH و Zn-Mn<sub>2</sub>-Al LDH سنتز شده که به ترتیب به اختصار LDH و Zn-Mn<sub>2</sub>-Al LDH و Zn-Mn<sub>1</sub>-Al LDH نامگذاری شدند توسط آنالیزهای XRD<sup>۲</sup> و FTIR<sup>۳</sup> مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج آن در مطالعه قبلی (Hatami et al., 2020) گزارش شده است.

پس از حصول اطمینان از سنتز موفقیت‌آمیز این ترکیبات، به منظور مقایسه ترکیبات Zn-Al، Zn-Mn<sub>1</sub> و Zn-Mn<sub>2</sub> در جذب و واجذب B، هم‌دماهای جذب و واجذب این ترکیبات در محیط شبیه‌سازی شده محلول خاک مورد مطالعه قرار گرفت. برای بررسی هم-دماهای جذب ۲۰ میلی‌لیتر از محلول ۰/۰۳ مولار نیترات پتاسیم حاوی غلظت‌های ۰/۲۵ تا ۱۰ میلی‌مولار B از منبع H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> در pH = ۷ به ۱۰۰ میلی‌گرم جاذب افزوده شد و بعد از تکان دادن به مدت

- 1- Urea hydrolysis
- 2- X-Ray Diffraction
- 3- Fourier Transform Infrared spectroscopy

4- Root mean squared error

جدول ۱- فرم ریاضی و پارامترهای معادلات لانگمویر و فرندلیچ

Table 1- Mathematical forms and parameters of the Langmuir and Freundlich equations

معادلات Equations	فرم ریاضی معادلات Mathematical forms of equations	پارامترهای معادلات Parameters of equations
لانگمویر (Langmuir)	$\text{Log}(q_e) = \log(k_F) + 1/n \log(C_e)$	$q_e$ و $C_e$ به ترتیب مقدار B جذب شده در واحد جرم جاذب و غلظت تعادلی B ( $q_e$ and $C_e$ the amounts of B adsorbed per unit mass of adsorbent and equilibrium concentration of B, respectively)
فرندلیچ (Freundlich)	$C_e/q_e = C_e/b + 1/(k_L \times b)$	$k_L$ و $k_F$ و $1/n$ ثابت‌های معادلات، b حداکثر ظرفیت جذب ( $k_L$ , $k_F$ and $1/n$ equations constants, b maximum adsorption capacity)

## نتایج و بحث

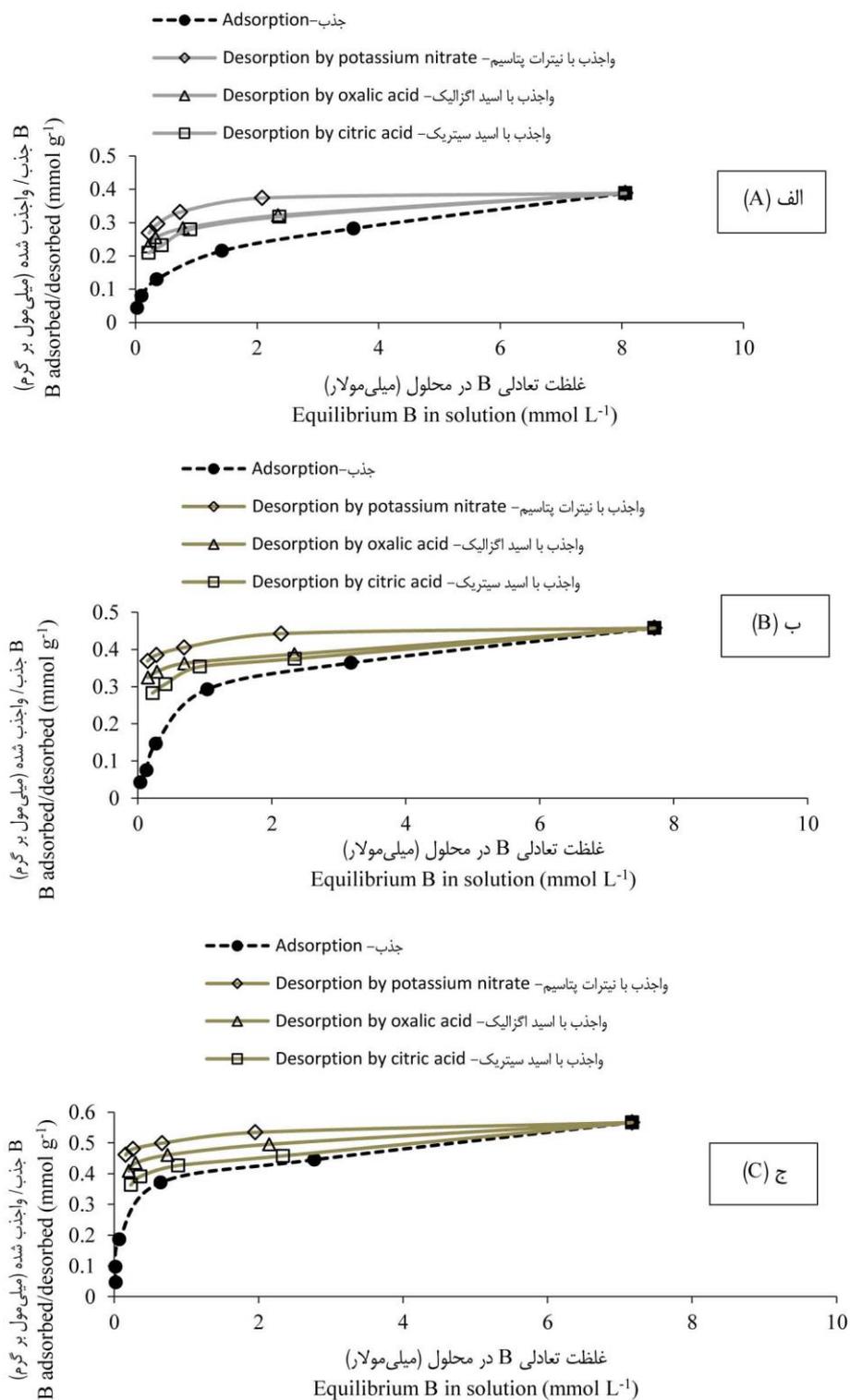
هم‌دمای جذب توصیف کننده مقدار جذب یک ماده توسط یک جاذب در دمای ثابت است. در پژوهش حاضر این پارامتر برای B در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، قدرت یونی ۰/۰۳ مولار نیترات پتاسیم و غلظت اولیه‌های ۰/۲۵ تا ۱۰ میلی‌مولار در  $\text{pH} = 7$  مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که مقدار جذب در Zn-Al، Zn-Mn<sub>1</sub> و Zn-Mn<sub>2</sub> با افزایش غلظت B افزایش یافته و به ترتیب به  $(\pm 0.03)/0.39$ ،  $(\pm 0.04)/0.46$  و  $(\pm 0.03)/0.57$  میلی‌مول بر گرم رسید (شکل ۱). اما درصد جذب با افزایش غلظت به ترتیب در Zn-Al، Zn-Mn<sub>1</sub> و Zn-Mn<sub>2</sub> از ۸۶/۷، ۸۴/۸ و ۹۱ درصد به ۱۹/۴، ۲۲/۹ و ۲۸/۳ درصد کاهش یافت که احتمالاً به دلیل کاهش یا اشباع شدن مکان‌های جذبی است که منجر به کاهش تمایل جذب در غلظت‌های بالا می‌گردد. علاوه بر این، همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد LDHs سه‌تایی (به ویژه Zn-Mn<sub>2</sub>) در مقایسه با Zn-Al قادر به جذب B بیشتری در محیط بازسازی شده محلول خاک بودند که دلایل آن در مطالعه قبلی (Hatami et al., 2020) بزرگ‌تر بودن سطح ویژه (به ترتیب ۱۰/۱، ۱۱/۳ و ۲۱/۲ متر مربع بر گرم در Zn-Al، Zn-Mn<sub>1</sub> و Zn-Mn<sub>2</sub>) و همچنین وقوع همزمان دو مکانسیم تبادل یونی و جذب سطحی (به دلیل کاهش  $d_{003}$  در الگوی XRD این ترکیبات پس از جذب B) در LDHs سه‌تایی عنوان شده است. همچنین این محققین بر اساس نتایج XRD بیان کردند که احتمال وقوع مکانسیم تبادل یونی در ترکیب Zn-Al اندک بوده (به دلیل عدم تغییر  $d_{003}$  در الگوی XRD این ترکیب پس از جذب B) و جذب سطحی مکانسیم غالب این ترکیب می‌باشد. بنابراین، به نظر می‌رسد که سنتز LDHs سه‌تایی می‌تواند از جمله راه‌کارهای افزایش ظرفیت جذب این ترکیبات محسوب شود.

نتایج برآزش داده‌های هم‌دمای جذب B با مدل‌های لانگمویر و فرندلیچ برای هر سه ترکیب مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است. مقادیر بالای  $R^2$  و پایین RMSE نشان‌دهنده برآزش خوب داده‌های جذب به معادله فرندلیچ بود که بیانگر جذب B در سطوح ناهمگن LDHs است. ضریب  $1/n$  در مدل فرندلیچ نشان‌دهنده

قدرت جذب می‌باشد و چنانچه  $0 < 1/n < 1$  باشد بیانگر شرایط مطلوب فرآیند جذب است (Jiang et al., Delazare et al., 2014). در این پژوهش مقادیر  $1/n$  برای LDHs بین ۰/۳۸۷ تا ۰/۴۳۲ برآورد گردید (جدول ۲). لذا، شرایط جذب B مطلوب بوده است. برآزش داده‌های جذب B به معادله فرندلیچ توسط فریرا و همکاران (Ferreira et al., 2006) کامدا و همکاران (Kameda et al., 2015) گائو و همکاران (Gao et al., 2017) نیز گزارش شده است.

واجذب B از LDHs ساخته شده در محلول ۰/۰۳ مولار نیترات پتاسیم، ۱/۲۵ میلی‌مولار اسید اگزالیک و ۱/۲۵ میلی‌مولار اسید سیتریک حاوی غلظت ۱۰ میلی‌مولار B، به تفکیک در شکل ۱ نشان داده شده است. درصد واجذب B در Zn-Al، Zn-Mn<sub>1</sub> و Zn-Mn<sub>2</sub> پس از ۴ چرخه واجذب به ترتیب ۳۰/۸، ۱۹/۴ و ۱۸/۶ برای نیترات پتاسیم، ۴۱/۲، ۲۹/۱ و ۲۸/۲ برای اسید اگزالیک و ۴۶/۲، ۳۸/۲ و ۳۵/۹ برای اسید سیتریک تعیین شد. این نتایج نشان داد که درصد واجذب در LDHs مورد مطالعه بسته به دو یا سه تایی بودن آن و همچنین نوع محلول زمینه متفاوت است. با توجه به این‌که نتایج آنالیز XRD نمونه‌ها پس از جذب B در مطالعه قبلی (Hatami et al., 2020) حاکی از کاهش درجه بلوری در ترکیبات Zn-Mn<sub>1</sub> و Zn-Mn<sub>2</sub> بود (به دلیل وقوع مکانسیم تبادل یونی) انتظار می‌رفت که این دو ترکیب درصد واجذب B بیشتری نسبت به Zn-Al که پایداری درجه بلوری خود را حفظ کرده بود (به دلیل وقوع مکانسیم جذب سطحی) نشان دهند. اما برخلاف انتظار، Zn-Al دارای درصد واجذب بیشتری در هر سه محلول زمینه بود. این نتیجه نشان می‌دهد که واجذب B در LDHs به نوع مکانسیم جذب B و یا مکان حضور آنیون بستگی دارد (Goh et al., 2010) و واجذب از مکان‌های سطحی سهل‌تر از فضای بین لایه‌ای صورت می‌گیرد.

همچنین نتایج پژوهش حاضر نشان داد که نوع محلول زمینه نیز در میزان B واجذب شده اثرگذار بوده است، به نحوی که در هر سه ترکیب توالی میزان واجذب به صورت نیترات پتاسیم > اسید اگزالیک > اسید سیتریک بود.



شکل ۱- هم‌دماهای جذب و واجذب B در (الف) Zn-Al، (ب) Zn-Mn<sub>1</sub>، (ج) Zn-Mn<sub>2</sub> (قدرت یونی ۰/۰۳ مولار نیترات پتاسیم، pH = ۷، دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، زمان تکان دادن ۲۴۰ دقیقه)

Figure 1- Equilibrium adsorption-desorption isotherms of B on (A) Zn-Al, (B) Zn-Mn<sub>1</sub> and (C) Zn-Mn<sub>2</sub> (I = 0.03 mol L<sup>-1</sup> KNO<sub>3</sub>, pH = 7, t = 25 °C, shaking time = 240 min)

جدول ۲- مقادیر پارامترهای معادلات فرندلیچ و لانگمویر برای هم‌دمای جذب و واجذب B در LDHs مورد مطالعه

Table 2- The parameters of Freundlich and Langmuir isotherms for adsorption and desorption of B by the LDHs

LDH	لانگمویر Langmuir				فرندلیچ Freundlich			
	RMSE	R <sup>2</sup>	B (mmol g <sup>-1</sup> )	K <sub>L</sub> (Lmmol <sup>-1</sup> )	RMSE	R <sup>2</sup>	1/n	K <sub>F</sub> (mmol <sup>(1-1/n)</sup> g <sup>-1</sup> L <sup>1/n</sup> )
جذب								
Adsorption								
Zn-Al	1.365	0.97	0.40	1.31	0.034	0.99	0.387	0.47
Zn-Mn <sub>1</sub> -Al	0.904	0.99	0.43	1.33	0.053	0.98	0.432	0.49
Zn-Mn <sub>2</sub> -Al	0.602	0.99	0.55	1.78	0.059	0.98	0.426	0.56
واجذب در نیترات پتاسیم								
Desorption by potassium nitrate								
Zn-Al	0.038	0.99	0.39	8.37	0.024	0.91	0.103	0.62
Zn-Mn <sub>1</sub> -Al	9.837	0.99	0.46	14.92	0.007	0.97	0.056	0.68
Zn-Mn <sub>2</sub> -Al	7.227	0.98	0.57	13.26	0.003	0.99	0.053	0.75
واجذب در اسید اگزالیک								
Desorption by oxalic acid								
Zn-Al	0.476	0.99	0.40	3.45	0.010	0.99	0.139	0.58
Zn-Mn <sub>1</sub> -Al	10.056	0.98	0.46	5.36	0.013	0.96	0.082	0.65
Zn-Mn <sub>2</sub> -Al	7.446	0.99	0.58	6.08	0.008	0.98	0.086	0.72
واجذب در اسید سیتریک								
Desorption by citric acid								
Zn-Al	0.470	0.99	0.40	2.69	0.012	0.99	0.173	0.57
Zn-Mn <sub>1</sub> -Al	10.159	0.99	0.47	3.39	0.012	0.98	0.132	0.63
Zn-Mn <sub>2</sub> -Al	7.537	0.99	0.58	3.45	0.015	0.97	0.120	0.70

(Castro *et al.*, 2018) نیز اشاره شده است. این محققین نشان دادند که الگوی رهاسازی B در نمونه Mg-Al-B LDH در طی زمان همواره کندتر از H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> بود که گواه بر پایداری LDH در خاک مورد مطالعه بود. در این زمینه نتایج مشابهی نیز برای Zn-Al-B LDH سنتز شده به روش هم‌رسوبی توسط سونگکم و همکاران (Songkhum *et al.*, 2018) گزارش شده است.

