



جلد ۳۹ شماره ۱

سال ۱۴۰۴

آب و خاک

نشریه

(علوم و صنایع کشاورزی)

شماره پیاپی ۹۹

شاپا: ۴۷۵۷-۲۰۰۸

عنوان مقالات

- ۳..... بررسی میزان انطباق شاخص GRI در خشکسالی منابع آب زیرزمینی دشت قزوین
مهدیه جمشیدی اوانکی - کیومرث ابراهیمی - سیده صبا هاشمی
- مقایسه تأثیر کودهای زیستی باکتریایی و قارچی بر عملکرد و کارایی مصرف آب گندم در شرایط تنش آبی:
نقش آنزیم ACC-دآمیناز و فرمولاسیون‌های مختلف قارچی ۱۹
سیدسجاد حسینی - فرهاد رجالی - پیمان کشاورز
- افزایش دسترسی فسفر و تغییر پاسخ‌های بیوشیمیایی خاک با کاربرد اسیدهیومیک و مایه‌زنی استرپتومایسس ۳۷
نیلوفر خلیلی - رضا قربانی نصرآبادی - مجتبی بارانی مطلق - رضا خدادادی
- شناسایی و اولویت‌بندی مناسب‌ترین راهبردهای بهبود سلامت آبخیز سد ایلام با روش SWOT ۵۷
احسان فتحی - محمدرضا اختصاصی - علی طالبی - جمال مصفايي
- سینتیک رهاسازی روی، منگنز و منیزیم از هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای Mg-Zn-Mn-Al-LDH تحت تأثیر
اسید سیتریک و اسید تارتاریک ۷۵
زهرا موحدی راد - محسن حمیدپور - احمد تاج آبادی پور
- واکنش شاخص‌های رشدی، فیزیولوژیک و ساکارز وارپته‌های مختلف نیشکر به کاربرد سیلیکون در شرایط شوری آب ۹۳
علی انصوری سواری - مجید نبی پور - معصومه فرزانه

آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

با شماره پروانه ۲۱/۲۰۱۵ مورخه ۱۳۶۸/۴/۱۱ و درجه علمی-پژوهشی شماره ۲۶۵۲۴ تاریخ ۱۳۷۳/۱۰/۱۹ از

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد ۳۹ شماره ۱ سال ۱۴۰۴

بر اساس مصوبه وزارت عتف از سال ۱۳۹۸، کلیه نشریات دارای درجه "علمی-پژوهشی" به نشریه "علمی" تغییر نام یافتند.

صاحب امتیاز:

دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول:

رضا ولی زاده

سرمدیر:

امیر فتوت

اعضای هیئت تحریریه:

استاد- تغذیه نشخوارکنندگان (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

علوم خاک (دانشگاه تبریز)

هواشناسی کشاورزی (دانشگاه تهران)

آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، آمریکا)

علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

علوم خاک (دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان)

آبیاری و زهکشی (دانشگاه فردوسی مشهد)

علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

خاکشناسی (دانشگاه گریفیت، استرالیا)

علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

آبیاری و زهکشی (دانشگاه تهران)

آبیاری و مهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)

هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

اوستان، شاهین

بذرافشان، جواد

تقوایان، صالح

خراسانی، رضا

خرمائی، فرهاد

علیزاده، امین

فتوت، امیر

قدیری، حسین

لکزیان، امیر

لیاقت، عبدالمجید

مساعدی، ابوالفضل

موسوی بایگی، محمد

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

نشانی: دانشگاه فردوسی مشهد- دانشکده کشاورزی - ص. پ. ۹۱۷۷۵-۱۱۶۳ - دبیرخانه نشریات علمی- نشریه آب و خاک

پست الکترونیکی: 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.



مندرجات

- 3 بررسی میزان انطباق شاخص GRI در خشکسالی منابع آب زیرزمینی دشت قزوین
مهدیه جمشیدی اوانکی - کیومرث ابراهیمی - سیده صبا هاشمی
- 19 مقایسه تأثیر کودهای زیستی باکتریایی و قارچی بر عملکرد و کارایی مصرف آب گندم در شرایط تنش آبی: نقش آنزیم ACC-دآمیناز و فرمولاسیونهای مختلف قارچی
سیدسجاد حسینی - فرهاد رجالی - پیمان کشاورز
- 37 افزایش دسترسی فسفر و تغییر پاسخهای بیوشیمیایی خاک با کاربرد اسیدهیومیک و مایه زنی / استرپتومایسس نیلوفر خلیلی - رضا قربانی نصرآبادی - مجتبی بارانی مطلق - رضا خدادادی
- 57 شناسایی و اولویت بندی مناسب ترین راهبردهای بهبود سلامت آبخیز سد ایلام با روش SWOT
احسان فتحی - محمدرضا اختصاصی - علی طالبی - جمال مصفایی
- 75 سینتیک رهاسازی روی، منگنز و منیزیم از هیدروکسیدهای دوگانه لایه ای Mg-Zn-Mn-Al-LDH تحت تأثیر اسید سیتریک و اسید تارتاریک
زهرا موحدی راد - محسن حمیدپور - احمد تاج آبادی پور
- 93 واکنش شاخص های رشدی، فیزیولوژیک و ساکارز واریته های مختلف نیشکر به کاربرد سیلیکون در شرایط شوری آب
علی انصوری سواری - مجید نبی پور - معصومه فرزانه

Assessment of the GRI Index Compliance in Groundwater Drought in the Qazvin Plain, Iran

M. Jamshidi Avanaki¹, K. Ebrahimi^{2*}, S.S. Hashemi²

1- Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural, University of Tehran, Karaj, Iran

2- Department of Environmental Sciences and Technologies, Faculty of Energy and Sustainable Resources Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

(*- Corresponding Author Email: EbrahimiK@ut.ac.ir)

Received: 20-11-2024

Revised: 14-04-2025

Accepted: 15-04-2025

Available Online: 15-04-2025

How to cite this article:

Jamshidi Avanaki, M., Ebrahimi, K., & Hashemi, S.S. (2025). Assessment of the GRI index compliance in groundwater drought in the Qazvin plain, Iran. *Journal of Water and Soil*, 39(1), 1-16. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90890.1447>

Introduction

Drought, as an environmental crisis, not only impacts ecosystems but also poses risks to human activities and has significant negative effects. The occurrence of intermittent and prolonged droughts, along with significant fluctuations in climate, exacerbates water scarcity, particularly in surface water resources; thus, groundwater resources play a key role as a vital source for supplying water for various consumption needs.

Groundwater drought is one of the serious and increasing challenges that has been acutely felt in recent years. Climate change and increasing water demand in agricultural and industrial sectors has led to increase dextraction from groundwater sources, significantly affecting many plains and groundwater resources in the country, resulting in severe depletion. This has consequently led to water crises and recurrent droughts. Therefore, understanding the relationship between drought and the status of groundwater resources is crucial. This issue not only impacts agriculture and food security but also has negative effects on public health, the economy, and the environment. For this reason, proper and sustainable management of these resources in the face of drought challenges is essential.

Materials and Methods

The examination of hydrogeological droughts and the monitoring of groundwater levels is essential for providing appropriate solutions for the protection and management of water resources.

In the present study, the Groundwater Resource Index (GRI) was used to assess groundwater drought in the Qazvin Plain. Additionally, to explore the relationship between the GRI and the Standardized Precipitation Index (SPI) across different time scales, the correlation coefficient between the two indices was calculated. Subsequently, the GRI was localized within the plain by analyzing its values across various monitoring wells.

Results and Discussion

The high correlation between the GRI index and the SPI drought index over a 48-month timeframe indicated that groundwater resources in the Qazvin plain were influenced by both wet and dry weather phenomena, with a time lag of approximately three to six months before meteorological drought translated into groundwater drought. Eslamian *et al.* (2009) also reported a three-month time lag for the effects of drought on the groundwater resources of the Qazvin, Buin Zahra, and Hamadan plains in their research .



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90890.1447>

Conclusion

The localization study of the GRI index in the Qazvin Plain region concluded that the index is highly responsive for assessing and evaluating groundwater drought. It effectively identified wet and dry years and showed a strong alignment with the behavior of the groundwater table. The analysis of drought during the years from 1996-2001 also illustrated that the impacts of drought continued into subsequent years on groundwater resources, and according to the GRI index, the decline in groundwater levels persisted in later years. This was evident even with increased precipitation in 2002 and thereafter, where we continued to witness declines and the ongoing trend of groundwater drought.

Acknowledgments

We would like to thank the University of Tehran and the Water Resources Management Company of Iran for providing the necessary facilities to conduct this research study and prepare relevant papers.

Keywords: Correlation, Drought, Groundwater resource index, Qazvin Plain, SPI

بررسی میزان انطباق شاخص GRI در خشکسالی منابع آب زیرزمینی دشت قزوین

مهديه جمشیدی اوانکی^۱ - کیومرث ابراهیمی^۲  - سیده صبا هاشمی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۶

چکیده

خشکسالی یکی از پدیده‌های زیان‌بار آب و هوایی است که علاوه بر آب‌های سطحی تأثیر آن بر منابع آب زیرزمینی نیز بایستی پایش و شناسایی شود. هدف اصلی مقاله حاضر، مطالعه و بررسی اثرات خشکسالی بر رفتار سفره آب زیرزمینی دشت قزوین با استفاده از شاخص خشکسالی منبع آب زیرزمینی (GRI) بوده است. برای این منظور تراز آب زیرزمینی به‌عنوان معیار اصلی مطالعه در چاه‌هایی با کمترین، بیشترین و مقادیر متوسط افت، مورد بررسی قرار گرفت. از آمار سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۴۵ به دلیل کامل بودن اطلاعات استفاده و محاسبات و ارزیابی‌های لازم انجام شد. نتایج نشان داد که یک روند کاهشی در مقادیر شاخص GRI طی سال‌های ۱۳۸۰-۱۳۷۵ وجود داشته و از طرف دیگر در همین محدوده زمانی، خشکسالی‌های با درجات بالا در سفره آب زیرزمینی مورد مطالعه رخ داده است. همچنین نتایج بیانگر وجود همبستگی معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد شاخص خشکسالی هیدروژئولوژیکی GRI با شاخص خشکسالی هواشناسی SPI در مقیاس ۴۸ ماهه و تاخیر زمانی سه ماهه می‌باشد. ارزیابی تعداد زیادی از چاه‌های منطقه با شاخص GRI نشان داد که این شاخص عملکرد خوبی در دشت قزوین دارد. لذا با قاطعیت می‌توان اظهار نمود که بدون نیاز به هیچ ضریب تعدیل و یا اصلاح خاصی، شاخص خشکسالی منبع آب زیرزمینی GRI برای آبخوان دشت قزوین به‌عنوان یک شاخص منطبق قابل استفاده است.

واژه‌های کلیدی: خشکسالی، دشت قزوین، شاخص منبع آب زیرزمینی، همبستگی، SPI

مقدمه

و طولانی مدت و نوسانات زیاد آب و هوایی، کمبود آب به‌ویژه منابع آب سطحی را تشدید می‌کند؛ کمبود این منابع، باعث کاهش فرآیند تغذیه آب‌های زیرزمینی شده و در چنین شرایطی، حجم آب‌های زیرزمینی به تدریج کاهش می‌یابد و این امر می‌تواند سبب تشدید کمبود آب در مناطق شهری و روستایی شود. بدین ترتیب منابع آب زیرزمینی به‌عنوان یک منبع حیاتی جهت تأمین آب مصرفی در بخش‌های مختلف، نقش کلیدی را ایفا می‌کنند (Solaimani et al., 2005). خشکسالی آب زیرزمینی یکی از چالش‌های جدی است که در سال‌های اخیر، به شدت احساس می‌شود. تغییرات اقلیمی و افزایش نیاز به آب در بخش‌های کشاورزی و صنعتی موجب افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی شده و بسیاری از دشت‌ها و منابع آب زیرزمینی کشور را تحت تأثیر قرار داده و باعث شده به شدت افت کنند که در نتیجه به

خشکسالی یکی از تغییرات معمول اقلیمی است که به کاهش بارندگی، افزایش دما و کمبود رطوبت در سطح زمین منجر می‌شود. این پدیده هنگامی اتفاق می‌افتد که بارش یا رواناب طبیعی در یک دوره زمانی معلوم، کمتر از متوسط زمانی متناظر بوده است؛ خشکسالی به عنوان یک بحران محیط‌زیستی نه تنها بر روی اکوسیستم‌ها تأثیر می‌گذارد، بلکه به گونه‌ای می‌باشد که فعالیت‌های بشر را با خطر مواجه کرده و اثرات منفی قابل توجهی دارد (Climatology & Aerology, 2011). از سوی دیگر، کشور ما به‌علت قرار گرفتن در منطقه خشک و نیمه‌خشک جهان از نظر منابع آب زیرزمینی دارای وضعیت نامطلوبی نسبت به متوسط دنیا است؛ بخش قابل ملاحظه‌ای از مصارف آب کشور توسط منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. وقوع خشکسالی‌های متناوب

۱- گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- گروه آموزشی علوم و فناوری‌های محیطی، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(Email: EbrahimiK@ut.ac.ir)

(*) نویسنده مسئول:

زیرزمینی منطقه دارند. سرکار و چیناسامی (Sarkar & Chinnsamy, 2023) در ارزیابی تأثیر بارش بر آبخوان با استفاده از شاخص SPI و GRI در منطقه پورولیا، بنگال غربی، هند نشان دادند که حدود ۷۱ درصد آبخوان به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در وضعیت خشکسالی خیلی شدید قرار گرفته است. آنچه‌کندی و همکاران (Aghchehkandi et al., 2023) با ارزیابی اثرات خشکسالی هواشناسی بر تراز آب زیرزمینی حوزه آبخیز هراز استان مازندران دریافتند که خشکسالی با یک تأخیر ۳ ماهه بر منابع آب زیرزمینی اثر دارد و بیشترین همبستگی بین شاخص بارش استاندارد شده و متوسط تراز آب زیرزمینی در مقیاس زمانی ۲۴ ماهه در ایستگاه‌های باران‌سنجی در سطح ۹۵ و ۹۹ درصد معنی‌دار می‌باشد. نادریان‌فر و همکاران (Naderianfar et al., 2021) تغییرات نوسانات سطح آب زیرزمینی در حوضه آبریز هلیل رود جیرفت را بررسی کردند. نتایج تحلیل‌ها به‌صورت سری زمانی متوالی نشان داد که SPI با مقیاس زمانی بلندمدت ۷ ماهه از همبستگی بیشتری با هیدروگراف سطح آب زیرزمینی دشت برخوردار است. قلعه‌نی و همکاران (Mohammadi Ghaleni et al., 2011) به‌منظور بررسی رابطه بین خشکسالی و افت سطح آب‌های زیرزمینی در آبخوان دشت ساوه از شاخص بارش استاندارد شده استفاده کردند. نتایج بررسی‌های همبستگی بین شاخص بارش استاندارد شده با تراز سطح آب زیرزمینی نشان داده است که شاخص SPI با مقیاس زمانی ۲۴ و ۴۸ ماهه با تراز سطح آب زیرزمینی با تأخیر زمانی ۵ ماه بیشترین همبستگی را به‌ترتیب با ۰/۸۰۶ و ۰/۷۶۲ دارد. عزیزی (Azizi, 2003) به‌منظور بررسی شدت خشکسالی و ارتباط بین خشکسالی‌های اقلیمی و هیدروژئولوژیک، از داده‌های بارش و آب‌های زیرزمینی دشت قزوین استفاده کرد. نتایج تحقیق او نشان داد که تعداد ناهنجاری‌های منفی بارش طی دوره، بیش از تعداد ناهنجاری‌های مثبت بوده و تأثیر فعالیت‌های انسانی در ناهنجاری‌های منفی آب‌های زیرزمینی به شدت چشمگیر است. خشکسالی آب‌های زیرزمینی با دو الی سه ماه تأخیر نسبت به خشکسالی‌های اقلیمی بروز می‌کند. جمشیدی (Jamshidi Avanaki, 2013) به بررسی اثرات خشکسالی بر رفتار سفره‌های آب زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های متداول پرداخت. وی با بومی کردن شاخص GRI در مورد آبخوان دشت قزوین نتیجه گرفت که علاوه بر وجود خشکسالی افزایش چاه‌های بهره‌برداری و اضافه برداشت‌ها روند نزولی سطح سفره دشت قزوین را تشدید کرده است. مندیسنو و سناتوره (Mendicino & Senatore, 2008) در پژوهشی شاخص منبع آب زیرزمینی GRI را در منطقه کلابریا که دارای اقلیم مدیترانه‌ای است برای یک دوره ۴۵ ساله (۱۹۵۹-۲۰۰۶) محاسبه و سپس با شاخص SPI در مقیاس ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه مقایسه کردند. آنان دریافتند که خصوصیات لیتولوژی حوضه بر شاخص GRI مؤثر بوده و سبب تأخیر فاز GRI نسبت به SPI می‌شود؛ از طرفی هر چه مقیاس زمانی SPI بزرگتر باشد، همبستگی آن با

بحران‌های آبی و خشکسالی‌های مکرر منجر شده است. بنابراین، درک رابطه بین خشکسالی و وضعیت منابع آب زیرزمینی اهمیت بسزایی دارد؛ زمانی که بارندگی کم می‌شود، میزان آب ورودی به منابع آب زیرزمینی کاهش یافته و در نتیجه سطح آب‌های زیرزمینی نیز کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند باعث افت کیفیت آب، افزایش غلظت املاح و در نهایت کاهش قابلیت استفاده از آب برای مصارف مختلف گردد و منجر به تخریب منابع آبی موجود شود. این موضوع نه تنها بر کشاورزی و امنیت غذایی تأثیر می‌گذارد، بلکه همچنین بر سلامت عمومی، اقتصاد و محیط‌زیست آثار منفی می‌گذارد. به همین دلیل، مدیریت صحیح و پایدار این منابع در برابر چالش‌های خشکسالی ضروری است. براساس گزارشات سازمان ملل؛ خشکسالی‌ها هزینه‌های اقتصادی و اجتماعی بالایی به همراه دارند که به‌عنوان یک موضوع حیاتی در سیاست‌گذاری‌های دولتی باید مورد توجه قرار گیرند (Weather Report, 2020). بررسی خشکسالی‌های هیدروژئولوژیکی و رفتارسنجی سطح آب زیرزمینی در راستای ارائه راهکارهای حفاظت و مدیریت مناسب منابع آب، ضروری می‌باشد. در زمینه تأثیر خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی، مطالعات مختلفی در مناطقی که در معرض تهدید این مخاطره‌ی جوی هستند انجام گرفته است که هرکدام بسته به هدف و ویژگی‌های منطقه‌ی مورد مطالعه، روش‌های مختلفی را به کار برده‌اند؛ در ادامه به نمونه‌هایی از این مطالعات اشاره می‌شود.

خان و همکاران (Khan et al., 2008) در بررسی رابطه بین خشکسالی و سطح آب زیرزمینی در اراضی یکی از دشت‌های استرالیا به این نتیجه رسیدند که بین شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و سطح آب زیرزمینی کم‌عمق منطقه ارتباط قوی وجود دارد. هسو و همکاران (Hsu et al., 2007) به‌منظور تعیین رابطه بارش و تغذیه از برون‌یابی بارندگی در دشت پینگتونگ تایوان استفاده کردند. در این تحقیق از رابطه ساده تغذیه و بارندگی استفاده شد؛ نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که کاهش سطح آب زیرزمینی باعث هجوم آب شور و افت کیفیت آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه شده است.