به منظور بررسی تاثیر شرایط شیب‌سازی شده محلول خاک (قدرت یونی و دو اسید آلی متداول) بر رهاسازی احتمالی کاتیون‌های ساختاری Zn و Mn موجود در LDHs مورد مطالعه، غلظت این عناصر در طی چرخه‌های واجذب اندازه‌گیری گردید. بر اساس نتایج به دست آمده مقدار Zn آزاد شده از Zn-Al، Zn-Mn<sub>1</sub> و Zn-Mn<sub>2</sub> به ترتیب در نبود اسیدهای آلی برابر با ۰/۳۸، ۰/۳۶ و ۰/۳۴ میلی‌مول بر گرم، در حضور اسید اگزالیک برابر با ۰/۴۷، ۰/۴۵ و ۰/۴۳ میلی‌مول بر گرم و در حضور اسید سیتریک برابر با ۰/۵۵، ۰/۵۶ و ۰/۵۳ میلی‌مول بر گرم بود (شکل ۲-الف). همچنین مقادیر رهاسازی Mn در نمونه‌های Zn-Mn<sub>1</sub> و Zn-Mn<sub>2</sub> تحت تاثیر نیترات پتاسیم، اسید اگزالیک و اسید سیتریک به ترتیب برابر با ۰/۰۴، ۰/۰۸ و ۰/۱ میکرومول بر گرم به دست آمد (شکل ۲-ب). بنابراین، رهاسازی Zn و Mn مشخص کرد که احتمالاً بخشی از ساختمان LDHs دچار انحلال شده است چرا که کاتیون‌های ساختاری تنها در صورت حل پذیری LDHs می‌توانند در محلول حاصل از واجذب حضور داشته باشند. در مطالعه‌ای لوپز-رایو و همکاران (López-Rayó *et al.*, 2017) رهاسازی Zn از ترکیب Mg-Zn-Fe-LDH را به منظور

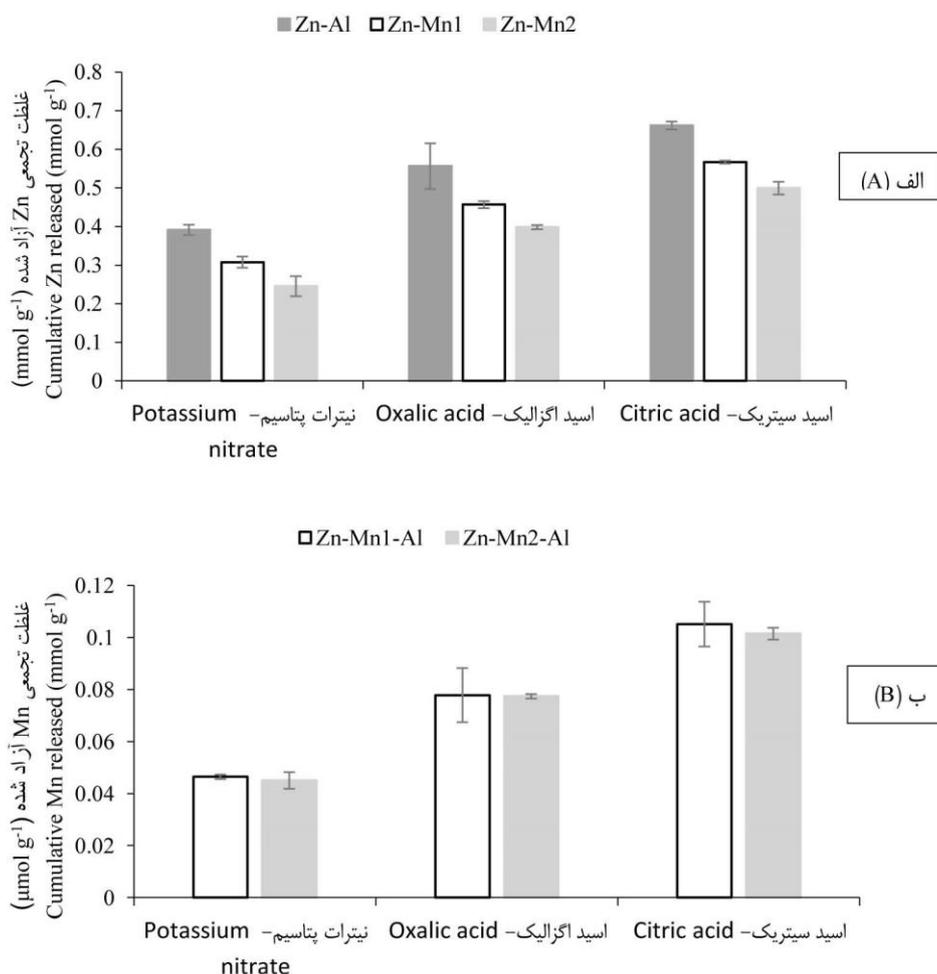
بالاتر بودن مقادیر واجذب در اسید سیتریک می‌تواند به تفاوت ساختار شیمیایی آن با اسید اگزالیک نسبت داده شود (Shafiqh *et al.*, 2019). به عبارت دیگر اسید سیتریک با وجود سه گروه عاملی کربوکسیل در مقایسه با اسید اگزالیک که شامل دو گروه عاملی است، قادر به تشکیل کلات‌های بیشتری با کاتیون‌های ساختاری LDHs بوده که این امر خود موجب افزایش احتمال انحلال بخشی از LDHs و در نتیجه واجذب بیشتر B می‌گردد.

متفاوت بودن مقدار واجذب در LDHs با توجه به نوع محلول زمینه در مطالعه چنگ و همکاران (Cheng *et al.*, 2009) نیز گزارش شده است. علاوه‌براین، وقوع مکانیسم انحلال در LDHs سنتز شده از دیگر دلایلی است که می‌تواند در واجذب B در این پژوهش اثرگذار باشد. در این زمینه حضور غلظت‌های قابل اندازه‌گیری از کاتیون‌های ساختاری (Zn و Mn) در محلول‌های واجذب می‌تواند تاییدی بر انحلال این ترکیبات باشد که در ادامه به این موضوع پرداخته خواهد شد.

مشابه با نتایج جذب، بررسی هم‌دمای واجذب B نشان داد که معادله فرندلیچ به خوبی قادر به برازش داده‌های واجذب در هر سه ترکیب مورد مطالعه بود (جدول ۲). به‌طور کلی نتایج بررسی ۴ چرخه واجذب B از LDHs مورد بررسی نشان داد که رهاسازی B هم در حضور نیترات پتاسیم ۰/۰۳ مولار که معادل با قدرت یونی محلول خاک است و هم در حضور اسیدهای سیتریک و اگزالیک ۱/۲۵ میلی‌مولار به عنوان دو اسید آلی متداول در محیط خاک، روندی نسبتاً آهسته داشت. این روند کند رهاسازی در مطالعه کاسترو و همکاران

Zn و Mn تحت تاثیر اسید سیتریک را می‌توان به حضور سه گروه عاملی کربوکسیل در آن و در نتیجه تشکیل پیوندهای بیشتر مرتبط دانست. موثر بودن اسید سیتریک در رهاسازی Zn از ترکیب Zn-LDH (Shafigh *et al.*, 2019) نیز گزارش شده است. آن‌ها بیان کردند که میزان رهاسازی Zn تحت تاثیر اسید سیتریک، اسید اگزالیک و اسید تارتاریک به ترتیب ۵۲۲، ۱۲۳/۵ و ۹۷/۹ میکرومول بر گرم بود. بنابراین بر اساس نتایج به دست آمده سه ترکیب سنتز شده ماتریکس مناسبی را برای جذب و واجذب B و همچنین رهاسازی دو عنصر غذایی کم‌مصرف (Zn و Mn) در شرایط شبیه‌سازی شده محلول خاک ایجاد کردند با این وجود انجام مطالعاتی در محیط واقعی جهت نتیجه‌گیری دقیق‌تر کاملا ضروری به نظر می‌رسد.

تأمین Zn مورد نیاز گیاه جو مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق حاکی از افزایش جذب Zn در گیاه جو به دنبال حلالیت LDH تحت تاثیر ترشحات ریشه و کاهش pH منطقه ریزوسفر ریشه بود. حلالیت LDHs در محیط شبیه‌سازی شده و واقعی خاک و خروج کاتیون‌های ساختاری در مطالعات حلاج‌نیا و همکاران (Halajnia *et al.*, 2016)، شفیق و همکاران (Shafigh *et al.*, 2019) و حاتمی همکاران (Hatami *et al.*, 2021) نیز تایید و گزارش شده است. مطابق نتایج، نوع محلول زمینه اثر معنی‌داری بر مقادیر Zn و Mn آزاد شده داشته است به نحوی که روند نیترات پتاسیم > اسید اگزالیک > اسید سیتریک برای آن قابل پیشنهاد است اما همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود تغییر در نوع LDH تفاوت چندانی در مقدار Zn و Mn آزاد شده تحت تاثیر هر یک از محلول‌های زمینه ایجاد نکرده است. همان‌گونه که قبلا هم اشاره شد بزرگ‌تر بودن مقادیر رهاسازی



شکل ۲- تاثیر نیترات پتاسیم ۰/۰۳ مولار، اسید اگزالیک ۱/۲۵ میلی‌مولار و اسید سیتریک ۱/۲۵ میلی‌مولار بر رهاسازی Zn (الف) و Mn (ب) از Zn-Mn<sub>1</sub> و Zn-Mn<sub>2</sub>

Figure 2- The effects of potassium nitrate, oxalic acid and citric acid on Zn (A) and Mn (B) released from Zn-Mn<sub>1</sub> and Zn-Mn<sub>2</sub>

## نتیجه گیری

حاکمی از ناپایداری LDHs مورد مطالعه در شرایط شبیه‌سازی شده محلول خاک و در نتیجه وقوع انحلال در بخشی از ساختار این ترکیبات داشت. اگرچه در پژوهش حاضر امکان کمی‌سازی سهم هر یک از مکانیسم‌های موثر در واجذب عناصر وجود نداشت اما با توجه به اهمیت این موضوع، انجام چنین مطالعه‌ای در پژوهش‌های بعدی پیشنهاد می‌شود. موثر بودن نوع محلول زمینه بر درصد واجذب B و همچنین میزان رهاسازی کاتیون‌های Zn و Mn گواه تاثیر دو ویژگی محلول خاک یعنی قدرت یونی و حضور اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم بر شرایط LDH در صورت کاربرد حاکمی آن می‌باشد. بنابراین، اگرچه بر اساس این پژوهش به نظر می‌رسد که LDHs مورد مطالعه قادرند به طور همزمان دو و یا سه عنصر غذایی ضروری گیاه را تامین نمایند اما با توجه به تاثیر شرایط خاک بر پایداری LDHs از یک سو و کندرها بودن خروج این عناصر و عدم آگاهی از مناسب بودن تامین این عناصر در زمان نیاز گیاه از سوی دیگر، کاربرد این ترکیبات در شرایط واقعی خاک و در حضور گیاه را ضروری می‌سازد.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که در شرایط شبیه‌سازی شده محلول خاک نوع LDH علاوه بر جذب B در واجذب آن نیز تاثیرگذار بود. به عبارت دیگر LDHs سه تایی Zn-Mn-Al به دلیل وقوع همزمان مکانیسم‌های جذب سطحی و تبادل یونی دارای جذب بیشتری در مقایسه با Zn-Al LDH که تنها شواهدی از مکانیسم جذب سطحی را نشان داد، بودند. اما با توجه به متفاوت بودن انرژی پیوند در مکان‌های جذبی متفاوت، در حضور هر سه محلول زمینه (نیترات پتاسیم ۰/۰۳ مولار، اسید اگزالیک ۱/۲۵ میلی‌مولار و اسید سیتریک ۱/۲۵ میلی‌مولار)، LDHs سه تایی درصد واجذب B کمتری نشان دادند. کوچک بودن مقادیر واجذب به ویژه در LDHs سه تایی احتمالاً دلیلی بر رهاسازی کند آنیون B در این ترکیبات بود. هرچند به منظور اظهار نظر قطعی‌تر، انجام مطالعات سینتیک واجذب مفید و قابل پیشنهاد است. برخلاف B، نوع LDH تاثیر قابل توجهی بر رهاسازی کاتیون‌های ساختاری Zn و Mn نشان نداد. صرف‌نظر از میزان رهاسازی این کاتیون‌ها، حضور آن‌ها در عصاره‌های واجذب

## منابع

1. Ay, A.N., Zumreoglu-Karan, B., & Temel, A. (2007). Boron removal by hydrotalcite-like, carbonate-free Mg-Al-NO<sub>3</sub>-LDH and a rationale on the mechanism. *Microporous and Mesoporous Materials* 98: 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2006.08.004>.
2. Ay, A.N., Zumreoglu-Karan, B., Temel, A., & Mafra, L. (2011). Layered double hydroxides with interlayer borate anions: A critical evaluation of synthesis methodology and pH-independent orientations in nano-galleries. *Applied Clay Science* 51: 308-316. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.12.015>.
3. Azimzadeh, Y., Najafi, N., Reyhanitabar, A., Oustan, S., & Khataee, A. (2021). Effects of phosphate loaded LDH-biochar/hydrochar on maize dry matter and P uptake in a calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science* 67(12): 1649-1664. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1802012>.
4. Benício, L.P.F., Constantino, V.R.L., Pinto, F.G., Vergütz, L., Tronto, J., & Da Costa, L.M. (2017). Layered double hydroxides: new technology in phosphate fertilizers based on nanostructured materials. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 5(1): 399-409. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b01784>.
5. Bharali, D., & Deca, R.C. (2017). Preferential adsorption of various anionic and cationic dyes from aqueous solution over ternary CuMgAl layered double hydroxide. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 525: 64-76. <http://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.04.060>.
6. Cao, Y., & Guo Q. (2013). Boron removal from water using takovite: adsorption vs. anion exchange. *Advanced Materials Research* 781-784: 2150-2156. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.781-784.2150>.
7. Castro, G.F., Ferreira, J.A., Eulálio, D., de Souza, S.J., Novais, S.V., Novais, R.F., Pinto, F.G., & Tronto, J. (2018). Layered double hydroxides: matrices for storage and source of boron for plant growth. *Clay Minerals* 53(01):1-27. <https://doi.org/10.1180/clm.2018.6>.
8. Cheng, X., Huang, X., Wang, X., Zhao, B., Chen, A., & Sun, D. (2009). Phosphate adsorption from sewage sludge filtrate using zinc-aluminum layered double hydroxides. *Journal of Hazardous Materials* 169: 958-964. <http://doi:10.1016/j.jhazmat.2009.04.052>.
9. Chitrakar, R., Tezuka, S., Hosokawa, J., Makita, Y., Sonoda, A., Ooi, K., & Hirotsu, T. (2010). Uptake properties of phosphate on a novel Zr-modified Mg-Fe-LDH(CO<sub>3</sub>). *Journal of colloid and interface science* 349: 314-320. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.05.068>.
10. Delazare, T., Ferreira, L.P., Ribeiro, N.F.P., Souza, M.M.V.M., Campos, J.C., & Yokoyama, L. (2014). Removal of boron from oilfield wastewater via adsorption with synthetic layered double hydroxides. *Journal of Environmental Science and Health, Part A* 49: 923-932. <http://doi.org/10.1080/10934529.2014.893792>.
11. Essington, M.E. (2004). *Soil and Water Chemistry: An Integrative Approach*, 1st ed. CRC Press, Boca Raton,

- FL.
12. Everaert, M., Warrinnier, R., Baken, S., Gustafsson, J.P., De Vos, D.E., & Smolders, E. (2016). Phosphate exchanged Mg-Al layered double hydroxides: a new slow release phosphate fertilizer. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 4(8): 4280–4287. <http://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b00778>.
  13. Ferreira, O.P., Moraes, S.G., Duran, N., Cornejo, L., & Alves, O.L. (2006). Evaluation of boron removal from water by hydrotalcite-like compounds. *Chemosphere* 62: 80–88. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.04.009>.
  14. Gao, Z., Xie, S., Zhang, B., Qiu, X., & Chen, F. (2017). Ultrathin Mg-Al layered double hydroxide prepared by ionothermal synthesis in a deep eutectic solvent for highly effective boron removal. *Chemical Engineering Journal* 319: 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.03.002>.
  15. Goh, K.-H., Lim, T.T., & Dong, Z. (2008). Application of layered double hydroxides for removal of oxyanions: A review. *Water Research* 42: 1343–1368. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2007.10.043>.
  16. Goh, K.H., Lim, T.T., Banas, A., & Dong, Z. (2010). Sorption characteristics and mechanisms of oxyanions and oxyhalides having different molecular properties on Mg/Al layered double hydroxide nanoparticles. *Journal of Hazardous Materials* 179: 818–827. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.03.077>.
  17. Guo, Q., Zhang, Y., Cao, Y., Wang, Y., & Yan, W. (2013). Boron sorption from aqueous solution by hydrotalcite and its preliminary application in geothermal water deboronation. *Environmental Science and Pollution Research* 20: 8210–8219. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1796-5>.
  18. Halajnia, A., Oustan, S., Najafi, N., Khataee, A.R., & Lakzian, A. (2016). Effects of Mg-Al layered double hydroxide on nitrate leaching and nitrogen uptake by maize in a calcareous soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 47: 1162–1175. <http://doi.org/10.1080/00103624.2016.1165825>.
  19. Hatami, H., Fotovat, A., & Halajnia, A. (2018). Comparison of adsorption and desorption of phosphate on synthesized Zn-Al LDH by two methods in a simulated soil solution. *Applied Clay Science* 152: 333–341. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.032>.
  20. Hatami, H., Fotovat, A., & Halajnia, A. (2020). Adsorption of Boron from a Simulated Soil Solution Using Zn-Al and Mn-Doped Zn-Al Layered Double Hydroxides. *Colloid Journal* 82(6): 735–745. <http://doi.org/10.1134/S1061933X20060058>.
  21. Hatami, H., Fotovat, A., & Halajnia, A. (2021). Availability and Uptake of Phosphorus and Zinc by Maize in the Presence of Phosphate-Containing Zn-Al-LDH in a Calcareous Soil. *Eurasian Soil Science* 54(3): 431–440. <http://doi.org/10.1134/S1064229321030066>.
  22. Inayat, A., Klumpp, M., & Schwieger, W. (2011). The urea method for the direct synthesis of ZnAl layered double hydroxides with nitrate as the interlayer anion. *Applied Clay Science* 51: 452–459. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2011.01.008>.
  23. Jiang, J.-Q., Xu, Y., Quill, K., Simon, J., & Shettle, K. (2007). Laboratory Study of Boron Removal by Mg/Al Double-Layered Hydroxides. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 46: 4577–4583.
  24. Kameda, T., Oba, J., & Yoshioka, T. (2015). New treatment method for boron in aqueous solutions using Mg-Al layered double hydroxide: Kinetics and equilibrium studies. *Journal of Hazardous Materials* 293: 54–63. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.03.015>.
  25. López-Rayó, S., Imran, A., Hansen, H.C.B., Schjoerring, J., & Magid, J. (2017). Layered double hydroxides: potential release-on-demand fertilizers for plant zinc nutrition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 65(40): 8779–8789. <http://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02604>.
  26. Novillo, C., Guaya, D., Allen-Perkins Avenqiudaño, A., Armijos, C., Cortina, J.L., & Cota, I. (2014). Evaluation of phosphate removal capacity of Mg/Al layered double hydroxides from aqueous solutions. *Fuel* 138: 72–79. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.07.010>.
  27. Shafigh, M., Hamidpour, M., & Furrer, G. (2019). Zinc release from Zn-Mg-Fe(III)-LDH intercalated with nitrate, phosphate and carbonate: The effects of low molecular weight organic acids. *Applied Clay Science* 170: 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.01.016>.
  28. Songkhum, P., Wuttikhun, T., Chanlek, N., Khemthong, P., & Laohhasurayotin, K. (2018). Controlled release studies of boron and zinc from layered double hydroxides as the micronutrient hosts for agricultural application. *Applied Clay Science* 152: 311–322. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.028>.
  29. Woo, M.A., Kim, T.W., Paek, M., Ha, H., Choy, J., & Hwang, S. (2011). Phosphate-intercalated Ca-Fe-layered double hydroxides: Crystal structure, bonding character, and release kinetics of phosphate. *Journal of Solid State Chemistry* 184: 171–176. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2010.11.003>.
  30. Zhang, H., & Selim, H.M. (2005). Kinetics of arsenate adsorption-desorption in soils. *Environmental Science & Technology* 39: 6101–6108. <https://doi.org/10.1021/es050334u>.



## Three-year Effects of Conservation Tillage and Cover Crop on Selected Soil Quality Indicators and Corn Yield Components

M. Nael<sup>1\*</sup>, S.S. Salehi<sup>2</sup>, J. Hamzei<sup>3</sup>, M. Zandi Baghche-Maryam<sup>4</sup>

Received: 20-08-2022

Revised: 04-11-2022

Accepted: 27-11-2022

Available Online: 22-02-2023

### How to cite this article:

Nael, M., Salehi, S.S., Hamzei, J., & Zandi Baghche-Maryam, M. (2023). Three-year Effects of Conservation Tillage and Cover Crop on Selected Soil Quality Indicators and Corn Yield Components. *Journal of Water and Soil* 36(6): 773-785. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/jsw.2022.78321.1195](https://doi.org/10.22067/jsw.2022.78321.1195)

### Introduction

Conservation Agriculture (CA), as a sustainable cultivation system, aims at efficient use of natural resources with least environmental impacts, while achieving food security through increasing yield and crop diversification. CA consists of three main principles: 1- reduction or elimination of mechanical soil disturbance; 2- maintaining a permanent cover of crop residues on soil; and 3- diversification of crops. However, the total area under CA in Iran is less than 5% of arable lands. In Hamedan province, CA is mostly implemented in rainfed farming. Therefore, there is a necessity to expand CA in irrigated areas. Nonetheless, a lack of sufficient technical and local knowledge about CA acts as a barrier for its expansion in irrigated lands. Despite the large body of research conducted on CA, there is no detailed information about the combined effects of cover crops and conservation tillage systems on soil functioning and corn productivity in semi-arid regions of Hamedan province. Therefore, our aim was to study three-year effects of conservation tillage practices (no tillage and minimum tillage) and cover crops (hairy vetch and grass pea) on selected soil quality indicators and yield components of corn in a clay loam soil of a semi-arid region in Hamedan.

### Materials and Methods

Combined effects of various tillage practices and cover crops on selected soil quality indicators and corn productivity were examined in a three-year experiment conducted in the research field of Bu-Ali Sina University. A factorial experiment in the basis of randomized complete block design with 3 replications and 2 factors were carried out, in which three levels of tillage practices (no tillage (NT), minimum tillage (MT), and conventional tillage (CT)), and three levels of cover crops (hairy vetch (V), grass pea (L), and no cover crop) were the imposed treatments. Surface soil samples (0-15 cm) were collected two weeks after corn harvesting in the third year of experiment. Total organic carbon (TOC), organic carbon stock (CS), active carbon (AC), carbon management index (CMI), basal respiration (BR), alkaline phosphatase activity (APA), bulk density (BD), mean weight diameter of water-stable aggregates (MWD), and available phosphorous (P) and potassium (K) were determined. Corn yield components (including number of kernel rows per corn, number of grains per corn row, ear cob weight, hundred weight of grains, ear weight, grain weights per ear, biological yield and grain yield) were measured.

### Results and Discussion

The highest TOC (0.96%), CS (18.7 ton/ha), AC (398 mg/kg), CMI (74.8), BR (0.118 mgCO<sub>2</sub>/g.d) and MWD (1.82 mm) were observed in MT treatment. However, no significant difference was detected between MT and CT in terms of AC, CS and CMI. Moreover, the lowest TOC (0.74%) was measured in NT, which showed

1, 2 and 4- Assistant Professor, Master's Degree and Ph.D. Student in Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [m.nael@basu.ac.ir](mailto:m.nael@basu.ac.ir))

3- Associate Professor, Agronomy and Plant Breeding Department, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

no significant difference with CT treatment (0.83%). Reduced destruction of soil structure coupled with the increased MWD, and increased inputs of crop residues through MT, resulted in the protection of organic matter against microbial decomposition. Soil structuring, represented by BD, was improved under conservation tillage treatments (NT and MT).

Among cover crops, hairy vetch treatment demonstrated the highest TOC (1.0%), CS (19.5 ton/ha), AC (427 mg/kg), CMI (80.3) and MWD (1.73 mm). However, these indicators, except CMI, were not significantly different between the two cover crops. On the contrary, these indicators were lowest in the control (no cover crop). Moreover, AC and CMI were not significantly different between grass pea and the control. Carbon stock was increased by 54 and 40% in hairy vetch and grass pea treatments, respectively, relative to the control. In general, cover crop cultivation combined with conservation tillage practices introduced additional biomass to the soil which in turn improved soil organic matter over time and enhanced soil quality.

The lowest amounts of biological yield (1663 g/m<sup>2</sup>), grain yield (507 g/m<sup>2</sup>), hundred weight of grains (11.0 g), ear weight (91.4 g), grain weights per ear (62.9 g), and number of kernel rows per corn (13) were measured in CT system. In contrast, the highest grain yield (637 g/m<sup>2</sup>), hundred grain weight (13.6 g), ear weight (108.4 g), and grain weights per ear (81.9 g) were measured in NT treatment. However, the biological yield showed no significant difference between NT and CT. Soil quality improvement in conservation tillage treatments explains the enhancement of certain yield components. Biological yield and number of grains per row demonstrated significant difference between cover crop treatments; the maximum of biological yield (2103 g/m<sup>2</sup>) and of number of grains per row (44) was measured in hairy vetch treatment. Moreover, the lowest of biological yield (1589 g/m<sup>2</sup>) was observed in the control (no cover crop) treatment.

## Conclusion

All soil quality indicators, except available P, were improved under MT as compared with CT. Our three-year study revealed that among conservation tillage treatments, MT improved majority of soil quality indicators compared to NT. Therefore, minimum tillage practice seems to be more sustainable in this study area. Conservation tillage treatments (MT and NT) also enhanced corn grain yield, grain weights per ear and number of grain rows per ear compared to the CT. Both cover crops improved most soil quality indicators. Moreover, both cover crops induced significant effect on biological yield, although hairy vetch was more effective than grass pea. The integration of minimum tillage with hairy vetch cover crop is considered as a sustainable cropping system for the improvement of soil quality and corn yield in this area.