بروکو و همکاران (Brocque et al., 2018) روند تراز آب زیرزمینی ۳۸۱ چاه را در برابر تغییر اقلیمی به‌مدت ۲۶ سال با روش من‌کنندال اصلاحی و تخمینگر سن در جنوب استرالیا بررسی کردند. لزایک و همکاران (Lezzaik et al., 2018) به توسعه و کاربرد شاخص‌های خشکسالی آب زیرزمینی در شمال آفریقا و خاورمیانه پرداختند؛ نتایج سالانه GRI نشان داد که خطر افت تراز آب زیرزمینی به حکمرانی و امنیت غذایی وابسته است و ذخایر آب زیرزمینی منطقه در معرض خشکسالی آب زیرزمینی قرار گرفته است. بررسی روند تغییر تراز آب‌های زیرزمینی و خشکسالی آن‌ها در حوضه رودخانه شرقی بنگال غربی هند توسط هالدر و همکاران (Halder et al., 2020) با آزمون من‌کنندال نشان داد این حوضه با خشکسالی شدید هواشناسی، آبشناسی و کشاورزی روبه‌رو است که تأثیر ویژه‌ای بر تراز آب‌های

تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد و مرطوب است. این دشت از شمال با حوضه آبریز شاهرود، از غرب با اهررود و خررود، از جنوب با رودخانه‌های شورچای، قره بلاغ لار و قره چای و از شرق با رودخانه کردان و کرج محاط شده است. رودخانه‌های دشت قزوین از سلسله جبال اطراف آن سرچشمه گرفته و به سمت دشت جاری می‌شوند؛ از شمال رشته کوه البرز، از غرب کوه‌های چهارگر و از جنوب کوه‌های رامند آن‌ها را تغذیه می‌کنند.

نحوه رسوب‌گذاری و وجود رودخانه‌های بزرگ و کوچک در این منطقه باعث شده که سفره آب زیرزمینی موقعیت خوبی پیدا نماید و شرایط بهره‌برداری از آن‌ها را در اولویت قرار دهد.

داده‌ها و مشخصات ایستگاه‌ها

در این پژوهش به‌منظور ارزیابی میزان انطباق شاخص GRI در خشکسالی منابع آب زیرزمینی و بررسی خشکسالی هواشناسی توسط شاخص SPI، به‌دلیل کامل و بی‌نقص بودن داده‌ها، دوره آماری از سال ۱۳۴۵ تا ۱۳۹۰ انتخاب و محاسبات انجام گردید. علاوه بر این جهت بررسی رابطه شاخص GRI با شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی مختلف، ضریب همبستگی این دو شاخص نیز محاسبه شد و در ادامه کار بومی‌سازی شاخص GRI؛ فرآیند ارزیابی و تعدیل این شاخص جهت تطبیق با شرایط منطقه مورد مطالعه، مورد بررسی قرار گرفت.

از سه ایستگاه هواشناسی آشتجین، دانسفهان و رحیم‌آباد و سطح آب زیرزمینی ۸۹ حلقه چاه جهت ارزیابی رابطه خشکسالی و افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان دشت قزوین استفاده شد. ایستگاه‌های مذکور با در نظر گرفتن موارد مختلفی از جمله نواقص آماری کم، داشتن آمار طولانی مدت و پراکنش مناسب در سطح دشت انتخاب گردید. در مرحله‌ی پیش پردازش داده‌ها، ابتدا داده‌های بارش ماهانه کلیه ایستگاه‌ها به لحاظ همگنی از طریق روش آماری ران تست^۱ مورد بررسی قرار گرفت و سپس نواقص آماری داده‌ها با استفاده از روش الگوریتم حداکثر برآورد مورد انتظار^۲ تخمین زده شد. در گام بعدی برای هر یک از مقیاس‌های زمانی مورد نظر، مقادیر بارندگی ماهانه هر ایستگاه محاسبه و برازش توزیع آماری گاما (به‌دلیل برتری‌هایی از قبیل انطباق با توزیع‌های مختلف و توانایی تبدیل به توزیع نرمال، توصیف سری‌های زمانی طولانی مدت انتخاب شد) بر سری‌های بارندگی حاصله انجام گردید که در نهایت این توزیع به یک توزیع نرمال تبدیل شده است (McKee et al., 1993). همچنین داده‌های سطح آب زیرزمینی در دوره آماری به‌عنوان ورودی اصلی شاخص GRI انتخاب شد و از بین ۸۹ چاه پی‌زومتری، سه چاه رادکان یک، خوزبین و یحیی‌آباد با بیشترین، کمترین و متوسط افت در نقاط مختلف دشت که نماینده

شاخص GRI مناسب‌تر است. ایمانی و طالبی اسفندرانی (Eimani & Talebi Esfandarani, 2011) در بررسی آثار خشکسالی در یک دوره بیست ساله (۱۳۶۷-۱۳۸۷) بر سطح سفره آب زیرزمینی دشت بهاباد یزد با استفاده از شاخص SPI و شاخص GRI به مطالعه پرداختند. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده افت شدید سفره در ده سال اخیر و رابطه بین شاخص SPI در مقیاس زمانی دراز مدت به‌خصوص مقیاس ۴۸ ماهه با سطح ایستابی سفره دشت می‌باشد. همچنین صیف و همکاران (Seif, et al., 2011) در منطقه فسا به نتیجه‌ی مشابهی با آنچه که ایمانی و طالبی اسفندرانی نتیجه گرفته‌اند، دست یافتند که نشان‌دهنده رابطه معنی‌دار بین خشکسالی اقلیمی با خشکسالی هیدروژئولوژیکی به‌خصوص در مقیاس بلند مدت می‌باشد و خشکسالی هیدروژئولوژیکی نسبت به خشکسالی اقلیمی تأخیر فاز دارد.

همان‌گونه که از مرور مطالعات انجام شده مشخص است، در بررسی وضعیت خشکسالی، در تعداد کمی از تحقیقات به مسئله آب‌زیرزمینی توجه شده است و اغلب از شاخص SPI که بر اساس داده‌های بارندگی طولانی مدت است، استفاده شده است. با این وجود شاخص SPI نمی‌تواند سایر پارامترها از جمله سطح آب زیرزمینی، رطوبت خاک، کاربری اراضی، شرایط گیاهی را در پایش و پیش‌بینی خشکسالی مورد بررسی قرار دهد. لذا از آنجا که یکی از ابزارهای مفید برای پایش خشکسالی آب زیرزمینی، شاخص منبع آب زیرزمینی GRI می‌باشد، در پژوهش حاضر شاخص GRI، به‌عنوان یک شاخص توانا برای پایش و پیش‌بینی خشکسالی منبع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

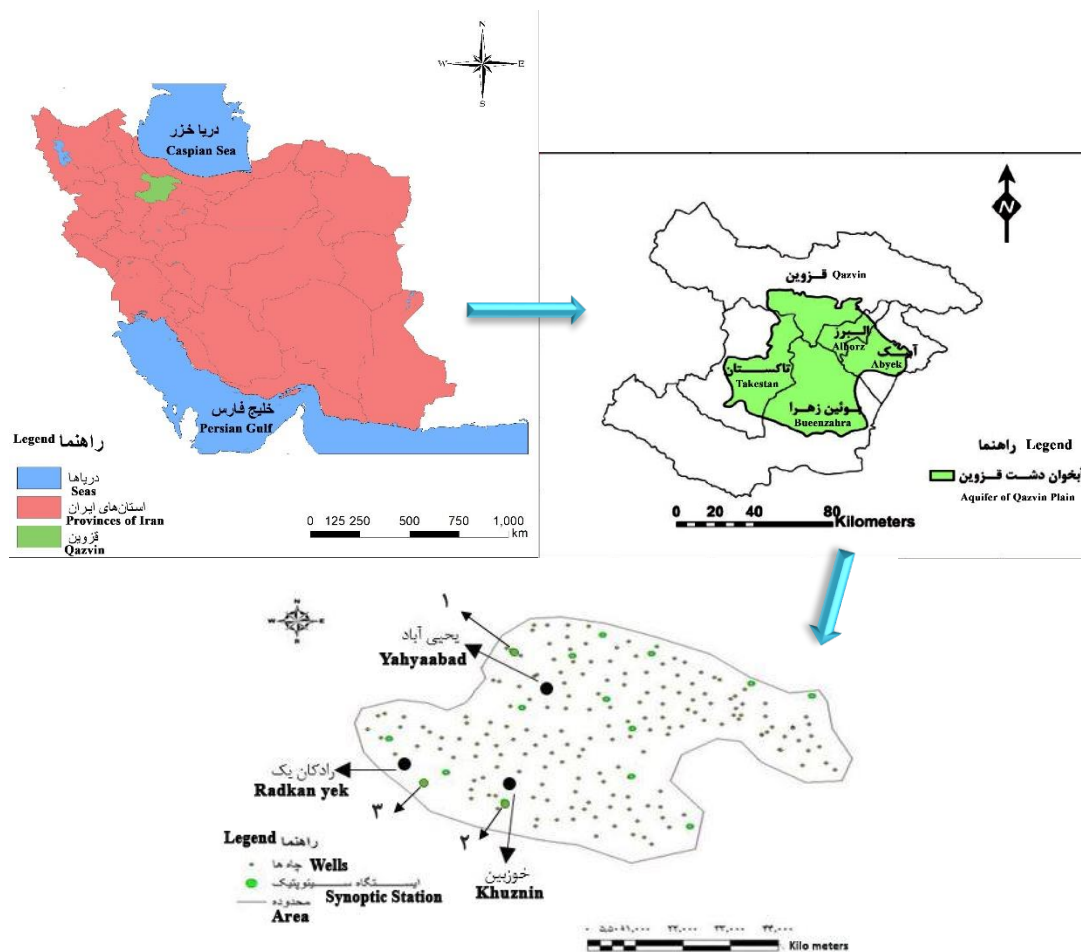
منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی دشت قزوین واقع در استان قزوین در شمال غربی ایران و بین دو رشته کوه البرز و زاگرس قرار دارد. این دشت همچنین از شمال به استان گیلان، از شرق به تهران، از غرب به استان زنجان و از جنوب به استان مرکزی متصل می‌باشد. دشت قزوین در محدوده طول‌های جغرافیایی ۴۸°۴۵' تا ۵۰°۵۰' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۵°۳۷' تا ۳۶°۴۵' شمالی قرار گرفته و ارتفاع حداکثر و حداقل به‌ترتیب برابر ۲۹۷۱ و ۱۱۰۰ متر و متوسط ارتفاع از سطح دریا حدود ۱۲۵۰ متر می‌باشد. محدوده مطالعاتی دشت قزوین با وسعت ۴۴۸۷ کیلومتر مربع از نظر تقسیم‌بندی هیدروژئولوژیکی حوضه‌های آبریز کشور به‌عنوان زیرحوضه رود شور که وسیع‌ترین حوضه آبریز استان قزوین است، محسوب می‌شود.

از نظر اقلیمی، دشت قزوین دارای آب و هوای مدیترانه‌ای با

نشان می‌دهد. همچنین در جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های باران سنجی آورده شده است.

کل دشت باشد انتخاب شد. شکل ۱ محدوده مورد مطالعه به همراه موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک و چاه‌های پیرومتری را در منطقه



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت قزوین به همراه ایستگاه‌ها و چاه‌ها
Figure 1- Geographic location of the Qazvin Plain along with stations and wells

جدول ۱- خلاصه آماری بارندگی ایستگاه‌های منتخب در دوره مطالعه شده

Table 1- Statistical Summary of Rainfall at Selected Stations During the Study Period

شماره ایستگاه Station Number	ایستگاه سینوپتیک Synoptic Station	کد Code	از سال Year	میانگین بارندگی (mm) Average Precipitation	انحراف معیار Standard Deviation	کمینه (mm) Minimum	بیشینه (mm) Maximum
1	آشتجین Ashtgin	41-158	1347	344	111	128	627
2	دانسفهان Dansfahan	41-142	1350	212	60	68.5	358
3	رحیم آباد Rahimabad	41-071	1345	319	141	140.5	570

شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

شاخص SPI به طور رسمی در سال ۱۹۹۳ توسط مک کی و همکارانش (McKee et al., 1993) معرفی شد. این شاخص براساس نرمال سازی داده های بارش طراحی شده و این امکان را به محققان می دهد که الگوهای بارش را بدون توجه به توزیع های نرمال بررسی کنند (McKee et al., 1993). محاسبه شاخص SPI شامل چند مرحله کلیدی است. در ابتدا، داده های بارش برای یک دوره معین جمع آوری می شود؛ سپس، این داده ها براساس تابع توزیع نرمال، نرمال سازی می شوند. در این مرحله، برای هر مقدار بارش، نمره Z (متغیر تصادفی نرمال استاندارد که دارای میانگین صفر و انحراف معیار یک است) محاسبه می شود که این مقدار همان شاخص SPI است (Stagge et al., 2017). در شرایطی که داده ها توزیع نرمال نداشته باشند، محاسبه مستقیم SPI می تواند منجر به نتایج گمراه کننده شود. با این وجود می توان با استفاده از توزیع های جایگزین نظیر توزیع گامبل، ویزور و یا لاپلاس به مدل سازی دقیق تری از داده های بارش کمک و سپس SPI را محاسبه کرد. همچنین تضمینی وجود ندارد که داده ها به طور مطلق به توزیع نرمال تبدیل شوند. لذا توجه به نوع داده، حجم نمونه و شرایط خاص هر پدیده الزامی است تا از نتایج به دست آمده به دقت و صحت لازم دست یافت.

شاخص بارش استاندارد شده بر این اصل استوار است که کمبود مقدار بارش، اثرات مختلفی روی سطح آب های زیرزمینی، مقدار آب ذخیره یافته پشت سدها، رطوبت خاک، ذخیره برف و جریانات رودخانه ای دارد. شاخص SPI برای تشخیص کمبود میزان بارندگی در مقیاس های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه طراحی شده است. این مقیاس های زمانی اثرات خشکسالی را بر منابع آب قابل دسترس نشان می دهند. شرایط رطوبتی خاک؛ عکس العملی هستند در برابر ناهنجاری های بارندگی در مقیاس های نسبتاً کوتاه، در حالی که جریانات سطحی، آب های زیرزمینی و مقدار ذخایر پشت سدها؛ اثر ناهنجاری های دراز مدت بارندگی را منعکس می کنند.

از آنجا که شاخص SPI یک شاخص نسبی است، به راحتی می تواند برای مقایسه بارش در دوره های زمانی مختلف یا مناطق جغرافیایی مختلف استفاده شود. این ویژگی امکان شناسایی دوره های خشک و مرطوب را فراهم می آورد و به این ترتیب می تواند به تصمیم گیری ها در زمینه کشاورزی، مدیریت منابع آب، و پیش بینی وقوع بلایای طبیعی کمک کند. در واقع، این شاخص از آن جهت که قابلیت شناسایی الگوهای بارش را فراهم می آورد، در پیش بینی و مدیریت بحران های مرتبط با کمبود آب یا سیل بسیار کارآمد است (Hayes, Svoboda, & Wall, 1999).

در پژوهش حاضر برای محاسبه SPI ابتدا داده های ماهانه بارندگی

استخراج و سری های زمانی در مقیاس های ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه تشکیل گردید؛ هنگامی که رابطه احتمال داده های بارندگی موجود به دست آمد، احتمال نقطه ای هر یک از داده های بارندگی مشاهده شده، محاسبه و برای محاسبه انحراف بارندگی در تابع چگالی احتمال گاما که دارای میانگین صفر و انحراف معیار یک می باشد، مورد استفاده قرار گرفت و توزیع تجمعی گاما به روش مک کی محاسبه شد؛ در انتها متغیر تصادفی Z یا SPI مربوط به هر مقدار بارندگی از منحنی احتمالات تجمعی به دست آورده شد.

تابع احتمال توزیع تجمعی گاما برازش خوبی بر سری زمانی اقلیمی بارندگی دارد و به صورت تابع چگالی احتمال یا تابع فراوانی بر اساس رابطه (۱) به دست می آید:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \cdot x^{\alpha-1} \cdot e^{-x/\beta} \quad (1) \quad X > 0$$

که $\alpha > 0$ و $\beta > 0$ به ترتیب پارامتر شکل و مقیاس هستند، $X > 0$ مقدار بارندگی ماهانه برحسب میلی متر و $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما می باشد که از رابطه (۲) محاسبه می شود:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (2)$$

شاخص خشکسالی منبع آب زیرزمینی (GRI)

مندیسینو و همکاران (Mendicino & Senatore, 2008) در سال ۲۰۰۸ شاخص GRI را به عنوان شاخصی مفید و قابل اعتماد برای پایش و پیش بینی وضعیت خشکسالی برای منطقه مدیترانه پیشنهاد دادند. در این شاخص وضعیت های مختلف لیتولوژی زمین تأثیر مهمی بر واکنش هیدروژئولوژیکی حوضه در فصل تابستان نسبت به بارش های فصل زمستان دارند. تحلیل خصوصیات شاخص GRI بیانگر تغییرات مکانی زیاد این شاخص و حساسیت زیاد آن به خصوصیات لیتولوژی منطقه مورد مطالعه می باشد. شاخص GRI در ماه های تابستان از خود همبستگی بالایی برخوردار است و این قابلیت برای برخی از اهداف پیش بینی مناسب است. مقدار این شاخص از رابطه (۳) محاسبه می شود:

$$GRI = \frac{D_{y,m} - \mu_{D,m}}{\sigma_{D,m}} \quad (3)$$

که در این رابطه: $D_{y,m}$ مقادیر آب زیرزمینی در سال y و ماه m ، $\mu_{D,m}$ میانگین مقادیر آب زیرزمینی در ماه m و $\sigma_{D,m}$ انحراف معیار مقادیر آب زیرزمینی در ماه m می باشد (Chenari, 2006).

طبقات مختلف رطوبتی در شاخص GRI همانند شاخص SPI می باشد؛ پدیده خشکسالی زمانی اتفاق می افتد که مقادیر به طور مداوم منفی شده و به ۱- یا کمتر برسد؛ در صورتی که مقادیر مثبت نشان دهنده خاتمه خشکسالی می باشند. بنابراین هر واقعه خشکسالی مدت

تداومی دارد که با زمان شروع، خاتمه و شدت آن در هر ماه تا زمانی که خشکسالی دوام داشته باشد، تعریف می‌شود. در **جدول ۲** طبقات مختلف رطوبتی شاخص‌های GRI و SPI نشان داده شده است.

نتایج و بحث

بررسی وضعیت آب زیرزمینی با شاخص GRI

شکل ۲ به بررسی تغییرات تراز آب زیر زمینی در سه چاه یحیی‌آباد، رادکان یک و خوزبین پرداخته است؛ همان‌طور که ملاحظه می‌شود در هر سه نمودار دو روند دیده می‌شود.

قسمت (الف) عمق دسترسی به آب از ۲۶ متری سطح زمین در سال ۱۳۴۷ به ۶۴/۵ متری سطح زمین در سال ۱۳۹۰ رسیده است. به عبارت دیگر ۳۸/۵ متر افت طی ۴۴ سال اتفاق افتاده است؛ روند افت طبق شکل طی سال‌های ۱۳۷۴-۱۳۴۷ تقریباً ثابت و پیرامون ۱۰ متر بوده است، اما این مقدار از سال ۷۴ به بعد روند نزولی به خود گرفته و بیشترین افت طی سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۷۶ اتفاق افتاده است که معادل ۳۰ متر می‌باشد.

چاه رادکان یک هم مانند چاه یحیی‌آباد با افت سطح آب زیرزمینی همراه بوده است که افت ۱۱/۸ متر از سال‌های ۱۳۴۴ تا ۱۳۷۷ و افت

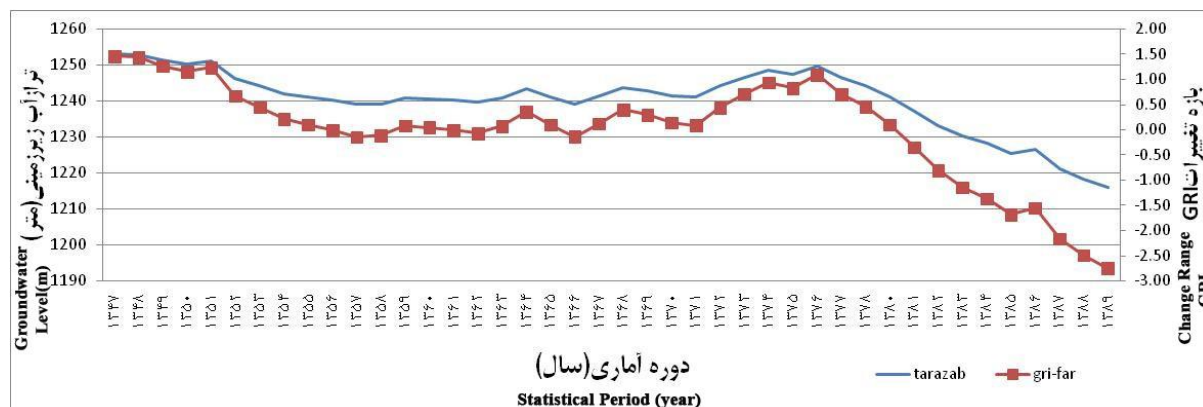
۳۸/۵ متری از سال ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۰ به ثبت رسیده است. این مقدار افت در چاه خوزبین نیز همین روند را داشته است؛ به گونه‌ای که از سال ۱۳۴۳ تا ۱۳۷۷ روند تقریباً ثابت بوده و طی این ۳۵ سال ۵/۲ متر افت داشته؛ یعنی به ازای هر سال ۱۵ سانتی‌متر افت به ثبت رسیده است. در حالی که این مقدار افت طی سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۰ به ۴۵ متر رسیده است؛ به این معنا که طی این ۱۴ سال، به ازای هر سال ۳/۲ متر افت ثبت شده است و دلیل آن افزایش چاهای عمیق و نیمه‌عمیق در سطح منطقه است.

شکل ۳ انطباق تراز آب زیرزمینی فروردین ماه با بارندگی سالانه را نشان می‌دهد؛ بررسی تراز آب در این ماه می‌تواند نشان‌دهنده میزان تأثیر بارش‌ها بر منابع آبی سطحی و زیرزمینی باشد. در بسیاری از مناطق، فروردین به‌عنوان ماهی حیاتی در چرخه آبی شناخته می‌شود، زیرا آب‌های ذخیره شده در این ماه می‌توانند تأثیر زیادی بر تولید محصولات کشاورزی داشته باشند. با تجزیه و تحلیل تراز آب در فروردین و بارش کل سال، می‌توان به درک بهتری از روندهای بلندمدت بارش و تأثیرات آن بر ذخایر آبی و تغییرات اقلیمی رسید. هنگامی که تراز آب در فروردین ماه علی‌رغم بارش‌های کم در کل سال افزایش یافته است، نشان‌دهنده نفوذ رواناب‌های ناشی از بارندگی‌های ماه‌های قبل است.

جدول ۲- طبقات مختلف خشکسالی و ترسالی بر حسب مقادیر GRI و SPI

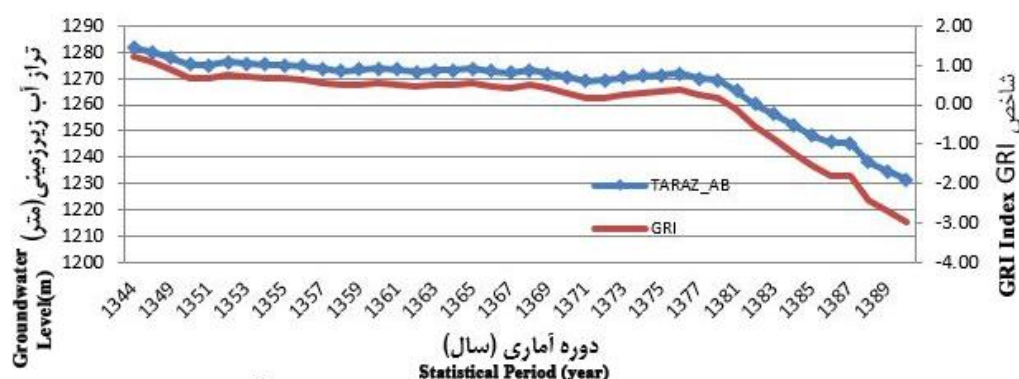
Table 2- Different Levels of Drought and Flooding Based on GRI and SPI Values

طبقات	مقادیر شاخص SPI	مقادیر شاخص GRI	ویژگی بارشی
Classes	SPI Index Values	GRI Index Values	Precipitation Characteristics
1	≥ 2	≥ 2	ترسالی شدید Severe Wetness
2	1.5 تا 1.99	1.5 تا 1.99	خیلی مرطوب Very Humid
3	1 تا 1.49	1 تا 1.49	ترسالی متوسط Moderate Wetness
4	0.5 تا 0.99	0.5 تا 0.99	ترسالی ضعیف Weak Wetness
5	-0.49 تا 0.49	-0.49 تا 0.49	نرمال Normal
6	-0.5 تا -0.99	-0.5 تا -0.99	خشکسالی ضعیف Weak Drought
7	-1 تا -1.49	-1 تا -1.49	خشکسالی متوسط Moderate Drought
8	-1.5 تا -1.99	-1.5 تا -1.99	خشکسالی شدید Severe Drought
9	$-2 \leq$	$-2 \leq$	خشکسالی بسیار شدید Very Severe Drought



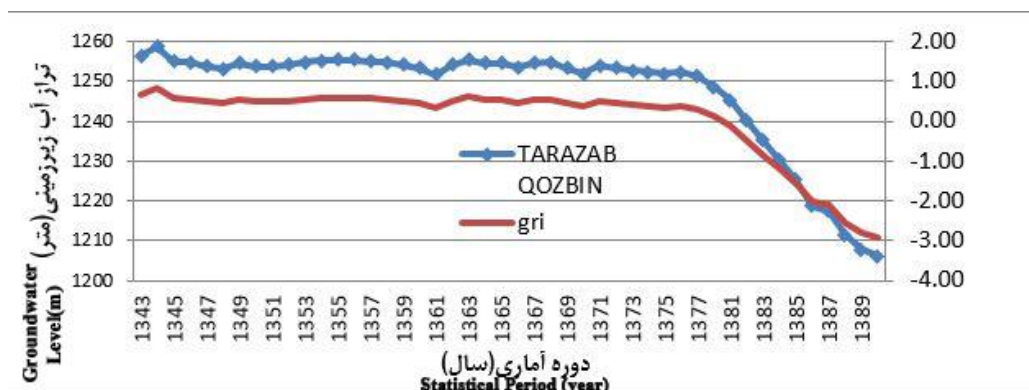
الف- تطابق شاخص GRI و تراز آب زیرزمینی چاه یحیی آباد و ایستگاه سینوپتیک آشتجین-فروردین ماه

a- Correlation of the GRI index and groundwater level of Yahyaabad well and the synoptic station of Ashtgin - March



ب- تطابق شاخص GRI چاه رادکان یک و تراز آب زیرزمینی ایستگاه سینوپتیک رحیم آباد-فروردین ماه

b- Correlation of the GRI index of Radkan yek well and the groundwater level of the synoptic station of Rahimabad - March



ج- تطابق شاخص GRI چاه خوزبین و تراز آب زیرزمینی ایستگاه سینوپتیک دانشفهان-فروردین ماه

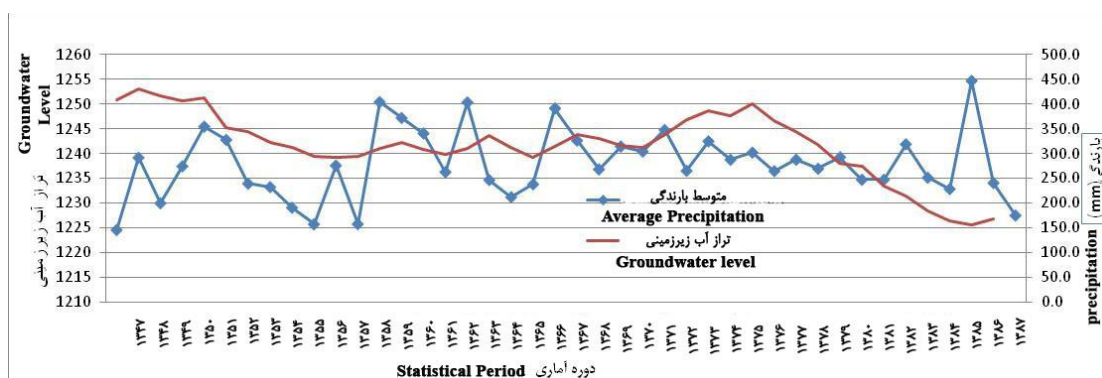
c- Correlation of the GRI index of Khuzbin well and the groundwater level of the synoptic station of Dansfahan - March

شکل ۲- تطابق شاخص GRI و تراز آب زیرزمینی در سه چاه

Figure 2- Correlation of the GRI index and groundwater level in three wells

ترتیب در نمودارهای قسمت (ب) و (ج) هم همین نتیجه را می توان گرفت. علت تفاوت این تأخیرهای زمانی به علت تفاوت در شرایط هر دشت است از جمله به عمق سطح آب زیرزمینی، خصوصیات لیتولوژی و خصوصیات هیدرولیکی آبخوان آن منطقه بستگی دارد.

همان طور که از شکل ۴ مشخص است، در قسمت (الف) شاخص SPI 48 ماهه و شاخص GRI 12 ماهه باهم انطباق داده شده که نشان می دهد تأخیر زمانی بین دو نمودار وجود دارد؛ به گونه ای که با کاهش بارندگی و وجود خشکسالی براساس شاخص SPI پس از چند ماه شاخص GRI هم خشکسالی را به اثبات رسانیده است. به همین

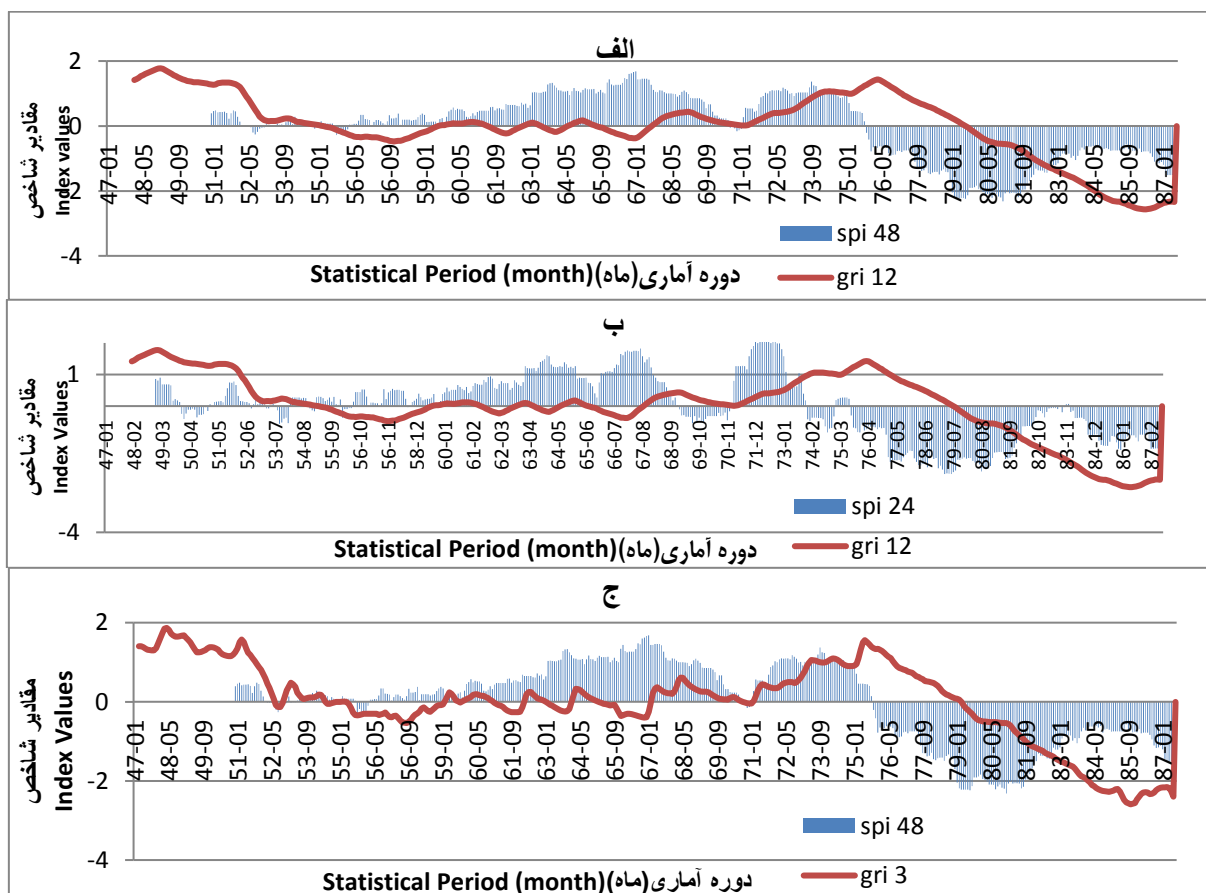


شکل ۳- تطابق تراز آب زیرزمینی فروردین ماه و مجموع بارندگی سالانه-چاه یحیی آباد

Figure 3- Correlation of groundwater level in Farvardin and total annual precipitation - Yahyaabad

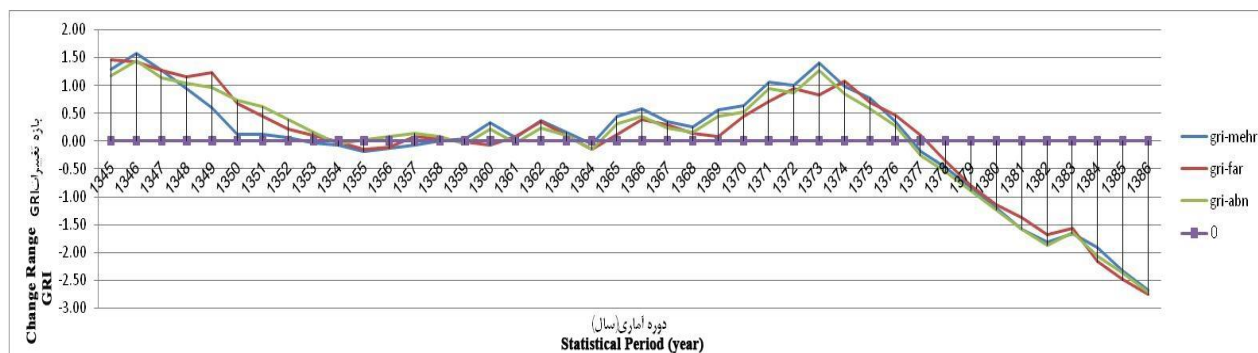
سال‌های ۸۰ تا ۸۱ به خشکسالی متوسط رسیده، در سال‌های ۸۱ تا ۸۳ به خشکسالی شدید رسیده و از سال ۸۳ به بعد به خشکسالی بسیار شدید رسیده است که این موضوع از افت ۳۱/۵ متری سطح ایستابی کاملاً نمایان است. روند شاخص SPI هم با توجه به بازه‌های شاخص از سال ۷۶ تا سال ۸۲ خشکسالی شدید را نشان می‌دهد.