**Keywords:** Conservation agriculture, Minimum tillage, No tillage, Soil organic carbon

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۱، ص. ۷۷۳-۷۸۵

## پیامد سه‌ساله خاک‌ورزی حفاظتی و گیاه پوششی بر برخی شناسه‌های کیفیت خاک و اجزاء عملکرد ذرت

محسن نائل<sup>\*۱</sup> - سیده صبا صالحی<sup>۲</sup> - جواد حمزه‌ئی<sup>۳</sup> - مرضیه زندی باغچه مریم<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۶

### چکیده

بهره‌گیری از خاک‌ورزی حفاظتی و کاشت گیاهان پوششی در چارچوب کشاورزی حفاظتی نه تنها در بلند مدت به حفظ منابع خاک و آب کمک می‌کند بلکه می‌تواند به پایداری تولید نیز بیانجامد. به منظور مقایسه اثر روش‌های مختلف خاک‌ورزی حفاظتی و گیاهان پوششی بر برخی شناسه‌های کیفیت خاک و اجزاء عملکرد ذرت، یک آزمایش مزرعه‌ای سه‌ساله به صورت طرح فاکتوریل دو عاملی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. نظام خاک‌ورزی در سه سطح (بی‌خاک‌ورزی، کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم) و گیاه پوششی در سه سطح (ماشک گل‌خوشه‌ای، خلر و بدون گیاه پوششی) اجرا شدند. ادوات مورد استفاده در خاک‌ورزی مرسوم شامل گاواهن برگردان‌دار و دیسک، در کم‌خاک‌ورزی شامل گاواهن چیزل، و در بی‌خاک‌ورزی صرفاً از دروگر برای درو کردن گیاه پوششی استفاده شد. نمونه‌برداری از خاک سطحی (۰-۱۵ سانتی متر) در سال سوم آزمایش و پس از برداشت ذرت انجام گرفت. مقدار کربن آلی کل، ذخیره کربن خاک<sup>۵</sup>، کربن فعال<sup>۶</sup>، شاخص مدیریت کربن<sup>۷</sup>، تنفس پایه<sup>۸</sup>، فسفر و پتاسیم فراهم، جرم مخصوص ظاهری، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب و فعالیت آنزیم فسفاتاز قلبایی تعیین شد. به‌جز فسفر فراهم، سایر شناسه‌های کیفیت خاک در نظام کم‌خاک‌ورزی، در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم، بهبود یافت. با این حال، این دو تیمار تفاوت معنی‌داری از نظر کربن فعال، ذخیره کربن و شاخص مدیریت کربن نشان ندادند. به علاوه، کمترین مقادیر کربن آلی کل (۰/۷۴ درصد) در تیمار بی‌خاک‌ورزی دیده شد، که تفاوت معنی‌داری با تیمار خاک‌ورزی مرسوم (۰/۸۳ درصد) نداشت. نظام کم‌خاک‌ورزی با افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار و انباشت بقایای گیاهی، در نگهداشت کربن آلی خاک موثر بود. نظام کم‌خاک‌ورزی در مقایسه با بی‌خاک‌ورزی، باعث بهبود اغلب شناسه‌های کیفیت خاک شد. هر دو گیاه پوششی باعث بهبود اغلب شناسه‌های کیفیت خاک، در مقایسه با شاهد شدند. هرچند گیاه ماشک، در مقایسه با خلر، به طور مؤثرتری باعث بهبود شاخص مدیریت کربن شد. ذخیره کربن در تیمار ماشک و خلر، به ترتیب ۵۴ و ۴۰ درصد بیشتر از تیمار بدون گیاه پوششی بود. در خاک‌ورزی مرسوم، کمترین مقدار عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه، وزن بلال، وزن دانه در بلال و تعداد ردیف دانه در بلال مشاهده شد. در مقابل، بیشترین مقدار عملکرد دانه، وزن صد دانه، وزن بلال و وزن دانه در بلال در تیمار بی‌خاک‌ورزی مشاهده شد. با این حال، تفاوت معنی‌داری بین دو تیمار خاک‌ورزی حفاظتی (بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی) از نظر عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه، وزن بلال و تعداد ردیف دانه در بلال وجود نداشت. از طرف دیگر، تأثیر گیاه پوششی بر عملکرد بیولوژیک و تعداد دانه در ردیف بلال معنی‌دار بود، به طوری که بیشترین مقدار این دو صفت در تیمار ماشک گل‌خوشه‌ای مشاهده

۱، ۲ و ۴- به ترتیب استادیار دانش‌آموخته کارشناس ارشد و دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

\*- نویسنده مسئول: (Email: m.nael@basu.ac.ir)

۳- دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

DOI: 10.22067/jsw.2022.78321.1195

5- Soil (organic) Carbon Stock

6- Active Carbon

7- Carbon Management Index

8- Basal Respiration

شد. در کل، تلفیق کم‌خاک‌ورزی و گیاه پوششی ماشک گل‌خوشه‌ای به عنوان مناسب‌ترین نظام کشت از نظر بهبود شناسه‌های کیفیت خاک و عملکرد ذرت در منطقه مورد مطالعه معرفی می‌گردند.

### واژه های کلیدی: بی‌خاک‌ورزی، کربن آلی خاک، کشاورزی حفاظتی، کم‌خاک‌ورزی

#### مقدمه

کشاورزی حفاظتی به عنوان یکی از انواع نظام‌های کشاورزی پایدار سعی در استفاده بهینه و پایدار از منابع طبیعی، کم کردن اثرات مخرب زیست‌محیطی، و برقراری امنیت غذایی دارد (Pradhan et al., 2018). این نظام از سه طریق به اهداف فوق دست می‌یابد: ۱- کاهش و یا حذف خاک‌ورزی؛ ۲- ایجاد و حفظ یک پوشش دائم از بقایای گیاهی و ۳- ایجاد تنوع گونه‌ای در کشت. بر خلاف نظام کشاورزی مرسوم، کشاورزی حفاظتی با بهبود شرایط فیزیکی، حاصلخیزی و زیست‌شناختی خاک از یک طرف، و کنترل اکولوژیک آفات و بیماری‌ها از طرف دیگر، نه تنها پایداری اکولوژیک نظام‌های کشت را افزایش می‌دهد، بلکه در طولانی مدت پایداری اقتصادی و عملکرد محصول را نیز تضمین می‌کند (Page et al., 2020). با این حال، این نظام کشاورزی در کمتر از ۵ درصد از اراضی کشور در حال اجراست (Latifi et al., 2021). در استان همدان، کشاورزی حفاظتی بیشتر در اراضی دیم اجرا می‌شود، بنابراین ضرورت توسعه آن در اراضی آبی حائز اهمیت است. با این حال، نبود دانش کافی در زمینه جزئیات نحوه اجرای این نظام کشاورزی، مانع توسعه آن در استان شده است.

خاک‌ورزی حفاظتی (شامل بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی) از مؤلفه‌های اصلی کشاورزی حفاظتی است که با کاهش به‌هم‌خوردگی خاک و حفظ بقایای گیاهی، در ابتدا به بهبود شاخص‌های فیزیکی خاک کمک می‌کند. افزایش پایداری خاکدانه‌ها، نفوذپذیری و تخلخل، کاهش تبخیر و حفظ رطوبت خاک، و حفاظت در برابر فرسایش آبی و بادی از جمله اثرات بلند مدت خاک‌ورزی حفاظتی است. به‌علاوه، این نظام خاک‌ورزی بر شاخص‌های شیمیایی و زیست‌شناختی کیفیت خاک مانند کربن آلی، فراهمی عناصر غذایی (N, P, K, Ca, Mg) و ظرفیت تبادل کاتیونی نیز تأثیر مثبت دارد (Sithole et al., 2016). معمولاً در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم (شخم برگردان)، بی‌خاک‌ورزی باعث افزایش مقدار مواد آلی خاک سطحی می‌شود، زیرا با بهبود خاکدانه‌سازی، مواد آلی حفظ شده در داخل خاکدانه‌ها کمتر در معرض تجزیه میکروبی قرار می‌گیرند. محققین مختلف در مطالعه تأثیر روش‌های مختلف خاک‌ورزی حفاظتی بر خاک و گیاه به نتایج گوناگونی دست یافته‌اند. در یک مطالعه دو ساله تأثیر سطوح مختلف بقایای گیاهی و روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی بر عملکرد ذرت علوفه‌ای در یک خاک لوم رسی

در شهرستان گرگان بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که عملکرد علوفه تر در تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی تفاوتی نداشته، ولی در تیمار بی‌خاک‌ورزی به حداقل رسید (Asadi et al., 2016). این کاهش عملکرد، به اثرات منفی بی‌خاک‌ورزی در مطالعات کوتاه مدت، مانند فشردگی خاک و کاهش نفوذ ریشه نسبت داده شد. هم‌چنین، در یک مطالعه ده ساله، روش‌های مختلف خاک‌ورزی در یک خاک رسی و تحت تناوب گندم، سویا-ذرت دانه‌ای با هم مقایسه شد. نتایج نشان دادند شناسه‌های کیفیت خاک در نظام‌های بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی، نسبت به خاک‌ورزی مرسوم بهبود یافته است (Çelik et al., 2021).

کاشت گیاهان پوششی به همراه عملیات خاک‌ورزی حفاظتی نه تنها می‌تواند باعث بهبود کیفیت خاک گردد، بلکه می‌تواند از طریق افزایش تنوع زیستی به کاهش آفات و بیماری‌ها و نهایتاً بهبود عملکرد محصول بیانجامد. با این حال، انتخاب گیاهان پوششی مناسب با توجه به شرایط اقلیمی و خاکی هر منطقه و نیز اهداف مدیریتی صورت می‌گیرد و نیاز به تحقیقات منطقه‌ای دارد. نوری و همکاران (Nouri et al., 2019) اثر طولانی مدت (سی و چهار سال) دو گونه گیاه پوششی، شامل ماشک گل‌خوشه‌ای (*Vicia villosa*) و گندم (*Triticum aestivum* L.)، و بی‌خاک‌ورزی را بر خواص فیزیکی خاک و عملکرد پنبه بررسی کردند. یافته‌ها نشان داد کاشت طولانی مدت گیاهان پوششی می‌تواند مقدار کم بقایای گیاهی در پنبه را جبران کند و کیفیت فیزیکی خاک (پایداری و توزیع اندازه خاکدانه‌ها؛ پیوستگی، جهت‌گیری و توزیع اندازه منافذ؛ و مقاومت فیزیکی) را در نظام بی‌خاک‌ورزی بهبود بخشد. با این حال، تغییر در کیفیت فیزیکی خاک، تولید اقتصادی و پایداری زیست محیطی ممکن است تا سال‌ها پس از شروع مدیریت مشهود نباشد. این امر بیانگر اهمیت مطالعات طولانی مدت برای مشاهده نتیجه واقعی شیوه‌های مدیریت کشاورزی است. به هر روی، اثربخشی نظام بی-خاک‌ورزی وابسته به میزان ورودی بقایا است، به طوری که در نظام‌های کشتی که بقایای کمی وارد خاک می‌کنند این اثربخشی محدود است. ناکافی بودن بقایا ممکن است باعث شود تأثیر مثبت خاک‌ورزی حفاظتی بر کیفیت خاک ناچیز باشد و حتی حساسیت خاک به فشردگی و فرسایش افزایش یابد (Nouri et al., 2019).

پژوهش‌های متعددی در مورد جنبه‌های مختلف کشاورزی حفاظتی در نواحی مختلف اقلیمی ایران صورت گرفته است (Asadi et al., 2016). در استان همدان نیز مطالعات با ارزشی در این زمینه

وزن خشک آن‌ها به‌منظور مقایسه، اندازه‌گیری شد. مقدار توده زنده گیاهی خشک (اندام هوایی) در زمان قطع کردن گیاه پوششی ۶۵۰ و ۶۳۰ گرم بر مترمربع، به ترتیب برای ماشک و خلر بود. سپس کل گیاه پوششی با توجه به نوع تیمار خاک‌ورزی، به شرحی که در زیر می‌آید، به خاک اضافه شد. در تیمار خاک‌ورزی مرسوم، گیاه پوششی توسط گاواهن برگردان‌دار با خاک مخلوط شد. اما در کم‌خاک‌ورزی، گیاه پوششی توسط گاواهن چپزل به‌صورت نیمه مخلوط به خاک اضافه شد. در تیمار بی‌خاک‌ورزی نیز کل گیاهان پوششی پس از درو به طور یکنواخت روی سطح خاک رها شد. در خاک‌ورزی مرسوم بعد از شخم با گاواهن برگردان‌دار، از دیسک برای خرد کردن کلوخه‌ها استفاده شد و نهایتاً فارو زده شد. در دیگر تیمارها عملیات فارو اجرا نشد. ادوات مورد استفاده در خاک‌ورزی مرسوم شامل گاواهن برگردان‌دار و دیسک، در کم‌خاک‌ورزی شامل گاواهن چپزل، و در بی‌خاک‌ورزی صرفاً از دروگر برای درو کردن گیاه پوششی استفاده شد. دو هفته پس از برگرداندن گیاهان پوششی به خاک، کشت ذرت در ردیف‌های با فاصله ۷۵ سانتی‌متر و فاصله روی هر ردیف ۱۸ سانتی‌متر به‌صورت دستی انجام گرفت. هر کرت شامل ۵ ردیف کاشت به طول ۶ متر بود. بعد از برگرداندن ماشک گل‌خوشه‌ای و خلر به خاک، با توجه به نتایج آزمایش خاک، کود پتاسیم و فسفر مصرف نشد. نیاز کودی به نیتروژن در هر یک از تیمارهای دارای گیاه پوششی، پس از کسر میزان نیتروژن افزوده شده به خاک از طریق گیاهان پوششی محاسبه شد و به شکل کود اوره، در سه مرحله (زمان کشت، ۸-۶ برگی و مرحله تاسلینگ) به خاک داده شد. برای این منظور نیاز ذرت به کود اوره معادل ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار در نظر گرفته شد، و در تیمارهای بدون گیاه پوششی این مقدار در سه مرحله به خاک اضافه شد. برای تیمارهای دارای گیاه پوششی، ابتدا میانگین محتوای نیتروژن کل برای دو گیاه پوششی ماشک و خلر از منابع استخراج شد (۴۳/۲ گرم نیتروژن بر کیلوگرم ماده خشک برای هر دو گیاه پوششی) و در مقدار ماده خشک تولید شده از هر گیاه پوششی ضرب شد تا مقدار نیتروژن وارد شده به خاک از طریق گیاه پوششی بدست آید. سپس، باقیمانده نیاز به نیتروژن از منبع کود اوره و در سه مرحله به خاک داده شد. آبیاری به روش بارانی و هر هفته یکبار به میزان ۵۰۰ مترمکعب در هکتار در طول فصل رشد ذرت صورت گرفت.

#### اندازه‌گیری عملکرد و اجزاء عملکرد ذرت

پس از رسیدگی ذرت و با رعایت اثر حاشیه، صفات تعداد ردیف دانه در بلال، تعداد دانه در ردیف، وزن ۱۰۰ دانه، وزن دانه در بلال، وزن بلال و وزن چوب بلال اندازه‌گیری شد. عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک نیز با برداشت بوته‌های موجود در دو متر مربع تعیین شد.

صورت گرفته است (Hamzei Ahmadvand and Hajinia, 2015; and Borbor, 2014). با این حال، در این پژوهش‌ها عمدتاً تأکید بر بررسی پاسخ‌های خاکی یا گیاهی به طور مجزا و مستقل از هم بوده است، و کمتر ابعاد مختلف کیفیت خاک و اجزاء عملکرد به صورت توأم بررسی شده است. به‌علاوه، دانش ما درباره اثر تلفیقی خاک‌ورزی‌های حفاظتی مختلف و گیاهان پوششی مختلف بر کیفیت خاک و اجزاء عملکرد ذرت در شهرستان همدان هم‌چنان ناکافی است. بنابراین، هدف از این پژوهش، بررسی اثر سه ساله خاک‌ورزی حفاظتی (شامل بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی) و گیاه پوششی (شامل ماشک گل‌خوشه‌ای و خلر) بر برخی شناسه‌های کیفیت خاک، عملکرد و اجزاء عملکرد ذرت در یک خاک لومی رسی در منطقه نیمه خشک (دستجرد) همدان بود.

## مواد و روش‌ها

### مشخصات منطقه و طرح آزمایشی

این پژوهش از اسفند سال ۱۳۸۹ شروع و به مدت سه سال پی در پی در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا، واقع در روستای دستجرد در فاصله ۳۷ کیلومتری از شهر همدان اجرا شد. این مزرعه دارای ارتفاع ۱۶۹۱ متر از سطح دریا، و در طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۱ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۱ دقیقه شمالی قرار دارد. خاک مزرعه مورد مطالعه در زمان شروع طرح دارای پی-اچ (واکنش) ۷/۴۵، هدایت الکتریکی ۰/۴۰۹ دسی‌زیمنس بر متر و بافت لوم رسی (نسبت شن، سیلت و رس به ترتیب، ۲۰، ۴۵ و ۳۵ درصد) بود. تمام عملیات زراعی در این سه سال مشابه هم بود. آزمایش به صورت فاکتوریل دو عاملی در قالب طرح بلوک-های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل خاک‌ورزی در سه سطح (بی‌خاک‌ورزی، کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم)، و عامل گیاه پوششی در سه سطح (ماشک گل‌خوشه‌ای، خلر و بدون گیاه پوششی) اجرا شد.

### عملیات زراعی و نمونه‌برداری از گیاه پوششی

از آنجایی که تمام عملیات‌های زراعی در سه سال اجرای آزمایش مشابه هم بود، در اینجا فقط عملیات زراعی سال سوم (از اسفند سال ۱۳۹۱ تا مهر ۱۳۹۲) توضیح داده خواهد شد. در سال سوم اجرای آزمایش و در اوایل اسفندماه ۱۳۹۱ پس از آماده‌سازی زمین، ماشک گل‌خوشه‌ای و خلر به ترتیب به میزان ۴۰ و ۵۰ کیلوگرم در هکتار کشت شد. در اردیبهشت ۱۳۹۲، نمونه‌برداری از گیاهان پوششی خلر و ماشک در مرحله گلدهی و به منظور تعیین مقدار بقایای گیاهی وارد شده در واحد سطح از هر یک از گیاهان پوششی صورت گرفت. بدین منظور از هر واحد آزمایشی بوته‌های موجود در ۳ متر مربع، برداشت و

## نمونه‌برداری خاک و تجزیه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌برداری خاک با سه تکرار و به صورت ترکیبی از عمق ۱۵ سانتی‌متر بالایی خاک پس از برداشت گیاه اصلی در مهرماه ۱۳۹۲ انجام گرفت. در تهیه نمونه‌های خاک ترکیبی، مقدار ثابتی از خاک از پای بوته‌ها و بین ردیف‌ها برداشت و مخلوط شد. بخشی از نمونه‌های خاک پس از هواخشک شدن، کوبیده شد و از الک دو میلی متر عبور داده شد، و ویژگی‌های کربن آلی کل به روش اکسیداسیون تر (Nelson and Sommers, 1996)، کربن فعال به روش تعیین کربن آلی قابل اکسید با محلول ۰/۰۲ مولار پرمنگنات پتاسیم (Weil et al., 2003)، تنفس پایه به روش اندازه‌گیری CO<sub>2</sub> آزاد شده در یک دوره آنکوباسیون ۷ روزه تحت شرایط کنترل شده رطوبتی (حد گنجایش زراعی) و دمایی (۲۷ درجه سلسیوس) (Isermeyer, 1952) و فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی در حضور سوبسترای پارانیتروفنیل فسفات و آنکوباسون در دمای ۳۷ درجه سلسیوس (Tabatabai and Bremner, 1969) اندازه‌گیری شد. بخش دیگری از نمونه‌های خاک پس از هواخشک شدن از الک چهار میلی‌متر عبور داده شد و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب (Cambardella and Elliott, 1994) توسط سری الک‌های ۲ و ۵/۰ و ۰/۰۵۳ تعیین شد. هم‌چنین نمونه‌های دست‌نخورده خاک با سه تکرار و با استفاده از سیلندرهای ظاهری خاک (Blake and Hartge, 1986) اندازه‌گیری شد. به علاوه، مقدار ذخیره کربن با استفاده از حاصل ضرب کربن آلی کل، جرم مخصوص ظاهری و عمق نمونه‌برداری محاسبه شد (Akala and Lal, 2001). هم‌چنین، شاخص مدیریت کربن (CMI) با استفاده از مقدار کربن آلی کل و کربن آلی فعال، و به کمک رابطه ۱ محاسبه شد (Blair et al., 1995).

$$CMI = CPI \times LI \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه CPI<sup>۱</sup> (شاخص ذخیره کربن) و LI<sup>۲</sup> (شاخص پویایی کربن) از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$CPI = \text{نسبت کربن آلی کل در تیمار به کربن آلی کل در تیمار مرجع،}$$

LI = نسبت پویایی کربن در تیمار به پویایی کربن در تیمار مرجع، که میزان پویایی کربن از تقسیم مقدار کربن پویا (کربن فعال) بر مقدار کربن پایدار (تفاضل کربن کل و کربن فعال) به دست آمد. تیمار مرجع تیماری است که بیشترین مقدار کربن آلی کل و کربن فعال (در این مطالعه، تیمار کم‌خاک‌ورزی و ماشک) در آن اندازه‌گیری شده است.

## تجزیه و تحلیل داده‌ها

به منظور تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها، ابتدا نرمال بودن آن‌ها با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، ناهمبسته بودن مانده‌ها با استفاده از آزمون دوربین-واتسون، همگنی واریانس مانده‌ها با آزمون لون، در محیط نرم‌افزار R، بررسی شد. در نهایت برای مقایسه میانگین از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد.

## نتایج و بحث

## شناسه‌های کیفیت خاک

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) نشان داد که اثر متقابل دو عامل خاک‌ورزی و گیاه پوششی تنها بر فعالیت آنزیم فسفاتاز معنی‌دار بود. به علاوه، اثر اصلی خاک‌ورزی بر کربن آلی کل، ذخیره کربن، کربن فعال، شاخص مدیریت کربن، تنفس پایه، جرم مخصوص ظاهری، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و مقدار پتاسیم معنی‌دار بود. هم‌چنین اثر اصلی گیاه پوششی بر کربن آلی کل، ذخیره کربن، کربن فعال، شاخص مدیریت کربن، تنفس پایه و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها معنی‌دار بود. قابل ذکر است که هیچ یک از عوامل آزمایشی تأثیر معنی‌داری بر مقدار فسفر نداشتند (جدول ۱).

## شناسه‌ی کربن آلی کل، ذخیره کربن، کربن فعال، تنفس پایه، جرم مخصوص ظاهری، MWD و شاخص مدیریت کربن

نتایج مقایسات میانگین (جدول ۲) نشان داد که در بین تیمارهای خاک‌ورزی، تیمار کم‌خاک‌ورزی (MT) دارای بیشترین مقادیر کربن آلی کل (۰/۹۶ درصد)، ذخیره کربن (۱۸/۶۷ تن بر هکتار)، کربن فعال (۳۹۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، شاخص مدیریت کربن (۷۴/۸)، تنفس پایه (۰/۱۱۸ میلی‌گرم CO<sub>2</sub> بر گرم خاک در روز) و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار (MWD) (۱/۸۲ میلی‌متر) بود. با این حال، دو تیمار MT و خاک‌ورزی مرسوم (CT) تفاوت معنی‌داری از نظر کربن فعال، ذخیره کربن و شاخص مدیریت کربن نشان ندادند. به علاوه، کمترین مقادیر کربن آلی کل (۰/۷۴ درصد) در تیمار بی‌خاک‌ورزی (NT) دیده شد، که تفاوت معنی‌داری با تیمار CT (۰/۸۳ درصد) نداشت. هم‌چنین، تیمار NT دارای کمترین ذخیره کربن (۱۴/۴ تن بر هکتار) نسبت به دیگر تیمارهای خاک‌ورزی بود. این نتایج بیانگر آن است که پیامد سه ساله خاک‌ورزی حفاظتی در منطقه مطالعاتی تنها در تیمار کم‌خاک‌ورزی باعث بهبود چشمگیر شناسه‌های کیفیت خاک مورد بحث شده است، و به طور کلی اثر تیمار بی-خاک‌ورزی تا حد زیادی مشابه تیمار خاک‌ورزی مرسوم بوده است.

1- Carbon Pool Index

2- Lability Index

این تیمار نیز باشد. به علاوه، کاهش خاک‌ورزی باعث حفاظت بیشتر خاکدانه‌ها و افزایش قطر خاکدانه‌های پایدار (MWD) شده است. این خاکدانه‌های پایدار محل‌های مناسبی برای نگهداشت مواد آلی و حفاظت آن‌ها در برابر تجزیه میکروبی هستند. به طور مشابه، مطالعات سوکولوفسکی و همکاران (Sokolowski et al., 2020) نشان دادند که بی‌خاک‌ورزی برای جبران از دست رفتن کربن آلی خاک ناشی از کشت مداوم کافی نیست. با این حال، آن‌ها گزارش دادند که نظام‌های بی‌خاک‌ورزی قادر به کاهش اثرات منفی کشاورزی بر خصوصیات خاک هستند. از سوی دیگر، هیل و همکاران (Hiel et al., 2018) بیان کردند که برگرداندن بقایا و استفاده از گیاهان پوششی به همراه کم‌خاک‌ورزی موجب بهبود میزان ماده آلی خاک و بهبود حاصلخیزی خاک می‌شود. به طور کلی، عملیات خاک‌ورزی مرسوم، به دلیل به هم ریختن خاک و تأثیر بر مقدار ماده آلی و توزیع آن در نیمرخ خاک می‌تواند بر کاهش پایداری خاکدانه‌ها و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها مؤثر باشد.

لازم به ذکر است، در تیمار بی‌خاک‌ورزی، تمام اندام‌های هوایی حاصل از گیاه اصلی و گیاه پوششی، بدون اینکه با خاک مخلوط شوند، در سطح خاک رها شدند. حال آنکه، این بقایا در صورتی می‌توانند به افزایش ذخایر کربن آلی خاک کمک کنند که با خاک مخلوط شده و تحت تأثیر فعالیت‌های ریزجانداران خاک تجزیه شوند. باید در نظر داشت که اقلیم نیمه‌خشک منطقه نیز در کاهش سرعت بقایای گیاهی در تیمار بی‌خاک‌ورزی نقش مؤثری دارد. در مقابل، مخلوط شدن و تجزیه بقایای سطحی و زیرسطحی با خاک در تیمار کم‌خاک‌ورزی بیشتر از سایر تیمارها است. از طرف دیگر، میانگین وزن خشک بقایای ذرت (پس از برداشت دانه) در دو سال اول اجرای طرح برابر ۷۰۰ گرم در مترمربع برای تیمار بی‌خاک‌ورزی، و ۸۰۰ گرم بر متر مربع برای دو تیمار کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم اندازه‌گیری شد (نتایج در جداول نیامده است). از این رو، به نظر می‌رسد علت کمتر بودن کربن آلی در تیمار بی‌خاک‌ورزی، علاوه بر عدم اختلاط بقایا با خاک، تا حدی مربوط به مقدار کمتر بقایای ذرت در

جدول ۱- تجزیه واریانس شناسه‌های کیفیت خاک تحت تأثیر تیمارهای خاک‌ورزی و گیاه پوششی

Table 1- Analysis of variance of soil quality indicators affected by tillage and cover crop treatments

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	کربن آلی کل Total organic carbon	کربن Active carbon	شاخص مدیریت کربن Carbon management index	ذخیره کربن Soil carbon Stock	تنفس پایه Basal respiration	جرم مخصوص Bulk density	میانگین وزنی قطر خاکدانه Mean weight diameter	فسفر P	پتاسیم K	فعالیت آنزیم فسفاتاز Phosphatase activity
تکرار Replication	2	0.133***	9710.7 <sup>ns</sup>	329.5 <sup>ns</sup>	64.4***	0.0096***	0.019***	0.050 <sup>ns</sup>	0.687 <sup>ns</sup>	918.5 <sup>ns</sup>	51240 <sup>ns</sup>
خاک‌ورزی Tillage (T)	2	0.106**	16485.7*	597.9*	41.1**	0.0009**	0.007**	0.341**	0.411 <sup>ns</sup>	14203.3*	1604363***
گیاه پوششی Cover crop (C)	2	0.310***	28689.3**	963.1**	112.6***	0.0023***	0.001 <sup>ns</sup>	0.065*	1.435 <sup>ns</sup>	623.2 <sup>ns</sup>	472096 <sup>ns</sup>
خاک‌ورزی × گیاه پوششی T × C	4	0.008 <sup>ns</sup>	1218.5 <sup>ns</sup>	49.4 <sup>ns</sup>	5.1 <sup>ns</sup>	0.0001 <sup>ns</sup>	0.001 <sup>ns</sup>	0.042 <sup>ns</sup>	7.177 <sup>ns</sup>	2689.8 <sup>ns</sup>	376378*
خطا Error	16	0.012	2881.1	106.7	4.3	0.0001	0.001	0.014	2.702	2404.2	100162
ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)	-	12.8	14.5	14.8	12.5	10.2	2.4	7.11	21.1	12.6	11.0

ns, \*, \*\*, and \*\*\* represent non-significant and significant differences at the probability levels of 0.05, 0.01, and 0.001, respectively.

ns, \*, \*\*, and \*\*\* represent non-significant and significant differences at the probability levels of 0.05, 0.01, and 0.001, respectively.