از سال ۷۲ تا ۷۴ با افزایش قابل توجه بارندگی‌ها، سطح آب زیرزمینی حدود ۱/۵ متر افزایش یافته است، اما در سال‌های بعد با کاهش میزان بارندگی تا سال ۸۶ روند نزولی بروز نموده است. بررسی روند شاخص GRI در این شکل، ورود به آستانه خشکسالی ضعیف را از سال ۷۹ نشان می‌دهد که این روند با شیب تندی ادامه پیدا کرده، در



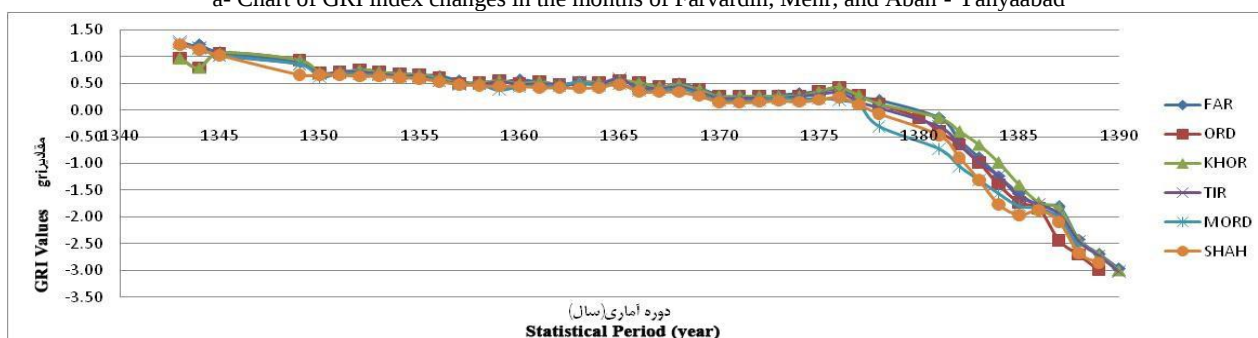
شکل ۴- تطابق شاخص SPI و GRI با مقیاس‌های زمانی متفاوت-چاه یحیی آباد

Figure 4- Correlation of GRI and SPI indices with different time scales- Yahyaabad



الف- نمودار تغییرات شاخص GRI در سه ماه فروردین، مهر و آبان - یحیی آباد

a- Chart of GRI index changes in the months of Farvardin, Mehr, and Aban - Yahyaabad



ب- نمودار تغییرات شاخص GRI در شش ماه فروردین تا شهریور - رادکان یک

b- Chart of GRI index changes over six months from Farvardin to Shahrivar - Radakan yek

شکل ۵- تغییرات شاخص GRI در ماه‌های متفاوت

Figure 5- Changes in the GRI index in different months

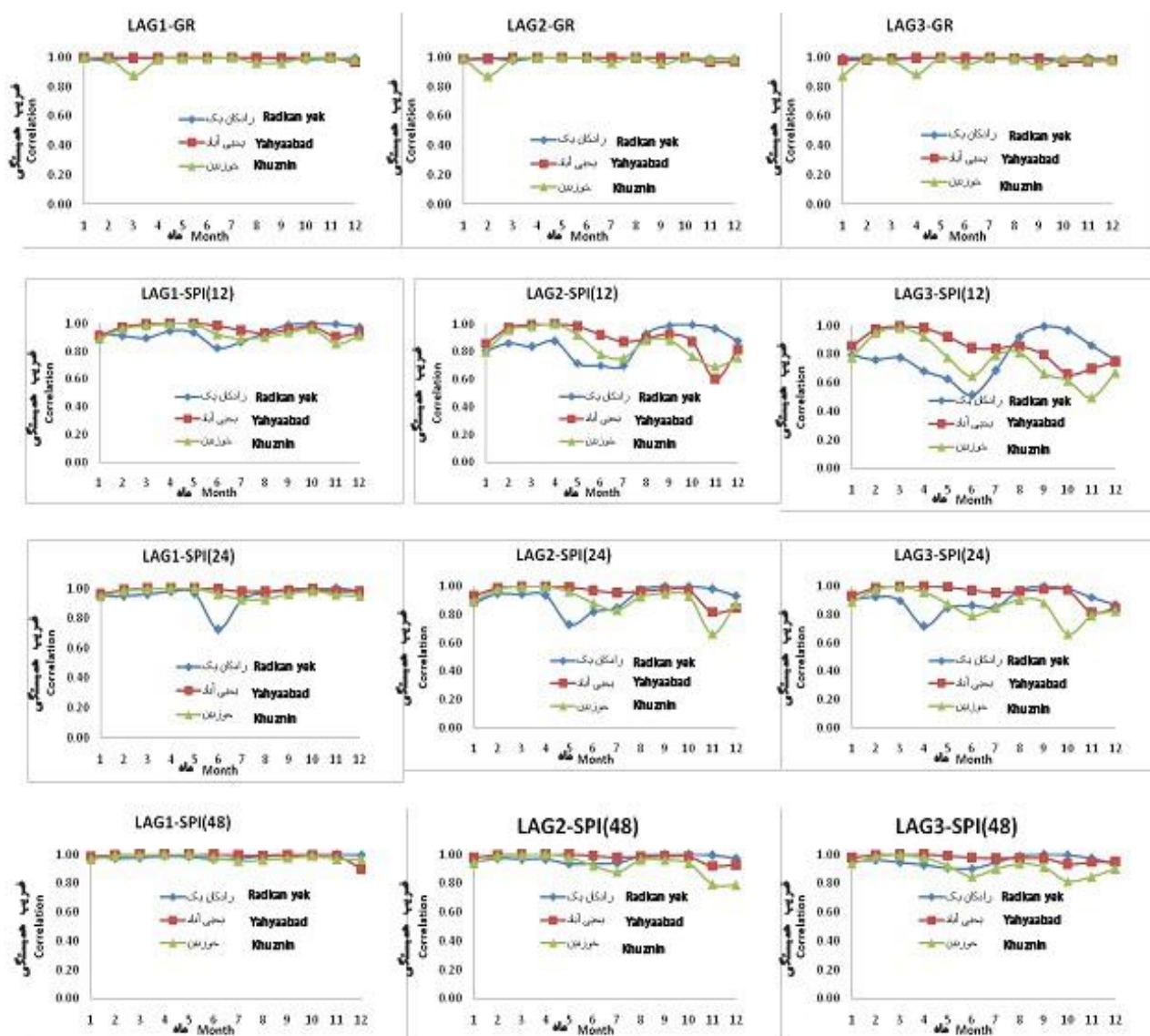
می‌باشد. در مقایسه با سال‌های قبل از ۱۳۷۶ میزان برداشت به‌دلایلی از جمله کاهش بارندگی، خشکی قنات و چشمه‌ها و کاهش آبدی چاه‌های موجود، افزایش چشمگیری داشته است؛ هر چند عامل اقلیمی بیشترین تأثیر را در افت سطح ایستابی طی سال‌های اخیر داشته، ولی این بحران و برداشت ۷ برابر قبل، حاصل مجموعه عواملی از جمله طرح توسعه نیروگاه شهید رجایی (با توجه به نیاز آبی قابل ملاحظه‌ای که دارد) و افزایش چاه‌های بهره‌برداری است که نیازمند تحقیقی مجزا جهت تعیین درصد نقش عامل انسانی و اثرات زیست‌محیطی در خشکسالی آب‌های زیرزمینی می‌باشد.

خود همبستگی شاخص‌های SPI و GRI

در شکل ۶ خود همبستگی برای GRI و SPI ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه نشان داده شده است که با تأخیر زمانی ۱، ۲ و ۳ ماهه برای سه ایستگاه مختلف مشاهده می‌شود.

طبق شکل ۵ بررسی تغییرات شاخص GRI در سه ماه فروردین، مهر و آبان، مبین این است که تغییرات شاخص طی این سه ماه تقریباً مشابه بوده و بررسی‌های آماری نشان می‌دهد تغییرات این سه نمودار در سطح ۵٪ معنی‌دار نبوده است و اختلافات آن‌ها قابل چشم‌پوشی است.

روند نزولی شاخص GRI طی سال‌های ۱۳۷۶-۱۳۹۰ به جنبه‌های مختلفی مربوط می‌شود؛ نخستین دلیل می‌تواند ناشی از تغییرات اقلیمی و افزایش دما باشد که منجر به تبخیر بیشتر و کاهش رطوبت خاک می‌شود. به‌طوری‌که حتی در سال‌هایی که بارش بیشتری وجود دارد، ممکن است تبخیر به قدری باشد که رطوبت خاک نتواند به سطح نرمال برسد. دلیل دیگر، تغییرات در الگوهای بارش است. به عبارتی، در برخی از مناطق ممکن است بارش در زمان‌های خاصی از سال (مانند بارش‌های فصلی) افزایش یابد، اما این افزایش بارش به‌خوبی توزیع نشده و نمی‌تواند نیازهای آبی خاک را در تمام طول سال برآورده کند. در این وضعیت، مقادیر بارش به‌ظاهر افزایش یافته، اما مقادیر شاخص به‌دلایلی چون تبخیر بالا و عدم توزیع مناسب بارش، همواره نزولی



شکل ۶- خود همبستگی مقادیر SPI ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه و GRI با تأخیر زمانی های ۱، ۲ و ۳ ماهه

Figure 6- Autocorrelation of SPI values for 12, 24, and 48 months and GRI with time lags of 1, 2, and 3 months

تأثیر خشکسالی‌ها بر منابع آب زیرزمینی در هر منطقه به عمق سطح آب زیرزمینی، خصوصیات خاک و خصوصیات هیدرولیکی آبخوان آن بستگی دارد.

مقادیر همبستگی بالای GRI در فصل تابستان، می‌تواند برای پیش‌بینی این شاخص استفاده شود. ابتدا برای سری زمانی GRI و SPIها مقادیر خود همبستگی بدست آمد و معلوم شد که مقادیر ماه‌های با بارش کم دارای خود همبستگی بیشتری هستند؛ یعنی مقدار ماه ۵ نسبت به ماه ۴ دارای همبستگی است، به عبارتی می‌توان مقدار GRI ماه ۵ را از ماه ۴ پیش‌بینی کرد و به آن پیش‌بینی اطمینان بیشتری داشت، اما نمی‌توان از ماه‌های زمستان ماه‌های دیگر را پیش‌بینی کرد یا به آن پیش‌بینی اطمینان داشت.

مقادیر خود همبستگی با افزایش تأخیر زمانی و کاهش مقیاس زمانی کمتر می‌شود و برای ماه‌های تابستان (ماه‌های ۴ تا ۸) همبستگی بالایی مشاهده می‌شود؛ به‌ویژه برای مقیاس زمانی زیاد. این حالت برای GRI به‌طور آشکارتری مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که برای فصل تابستان مقادیر خود همبستگی تقریباً برابر یک است. این موضوع نشان می‌دهد که در پایان فصل بارش (اواخر زمستان)، تغذیه آبخوان متوقف می‌شود، در عوض در ماه‌های پاییز و زمستان، با وقوع بارش و تأثیر آن بر روی تغذیه آبخوان (افزایش ذخیره آبخوان و تغییر GRI) میزان خود همبستگی شاخص‌ها کاهش می‌یابد. زمان نفوذ بارش می‌تواند متغیر باشد و از سه تا شش ماه طول بکشد؛ علت تفاوت این تأخیرهای زمانی به علت تفاوت در شرایط هر دشت است؛

همبستگی بالای شاخص GRI با شاخص خشکسالی SPI در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه نشان می‌دهد که منابع آب زیرزمینی در این منطقه تحت تأثیر پدیده‌های ترسالی و خشکسالی است و با تأخیر زمانی در حدود سه تا شش ماهه خشکسالی هواشناسی به خشکسالی آب زیرزمینی مبدل می‌شود. اسلامیان و همکاران (Eslamian et al., 2009) نیز در تحقیقات خود تأخیر زمانی اثرات خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی دشت‌های قزوین، بوئین زهرا و همدان را سه ماهه گزارش کردند.

جدول ۴ میزان افت سطح آب در آبخوان دشت قزوین را نشان می‌دهد که آمار بسیار نگران‌کننده‌ای دارد؛ به‌نحوی که تقریباً طی ۱۵ سال، از سال ۷۵ تا ۹۰ میزان افت به ۴۰ متر رسیده است این در حالی است که طرح توسعه نیروگاه شهید رجایی در سال‌های اخیر و با توجه به نیاز آبی قابل ملاحظه‌ای که دارد، می‌تواند به تشدید این مسئله کمک کند. که در مقابل میزان افت در ۲۰ سال گذشته‌اش (۱۳۴۵-۱۳۷۵) که حدود ۷ متر است، نسبتی ۴۰ به ۷؛ یعنی حدود ۶ برابر دارد که نشان‌دهنده آن است علاوه بر عوامل اقلیمی، عوامل انسانی از قبیل افزایش چاه‌های بهره‌برداری در منطقه در کاهش مقادیر GRI بی‌تأثیر نبوده است و نقش به‌سزایی در تشدید خشکسالی آب زیرزمینی دارد.

با این حال، شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش مقیاس زمانی SPI، ضریب همبستگی هم افزایش می‌یابد و از طرف دیگر ضریب همبستگی GRI از همه بزرگتر است. این نتیجه بدست می‌آید که شباهتی بین رفتار SPI با بزرگترین مقیاس زمانی و GRI وجود دارد.

همبستگی شاخص‌های SPI و GRI

جدول ۳ مقادیر همبستگی بین شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه را طی دوره ۱۳۸۷-۱۳۴۷ نشان می‌دهد. برای تعیین اثر تأخیر زمانی خشکسالی هواشناسی بر خشکسالی هیدروژئولوژیکی، ضریب همبستگی بین شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی مختلف با شاخص GRI در فواصل زمانی ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ ماهه بررسی شد که با توجه به این جدول، در دشت قزوین بیشترین همبستگی بین شاخص‌های GRI و SPI ۴۸ ماهه دیده می‌شود و مقادیر همبستگی برای SPI ۲۴ و ۴۸ ماهه در تأخیر زمانی‌های ۳ تا ۶ ماه معنی‌دار بوده است که در جدول مشخص شده است. این مطلب با نتایج مطالعات قلعه‌نی و همکاران (Mohammadi Ghaleni et al., 2011) و ملکی‌نژاد و پورشرعیاتی (Malekinezhad & Poorshareyati, 2011) نیز مطابقت دارد.

جدول ۳- همبستگی مقادیر دو شاخص GRI و SPI در محدوده یحیی‌آباد

Table 3- Correlation of the values of the two indices GRI and SPI in the Yahya abad area

1348-1387						
Spi-6	Spi-9	Spi-12	Spi-18	Spi-24	Spi-48	
0.14	0.15	0.17	0.24	0.28	0.40	no lag
0.13	0.14	0.18	0.24	0.28	0.41	lag 1
-0.12	-0.12	0.09	0.10	0.22	0.51	lag 2
-0.11	0.00	0.12	0.11	0.44**	0.54**	lag 3
-0.13	0.02	0.14	0.11	0.48**	0.57**	lag 4
0.11	0.17	0.15	0.21	0.53**	0.61**	lag 5
0.11	0.17	0.15	0.21	0.53**	0.61**	lag 6

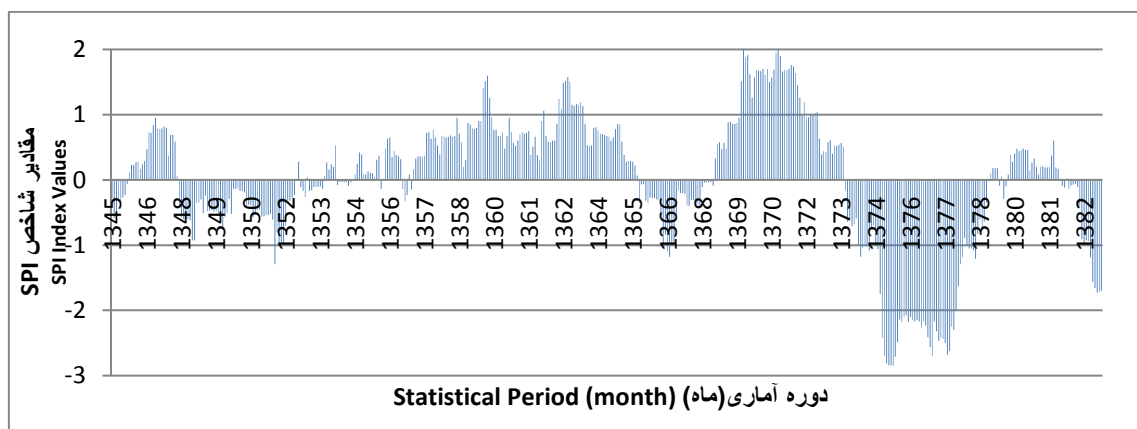
** : معنی‌دار در سطح ۹۹٪

** : significant at the 99% level

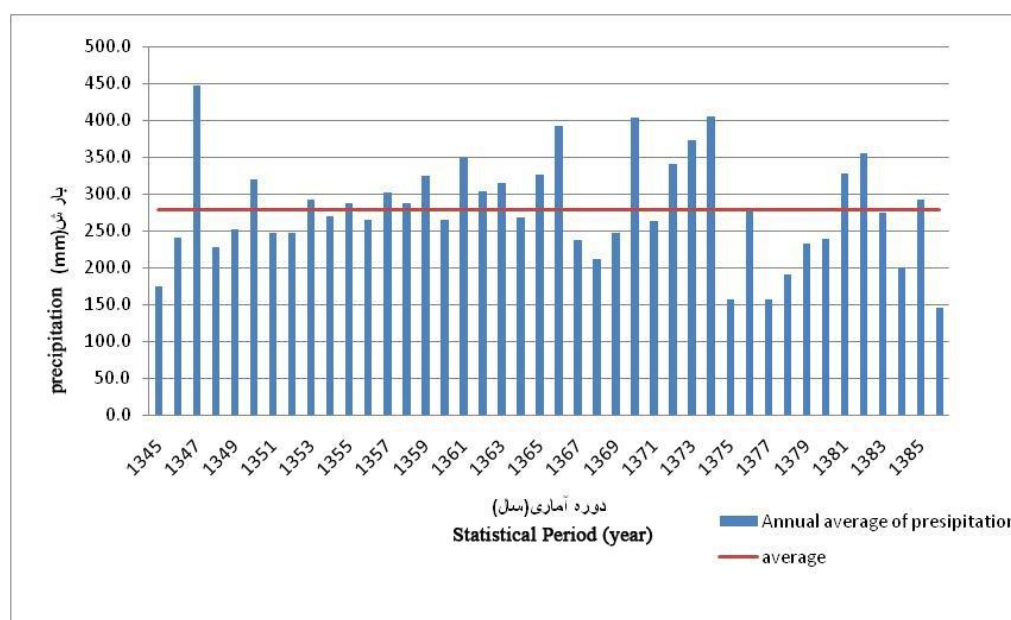
جدول ۴- میزان افت چاه‌های منتخب آبخوان قزوین

Table 4- Decline Rate of Selected Wells in the Qazvin Aquifer

چاه Well	دوره آماری Statistical Period	
	سال‌های ۴۵-۷۵ Years 1966-1996	سال‌های ۷۵-۹۰ Years 1996-2011
خوزبین Khozbin	۴.۶ متر (m)	۴۶ متر (m)
رادکان یک Radkan yek	۱۰ متر (m)	۴۰ متر (m)
یحیی آباد Yahya abad	۵.۶۵ متر (m)	۳۱.۵ متر (m)



شکل ۷- گراف مقادیر شاخص SPI، ۴۸ ماهه
Figure 7- SPI Index Values Graph, 48 Months



شکل ۸- نمودار بارندگی سالانه دشت قزوین و میانگین بارش‌ها
Figure 8- Annual Precipitation Chart of the Qazvin Plain and Average Rainfall

آب زیرزمینی در این منطقه از عملکرد خوبی برخوردار است. به گونه‌ای که سال‌های تر و خشک را به خوبی نشان داده و انطباق مناسبی با رفتار سفره آب زیرزمینی دارد و مطابق با آنچه مندیسینو و همکاران (Mendicino & Senatore, 2008) نتیجه گرفتند، شاخصی است که با بیان صحیح خشکسالی‌ها در منطقه نسبت به سایر شاخص‌های خشکسالی به خصوص شاخص‌های خشکسالی هواشناسی برتری دارد. با توجه به چالش‌های جهانی مربوط به آب در قرن بیست و یکم، استفاده از شاخص GRI به عنوان یک ابزار کارآمد در ارزیابی و مدیریت بحران‌های خشکسالی این امکان را به مسئولین و محققین می‌دهد تا بهترین تصمیمات را اتخاذ کرده و بتوانند اقدامات خود را بر اساس شدت و گستردگی خشکسالی اولویت‌بندی کنند که منجر به ایجاد برنامه‌های

در شکل ۷ به بررسی شاخص SPI در مقیاس ۴۸ ماهه پرداخته شده است؛ این شکل خشکسالی شدید (طبق جدول ۲) منطقه مورد مطالعه را در سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۷۹ نشان می‌دهد. شکل ۸ بارندگی سالانه دشت قزوین است که با روش تیسن‌بندی به وسیله میان‌یابی کریجینگ بدست آمده است. همانطور که در شکل مشخص است، میانگین بارندگی سالانه دشت ۲۷۹ میلی‌متر است.

نتیجه‌گیری

در بررسی بومی‌سازی شاخص GRI در منطقه دشت قزوین این نتیجه حاصل شد که شاخص GRI جهت بررسی و ارزیابی خشکسالی

زیرزمینی پرداخته شود.