همکاران (Sokolowski et al., 2020) حاکی از این بود که در نظام بی‌خاک‌ورزی در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم، جرم مخصوص ظاهری، رطوبت ثقلی و پایداری خاکدانه‌ها بالاتر بود، اما میزان رطوبت اشباع و تخلخل کل کاهش یافت. عدم تأثیر گیاه پوششی بر جرم مخصوص ظاهری در مطالعه حاضر با نتایج برخی مطالعات همخوانی نداشت (Ghaffari et al., Ahmadnia et al., 2020). احمدنیا و همکاران (Ahmadnia et al., 2020) در مطالعه یک‌ساله خود بر روی یک خاک لومی نشان دادند که گیاهان پوششی خلر، ماشک گل خوشه‌ای و چاودار به طور معنی‌داری باعث بهبود (کاهش) وزن مخصوص ظاهری خاک شدند. به نظر می‌رسد عوامل

از طرفی، نتایج جرم مخصوص ظاهری نشان می‌دهد که ساختمان خاک تا حد قابل توجهی در تیمارهای خاک‌ورزی حفاظتی (بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی)، در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم، بهبود یافته است (به ترتیب، ۱/۲۹ و ۱/۳۰ در مقابل ۱/۳۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب). با این حال، تیمار گیاه پوششی تأثیر معنی‌داری بر این شناسه نداشت (جدول ۲). حمزه‌ئی و بوربور (Hamzei and Borbor, 2014) کاهش ۱۹ درصدی جرم مخصوص ظاهری خاک را در تیمار کم‌خاک‌ورزی نسبت به تیمار بی‌خاک‌ورزی گزارش کردند، با این حال آن‌ها بین تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم و بی‌خاک‌ورزی تفاوت معنی‌داری مشاهده نکردند. در حالی که نتایج سوکولوفسکی و

نتایج، تأثیر مثبت کشت هر دو گیاه پوششی را بر شناسه‌های کربن آلی کل، ذخیره کربن و MWD، در یک دوره سه ساله نشان می‌دهد. مقدار توده زنده گیاهی (اندام هوایی) در زمان قطع کردن دو گیاه پوششی تفاوت معنی‌داری نشان نداد (۶۵۰ و ۶۳۰ گرم بر مترمربع، به ترتیب برای ماشک و خلر) (نتایج در جداول نیامده است). از این رو، مقدار مواد آلی ورودی به خاک، از طریق گیاهان پوششی مورد مطالعه، یکسان است. در کل، حضور گیاه پوششی، به ویژه ماشک، موجب افزایش محتوای کربن آلی و به تبع آن کربن فعال خاک شده است. به طور کلی، کشت گیاه پوششی و بازگرداندن بقایا به خاک نه تنها می‌تواند به حفظ و بهبود حاصلخیزی خاک کمک کند، بلکه میزان ماده آلی خاک را به ویژه در طولانی مدت افزایش می‌دهد (Merante et al., 2017). به علاوه، پژوهش‌ها نشان می‌دهند که نگهداشت کربن آلی در خاک به نوع بقایای اضافه شده و میزان تجزیه‌پذیری آنها نیز وابسته است. با این حال در مطالعه سه ساله حاضر، بین دو گیاه پوششی ماشک و خلر تفاوت معنی‌داری از نظر شناسه‌های کیفیت خاک مورد بررسی دیده نشد.

مختلفی، از جمله بافت نسبتاً سنگین خاک در مطالعه حاضر (لوم رسی) مانع از آن شده باشد که این ویژگی به طور چشمگیری بهبود یابد.

نتایج مقایسات میانگین (جدول ۲) نشان داد که در بین تیمارهای گیاه پوششی، تیمار ماشک دارای بیشترین مقادیر کربن آلی کل (۱/۰ درصد)، ذخیره کربن (۱۹/۴۸ تن بر هکتار)، کربن فعال (۴۲۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، شاخص مدیریت کربن (۸۰/۳) و MWD (۱/۷۳ میلی‌متر) بود. با این حال، بین دو تیمار ماشک و خلر تفاوت معنی‌داری از نظر شناسه‌های فوق، به جز شاخص مدیریت کربن، دیده نشد. مقدار ذخیره کربن در تیمار ماشک و خلر، به ترتیب ۵۴ و ۴۰ درصد بیشتر از تیمار بدون گیاه پوششی بود. به علاوه، مقدار تنفس پایه در هر دو تیمار گیاه پوششی مشابه و به طور معنی‌داری بیشتر از شاهد (بدون گیاه پوششی) بود. در مقابل، کمترین مقادیر شناسه‌های فوق در تیمار بدون گیاه پوششی دیده شد. با این حال، این تیمار (بدون گیاه پوششی) از نظر آماری تفاوت معنی‌داری به لحاظ مقدار کربن فعال و شاخص مدیریت کربن با تیمار خلر نداشت (به ترتیب، ۳۱۴ در مقابل ۳۶۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ۵۹/۷ در مقابل ۶۸/۹). این

جدول ۲- میانگین ( $\pm$  خطای استاندارد) شناسه‌های کیفیت خاک تحت تأثیر اثرات اصلی گیاه پوششی و خاک‌ورزی

Table 2- Mean ( $\pm$  standard error) of selected soil quality indicators affected by main factors of cover crops and tillage

ویژگی (Property)	تیمار خاک‌ورزی (Tillage treatment)			تیمار گیاه پوششی (Cover crop treatment)			حداقل تفاوت معنی‌دار Least significant difference
	CT	MT	NT	N	V	L	
کربن آلی کل Total organic carbon (%)	0.83 b ( $\pm 0.12$ )	0.96 a ( $\pm 0.12$ )	0.74 b ( $\pm 0.11$ )	0.64 B ( $\pm 0.1$ )	1.00 A ( $\pm 0.08$ )	0.89 A ( $\pm 0.09$ )	0.107
کربن فعال Active carbon (mg/kg)	389.4 a ( $\pm 23.2$ )	397.8 a ( $\pm 51.1$ )	319.8 b ( $\pm 15.4$ )	313.8 B ( $\pm 46.0$ )	426.7 A ( $\pm 34.4$ )	366.4 AB ( $\pm 34.3$ )	53.63
شاخص مدیریت کربن Carbon management index	73.9 a ( $\pm 4.2$ )	74.8 a ( $\pm 9.7$ )	60.3 b ( $\pm 34.8$ )	59.7 B ( $\pm 8$ )	80.3 A ( $\pm 6.6$ )	68.9 B ( $\pm 7.1$ )	10.32
ذخیره کربن Carbon stock (Mg/ha)	16.69 a ( $\pm 2.49$ )	18.67 a ( $\pm 2.59$ )	14.40 b ( $\pm 2.35$ )	12.64 B ( $\pm 2.20$ )	19.48 A ( $\pm 1.79$ )	17.63 A ( $\pm 2.10$ )	2.077
تنفس پایه Basal respiration (mg CO <sub>2</sub> /g.d)	0.098 b ( $\pm 0.008$ )	0.118 a ( $\pm 0.006$ )	0.103 b ( $\pm 0.009$ )	0.088 B ( $\pm 0.009$ )	0.115 A ( $\pm 0.006$ )	0.115 A ( $\pm 0.005$ )	0.0108
جرم مخصوص ظاهری Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	1.34 a ( $\pm 0.02$ )	1.30 b ( $\pm 0.03$ )	1.29 b ( $\pm 0.02$ )	1.32 A ( $\pm 0.02$ )	1.30 A ( $\pm 0.02$ )	1.31 A ( $\pm 0.04$ )	0.030
میانگین وزنی قطر خاکدانه Mean weight diameter (mm)	1.42 b ( $\pm 0.17$ )	1.82 a ( $\pm 0.21$ )	1.59 b ( $\pm 0.16$ )	1.56 B ( $\pm 0.10$ )	1.73 A ( $\pm 0.19$ )	1.69 A ( $\pm 0.13$ )	0.211
فسفر P (mg/kg)	7.92 a ( $\pm 0.99$ )	7.88 a ( $\pm 1.21$ )	7.53 a ( $\pm 0.85$ )	7.69 A ( $\pm 1.34$ )	8.21 A ( $\pm 0.77$ )	7.43 A ( $\pm 0.83$ )	1.642
پتاسیم K (mg/kg)	349.4 b ( $\pm 48.9$ )	385.8 ab ( $\pm 43.5$ )	428.8 a ( $\pm 47.6$ )	386.9 A ( $\pm 50.4$ )	396.8 A ( $\pm 49.4$ )	380.3 A ( $\pm 70.5$ )	49.02

میانگین‌هایی که حداقل در یک حرف مشترک هستند، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر پایه آزمون LSD می‌باشند. CT: خاک‌ورزی مرسوم، MT: خاک‌ورزی حداقل، NT: بدون خاک‌ورزی، L: خلر، V: ماشک گل‌خوشه‌ای، N: بدون گیاه پوششی.

Means with at least one similar letter are not significantly ( $P < 0.05$ ) different based on LSD test. CT: Conventional Tillage, MT: Minimum Tillage, NT: No Tillage, L: *Lathyrus sativus*, V: *Vicia villosa*, N: No cover crop.

### فسفر، پتاسیم و فعالیت آنزیم فسفاتاز

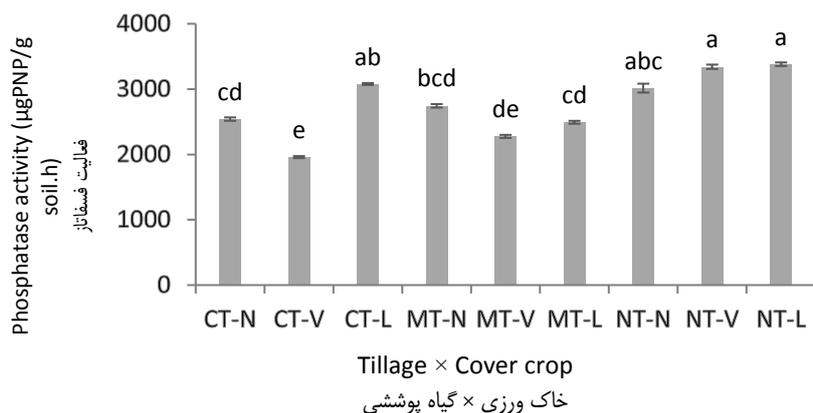
محتوای فسفر اولسن تحت تأثیر هیچ یک از عوامل آزمایشی قرار نداشت (جدول ۱). در این زمینه، نتایج بدست آمده از دیگر مطالعات بسیار گوناگون است. در برخی مطالعات، مقدار فسفر فراهم در خاک سطحی (۰ تا ۵ سانتی‌متر) نظام‌های بی‌خاک‌ورزی بیشتر از خاک ورزی مرسوم گزارش شده است (Verhulst Sithole et al., 2016)؛ (et al., 2010). در مقابل، سوکولوفسکی و همکاران (Sokolowski et al., 2020) گزارش کردند که نظام‌های خاک‌ورزی، فسفر، هدایت هیدرولیکی و نیتروژن کل را تحت تأثیر قرار نداده است. هم‌چنین افضلی گروه و همکاران (Afzali Gorouh et al., 2019) در مطالعه سه ساله خود در شهرستان ارزوئیه کرمان نشان دادند که مقدار فسفر در دو تیمار بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی (با چیزل) تفاوت معنی‌داری نداشت. این محققین، هم‌چنین تفاوت معنی‌داری در مقدار فسفر تیمارهایی که ۷۵ و ۱۰۰ درصد بقایای گیاهی داشتند مشاهده نکردند. در مقابل، بیشترین مقدار فسفر در تیماری که بقایای گیاهی کاملاً سوزانده شده بود، دیده شد. به نظر می‌رسد علیرغم تأثیر مثبتی که هر دو عامل مورد آزمون در این مطالعه (خاک‌ورزی و گیاه پوششی) بر افزایش مواد آلی خاک داشته‌اند، روند معدنی شدن فسفر آلی در مدت زمان اجرای مطالعه (سه سال) نتوانسته است محتوای فسفر را نسبت به شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش دهد. محتوای پتاسیم فراهم (محلول و تبدلی) تنها تحت تأثیر عامل خاک‌ورزی قرار داشت، به طوری که بیشترین مقدار آن در بی‌خاک‌ورزی (۴۲۸/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد. محتوای پتاسیم در تیمار کم‌خاک‌ورزی (۳۸۵/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) تفاوت معنی‌داری با تیمار بی‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم (۳۴۹/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) نداشت (جدول ۲). مطالعات نشان می‌دهند که غلظت پتاسیم فراهم در خاک سطحی نظام‌های خاک‌ورزی حفاظتی که بقایای غلات در آنها حفظ می‌گردد بیشتر از خاک‌هایی است که تحت خاک‌ورزی مرسوم بوده و بقایای گیاهی به آنها اضافه نمی‌شود (Palm et al., 2014).

بیشترین میزان فعالیت آنزیم فسفاتاز در نظام بی‌خاک‌ورزی در ترکیب با خلر (NT-L) (۳۳۸۱ میکروگرم پارانیتروفنل بر گرم خاک در ساعت) دیده شد. با این حال، این مقدار تفاوت معنی‌داری با فعالیت آنزیمی در تیمارهای NT-V، NT-N و CT-L نداشت. در مقابل، کمترین فعالیت آنزیمی در تیمار خاک‌ورزی مرسوم در ترکیب با ماشک گل‌خوشه‌ای (CT-V) (۱۹۵۹ میکروگرم بر گرم در ساعت) بود. نتایج نشان داد، هر چند اضافه کردن گیاه پوششی به نظام بی‌خاک‌ورزی باعث افزایش فعالیت آنزیم فسفاتاز شده است، ولی این افزایش در دوره سه ساله اجرای طرح معنی‌دار نبوده است. در نظام

کم‌خاک‌ورزی نیز اضافه کردن گیاهان پوششی تفاوت معنی‌داری در فعالیت آنزیمی ایجاد نکرد (شکل ۱). این در حالی است که فعالیت زودهنگام تغییرات کیفیت خاک در نظر گرفته شده است (Adetunji et al., 2021). آنزیم فسفاتاز از جمله آنزیم‌های برون سلولی است که علاوه بر ریزجانداران از ریشه گیاهان نیز ترشح می‌شود. از این رو افزایش توده زنده گیاهی از طریق کاشت گیاهان پوششی نه تنها می‌تواند تولید این آنزیم را افزایش دهد، بلکه می‌تواند با افزایش جمعیت و تغییر ترکیب ریز جانداران خاک فعالیت این آنزیم را در خاک افزایش دهد. با توجه به اینکه افزایش فعالیت آنزیم فسفاتاز، باعث تحریک معدنی شدن فسفر آلی شده و نهایتاً به افزایش فسفر فراهم در خاک می‌انجامد، با این حال نتایج فسفر اولسن تفاوت معنی‌داری را در بین تیمارهای مورد مطالعه نشان نداد. بین جی و همکاران (Yin-jie et al., 2022) در یک مطالعه ده ساله نشان دادند که خاک‌های تحت تیمار اصلاح‌کننده‌های آلی در مقایسه با تیمارهای کودهای شیمیایی دارای مقادیر کمتری از فسفر کل و فسفر معدنی هستند، حال آنکه مقدار فسفر فراهم، فسفر آلی و فعالیت آنزیم فسفاتاز در این تیمارها افزایش یافته است. به نظر می‌رسد مطالعه بخش بندی فسفر در مطالعات بعدی بتواند رابطه بین اشکال مختلف فسفر و آنزیم فسفاتاز را در نظام‌های کشت مختلف (حفاظتی و مرسوم) روشن‌تر نماید.