در نهایت اگر استفاده از منابع آب دشت قزوین محدود و متوازن نشود، بزودی این منطقه با وجود سابقه‌ی سکونت چند هزار ساله، از لحاظ مهم‌ترین عامل حیات خود، یعنی آب، با مشکلات جدی روبرو خواهد شد. برای رویارویی با چالش خشکسالی آب زیرزمینی، ضرورت دارد که تدابیر و راهکارهایی اجرایی شوند. از جمله این تدابیر می‌توان به راهکارهای مدیریتی جهت کنترل و نظارت بر حفر چاه‌ها و میزان برداشت آب از آن‌ها و به‌منظور جلوگیری از اضافه برداشت و مشکلات ناشی از آن اشاره کرد که نیازمند تحقیقات جداگانه دیگری می‌باشد.

سپاسگزاری

از دانشگاه تهران و شرکت مدیریت منابع آب ایران به‌دلیل تأمین امکانات و داده‌های لازم جهت انجام این تحقیق و تهیه مقالات مربوطه تشکر و قدردانی می‌شود.

عملیاتی مؤثرتری جهت مدیریت منابع آب خواهد شد و به کاهش هدر رفت منابع و بهینه‌سازی استفاده از آب کمک خواهد کرد. در نهایت، به‌کارگیری این شاخص و ابزارهای مشابه می‌تواند نقش اساسی در توسعه پایدار و حفظ منابع آب زیرزمینی داشته باشد.

بررسی خشکسالی سال‌های ۱۳۷۵-۱۳۸۰ نشان می‌دهد که اثرات خشکسالی تا سال‌های بعد از آن بر منابع آب زیرزمینی ادامه داشته است. در خشکسالی این سال‌ها که طی آن بارندگی منطقه در مقایسه با میانگین دراز مدت ۲۵ درصد کاهش داشته است، آبدهی چشمه‌ها و قنوات کاهش پیدا کرده و افت سطح ایستابی منطقه بی‌سابقه بوده است و مطابق با شاخص GRI این افت در سال‌های بعد هم ادامه پیدا کرده است؛ به‌گونه‌ای که با افزایش بارندگی در سال‌های ۱۳۸۱ و بعد از آن هم افت سطح ایستابی و ادامه روند خشکسالی آب زیرزمینی اتفاق افتاده است. هرچند عامل اقلیمی بیشترین تأثیر را در افت سطح ایستابی طی سال‌های اخیر داشته ولی این بحران و برداشت ۷ برابر قبل، حاصل مجموعه عواملی از جمله برداشت‌های بی‌رویه است که باید در تحقیقی مجزا به تعیین درصد نقش عامل انسانی در خشکسالی آب‌های

References

1. Aghchehkandi, A., Solaimani, K., Habibnezhad Roshan, M., & Shahedi, K. (2023). Evaluation impact of meteorological drought on groundwater level in Haraz watershed in Mazandaran province. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 14(1), 215-231. (In Persian with English abstract)
2. Azizi, G. (2003). Relationship between recent drought and groundwater resources in Qazvin plain. *Geographical Research*, 35(3), 131-143. (In Persian)
3. Brocque, A., Kath, J., & Smith, K. (2018). Chronic groundwater decline: A multi-decadal analysis of groundwater trends under extreme climate cycles. 561, 976-986 <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.059>
4. Chenari, M. (2006). Analysis of changes in various drought indices using the Markov chain; in the climatic samples of Southern Alborz. Tehran: Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran. (In Persian)
5. Climatology and aerology. (2011). Retrieved from <https://climatology.ir> (Last access 10 Jun2011)
6. Eimani, M., & Talebi Esfandarani, A. (2011). Effects of drought on aquifer level changes in Yazd Bahabad plain, using GRI indicators and SPI. 4th Iran Water Resources Management Conference. Tehran: AmirKabir University. (In Persian) <https://civilica.com/doc/117057/>
7. Eslamian, S., Nasri, M., & Rahimi, N. (2009). Wet and dry periods and it's effects on water resources changes in Buin Plain watershed. *Geography and Environmental Planning* 33, 75-90. <https://www.magiran.com/p777361>
8. Hayes, M., Svoboda, M., & Wall, N. (1999). Drought monitoring and assessment. *Water Environment Research*, 71(2), 717-722. (In Persian with English abstract)
9. Halder, S., Roy, M.B., & Roy, P.K. (2020). Analysis of groundwater level trend and groundwater drought using standard groundwater level index: A case study of an eastern river basin of west Bengal, India. *SN Applied Sciences*, 2(507). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2302-6>
10. Hsu, K.C., Wang, C.H., Chen, K.C., Chen, C.T., & Ma, K.W. (2007). Climate induced hydrological impacts on the groundwater system of the Pingtung Plain, Taiwan. *Journal of Hydrogeology*, 5, 903-913. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0137-x>
11. Jamshidi Avanaki, M. (2013). Assessment of drought effects on the groundwater involving drought indices. MSc Thesis, Faculty of Agriculture, University of Tehran.
12. Khan, S., Gabriel, H.F., & Rana, T. (2008). Standard precipitation index to track drought and assess impact of rainfall on water tables in irrigation areas. *Irrigation Drainage System*, 22, 159-177. <http://doi.org/10.1007/s10795-008-9049-3>
13. Lezzaik, K., Milewski, A., & Mullen, J. (2018). The groundwater risk index: development and application in the Middle East and North Africa region. *Science Total Environment*, 628, 1149-1164 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.066>
14. Malekinezhad, H., & Poorshareyati, R. (2011). Analysis of drought trends in the Marvast plain using the

- groundwater resource index (GRI). *4th Iran Water Resources Management Conference*. Tehran: AmirKabir University. (In Persian with English abstract) <https://civilica.com/doc/116924/>
15. McKee, T., Doesken, N., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, (pp. 179-184). Boston, Massachusetts: American Meteorological Society.
 16. Mendicino, G., & Senatore, A. (2008). A Ground water resource index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Hydrology*, 357, 282-302. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.05.005>
 17. Mohammadi Ghaleni, M., Ebrahimi, K., & Araghinejad, S. (2011). Assessment of the impact of drought on groundwater level fluctuations using the standardized precipitation index-case study Saveh aquifer. *4th Iran Water Resources Management Conference*. Tehran: AmirKabir University. (In Persian with English abstract). <https://civilica.com/doc/117068/>
 18. Naderianfar, M., Faryabi, A., Kouhestan, S., & Safavi Gardini, M. (2021). Investigating the groundwater fluctuations level in basin of Halil River, Jiroft. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 11(4), 141-159. (In Persian with English abstract).
 19. Sarkar, M., & Chinnasamy, P. (2023). Assessing the impact of precipitation on Hardrock aquifer system using standard precipitation index and groundwater resilience index: a case study of Purulia, West Bengal, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30158-8>
 20. Seif, M., Mosaedi, A., & Mohammadzadeh, H. (2011). Investigation of hydrogeological drought in the Fasa plain aquifer using the Groundwater Resource Index (GRI). *15th Symposium of Geological Society of Iran*. Tehran: Tarbiat Moallem University. (In Persian). <https://civilica.com/doc/135215/>
 21. Solaimani, K., Ramezani, N., Ahmadi, M.Z., & Bayat, F. (2005). Analysis of drought and flood trends in the watersheds of Mazandaran. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources of the Caspian Sea*, 3(1), 13-28. (In Persian). <https://www.magiran.com/p331910>
 22. Stagge, J., Hayes, M., & Svoboda, M. (2017). *Drought Monitoring: The Standardized Precipitation Index*. Klüver Academic Publishers.
 23. Weather Report. (2020), United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific.

Comparing the Effects of Bacterial and Fungal Biofertilizers on Wheat Yield and Water Use Efficiency under Drought Stress: The Role of ACC-deaminase and Various Fungal Formulations

S.S. Hosseini^{1*}, F. Rejali², P. Keshavarz³

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

(*- Corresponding Author Email: sajjadhosseini1369@gmail.com)

2- Department of Soil Biology and Biotechnology, Soil and Water Research Institute, AREEO, Karaj, Iran

3- Soil and Water Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran

Received: 08-10-2024

Revised: 21-01-2025

Accepted: 29-01-2025

Available Online: 29-01-2025

How to cite this article:

Hosseini, S.S., Rejali, F., & Keshavarz, P. (2025). Comparing the effects of bacterial and fungal biofertilizers on wheat yield and water use efficiency under drought stress: The role of ACC-deaminase and various fungal formulations. *Journal of Water and Soil*, 39(1), 17-34. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90176.1440>

Introduction

Water scarcity is a major challenge in Iran, with annual rainfall averaging 235 to 260 mm, only a third of the global average. Wheat, a staple crop in Iran, faces severe yield reduction under drought conditions. Utilizing biofertilizers like plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and arbuscular mycorrhizal (AM) fungi could help enhance water use efficiency (WUE) and yield in such environments. However, the effectiveness of biofertilizers varies based on several factors, including the type of biofertilizer (bacterial or fungal), the strain or species used, and the formulation (solid or liquid). Despite the established benefits of both PGPR and AM fungi in enhancing drought tolerance and WUE, there is a lack of comparative studies that examine the specific performance of bacterial versus fungal biofertilizers and their formulations under varying levels of water stress. Thus, the objectives of this study are as follows: 1) to identify the most suitable type of biofertilizer (bacterial or fungal) for improving wheat yield and WUE under drought conditions in Mashhad's climatic conditions; 2) to determine the effect of ACC deaminase enzyme on the efficiency of PGPR in enhancing wheat yield and WUE; 3) to compare the performance of AM fungal biofertilizers in two formulations (powder and liquid) and between single-species and multi-species inoculants.

Material and Methods

The experiment was conducted as a split-plot design with three replicates, where irrigation levels constituted the main plots, and biofertilizer treatments formed the subplots. The irrigation treatments included full irrigation (100% of wheat's water requirement), mild drought stress (85%), and severe drought stress (65%). The biofertilizer treatments were: no biofertilizer (F1), serving as a control; *Pseudomonas fluorescens* producing ACC-deaminase (F2); *P. fluorescens* without ACC-deaminase (F3); AM fungi (*Rhizoglyphus irregularis*) in liquid form (F4); and (5) AM fungi (*R. irregularis*, *Funneliformis mosseae*, and *Claroideoglomus etunicatum*) in powdered form (F5).

Results and Discussion

Both irrigation levels and biofertilizer types had significant impacts on root colonization, yield, and WUE.



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90176.1440>

Reducing irrigation from 100% to 85% and 65% of crop water requirements significantly reduced root colonization across all treatments. Among the bacterial treatments, only *P. fluorescens* producing ACC-deaminase (F2) showed a significant positive effect under severe drought (65% irrigation). This treatment increased grain yield by 9%, biological yield by 7%, and WUE by 6.8% compared to the control (F1). The presence of ACC-deaminase likely contributed to mitigating the effects of drought-induced ethylene, promoting better root growth and nutrient uptake under water stress. In contrast, *P. fluorescens* without ACC-deaminase (F3) did not significantly improve yield or WUE, emphasizing the importance of ACC-deaminase in promoting drought tolerance. Fungal biofertilizers outperformed bacterial treatments in grain and biological yield, as well as WUE. Under severe drought, powdered AM fungi (F5) increased grain yield by 26% and biological yield by 21% compared to the control, and WUE based on grain yield improved by 26%. This superior performance of AM fungi, particularly in powdered form, can be attributed to their ability to enhance nutrient and water uptake under drought conditions. These findings corroborate earlier studies that demonstrated AM fungi's ability to improve crop yield and WUE under drought stress by enhancing water uptake, nutrient availability, and improving the plant's physiological responses, such as maintaining cell membrane stability and increasing antioxidant activity. The powdered formulation of AM fungi (F5) showed greater effectiveness than the liquid form (F4). The higher colonization rates and performance in yield improvement may be due to the inclusion of multiple fungal species in the powdered form. The performance differences between the liquid and powdered AM fungi formulations may also be influenced by the physical properties of the biofertilizer since powdered inoculants are most effective when applied to the seeds of grasses like wheat and barley, as the structure of these seeds allows for better adhesion of the powder.

Conclusion

In conclusion, among the bacterial biofertilizers, only *P. fluorescens* producing ACC-deaminase significantly enhanced plant performance under severe drought, underscoring the importance of ACC-deaminase in alleviating drought stress. However, fungal biofertilizers, especially in powdered form, were more effective overall in improving yield, biological productivity, and WUE under varying levels of water stress. This research confirms that the application of AM fungi can serve as an effective strategy for improving wheat yield and increasing WUE in the climatic conditions of Mashhad. Overall, the observed differences in the effectiveness of these biofertilizers suggest that the appropriate selection of both type and formulation of biofertilizers can significantly contribute to managing water stress and improving crop production.

Keywords: Arbuscular mycorrhizal fungi, Drought stress, Irrigation levels, Microorganisms, PGPR

مقایسه تأثیر کودهای زیستی باکتریایی و قارچی بر عملکرد و کارایی مصرف آب گندم در شرایط تنش آبی: نقش آنزیم ACC-دآمیناز و فرمولاسیون‌های مختلف قارچی

سیدسجاد حسینی^{۱*} - فرهاد رجالی^۲ - پیمان کشاورز^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰

چکیده

این آزمایش با هدف انتخاب نوع کود زیستی (باکتریایی یا قارچی) و فرمولاسیون کودی مناسب برای گیاه گندم به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در ایستگاه تحقیقاتی طرق، واقع در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی در طی سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ اجرا شد. کرت‌های اصلی شامل سطوح آبیاری بودند: آبیاری کامل، تنش آبی ملایم و شدید که به ترتیب معادل ۱۰۰ درصد (۵۴۳۸ متر مکعب در هکتار)، ۸۵ درصد و ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه بود. کرت‌های فرعی شامل سطوح کود زیستی بودند: بدون کود زیستی (F1)، باکتری *Pseudomonas fluorescens* تولیدکننده آنزیم ACC-دآمیناز (F2)، باکتری *P. fluorescens* فاقد ACC-دآمیناز (F3)، قارچ میکوریز آرباسکولار (AM) به صورت مایع (F4)، و پودری (F5). ویژگی‌های مورد مطالعه شامل درصد کلنی‌زاسیون ریشه، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد زیستی، شاخص برداشت و کارایی مصرف آب بود. نتایج نشان داد که در بین کودهای زیستی باکتریایی، تنها کاربرد تیمار F2 در تنش آبی شدید موجب افزایش ۹ درصد عملکرد دانه، ۷ درصد عملکرد زیستی، ۸/۶ درصد کارایی مصرف آب دانه و ۷ درصد کارایی مصرف آب بر حسب عملکرد زیستی نسبت به شاهد شد. کارایی کودهای زیستی قارچی نسبت به باکتریایی به طور قابل توجهی بیشتر بود. همچنین شکل پودری قارچ AM نسبت به مایع آن کارایی بیشتری داشت به طوری که این تیمار موجب افزایش ۲۶ و ۲۱ درصد عملکرد دانه و عملکرد زیستی، و افزایش ۲۶ و ۲۲ درصد کارایی مصرف آب بر حسب عملکرد دانه و عملکرد زیستی در تنش آبی شدید شد. به طور کلی، تفاوت‌های مشاهده شده در کارایی کودهای زیستی نشان می‌دهد که انتخاب مناسب نوع و فرم این کودها می‌تواند نقش قابل توجهی در مدیریت تنش آبی و بهبود تولید محصول داشته باشد. با این حال، انجام پژوهش‌های بلند مدت برای تأیید و تقویت این نتایج ضروری است.

واژه‌های کلیدی: باکتری‌های PGPR، تنش خشکی، ریز جانداران، سطوح آبیاری، قارچ‌های میکوریز آرباسکولار

مقدمه

ایران با میانگین بارندگی سالانه حدود ۲۳۵ تا ۲۶۰ میلی‌متر، تنها یک سوم متوسط جهانی بارش را دارد. بیش از ۸۵ درصد از مساحت کشور در مناطق خشک، نیمه‌خشک، فراخشک و بیابانی قرار دارد، که این شرایط ناشی از بارش اندک در مناطق مرکزی و جنوبی است

محصول بیشتر به ازای هر واحد آب مصرفی، به‌ویژه در شرایط تنش خشکی، از اولویت‌های اساسی کشاورزی پایدار است (Rahimi, Hosseinpanahi & Siosemardehm, 2019). گندم، به‌عنوان محصولی استراتژیک که حدود ۷۰ درصد کالری و پروتئین روزانه مردم

۱- گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(*) نویسنده مسئول: Email: sajjadhosseini1369@gmail.com

۲- بخش تحقیقات بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

۳- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

ایران را تأمین می‌کند، تحت تأثیر محدودیت منابع آبی و شوری خاک قرار دارد (Naseri et al., 2017). در مناطق خشک و نیمه‌خشک، که بخش قابل توجهی از اراضی کشاورزی ایران را تشکیل می‌دهند، بهینه‌سازی مصرف آب و مدیریت تغذیه‌ای گیاه از طریق راهبردهایی نظیر کاربرد کودهای زیستی اهمیت زیادی دارد.

مشکلات اقتصادی ناشی از افزایش رو به رشد هزینه کودهای شیمیایی از یک سو و مسائل زیست محیطی مرتبط به مصرف غیراصولی این کودها از سوی دیگر تفکر استفاده از کودهای زیستی را برای تقویت رشد گیاهان در شرایط تنش‌های محیطی افزایش داده است (Cardoso & Kuyper, 2006; Jiriaie, Fateh, & Aynehband, 2014). این کودها شامل مجموعه‌ای از ریزجانداران مفید نظیر باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه (PGPR)^۱ و قارچ‌های میکوریز آرسکولار (AM)^۲ هستند که از طریق تعاملات مثبت با گیاهان، تأثیرات مثبتی بر رشد و عملکرد محصولات زراعی دارند (Nadeem et al., 2014).

باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه می‌توانند از طریق افزایش فراهمی عناصر غذایی در ریزوسفر، بهبود مورفولوژی ریشه و ساقه، اعمال مکانیسم‌های آنتی‌اکسیدانی، افزایش پایداری آب در گیاه، تشکیل بیوفیلم برای بهبود دسترسی به آب و تولید متابولیت‌های ثانویه و هورمون‌های گیاهی تحمل گیاه به خشکی و در نتیجه عملکرد محصول را افزایش دهند (Ahlwalia et al., 2021; Carmen et al., 2016; Kumar et al., 2019; Li et al., 2020; Lim & Kim, 2013). اتیلن یک هورمون گازی تنش‌زا است که بیوستز آن معمولاً در سیستم‌های ریشه گیاهانی که تحت تنش آبی قرار دارند، افزایش می‌یابد و باعث مهار رشد ریشه می‌شود. بنابراین، اثرات منفی تنش آبی در گیاهان می‌تواند از طریق کاهش تولید اتیلن توسط سیستم ریشه کاهش یابد، که در این صورت ریشه‌ها می‌توانند به رشد خود ادامه داده و کارکرد خود را حفظ کنند (Brunetti et al., 2021). برخی از سویه‌های PGPR که دارای فعالیت آنزیم ۱-آمینو سیکلوپروپان-۱-کربوکسیلات (ACC)-دآمیناز^۳ هستند، قادرند با تجزیه ACC به α -کتوتیرات و آمونیاک، اثرات منفی اتیلن تنش را کاهش داده و به این ترتیب رشد و کارایی گیاه را بهبود بخشند (Cheng, Park, & Glick, 2007; Glick, Penrose, & Li, 1998). سویه‌های PGPR با قابلیت تولید آنزیم ACC-دآمیناز از طریق افزایش توسعه ریشه کارایی بیشتری نسبت به سایر سویه‌های PGPR که فاقد این قابلیت هستند، در افزایش تحمل گیاه به خشکی، افزایش عملکرد محصول و در نتیجه افزایش کارایی مصرف آب داشته باشند. این پرسشی است که در این پژوهش به آن پاسخ داده خواهد شد. قارچ‌های AM یکی از مهمترین انواع کودهای زیستی به‌شمار

می‌روند که به افزایش تحمل گیاهان در برابر تنش خشکی کمک می‌کنند. این قارچ‌ها با حفظ یکپارچگی غشای سلولی، افزایش محتوای آب گیاه، بهبود جذب آب و عناصر غذایی، و در نتیجه ارتقاء کارایی مصرف آب، به رشد گیاهان تحت شرایط خشکی کمک می‌کنند (Khan, Shah, & Tian, 2022; Ruiz-Sánchez et al., 2011; Tang et al., 2022). علاوه بر این، قارچ‌های AM از سیستم فتوسنتزی در برابر تنش‌های اکسیداتیو ناشی از خشکی محافظت کرده و کارایی فتوسنتزی، تجمع اسمولیت‌ها، فنل‌ها و هورمون‌ها را بهبود می‌بخشد (Amiri et al., 2015; Ruiz-Sánchez et al., 2011; Tang et al., 2022). همچنین، این قارچ‌ها با افزایش فعالیت‌های آنتی اکسیدانی و بیان ژن‌ها، تجمع گونه‌های فعال اکسیژن را کاهش می‌دهند که این امر به تحمل گیاهان در برابر تنش خشکی کمک می‌کند (Hashem et al., 2016; Li et al., 2019; Tang et al., 2022). پژوهش‌های مختلفی افزایش تحمل به خشکی، افزایش عملکرد محصول و افزایش کارایی مصرف آب را در حضور قارچ‌های AM گزارش کرده‌اند (Majidi & Rejali, 2023; Mathur, Tomar, & Jajoo, 2019; Oliveira et al., 2016; Omidvari, Salamati, & Abdi, 2020; Yagini et al., 2020). با این حال کارایی کودهای زیستی (چه قارچی و چه باکتریایی) در بهبود رشد گیاه براساس نوع خاک (ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی)، شرایط اقلیمی (دما و میزان بارندگی)، نوع گونه گیاهی، عملیات‌های کشاورزی و روش کاربرد کود زیستی متفاوت است (Malusà et al., 2016). بنابراین، شناسایی کود زیستی مناسب (قارچ AM یا PGPR) برای گیاه گندم در شرایط اقلیمی ایران و تحت تنش آبی در مزرعه امری ضروری است.

یکی از عوامل مؤثر بر کارایی کودهای زیستی، نوع فرمولاسیون کود زیستی است (Malusà et al., 2016; Saif et al., 2021). پژوهش‌های گذشته در مورد اثر فرمولاسیون قارچ‌های AM عمدتاً بر روی اثر نوع حامل از قبیل پیت، ورمی‌کولایت، بیوجار، سنگ فسفات و غیره متمرکز بوده است (Barazetti et al., 2019; Garmendia & Mangas, 2014) و کمتر به اثر شکل فیزیکی کود زیستی (جامد یا مایع) پرداخته شده است. در حال حاضر، کودهای زیستی حاوی قارچ‌های AM به دو شکل جامد و مایع عرضه می‌شوند. فرم جامد این کودها شامل بسترهای کشت حاوی اندام‌های فعال قارچ (خاک آلوده به قارچ AM)، پودر و گرانول است (Sahu & Brahmaprakash, 2016; Siddiqui & Kataoka, 2011). باسیرو و همکاران در پژوهشی که بر روی ۶۸ نوع کود زیستی حاوی قارچ‌های AM از ۲۸ شرکت تولیدی انجام دادند، گزارش کردند که ۹۰ درصد این محصولات به شکل جامد (۶۵ درصد پودر و ۲۵ درصد گرانول) و تنها ۱۰ درصد به صورت مایع تولید شده‌اند (Basiru et al., 2020). با این حال، هنوز

3- AminoCyclopropane-1-Carboxylate (ACC) Deaminase

1- Plant Growth-Promoting Rhizobacteria
2- Arbuscular Mycorrhiza

تصادفی با سه تکرار اجرا شد. مقدار آبیاری در سه سطح شامل: آبیاری کامل معادل ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه، تنش آبی ملایم با تأمین ۸۵ درصد نیاز آبی، و تنش آبی شدید با تأمین ۶۵ درصد نیاز آبی در کرت‌های اصلی قرار داشتند. کودهای زیستی نیز در پنج سطح شامل: شاهد بدون کود زیستی (F1)، باکتری *Pseudomonas fluorescens* با قابلیت تولید آنزیم ACC-دآمیناز (F2)، باکتری *P. fluorescens* فاقد توانایی تولید آنزیم ACC-دآمیناز (F3)، قارچ میکوریز آربسکولار *Rhizophagus irregularis* به صورت مایع (F4)، و ترکیبی از سه گونه قارچی *Rhizophagus irregularis*، *Funneliformis*، *mosseae* و *Claroideoglomus etunicatum* به صورت پودری (F5) در کرت‌های فرعی بودند. جمعیت هر دو مایه تلقیح باکتری مورد استفاده حدود 4×10^8 سلول باکتری در هر میلی‌لیتر بود. فعالیت آنزیم ACC-دآمیناز در سویه‌ای که قادر به تولید این آنزیم بود، به میزان $3/50.8$ میکرومول α -کتوبوتیرات بر میلی‌گرم پروتئین در ساعت اندازه‌گیری شد (Jalili et al., 2009; Zabihi et al., 2011). علاوه بر این، فرم پودری قارچ AM دارای ۳۰۰ اندام فعال قارچی در هر گرم و فرم مایع آن نیز حاوی ۳۰۰ اندام فعال قارچی در هر میلی‌لیتر بود. برای آماده‌سازی زمین، از شخم برگردان‌دار و دو مرحله دیسک متقاطع استفاده شد. سپس پشته‌هایی به عرض ۶۰ سانتی‌متر با دستگاه فاروئر ایجاد گردید. ابعاد هر کرت آزمایشی به صورت ۳ متر عرض و ۵ متر طول بود. هر پشته دارای سه ردیف کاشت با فاصله ۲۰ سانتی‌متر از یکدیگر بود.

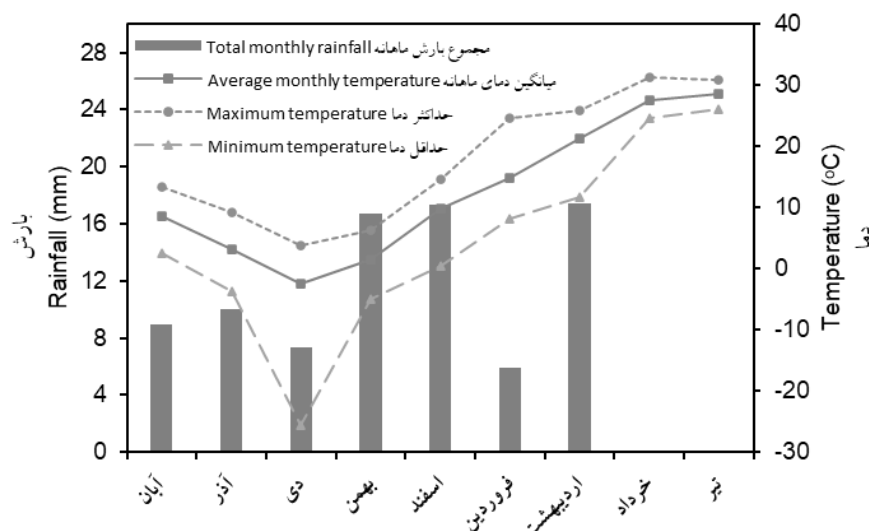
هیچ مطالعه مقایسه‌ای وجود ندارد که کارایی هر یک از این فرمولاسیون‌ها بر عملکرد محصول و کارایی مصرف آب در شرایط تنش آبی در مزرعه را مشخص کند.

بنابراین در این پژوهش، اهداف زیر دنبال می‌شود: (۱) شناسایی مناسب‌ترین نوع کود زیستی (باکتریایی یا قارچی) به منظور افزایش عملکرد گندم و بهبود کارایی مصرف آب در شرایط تنش آبی و اقلیمی مشهد، (۲) تعیین تأثیر آنزیم ACC-دآمیناز بر کارایی باکتری‌های PGPR در افزایش عملکرد گندم و کارایی مصرف آب، و (۳) مقایسه کارایی کود زیستی حاوی قارچ‌های AM در دو فرم پودری و مایع و همچنین تک گونه و چند گونه.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در ایستگاه تحقیقاتی طرق، واقع در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی (عرض جغرافیایی: ۳۶ درجه و ۱۳ دقیقه و ۱۳ ثانیه شمالی، طول جغرافیایی: ۵۹ درجه و ۳۸ دقیقه و ۴۸ ثانیه شرقی، ارتفاع از سطح دریا: ۱۰۰۳ متر) در طی سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ انجام شد. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم معتدل سرد و نیمه خشک بوده و میانگین دما سالانه و مجموع مقدار بارندگی در طی مدت زمان آزمایش به ترتیب ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد و ۸۹ میلی‌متر بود (شکل ۱). برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است.

این آزمایش به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل



شکل ۱- میانگین، حداکثر و حداقل دمای ماهیانه و مجموع بارندگی ماهیانه محل انجام آزمایش

Figure 1- Average, maximum, and minimum monthly temperatures, along with total monthly precipitation at experimental site

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1- Some physical and chemical properties of the soil at the experimental site

ویژگی Properties	EC	pH	کربنات کلسیم معادل Calcium carbonate equivalent	پتاسیم قابل دسترسی Available potassium	فسفر قابل دسترسی Available phosphorus	نیتروژن کل Total nitrogen	کربن آلی Organic carbon	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand	بافت Texture
واحد Unit	dS/m	-	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%	%	%	%	-
مقدار Amount	2.5	8.04	15	290	18.4	650	0.76	38	34	28	لوم رسی Clay loam

گیاه، آبیاری بهینه در تمامی کرت‌ها انجام گرفت. پس از رسیدن گیاه به مرحله پنج برگ، آبیاری بر اساس نیاز آبی هر تیمار و با استفاده از کنتورهای آب صورت گرفت. نیاز آبی گندم با استفاده از معادله پنمن-مونتیث فائو و دستورالعمل شماره ۵۶ فائو برای دوره‌های ۱۰ روزه و بر اساس آمار هواشناسی سال قبل از کاشت، از طریق نرم‌افزار CROPWAT محاسبه شد. بر اساس این محاسبات، نیاز آبی گیاه برابر با ۵۴۳۸ مترمکعب در هکتار تعیین گردید.

برای کنترل علف‌های هرز، از روش‌های شیمیایی شامل علف‌کش‌های 2-4-D به میزان ۱/۵ لیتر در هکتار و آپیروس به مقدار ۲۶ گرم در هکتار در مرحله پنجه‌زنی گندم، به همراه عملیات مکانیکی استفاده گردید. همچنین، برای حذف علف‌های هرز بین کرت‌ها، از کولتیوار بهره گرفته شد. در زمان نمونه‌برداری از ریشه گندم و تعیین عملکرد دانه و عملکرد زیستی، دو ردیف از هر طرف کرت و نیم متر از بالا و پایین آن به عنوان حاشیه در نظر گرفته شده و از فرآیند نمونه‌برداری حذف شدند.

رنگ‌آمیزی ریشه‌ها با روش فیلپس و هایمن (Phillips & Hayman, 1970) و تعیین درصد کلونیزاسیون با استفاده از روش تقاطع خطوط شبکه اندازه‌گیری شدند (Kormanik & McGraw, 1982). ویژگی‌های عملکردی شامل عملکرد دانه (وزن دانه در هکتار)، عملکرد زیستی (وزن دانه + وزن کاه و کلش در هکتار)، وزن هزار دانه، شاخص برداشت و کارایی مصرف آب بر حسب عملکرد دانه و عملکرد زیستی مورد اندازه‌گیری و محاسبه قرار گرفتند. شاخص برداشت از تقسیم عملکرد دانه بر عملکرد زیستی به دست آمد (Unkovich et al., 2010). شاخص کارایی مصرف آب (کیلوگرم به ازای هر متر مکعب آب مصرفی) بر مبنای عملکرد دانه یا عملکرد زیستی در هر تیمار با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد (Bramley et al., 2013):

بدین ترتیب هر کرت شامل ۱۲ ردیف کاشت با تراکم ۳۵۰ بوته در متر مربع بود. همچنین، برای جلوگیری از نشت آب بین کرت‌های اصلی، فاصله ۱/۵ متر و بین کرت‌های فرعی ۱ متر در نظر گرفته شد. در این پژوهش از گندم بهاره رقم فرین (*Triticum aestivum* L.) استفاده شد. این رقم در سال ۱۳۹۸ معرفی شده است، نسبتاً زودرس با تیپ رشد بهاره، مقاوم به ریزش، نیمه مقاوم به خوابیدگی، مقاوم به زنگ زرد و نیمه مقاوم به زنگ قهوه‌ای و در گروه ارقام با کیفیت نانویی خوب قرار دارد. ابتدا بذره‌های گندم برای ضدعفونی، به مدت ۳۰ ثانیه در اتانول ۷۵ درصد و سپس به مدت ۲ تا ۳ دقیقه در هیپوکلریت سدیم ۴ درصد قرار داده شدند و بعد از آن چندین بار با آب استریل شسته شدند تا آثار باقی‌مانده از مواد ضدعفونی‌کننده کاملاً از بین برود. کودهای زیستی مورد استفاده که از بخش تحقیقات بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک مؤسسه تحقیقات خاک و آب تهیه شده بودند، به شکل بذرمال و درست قبل از کاشت در آزمایشگاه و در شرایط استریل به بذره‌های گندم تلقیح شدند. برای این منظور، کودهای زیستی مایع (باکتریایی یا قارچی) بدون افزودن هرگونه ماده چسبنده به مقدار ۲ درصد وزن بذر روی بذرها ریخته شده و تا زمانی که تمام بذرها با مایه تلقیح پوشیده شوند به خوبی مخلوط شدند. برای فرم پودری کودهای زیستی قارچی، به هر کیلوگرم بذر گندم، ۲۰ گرم مایه تلقیح به همراه آب مقطر استریل اضافه شد و تا زمانی که بذرها با یک لایه نازک از دوغاب پوشانده شوند، هم زده شدند. پس از تلقیح کودهای زیستی، عملیات کاشت در اوایل دی ماه با استفاده از بذراکار خطی انجام شد و بعد از ۶ ماه رشد، در خرداد ماه، گیاه برداشت شد.

بر اساس توصیه کودی، تنها کود اوره به میزان ۳۵۰ کیلوگرم در هکتار به‌طور یکنواخت در تمامی کرت‌های آزمایشی قبل از کاشت (۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار) و به‌صورت کودآبیاری در مراحل پنجه‌زنی (۱۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار) و ساقه‌دهی (۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار) مصرف شد. در مرحله قبل از پنج برگ، برای اطمینان از استقرار مناسب

مطابق انتظار بیشترین درصد کلنیزاسیون ریشه مربوط به کودهای زیستی قارچی بود. در بین کودهای زیستی قارچی، بیشترین درصد کلنیزاسیون ریشه مربوط به فرم پودری قارچ AM (F5) بود. به طوریکه درصد کلنیزاسیون ریشه در حضور این تیمار (F5) در سطوح آبیاری ۶۵، ۸۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه به ترتیب ۱۳، ۱۹ و ۸ درصد بیشتر از فرم مایع قارچ AM (F4) بود ($p < 0.05$ ، شکل ۲).

در تمام تیمارهای کود زیستی به جز باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC-دآمیناز (F2)، افزایش تنش خشکی موجب کاهش وزن هزار دانه گندم شد (شکل ۳). در بین کودهای زیستی مورد بررسی، باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC-دآمیناز (F2) و هر دو فرم قارچ AM (F4 و F5) در پر شدن دانه گندم و در نتیجه افزایش وزن هزاردانه نقش مثبت و معنی داری داشتند (شکل ۳). باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC-دآمیناز (F2) در سطوح آبیاری ۶۵ و ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه به ترتیب موجب افزایش ۲۸ و ۷ درصدی وزن هزاردانه شد که این افزایش تنها در سطح آبیاری ۶۵ درصد از لحاظ آماری معنی دار بود ($p < 0.05$ ، شکل ۳). وزن هزاردانه در تیمار تلقیح با فرم مایع (F4) و پودری (F5) قارچ AM به ترتیب در سطح آبیاری ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه ۳۰ و ۳۱ درصد، در سطح آبیاری ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه ۱۶ و ۲۵ درصد و در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه ۱۶ و ۱۸ درصد نسبت به تیمار بدون کود زیستی افزایش یافت ($p < 0.05$ ، شکل ۳).

$$WUE (kg/m^3)$$

$$= \frac{Yield (kg)}{Irrigation\ water + Rainfall + Soil\ moisture (m^3)}$$

در این معادله WUE معادل کارایی مصرف آب، Yield معادل عملکرد دانه یا عملکرد زیستی، Irrigation water معادل حجم آب آبیاری، Rainfall معادل میزان بارندگی مؤثر در طول دوره رشد و Soil moisture معادل ذخیره رطوبتی خاک می باشد.

تجزیه و تحلیل آماری داده ها با استفاده از آنالیز واریانس دو طرفه (two-way ANOVA) و مقایسه میانگین بین تیمارهای مختلف با آزمون توکی HSD در سطح احتمال ۵ درصد در نرم افزار JMP 8 انجام گرفت.

نتایج

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی سطوح آبیاری و نوع کود زیستی بر کلنیزاسیون ریشه، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد زیستی، شاخص برداشت و کارایی مصرف آب بر حسب عملکرد دانه و عملکرد زیستی در سطح ۱ درصد معنی دار بود. اثر متقابل سطح آبیاری و نوع کود زیستی بر کلنیزاسیون ریشه در سطح ۱ درصد و بر عملکرد دانه، وزن هزاردانه و کارایی مصرف آب بر حسب عملکرد دانه در سطح ۵ درصد معنی دار شد (جدول ۲).

کاهش مقدار آب آبیاری موجب کاهش معنی داری درصد کلنیزاسیون ریشه در تمام تیمارهای آزمایشی شد ($p < 0.05$ ، شکل ۲).