### عملکرد و اجزاء عملکرد ذرت

اثر متقابل عوامل آزمایشی (نظام‌های خاک‌ورزی و گیاه پوششی) بر هیچ یک از صفات عملکرد ذرت و اجزاء آن تأثیر معنی‌داری نداشت. هم‌چنین، وزن چوب بلال تحت تأثیر هیچ یک از عوامل آزمایشی قرار نگرفت. در مقابل، سایر صفات تحت تأثیر حداقل یکی از عوامل اصلی قرار گرفتند. به طوری که اثر تیمارهای خاک‌ورزی بر عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه، وزن صد دانه، وزن دانه در بلال، تعداد ردیف دانه در بلال و وزن بلال معنی‌دار بود (جدول ۳). به‌طور کلی، کمترین مقدار عملکرد بیولوژیک (۱۶۶۳ گرم بر متر مربع)، عملکرد دانه (۵۰۷ گرم بر متر مربع)، وزن صد دانه (۱۱/۰ گرم)، وزن بلال (۹۱/۸ گرم)، وزن دانه در بلال (۶۲/۹ گرم) و تعداد ردیف دانه در بلال (۱۳/۰) در تیمار خاک‌ورزی مرسوم مشاهده شد. با این حال، از نظر وزن بلال و وزن صد دانه، تفاوت معنی‌داری بین تیمار خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی وجود نداشت. هم‌چنین، عملکرد بیولوژیک در خاک‌ورزی مرسوم و بی‌خاک‌ورزی تفاوت معنی‌داری نشان نداد (۱۶۶۳ در مقابل ۱۸۲۵ گرم بر متر مربع).



شکل ۱- مقایسه میانگین فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی تحت تاثیر اثر متقابل دو عامل خاک‌ورزی و گیاه پوششی

CT: خاک‌ورزی مرسوم، MT: خاک‌ورزی حداقل، NT: بدون خاک‌ورزی، L: خلر، V: ماشک گل‌خوشه‌ای، N: بدون گیاه پوششی (آزمون LSD،  $\alpha=0.05$ ).

**Figure 1. Mean comparison of phosphatase activity influenced by interaction effects of tillage and cover crop**  
CT: Conventional Tillage, MT: Minimum Tillage, NT: No Tillage, L: *Lathyrus sativus*, V: *Vicia villosa*, N: No cover crop.

مالچ از بقایای گیاهی، به نگهداشت رطوبت در خاک و جذب آن توسط گیاه کمک کرده باشد. این در حالی است که در یک مطالعه کوتاه مدت یک‌ساله، عملکرد دانه گندم در تیمار خاک‌ورزی مرسوم و حفظ ۶۰ درصد بقایای گیاهی، نسبت به تیمارهای خاک‌ورزی حفاظتی افزایش یافت (Komeili et al., 2016). این محققین، نگهداشت بیشتر رطوبت خاک و جذب بیشتر رطوبت در مرحله پر شدن دانه را علت بهبود عملکرد در این تیمار دانستند.

در مقابل، بیشترین مقدار عملکرد دانه (۶۳۷ گرم بر متر مربع)، وزن صد دانه (۱۳/۶ گرم)، وزن بلال (۱۰۸/۴ گرم) و وزن دانه در بلال (۸۱/۹ گرم) در تیمار بی‌خاک‌ورزی مشاهده شد. با این حال، تفاوت معنی‌داری بین دو تیمار خاک‌ورزی حفاظتی (بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی) از نظر عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه، وزن بلال و تعداد ردیف دانه در بلال وجود نداشت (جدول ۴). به نظر می‌رسد در مطالعه سه‌ساله حاضر، تیمار بی‌خاک‌ورزی به دلیل ایجاد مؤثر یک

جدول ۳- تجزیه واریانس عملکرد و اجزاء عملکرد ذرت تحت تأثیر تیمارهای خاک‌ورزی و گیاه پوششی

**Table 3- Analysis of variance of yield and yield components of corn affected by tillage and cover crop treatments**

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	عملکرد بیولوژیک Biological yield	عملکرد دانه Grain yield	وزن بلال Ear weight	وزن دانه در		تعداد ردیف دانه در		وزن چوب بلال Ear cob weight
					بلال Grain weights per ear	وزن صد دانه Hundred grain weight	بلال Number of grain rows per ear	تعداد دانه در ردیف Number of grains per row	
تکرار Replication	2	307289 <sup>ns</sup>	33997 <sup>**</sup>	644.5 <sup>*</sup>	740.5 <sup>***</sup>	3.62 <sup>ns</sup>	12.04 <sup>*</sup>	11.111 <sup>ns</sup>	3.34 <sup>ns</sup>
خاک‌ورزی Tillage (T)	2	622460 <sup>*</sup>	39087 <sup>***</sup>	620.2 <sup>*</sup>	811.7 <sup>***</sup>	16.40 <sup>***</sup>	31.59 <sup>***</sup>	16.333 <sup>ns</sup>	30.16 <sup>ns</sup>
گیاه پوششی Cover crop (C)	2	641654 <sup>*</sup>	5965 <sup>ns</sup>	149.5 <sup>ns</sup>	75.6 <sup>ns</sup>	2.00 <sup>ns</sup>	4.04 <sup>ns</sup>	25.333 <sup>*</sup>	12.51 <sup>ns</sup>
خاک‌ورزی × گیاه پوششی T × C	4	144366 <sup>ns</sup>	2734 <sup>ns</sup>	86.4 <sup>ns</sup>	51.0 <sup>ns</sup>	1.65 <sup>ns</sup>	0.93 <sup>ns</sup>	3.833 <sup>ns</sup>	15.76 <sup>ns</sup>
خطا Error	16	150857	3552	114.1	59.8	1.35	1.99	5.736	20.46
ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)	-	20.6	10.3	10.7	10.6	9.6	9.1	5.6	16.8

ns, \*, \*\*, and \*\*\* represent non-significant and significant differences at the probability levels of 0.05, 0.01, and 0.001, respectively.

ns, \*, \*\*, and \*\*\* represent non-significant and significant differences at the probability levels of 0.05, 0.01, and 0.001, respectively.

داری نسبت به شاهد (بدون گیاه پوششی) داشت. هم چنین یگانه پور و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعه‌ای یک‌ساله نشان دادند که کاشت همزمان گیاهان پوششی، به ویژه شبدر، همراه با ذرت، به دلیل رقابت با رشد علف‌های هرز باعث افزایش معنی‌دار عملکرد ذرت نسبت به شاهد شد (Yeganehpour et al., 2015). دمیر و ایسیک (Demir and Işık, 2019) طی بررسی تأثیر گیاهان پوششی بر برخی از پارامترهای کیفیت خاک و عملکرد گیاه به این نتیجه رسیدند که گیاهان پوششی می‌تواند استفاده از ورودی‌های خارجی مانند کود را کاهش دهند و باعث بهبود و حفظ حاصلخیزی خاک شوند؛ به طوری که گیاهان پوششی از طریق بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک، منجر به افزایش عملکرد گیاهان زراعی خواهند شد. در واقع، کمبود بقایای گیاهی باعث می‌شود خاک کمتر به خاک‌ورزی حفاظتی پاسخ دهد و حساسیت خاک به فشردگی و فرسایش را افزایش می‌دهد (Nouri et al., 2019) که در نهایت ممکن است منجر به کاهش عملکرد شود. کنگرس و همکاران (Congreves et al., 2017) بیان کردند که استفاده از خاک‌ورزی حفاظتی و گیاهان پوششی موجب افزایش کیفیت خاک می‌شود. آنها همچنین اشاره کردند که رابطه مستقیمی بین بهره‌وری محصولات زراعی و کیفیت خاک در محصولات دانه‌ای وجود دارد.

از این رو، به نظر می‌رسد اجرای خاک‌ورزی حفاظتی بدون حفظ بقایای گیاهی نتواند تأثیر مثبتی بر عملکرد داشته باشد. در مجموع، نتایج مطالعات نشان می‌دهد که نظام بی‌خاک‌ورزی چنانچه همراه با روش‌های حفاظتی دیگر نظیر مدیریت بقایای گیاهی باشد، باعث افزایش و پایداری عملکرد می‌شود (Zhao et al., 2017).  
تأثیر گیاه پوششی بر صفات عملکرد بیولوژیک و تعداد دانه در ردیف معنی‌دار شد (جدول ۳). به طوری که بیشترین عملکرد بیولوژیک (۲۱۰۳ گرم بر متر مربع) و تعداد دانه در ردیف (۴۴) در تیمار ماشک مشاهده شد. به علاوه، کمترین مقدار عملکرد بیولوژیک (۱۵۸۹ گرم بر متر مربع) در تیمار بدون گیاه پوششی اندازه‌گیری شد. تیمار خلر از نظر عملکرد بیولوژیک حد واسط (۱۹۷۳ گرم بر متر مربع) دو تیمار دیگر بود ولی به لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با آنها نشان نداد (جدول ۴). حمزه‌ئی و بوربو (Hamzei and Borbor, 2014) در یک مطالعه یک‌ساله اثر روش‌های مختلف شخم و گیاه پوششی را بر عملکرد ذرت و برخی خصوصیات خاک بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که از بین صفات مختلف ذرت (تعداد ردیف دانه در بلال، وزن صد دانه، شاخص برداشت، تعداد دانه در ردیف، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک)، تعداد دانه در ردیف، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک تحت تأثیر گیاهان پوششی (ماشک و خلر) افزایش معنی

جدول ۴- میانگین ( $\pm$  خطای استاندارد) عملکرد و اجزاء عملکرد ذرت تحت تأثیر اثرات اصلی گیاه پوششی و خاک‌ورزی  
Table 4- Mean ( $\pm$  standard error) of yield and yield components of corn affected by main factors cover of crop and tillage

ویژگی (Property)	تیمار خاک‌ورزی (Tillage treatment)			تیمار گیاه پوششی (Cover crop)			حداقل تفاوت معنی‌دار Least Significant Difference
	CT	MT	NT	N	V	L	
عملکرد بیولوژیک Biological yield (g/m <sup>2</sup> )	1663.2 b ( $\pm$ 389.6)	2177.4 a ( $\pm$ 442.7)	1824.8 ab ( $\pm$ 513.2)	1589.4 B ( $\pm$ 448.6)	2103.1 A ( $\pm$ 289.4)	1972.9 AB ( $\pm$ 566.9)	388.14
عملکرد دانه Grain yield (g/m <sup>2</sup> )	506.6 b ( $\pm$ 73.7)	587.9 a ( $\pm$ 88.7)	637.1 a ( $\pm$ 72.0)	593.7 A ( $\pm$ 74.2)	590.3 A ( $\pm$ 108.7)	547.5 A ( $\pm$ 97.1)	59.55
وزن بلال Ear weight (g)	91.84 b ( $\pm$ 11.65)	98.83 ab ( $\pm$ 11.63)	108.38 a ( $\pm$ 14.10)	101.67 A ( $\pm$ 10.11)	102.38 A ( $\pm$ 12.92)	94.99 A ( $\pm$ 17.85)	10.674
وزن دانه در بلال Grain weights per ear (g)	62.90 c ( $\pm$ 9.76)	73.49 b ( $\pm$ 11.08)	81.85 a ( $\pm$ 11.45)	74.21 A ( $\pm$ 9.27)	74.62 A ( $\pm$ 14.59)	69.41 A ( $\pm$ 15.30)	7.727
وزن صد دانه Hundred grain weight (g)	10.99 b ( $\pm$ 1.05)	11.77 b ( $\pm$ 1.21)	13.61 a ( $\pm$ 1.53)	11.89 A ( $\pm$ 1.67)	12.67 A ( $\pm$ 1.67)	11.81 A ( $\pm$ 1.71)	1.159
تعداد ردیف دانه در بلال Number of grain rows per ear	12.89 b ( $\pm$ 1.62)	15.89 a ( $\pm$ 1.76)	16.33 a ( $\pm$ 1.66)	15.67 A ( $\pm$ 1.73)	15.11 A ( $\pm$ 2.47)	14.33 A ( $\pm$ 2.50)	1.411
تعداد دانه در ردیف Number of grains per row	41.7 a ( $\pm$ 1.5)	42.7 a ( $\pm$ 1.2)	44.3 a ( $\pm$ 2.0)	43.1 AB ( $\pm$ 1.8)	44.4 A ( $\pm$ 1.2)	41.1 B ( $\pm$ 1.5)	2.39
وزن چوب بلال Ear cob weight (g)	28.9 a ( $\pm$ 2.5)	25.3 a ( $\pm$ 2.00)	26.5 a ( $\pm$ 2.8)	27.5 A ( $\pm$ 2.3)	27.8 A ( $\pm$ 2.6)	25.6 A ( $\pm$ 2.8)	4.51

CT میانگین‌هایی که حداقل در یک حرف مشترک هستند، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر پایه آزمون LSD می‌باشند. خاک‌ورزی مرسوم، MT: خاک‌ورزی حداقل، NT: بدون خاک‌ورزی، L: خلر، V: ماشک گل‌خوشه‌ای، N: بدون گیاه پوششی.

Means with at least one similar letter are not significantly ( $P < 0.05$ ) different based on LSD test. CT: Conventional Tillage, MT: Minimum Tillage, NT: No Tillage, L: *Lathyrus sativus*, V: *Vicia villosa*, N: No cover crop.