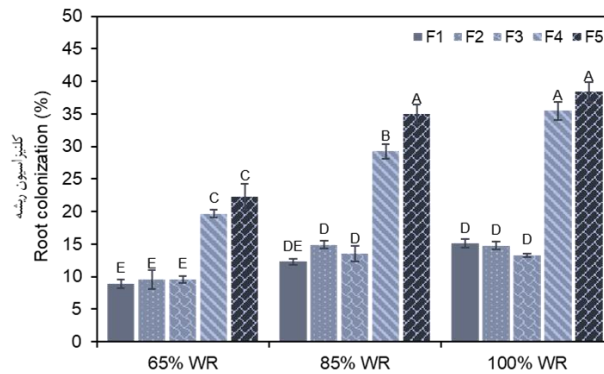
جدول ۲- تجزیه واریانس ویژگی های مورد بررسی

Table 2- Analysis of variance (ANOVA) for the studied properties

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares						
		کارایی مصرف آب (عملکرد زیستی) WUE (Biological yield)	کارایی مصرف آب (عملکرد دانه) WUE (Grain yield)	شاخص برداشت Harvest index	عملکرد زیستی Biological yield	عملکرد دانه Grain yield	وزن هزار دانه 1000- seed weight	کلنیزاسیون ریشه Root colonization
تکرار Replicate	2	0.0014 ^{ns}	0.0002 ^{ns}	2.079 ^{ns}	34043 ^{ns}	6130 ^{ns}	1.778 ^{ns}	0.353 ^{ns}
آبیاری Irrigation	2	0.0713 ^{**}	0.0227 ^{**}	32.357 ^{**}	33327872 ^{**}	5656045 ^{**}	175.53 ^{**}	358.13 ^{**}
خطای Error a	4	0.0004	0.0004	0.095	14527	2624	0.692	0.830
کود زیستی Biofertilizer	4	0.0760 ^{**}	0.0163 ^{**}	5.962 ^{**}	1502147 ^{**}	324056 ^{**}	101.77 ^{**}	850.40 ^{**}
آبیاری×کود زیستی Irrigation× biofertilizer	8	0.0014 ^{ns}	0.0005 [*]	2.949 ^{ns}	22855 ^{ns}	11938 [*]	10.66 [*]	29.91 ^{**}
خطای Error b	24	0.0007	0.0001	3011	12962	3743	3.956	1.265

ns, **, and * به ترتیب بدون اختلاف معنی دار، معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد

ns, **, and * indicate non-significant and significant at the 1% and 5% probability level, respectively

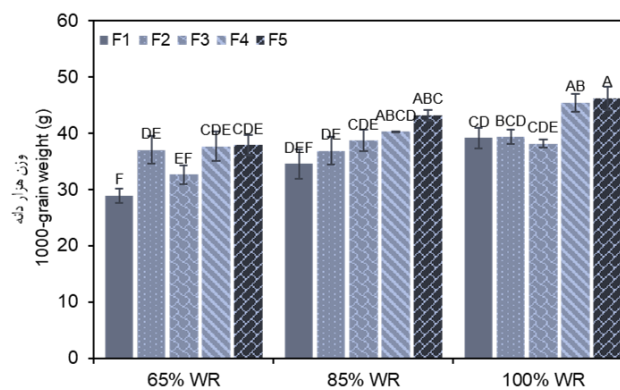


شکل ۲- اثر متقابل سطح آبیاری و کود زیستی بر درصد کلنیزاسیون ریشه گندم

حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد است. میله‌های خطا نشان دهنده انحراف معیار است. 65% WR، 85% WR و 100% WR به ترتیب بیانگر ۶۵، ۸۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه است. F1: بدون کود زیستی، F2: باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC-دآمیناز، F3: باکتری *P. fluorescens* بدون توان تولید ACC-دآمیناز، F4: قارچ AM به فرم مایع و F5: قارچ AM به فرم پودری.

Figure 2- The interaction effect of irrigation levels and biofertilizers on root colonization percentage of wheat

Different letters indicate significant differences between treatments at $p < 0.05$. Error bars represent standard deviation. 65% WR, 85% WR, and 100% WR correspond to 65%, 85%, and 100% of the plant's water requirement, respectively. F1: No biofertilizer, F2: *P. fluorescens* with ACC-deaminase, F3: *P. fluorescens* without ACC-deaminase, F4: AM fungi in liquid form, and F5: AM fungi in powder form.



شکل ۳- اثر متقابل سطح آبیاری و کود زیستی بر وزن هزاردانه گندم

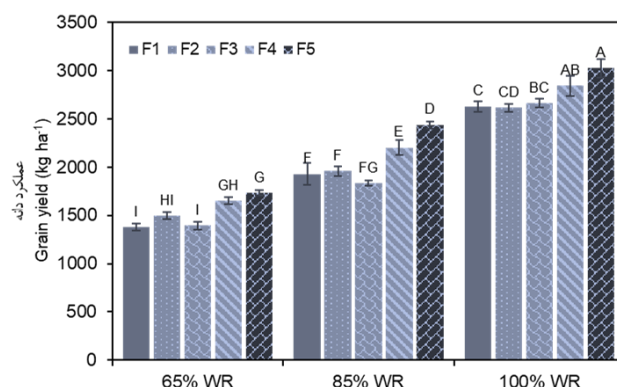
حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد است. میله‌های خطا نشان دهنده انحراف معیار است. 65% WR، 85% WR و 100% WR به ترتیب بیانگر ۶۵، ۸۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه است. F1: بدون کود زیستی، F2: باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC-دآمیناز، F3: باکتری *P. fluorescens* بدون توان تولید ACC-دآمیناز، F4: قارچ AM به فرم مایع و F5: قارچ AM به فرم پودری.

Figure 3- The interaction effect of irrigation levels and biofertilizers on 1000-seed weight

Different letters indicate significant differences between treatments at $p < 0.05$. Error bars represent standard deviation. 65% WR, 85% WR, and 100% WR correspond to 65%, 85%, and 100% of the plant's water requirement, respectively. F1: No biofertilizer, F2: *P. fluorescens* with ACC-deaminase, F3: *P. fluorescens* without ACC-deaminase, F4: AM fungi in liquid form, and F5: AM fungi in powder form.

دانه گندم نسبت به تیمار بدون کود زیستی شد ($p < 0.05$ ، شکل ۴). در تمام سطوح آبیاری کارایی فرم پودری قارچ AM در افزایش عملکرد دانه بیشتر از فرم مایع آن بود به هر حال این تفاوت تنها در سطح ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه از نظر آماری معنی‌دار بود (شکل ۴). در سطح آبیاری ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه، بذرمال گندم با باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC-دآمیناز نیز موجب افزایش ۹ درصدی عملکرد دانه گندم نسبت به تیمار بدون کود زیستی شد که این افزایش از لحاظ آماری معنی‌دار نبود (شکل ۴).

به‌طور کلی کاهش سطح آبیاری از ۱۰۰ درصد به ۸۵ و ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه موجب کاهش ۲۵ و ۴۴ درصدی میانگین عملکرد دانه گندم شد. در بین کودهای زیستی، تنها کاربرد هر دو فرم قارچ AM موجب افزایش معنی‌دار عملکرد دانه گندم شد (شکل ۴). تلقیح بذر گندم با فرم مایع (F4) و پودری (F5) قارچ AM در سطح آبیاری ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه موجب افزایش ۲۰ و ۲۶ درصدی، در سطح آبیاری ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه موجب افزایش ۱۴ و ۲۶ درصدی و در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه موجب افزایش ۸ و ۱۵ درصدی عملکرد



شکل ۴- اثر متقابل سطح آبیاری و کود زیستی بر عملکرد دانه گندم

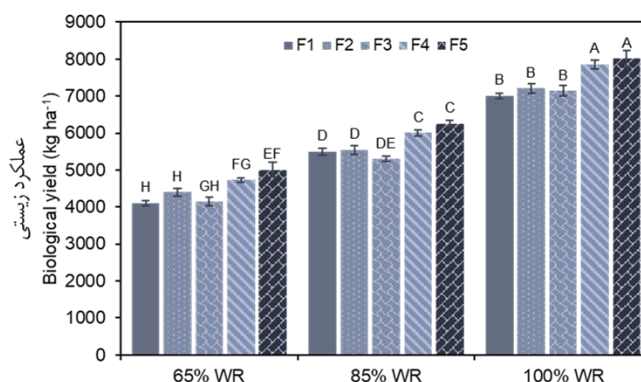
حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد است. میله‌های خطا نشان دهنده انحراف معیار است. 65% WR، 85% WR و 100% WR به ترتیب بیانگر ۶۵، ۸۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه است. F1: بدون کود زیستی، F2: باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC-دآمیناز، F3: باکتری *P. fluorescens* بدون توان تولید ACC-دآمیناز، F4: قارچ AM به فرم مایع و F5: قارچ AM به فرم پودری.

Figure 4- The interaction effect of irrigation levels and biofertilizers on grain yield

Different letters indicate significant differences between treatments at $p < 0.05$. Error bars represent standard deviation. 65% WR, 85% WR, and 100% WR correspond to 65%, 85%, and 100% of the plant's water requirement, respectively. F1: No biofertilizer, F2: *P. fluorescens* with ACC-deaminase, F3: *P. fluorescens* without ACC-deaminase, F4: AM fungi in liquid form, and F5: AM fungi in powder form.

۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه ۱۲ و ۱۴ درصد نسبت به تیمار بدون کود زیستی افزایش یافت ($p < 0.05$ ، شکل ۵). همچنین نتایج اثر متقابل آبیاری و کود زیستی نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار شاخص برداشت گیاه گندم به ترتیب با مقدار ۳۸/۹ و ۳۳/۶ مربوط به تیمار کاربرد فرم پودری قارچ AM (F5) در سطح آبیاری ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه و تیمار بدون کود زیستی (F1) در سطح آبیاری ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه بود ($p < 0.05$ ، شکل ۶).

نتایج اثر متقابل سطح آبیاری و کود زیستی نشان داد که کاربرد باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC-دآمیناز (F2) در سطح آبیاری ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه موجب افزایش ۷ درصدی عملکرد زیستی گندم شد که از لحاظ آماری معنی‌دار نبود (شکل ۵). همچنین عملکرد زیستی گندم در تیمار تلقیح با فرم مایع (F4) و پودری (F5) قارچ AM به ترتیب در سطح آبیاری ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه ۱۵ و ۲۱ درصد، در سطح آبیاری ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه ۹ و ۱۴ درصد و در سطح آبیاری

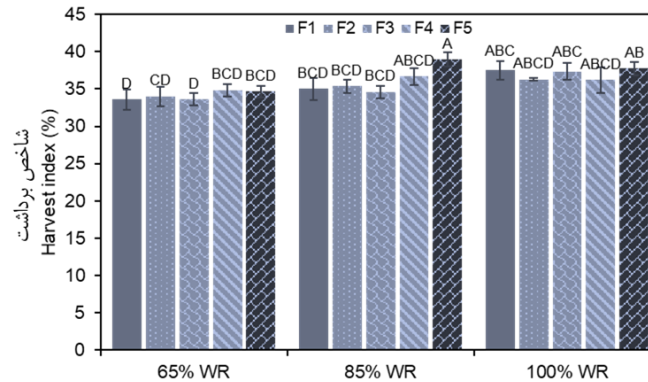


شکل ۵- اثر متقابل سطح آبیاری و کود زیستی بر عملکرد زیستی گندم

حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد است. میله‌های خطا نشان دهنده انحراف معیار است. 65% WR، 85% WR و 100% WR به ترتیب بیانگر ۶۵، ۸۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه است. F1: بدون کود زیستی، F2: باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC-دآمیناز، F3: باکتری *P. fluorescens* بدون توان تولید ACC-دآمیناز، F4: قارچ AM به فرم مایع و F5: قارچ AM به فرم پودری.

Figure 5- The interaction effect of irrigation levels and biofertilizers on biological yield

Different letters indicate significant differences between treatments at $p < 0.05$. Error bars represent standard deviation. 65% WR, 85% WR, and 100% WR correspond to 65%, 85%, and 100% of the plant's water requirement, respectively. F1: No biofertilizer, F2: *P. fluorescens* with ACC-deaminase, F3: *P. fluorescens* without ACC-deaminase, F4: AM fungi in liquid form, and F5: AM fungi in powder form.



شکل ۶- اثر متقابل سطح آبیاری و کود زیستی بر شاخص برداشت گندم

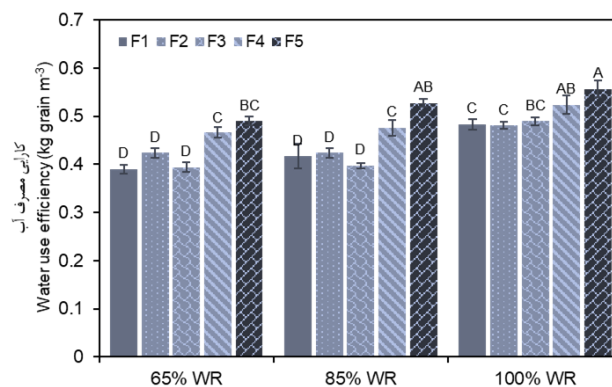
حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد است. میله‌های خطا نشان دهنده انحراف معیار است. 65% WR، 85% WR و 100% WR به ترتیب بیانگر ۶۵، ۸۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه است. F1: بدون کود زیستی، F2: باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC-دآمیناز، F3: باکتری *P. fluorescens* بدون توان تولید ACC-دآمیناز، F4: قارچ AM به فرم مایع و F5: قارچ AM به فرم پودری.

Figure 6- The interaction effect of irrigation levels and biofertilizers on harvest index

Different letters indicate significant differences between treatments at $p < 0.05$. Error bars represent standard deviation. 65% WR, 85% WR, and 100% WR correspond to 65%, 85%, and 100% of the plant's water requirement, respectively. F1: No biofertilizer, F2: *P. fluorescens* with ACC-deaminase, F3: *P. fluorescens* without ACC-deaminase, F4: AM fungi in liquid form, and F5: AM fungi in powder form.

(F4) و پودری (F5) قارچ AM در سطح آبیاری ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه به ترتیب ۲۰ و ۲۶ درصد، در سطح آبیاری ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه به ترتیب ۱۴ و ۲۷ درصد و در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه ۸ و ۱۵ درصد بیشتر از تیمار بدون کود زیستی در همان سطح آبیاری بود ($p < 0.05$ ، شکل ۷). به طور کلی کارایی مصرف آب گندم بر حسب عملکرد دانه در تیمار تلقیح با فرم پودری قارچ AM (F5) در هر سه سطح آبیاری بیشتر از فرم مایع آن (F4) بود که این تفاوت تنها در سطح ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه معنی‌دار بود (شکل ۷).

در تمام تیمارهای مورد بررسی با کاهش سطح آبیاری، مقدار کارایی مصرف آب گندم بر حسب عملکرد دانه نیز به طور معنی‌داری کاهش یافت ($p < 0.05$ ، شکل ۷). در بین کودهای زیستی باکتریایی (F2 و F3)، تنها کاربرد باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC-دآمیناز (F2) در سطح آبیاری ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه موجب افزایش ۸/۶ درصدی کارایی مصرف آب بر حسب عملکرد دانه نسبت به تیمار بدون کود زیستی شد که این افزایش از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. کارایی مصرف آب گندم بر حسب عملکرد دانه در تیمارهای تلقیح با فرم مایع

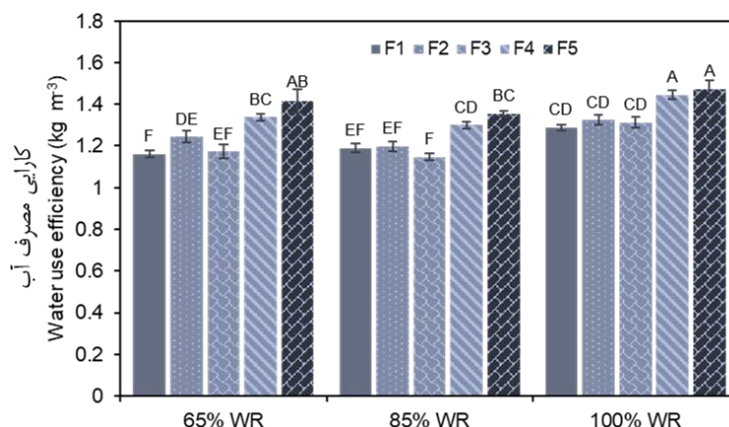


شکل ۷- اثر متقابل سطح آبیاری و کود زیستی بر کارایی مصرف آب گندم بر حسب عملکرد دانه

حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد است. میله‌های خطا نشان دهنده انحراف معیار است. 65% WR، 85% WR و 100% WR به ترتیب بیانگر ۶۵، ۸۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه است. F1: بدون کود زیستی، F2: باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC-دآمیناز، F3: باکتری *P. fluorescens* بدون توان تولید ACC-دآمیناز، F4: قارچ AM به فرم مایع و F5: قارچ AM به فرم پودری.

Figure 7- The interaction effect of irrigation levels and biofertilizers on water use efficiency based on grain yield

Different letters indicate significant differences between treatments at $p < 0.05$. Error bars represent standard deviation. 65% WR, 85% WR, and 100% WR correspond to 65%, 85%, and 100% of the plant's water requirement, respectively. F1: No biofertilizer, F2: *P. fluorescens* with ACC-deaminase, F3: *P. fluorescens* without ACC-deaminase, F4: AM fungi in liquid form, and F5: AM fungi in powder form.



شکل ۸- اثر متقابل سطح آبیاری و کود زیستی بر کارایی مصرف آب گندم برحسب عملکرد زیستی

حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد است. میله‌های خطا نشان‌دهنده انحراف معیار است. 65% WR، 85% WR و 100% WR به ترتیب بیانگر ۶۵٪، ۸۵٪ و ۱۰۰٪ نیاز آبی گیاه است. F1: بدون کود زیستی، F2: باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC-دآمیناز، F3: باکتری *P. fluorescens* بدون P. توان تولید ACC-دآمیناز، F4: قارچ AM به فرم مایع و F5: قارچ AM به فرم پودری.

Figure 8- The interaction effect of irrigation levels and biofertilizers on water use efficiency based on biological yield

Different letters indicate significant differences between treatments at $p < 0.05$. Error bars represent standard deviation. 65% WR, 85% WR, and 100% WR correspond to 65%, 85%, and 100% of the plant's water requirement, respectively. F1: No biofertilizer, F2: *P. fluorescens* with ACC-deaminase, F3: *P. fluorescens* without ACC-deaminase, F4: AM fungi in liquid form, and F5: AM fungi in powder form.