## نتیجه گیری

تعداد ردیف دانه در بلال شدند. هم‌چنین، هر دو گیاه پوششی باعث بهبود اغلب شناسه‌های کیفیت خاک شدند. به‌علاوه، هر دو گیاه پوششی باعث بهبود عملکرد بیولوژیک ذرت شدند، هر چند تأثیر ماشک گل‌خوشه‌ای بر این صفت بیشتر از خلر بود. از طرف دیگر، تعداد دانه در ردیف ذرت نیز در تیمار گیاه پوششی ماشک گل‌خوشه-ای به طور معنی‌داری بیشتر از تیمار خلر بود. در مجموع، تلفیق کم-خاک‌ورزی و گیاه پوششی ماشک گل‌خوشه‌ای به عنوان مناسب‌ترین نظام کشت از نظر بهبود شناسه‌های کیفیت خاک و عملکرد ذرت در شرایط مشابه با این آزمایش معرفی می‌گردند. برای توصیه‌های جامع‌تر نیاز به ادامه آزمایش در نقاط بیشتر و سال‌های متوالی بیشتر می‌باشد.

تلفیق خاک‌ورزی حفاظتی (شامل بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی) و گیاه پوششی (شامل ماشک گل‌خوشه‌ای و خلر) در یک دوره سه ساله، در یک خاک لوم رسی در منطقه دستجرد همدان نشان داد که به جز محتوای فسفر فراهم سایر شناسه‌های کیفیت خاک به طور معنی‌داری در نظام کم‌خاک‌ورزی، در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم، بهبود یافته است. در بین نظام‌های خاک‌ورزی حفاظتی، تأثیر کم‌خاک‌ورزی بر بهبود شناسه‌های کیفیت خاک بیشتر از بی‌خاک‌ورزی بود. از این رو، نظام کم‌خاک‌ورزی مدیریت پایدارتری در شرایط مشابه با این آزمایش می‌باشد. به‌علاوه، هر دو نظام خاک‌ورزی حفاظتی باعث بهبود عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، وزن دانه در بلال و

## منابع

- Adetunji, A.T., Ncube, B., Meyer, A.H., Olatunji, O.S., Mulidzi, R., & Lewu, F.B. (2021). Soil pH, nitrogen, phosphatase and urease activities in response to cover crop species, termination stage and termination method. *Heliyon* 7(1): e05980. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05980>.
- Afzali Gorouh, H., Naghavi, H., Rostami, M.A., & Najafinezhad, H. (2019). Effect of conservation tillage and wheat residue management in some soil properties and grain yield of corn. *Iranian Journal of Soil Research* 33(1): 1-11. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijsr.2019.119050>.
- Ahmadnia, F., Ebadi, A., Hashemi, M., & Ghavidel, A. (2020). Investigating the short time effect of cover crops on physical and biological properties of soil. *Journal of Water and Soil Conservation* 26(6): 277-290. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/JWSC.2019.16172.3145>.
- Ahmadvand, G., & Hajinia, S. (2015). The effect of cover crop and different tillage systems on soil physical properties and yield of potato. *Journal of Crop Production* 8(4): 163-182. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/20.1001.1.2008739.1394.8.4.9.5>.
- Akala, V., & Lal, R. (2001). Soil organic carbon pools and sequestration rates in reclaimed minesoils in Ohio. *Journal of environmental Quality* 30(6): 2098-2104. <https://doi.org/10.2134/jeq2001.2098>.
- Asadi, M.E., Feyzbakhsh, M.T., & Razzaghi, M.H. (2016). Study of silage maize yield and yield components under different managements of tillage. *Journal of Water and Soil Conservation* 23(3): 151-170. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/JWFST.2016.3191>.
- Blair, G.J., Lefroy, R.D., & Lisle, L. (1995). Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research* 46(7): 1459-1466.
- Blake, G.R., & Hartge, K.H. (1986). *Bulk density*. p. 363-375, In: Klute A. (ed.) *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, Modison.
- Cambardella, C., & Elliott, E. (1994). Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils. *Soil Science Society of America Journal* 58(1): 123-130. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800010017x>.
- Çelik, İ., Günal, H., Acir, N., Barut, Z.B., & Budak, M. (2021). Soil quality assessment to compare tillage systems in Cukurova Plain, Turkey. *Soil and Tillage Research* 208: 104892. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104892>.
- Congreves, K., Hooker, D., Hayes, A., Verhallen, E., & Van Eerd, L. (2017). Interaction of long-term nitrogen fertilizer application, crop rotation, and tillage system on soil carbon and nitrogen dynamics. *Plant and Soil* 410(1): 113-127. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2986-y>.
- Demir, Z., & Işık, D. (2019). Effects of cover crop treatments on some soil quality parameters and yield in a kiwifruit orchard in Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin* 28(9): 6988-6997.
- Ghaffari, M., Ahmadvand, G., Ardakani, M., Mosaddeghi, M., Yeganehehpour, F., Gaffari, M., & Mirakhori, M. (2012). Effect of cover crop residues on some physicochemical properties of soil and emergence rate of potato. *Journal of Crop Ecophysiology* 21(1): 79-90. (In Persian with English abstract)
- Hamzei, J., & Borbor, A. (2014). Effect of different soil tillage methods and cover crops on yield and yield components of corn and some soil characteristics. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production* 24(3): 35-47. (In Persian with English abstract).

- <https://sustainagriculture.tabrizu.ac.ir/article27221906f09a3231297d54566a5c904c20d2.pdf>.
15. Hiel, M.P., Barbieux, S., Pierreux, J., Olivier, C., Lobet, G., Roisin, C., Garré, S., Colinet, G., Bodson, B., & Dumont, B. (2018). Impact of crop residue management on crop production and soil chemistry after seven years of crop rotation in temperate climate, loamy soils. *Peer Journal* 6: e4836. <https://doi.org/10.7717/peerj.4836>.
  16. Isermeyer, H. (1952). Eine einfache Methode zur Bestimmung der Bodenatmung und der Karbonate im Boden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde* 56(1-3): 26-38. <https://doi.org/10.1002/jpln.19520560107>.
  17. Komeili, H.R., Rezvani Moghaddam, P., Ghodsi, M., Nassiri Mahallati, M., & Jalal Kamali, M.R. (2016). Effect of different tillage methods and the rate of crop residues on yield, yield components and economic efficiency of wheat. *Cereal Research* 6(3): 323-337 (In Persian with English abstract)
  18. Latifi, S., Hauser, M., Raheli, H., Movahhed Moghaddam, S., Viira, A.-H., Gökcin Ozuyar, P., & Azadi, H. (2021). Impacts of organizational arrangements on conservation agriculture: insights from interpretive structural modeling in Iran. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 45(1): 86-110. <https://doi.org/10.1080/21683565.2020.1751375>.
  19. Merante, P., Dibari, C., Ferrise, R., Sánchez, B., Iglesias, A., Lesschen, J.P., Kuikman, P., Yeluripati, J., Smith, P., & Bindi, M. (2017). Adopting soil organic carbon management practices in soils of varying quality: Implications and perspectives in Europe. *Soil and Tillage Research* 165: 95-106. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.08.001>.
  20. Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1996). *Total carbon, organic carbon, and organic matter*. 961-1010 In: Sparks D.L., Page A.L., Helmke P.A., Loeppert R.H., Soltanpour P.N., Tabatabai M.A., Johnston C.T. and Sumner M.E. (eds) *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical methods*, Modison.
  21. Nouri, A., Lee, J., Yin, X., Tyler, D.D., & Saxton, A.M. (2019). Thirty-four years of no-tillage and cover crops improve soil quality and increase cotton yield in Alfisols, Southeastern USA. *Geoderma* 337: 998-1008. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.016>.
  22. Page, K.L., Dang, Y.P., & Dalal, R.C. (2020). The ability of conservation agriculture to conserve soil organic carbon and the subsequent impact on soil physical, chemical, and biological properties and yield. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 4: 31. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00031>.
  23. Palm, C., Blanco-Canquib, H., DeClerck, F., Gaterea, L., & Grace, P. (2014). Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 187: 87-105. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.010>.
  24. Pradhan, A., Chan, C., Roul, P.K., Halbrendt, J., & Sipes, B. (2018). Potential of conservation agriculture (CA) for climate change adaptation and food security under rainfed uplands of India: A transdisciplinary approach. *Agricultural Systems* 163: 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.002>.
  25. Sithole, N.J., Magwaza, L.S., & Mafongoya, P.L. (2016). Conservation agriculture and its impact on soil quality and maize yield: A South African perspective. *Soil and Tillage Research* 162: 55-67. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.04.014>.
  26. Sokolowski, A.C., McCormick, B.P., De Grazia, J., Wolski, J.E., Rodríguez, H.A., Rodríguez-Frers, E.P., Gagey, M.C., Debelis, S.P., Paladino, I.R., & Barrios, M.B. (2020). Tillage and no-tillage effects on physical and chemical properties of an Argiaquoll soil under long-term crop rotation in Buenos Aires, Argentina. *International Soil and Water Conservation Research* 8(2): 185-194. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.02.002>.
  27. Tabatabai, M.A., & Bremner, J.M. (1969). Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil biology and Biochemistry* 1(4): 301-307. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(69\)90012-1](https://doi.org/10.1016/0038-0717(69)90012-1).
  28. Verhulst, N., Govaerts, B., Verachtert, E., Castellanos-Navarrete, A., Mezzalama, M., Wall, P., Decker, J., & Sayre, K.D. (2010). *Conservation agriculture, improving soil quality for sustainable production systems?* p. 137-208, In: Lal R. and Stewart B.A. (eds) *Advances in Soil Science: Food Security and Soil Quality*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
  29. Weil, R.R., Islam, K.R., Stine, M.A., Gruver, J.B., & Samson-Liebig, S.E. (2003). Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture* 18(1): 3-17. <https://doi.org/10.1079/AJAA200228>.
  30. Yeganehpour, F., Zehtab Salmasi, S., Abedi, G., Samadiyan, F., & Beyginiya, V. (2015). Effects of cover crops and weed management on corn yield. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 14(2): 178-181. <http://doi.org/10.1016/j.jssas.2014.02.001>.
  31. Yin-jie, Z., Wei, G., Hao-an, L., Ji-wei, T., Ruo-nan, L., Ming-yue, L., Huai-zhi, Z., & Shao-wen, H. (2022). Effects of a decade of organic fertilizer substitution on vegetable yield and soil phosphorus pools, phosphatase activities, and the microbial community in a greenhouse vegetable production system. *Journal of Integrative Agriculture* 21(7): 2119–2133. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(21\)63715-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(21)63715-2).
  32. Zhao, X., Liu, S.L., Pu, C., Zhang, X.Q., Xue, J.F., Ren, Y.X., Zhao, X.L., Chen, F., Lal, R., & Zhang, H.L. (2017). Crop yields under no-till farming in China: A meta-analysis. *European Journal of Agronomy* 84: 67-75.



## Contents

<b>Water Use Efficiency Evaluation in Deficit Irrigation and Partial Root Zone Drying in Potato (<i>Solanum tuberosum</i> L.)</b>	345
A. Asadi, H.R. Khazaie, J. Nabati	
<b>The Effect of Stagnant Zone Behavior in One-Dimensional Hydrodynamic Models and Solute Transport in Rivers</b>	661
A. Montazeri, S. Khodambashi Emami, M. Mazaheri	
<b>Evaluating the Effect of Combined Water and Salinity Stresses in Estimating the Fodder Maize Biological Yield through Periodic Evaporation and Transpiration</b>	677
F. Zargar Yaghoubi, M. Sarai Tabrizi, A. Mohammadi Torkashvand, M. Esfandiari, H. Ramezani Etedali	
<b>Numerical Estimation of Drinking Water Quality Index Using Tree Methods and Combined Wavelet Approaches and Principal Component Analysis</b>	695
M.T. Sattari, S. Javidan	
<b>Evaluating Reference Evapotranspiration Using Data Mining Methods and Comparing it with the Results of Water Requirement System in Qazvin Province</b>	711
A. Sedaghat, N.A. Ebrahimi Pak, A. Tafteh, S.N. Hosseini	
<b>The Combined Role of GIS, RS and Geoelectric in Determining the Susceptible Areas of Underground Dam Construction (Case Study: Pashueeyeh Basin of Kerman Province)</b>	729
N. Hajseyedalikhani, H. Saeediyani	
<b>Antibiotic Resistance Index of Heterotrophic and Coliform Bacteria in Water and Sediment of Goharood River</b>	743
F. Saberinia, M.B. Farhangi, N. Yaghmaeian Mahabadi, R. Shokati, N. Ghorbanzadeh	
<b>Evaluation of Zn[Mn]-Al LDHs as Matrices for Release of B, Zn and Mn in A Simulated Soil Solution</b>	761
H. Hatami, A. Fotovat	
<b>Three-year Effects of Conservation Tillage and Cover Crop on Selected Soil Quality Indicators and Corn Yield Components</b>	773
M. Nael, S.S. Salehi, J. Hamzei, M. Zandi Baghche-Maryam	

# WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 36      No. 6      2023

**Published by:** Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

**Manager in Charge:** Valizadeh, R. (Ruminant Nutrition)      Prof., Ferdowsi University of Mashhad

**Editor in Chief:** Fotovat, A. (Soil Science)      Prof., Ferdowsi University of Mashhad

## Editorial Board:

Alizadeh, A.	Irrigation and Drainage	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Bazrafshan, J.	Agricultural Meteorology	Assoc. Prof., Faculty of Agricultural Engineering and Technology
Fotovat, A.	Soil Science	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Ghadiri, H.	Soil Science	Prof. Griffith University
Khorassani, R.	Soil Science	Assoc. Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Khormali, F.	Soil Science	Prof., Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan
Lakzian, A.	Soil Science	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Liaghat, A.	Irrigation and Drainage	Prof., University of Tehran
Mosaedi, A.	Irrigation and Civil Eng.	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Mousavi Baygi, M	Agricultural Meteorology	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Oustan, Sh.	Soil Science	Prof., Tabrzi University
Taghvaeian, S.	Irrigation	Assoc. Prof., Oklahoma University

**Publisher:** Ferdowsi University of Mashhad

**Address:** Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

**P.O. Box:** 91775- 1163

**Fax:** +98 51 8787430

**E-Mail:** [jswa3@um.ac.ir](mailto:jswa3@um.ac.ir)

**Web Site:** <https://jsw.um.ac.ir/>

**Journal of Water and Soil is published bimonthly (six issues per year).**