زمانی که گیاهان با تنش خشکی مواجه می‌شوند، بهتر مشاهده کرد. ما مشاهده کردیم که کاربرد باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC-دآمیناز (F2) موجب افزایش ۹ درصدی عملکرد دانه و ۷ درصدی عملکرد زیستی در شرایط تنش آبی شدید شد (شکل ۴ و ۵). این افزایش با افزایش ۲۸ درصدی وزن هزار دانه همراه بود که تا حدودی افزایش عملکرد دانه در این تیمار را توضیح می‌دهد (شکل ۳). مکانیسم اصلی باکتری *P. fluorescens* برای تسهیل رشد و نمو گیاه در شرایط تنش، کاهش سطح اتیلن با هیدرولیز ACC (پیشساز اتیلن در گیاهان) است (Zahir et al., 2008). به گفته مایاک و همکاران (Mayak et al., 2004) افزایش سطح ACC در گیاهانی که در معرض خشکی قرار دارند، غلظت اتیلن را در ریشه و اندام هوایی گیاهان افزایش می‌دهد. ریشه‌ها ACC انباشته شده را به ریزوسفر ترشح می‌کنند که توسط آنزیم ACC-دآمیناز ترشح شده از باکتری *P. fluorescens* به NH_3 و α -کتوبوتیرات تبدیل می‌شود و در نهایت سطح اتیلن کاهش می‌یابد (Mayak et al., 2004). کاهش غلظت اتیلن تنش منجر به گسترش بهتر ریشه در خاک می‌شود که نتیجه آن افزایش جذب آب و عناصر غذایی به دلیل افزایش گستره ریزوسفر می‌باشد (Glick et al., 1997). توسعه بیشتر ریشه و در نتیجه جذب بهتر آب و عناصر غذایی از خاک با افزایش غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی، بهبود کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم‌ها و افزایش تولید مواد فتوسنتزی و در نتیجه پر شدن بهتر دانه و افزایش وزن هزار دانه همراه است (Zarei et al., 2020). پژوهش گذشته ما نیز نشان داد که تلقیح گندم با باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC-دآمیناز موجب افزایش

فرم پودری (F5) و مایع قارچ AM (F4) در سطح آبیاری ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه موجب افزایش ۱۵ و ۲۲ درصدی کارایی مصرف آب گندم برحسب عملکرد زیستی نسبت به تیمار بدون کود زیستی شد ($p < 0.05$ ، شکل ۸). این افزایش در سطح آبیاری ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه به ترتیب ۹ و ۱۴ درصد و در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه به ترتیب ۱۲ و ۱۴ درصد بود ($p < 0.05$ ، شکل ۸). همچنین باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC-دآمیناز (F2) در سطح آبیاری ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه موجب افزایش ۷ درصدی کارایی مصرف آب گندم برحسب عملکرد زیستی نسبت به تیمار بدون کود زیستی شد ولی این افزایش از لحاظ آماری معنی‌دار نبود.

بحث

در بین کودهای زیستی باکتریایی، تنها تلقیح گندم با باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC-دآمیناز (F2) در سطح آبیاری ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه یا تنش آبی شدید نقش مثبتی در افزایش وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد زیستی و در نتیجه کارایی مصرف آب برحسب عملکرد دانه و عملکرد زیستی داشت. پژوهش‌های بسیاری گزارش کردند که تأثیر مثبت باکتری‌های PGPR بر افزایش مقاومت به تنش خشکی و عملکرد محصول در شرایط تنش شدید بیشتر مشهود است (Moradgholi et al., 2022; Rubin et al., 2017). تحت شرایط آبیاری نرمال، گیاهان توانایی کافی برای جذب عناصر غذایی، به ویژه نیتروژن را دارند، بنابراین اثرات چنین باکتری‌هایی را می‌توان

غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل و کاروتینوئید شد که این واقعیت را تأیید می‌کند (Hosseini et al., 2024).

بهبود در رشد گیاه و افزایش در عملکرد زیستی و عملکرد دانه در اثر تلقیح با باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC-دآمیناز (تیمار F2) در شرایط تنش آبی شدید منجر به افزایش کارایی مصرف آب گیاه گندم شد (شکل ۷ و ۸). نتایج ما با یافته‌های سایر پژوهشگران که افزایش کارایی مصرف آب گیاه را در پاسخ به تلقیح با ریزوباکتری‌های تولید کننده ACC-دآمیناز گزارش کردند، مطابقت دارد (Akhtar et al., 2020; Brunetti et al., 2021; Yavuz et al., 2023). رحمان و همکاران گزارش کردند که تلقیح گندم با باکتری *Bacillus amyloliquefaciens* تولید کننده ACC-دآمیناز در تنش آبی شدید و ملایم به ترتیب موجب افزایش ۲۷/۹ و ۳۴/۳ درصدی کارایی مصرف آب و افزایش ۲۰/۰۳ و ۳۰/۷۷ درصدی عملکرد دانه گندم نسبت به تیمار شاهد شد (Rehman et al., 2024). با این حال نتایج پژوهش حاضر نشان دهنده تأثیر کم باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC-دآمیناز یا عدم تأثیر باکتری *P. fluorescens* بدون توان تولید آنزیم ACC-دآمیناز بر عملکرد زیستی، عملکرد دانه و کارایی مصرف آب گیاه گندم بود. کاهش کارایی PGPRها در شرایط مزرعه احتمالاً ناشی از کیفیت نامناسب مایه تلقیح و ناتوانی باکتری‌ها در مقابله با جمعیت‌های بومی خاک در شرایط نامساعد باشد. سویه‌های PGPR تلقیح شده باید برای رقابت با جمعیت‌های بومی برای تهیه منابع محدود، زنده ماندن و کلونیزه کردن مناطق خاصی از ریشه‌ها کارآمد باشند (Ahluwalia et al., 2021). از طرف دیگر کارایی PGPRها در شرایط مزرعه به شدت تحت تأثیر شرایط اقلیمی و زیست محیطی از جمله نوع خاک، دما و بارندگی است (Tabassum et al., 2017). احتمالاً شرایط آب و هوایی نامناسب مانند کاهش شدید دما در مراحل ابتدایی رشد و استقرار گیاه در این آزمایش می‌تواند یکی از علل کاهش کارایی کودهای زیستی باکتریایی مورد استفاده باشد (شکل ۱). برای یک پاسخ موثر، PGPRها باید ریشه گیاه را کلونیزه کنند و همچنین به یک تراکم جمعیتی مشخصی از سویه‌های PGPR مورد نیاز است. برای این هدف باید غلظت‌های بیشتری از سویه‌های PGPR برای کاربرد در مزرعه به خاک داده شود (Kumar et al., 2019; Nadeem et al., 2016) و یا اینکه سویه‌های PGPR در طول فصل رشد طی چندین مرتبه بازتلقیح شوند. همچنین در مواردی که یک سویه باکتریایی در ارائه تحمل به استرس موثر نیست، مجموعه باکتریایی متشکل از چند سویه ممکن است سودمند باشد (Smyth et al., 2011).

هر دو فرم کود زیستی قارچی (F4 و F5) در تمام سطوح آبیاری موجب افزایش معنی‌دار وزن هزاردانه، عملکرد دانه و عملکرد زیستی گیاه گندم نسبت به کودهای زیستی باکتریایی و تیمار بدون کود زیستی شدند. به این ترتیب بیشترین مقدار وزن هزاردانه، عملکرد دانه و

عملکرد زیستی مربوط به تیمارهای F4 و F5 در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه بود (شکل ۳، ۴ و ۵). پژوهش‌های گذشته نقش مثبت قارچ‌های AM در افزایش عملکرد گندم و همچنین کارایی بیشتر این کودهای زیستی قارچی نسبت به کودهای زیستی باکتریایی را گزارش کردند (Azami-Atajan et al., 2020; Naseri et al., 2020; Yagini et al., 2020). برای مثال حسن پور و زند نشان دادند که عملکرد دانه گندم در تیمار تنش و بدون تلقیح ۵۴۳۷ کیلوگرم در هکتار بود اما در همین شرایط، تلقیح با قارچ *Rhizophagus irregularis* موجب افزایش آن به ۶۴۶۳ کیلوگرم در هکتار و تلقیح با باکتری *Azotobacter chroococcum* موجب افزایش آن به ۶۱۲۹ کیلوگرم در هکتار شد که نشان‌دهنده کارایی بیشتر قارچ AM بود (Hasanpour & Zand, 2014). این امر می‌تواند به دلیل مرفولوژی خاص قارچ‌های AM، توانایی بسیار بیشتر آنها برای تحمل شرایط سخت مثل دمای زیاد یا کم نسبت به PGPRها، توانایی نفوذ در بسترهای جامد (Bilal et al., 2017) و همچنین توانایی این قارچ‌ها در فراهم آوردن تمام کارکردهای اکولوژیکی ارائه شده و مشخصه باکتری‌های PGPR باشد (Hyde et al., 2019).

افزایش وزن هزار دانه در حضور قارچ‌های AM احتمالاً بخاطر اثر مثبت قارچ AM در افزایش توانایی گیاه در استفاده از ذخایر ساقه باشد (Naseri et al., 2017). در واقع، انتقال احتمالی مواد معدنی بین قسمت‌های مختلف گیاهان امکان‌پذیر است. ژانگ و همکاران انتقال نیتروژن از قسمت‌های رویشی گیاه به دانه‌های برنج در تیمارهای تلقیح شده با قارچ‌های AM را نشان دادند (Zhang et al., 2017). در مرحله پر شدن دانه، مقدار نیتروژن و فسفر در ریشه و اندام هوایی ذرت در گیاهان تلقیح شده با قارچ AM به طور قابل توجهی بیشتر بود، که نشان می‌دهد قارچ AM باعث انتقال بیشتر نیتروژن و فسفر در مرحله پر شدن دانه در گیاهان میزبان می‌شود (Azaizeh et al., 1995). پر شدن بهتر دانه و افزایش وزن آن در حضور قارچ‌های AM مستقیماً در افزایش عملکرد دانه نقش دارند.

افزایش عملکرد دانه و عملکرد زیستی گندم در حضور قارچ‌های AM می‌تواند به دلیل جذب بهتر آب و عناصر غذایی باشد. جوهانسون و همکاران بیان کردند که قارچ‌های AM عملکرد گیاه را در شرایط تنش خشکی از طریق جذب عناصر غذایی غیرمتحرک مانند فسفر، روی و مس افزایش می‌دهند (Johansson et al., 2004). قارچ‌های AM علاوه بر تأثیر مثبت بر توانایی گیاه در جذب و انتقال عناصر غذایی در شرایط تنش خشکی، از طریق تأثیری که بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه و فعالیت‌های میکروبی خاک دارد می‌تواند عملکرد دانه و عملکرد زیستی گیاه را افزایش دهد. برای مثال افزایش عملکرد گندم در اثر تلقیح با قارچ‌های AM به دلیل بهبود محتوای نسبی آب برگ (RWC)، افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی و کاهش نشت الکترولیت توسط پژوهش‌های مختلفی گزارش شده است (Beltrano & Ronco, 2011).

گیاهان دارد و در نتیجه منجر به بهبود عملکرد گیاه می‌شود (Crossay et al., 2019; Ortas & Ustuner, 2014; Parihar et al., 2020; Pellegrino et al., 2022). این امر به دلیل خدمات اکوسیستمی متنوعی است که مایه تلقیح چندگونه‌ای ارائه می‌دهد (Pellegrino et al., 2022). علاوه بر این، گزارش‌ها حاکی از آن است که مایه تلقیح‌های پودری در پوشش‌دهی بذر گیاهان علفی مانند گندم و جو بیشترین کارایی را دارند، چرا که ساختار این بذرها باعث چسبندگی بهتر پودر می‌شود (Basiru et al., 2020; Rocha et al., 2019). در مقابل، مایه تلقیح‌های مایع بیشتر برای بذرهایی با سطح صاف مانند ذرت، لوبیا و یونجه مناسب هستند، زیرا چسبندگی مطلوبی ایجاد می‌کنند (Basiru et al., 2020). همچنین کالوت و همکاران گزارش کردند که فرم مایع قارچ *Rhizophagus irregularis* در مقایسه با فرم جامد آن، اسپورهای کمتری تولید کرده و کلنی‌زاسیون ریشه‌های گیاه تره‌فرنگی را کاهش داده است (Calvet et al., 2013).

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان دهنده نقش مثبت آنزیم ACC-دآمیناز در باکتری‌های PGPR در کاهش سطح اتیلن تنشی و بهبود وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد زیستی و کارایی مصرف آب گندم در شرایط تنش آبی شدید بود. همچنین قارچ‌های AM در فرم‌های پودری و مایع به خوبی توانستند وزن هزار دانه، عملکرد محصول، شاخص برداشت و در نتیجه کارایی مصرف آب را در هر سه سطح آبیاری بهبود دهند. نتایج این پژوهش نشان دهنده کارایی بیشتر کودهای زیستی قارچی نسبت به کودهای زیستی باکتریایی بود. این یافته‌ها تأیید می‌کند که کاربرد قارچ‌های AM می‌تواند به عنوان یک استراتژی مؤثر برای بهبود عملکرد گندم و افزایش کارایی مصرف آب در شرایط اقلیمی مشهد مورد استفاده قرار گیرد. همچنین نتایج ما نشان داد که فرم پودری قارچ AM در مقایسه با فرم مایع آن، به دلیل تنوع گونه‌ای و توانایی بالاتر در کلنیزه کردن ریشه، اثرات بهتری در افزایش عملکرد گندم داشت. به طور کلی تفاوت‌های مشاهده شده در کارایی این کودها نشان می‌دهد که انتخاب مناسب نوع و فرم کودهای زیستی می‌تواند به طور قابل توجهی در مدیریت تنش آبی و بهبود تولید محصول مؤثر باشد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از ریاست محترم بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی جناب آقای دکتر زنگی‌آبادی که امکان اجرا این پژوهش را فراهم کردن صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نماییم. همچنین از جناب آقای دکتر نیکخواه ریاست محترم ایستگاه تحقیقاتی طرق به خاطر کمک‌های بی دریغ ایشان در تهیه بذر، آماده‌سازی زمین و عملیات‌های داشت

جذب بهتر آب و عناصر غذایی در تیمارهای تلقیح شده با قارچ AM موجب افزایش RWC و غلظت بیشتر رنگدانه‌های فتوسنتزی در برگ می‌شود و می‌تواند با افزایش سطح برگ و فعالیت فتوسنتزی عملکرد گیاه را افزایش دهد.

کودهای زیستی قارچی و به‌ویژه فرم پودری آن موجب افزایش شاخص برداشت شدند (شکل ۶). شاخص برداشت یکی از معیارهای فیزیولوژیکی مهم در گیاهان به شمار می‌آید و نشان‌دهنده کارایی توزیع مواد فتوسنتزی بین اندام‌های مختلف گیاه، به ویژه انتقال مواد به اندام‌های اقتصادی مانند دانه‌ها یا میوه‌ها است. قارچ‌های AM از طریق جذب بهتر آب و عناصر غذایی، طول دوره پر شدن دانه را بهبود داده و از این طریق موجب افزایش عملکرد دانه و شاخص برداشت شدند (Naseri rad et al., 2021).

همچنین تلقیح با قارچ‌های AM در این پژوهش موجب افزایش کارایی مصرف آب گیاه گندم در هر سه سطح آبیاری شد که در راستای پژوهش‌های گذشته بود (Askari et al., 2019; Azami-Atajan et al., 2020; Birhane et al., 2012; Omidvari et al., 2020). پژوهش‌های مختلف افزایش کارایی مصرف آب در حضور قارچ‌های AM را به بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه در نتیجه جذب بهتر آب و عناصر غذایی نسبت داده‌اند (Azami-Atajan et al., 2020; Omidvari et al., 2020; Tang et al., 2022).

بین دو قارچ AM مورد مطالعه، فرم پودری قارچ AM (F5) نسبت به فرم مایع آن (F4) بیشترین کارایی را در افزایش وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد زیستی و کارایی مصرف آب داشت. به هر حال این تفاوت تنها در سطح ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه و برای عملکرد دانه و کارایی مصرف آب بر حسب عملکرد دانه معنی‌دار بود (شکل ۴ و ۷). این موضوع می‌تواند به دلیل کارایی بیشتر فرم پودری قارچ AM در کلنیزه کردن ریشه گیاه گندم (شکل ۲) و همچنین تنوع بیشتر قارچ‌های AM استفاده شده در آن باشد. در این پژوهش فرم پودری قارچ *Rhizophagus irregularis* شامل سه گونه قارچی *Funneliformis mosseae* و *Claroideoglomus etunicatum* بود در حالی که فرم مایع آن تنها از گونه قارچی *Rhizophagus irregularis* تشکیل شده بود. پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که مایه تلقیح حاوی گونه‌های مختلف قارچ AM نسبت به یک گونه قارچ منفرد در کلنیزه کردن ریشه از کارایی بیشتری برخوردار هستند (Majidi & Rejali, 2023; Pons & Müller, 2022; Rocha et al., 2019). از طرفی با افزایش میزان کلنیزه شدن ریشه‌های گیاه توسط قارچ‌های AM، مقدار جذب عناصر غذایی و رشد گیاه اغلب افزایش می‌یابد (Treseder, 2013). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که مایه تلقیح حاوی چندین گونه قارچ AM در مقایسه با مایه تلقیح تک‌گونه‌ای، توانایی بیشتری در افزایش فتوسنتز و جذب مواد غذایی

صمیمانه تشکر و سپاسگزاری می‌کنیم. از آقای مهندس کمالی،
 کارشناس محترم بخش تحقیقات خاک و آب، و همچنین آقای مهندس
 عباسی، کارشناس ایستگاه تحقیقاتی طرق، به دلیل کمک‌های بی
 دریغ‌شان در طی انجام این آزمایش صمیمانه تشکر و قدردانی
 می‌نماییم.

References

- Ahluwalia, O., Singh, P.C., & Bhatia, R. (2021). Resources, environment and sustainability a review on drought stress in plants: Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. *Resources, Environment and Sustainability*, 5(July), 100032. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100032>
- Akhtar, S.S., Amby, D.B., Hegelund, J.N., Fimognari, L., Großkinsky, D.K., Westergaard, J.C., Müller, R., Moelbak, L., Liu, F., & Roitsch, T. (2020). *Bacillus licheniformis* FMCH001 increases water use efficiency via growth stimulation in both normal and drought conditions. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00297>
- Amiri, R., Nikbakht, A., & Etemadi, N. (2015). Alleviation of drought stress on rose geranium [*Pelargonium graveolens* (L.) Herit.] in terms of antioxidant activity and secondary metabolites by mycorrhizal inoculation. *Scientia Horticulturae*, 197, 373–380. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.062>
- Askari, A., Ardakani, M.R., Paknejad, F., & Hosseini, Y. (2019). Effects of mycorrhizal symbiosis and seed priming on yield and water use efficiency of sesame under drought stress condition. *Scientia Horticulturae*, 257, 108749. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108749>
- Azaizeh, H.A., Marschner, H., Römhild, V., & Wittenmayer, L. (1995). Effects of a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus and other soil microorganisms on growth, mineral nutrient acquisition and root exudation of soil-grown maize plants. *Mycorrhiza*, 5(5), 321–327. <https://doi.org/10.1007/BF00207404>
- Azami-Atajan, F., Hammami, H., & Yaghoobzadeh, M. (2020). The application of plant growth promoting microorganisms and phosphate fertilizers on yield, yield components and water use efficiency of wheat at levels of irrigation water. *Journal of Crop Production*, 12(4), 1–24. (In Persian with English abstract).
- Barazetti, A.R., Simionato, A.S., Navarro, M.O.P., Santos, I.M.O. dos, Modolon, F., Andreata, M.F. de L., Liuti, G., Cely, M.V.T., Chrysafidis, A.L., Dealis, M.L., & Andrade, G. (2019). Formulations of arbuscular mycorrhizal fungi inoculum applied to soybean and corn plants under controlled and field conditions. *Applied Soil Ecology*, 142, 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.05.015>
- Basiru, S., Mwanza, H.P., & Hijri, M. (2020). Analysis of Arbuscular mycorrhizal fungal inoculant benchmarks. *Microorganisms*, 9(1), 81. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9010081>
- Beltrano, J., & Ronco, M.G. (2008). Improved tolerance of wheat plants (*Triticum aestivum* L.) to drought stress and rewatering by the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus claroideum*: Effect on growth and cell membrane stability. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 20(1), 29–37. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202008000100004>
- Bilal, S., Khan, A.L., Shahzad, R., Asaf, S., Kang, S.-M., & Lee, I.-J. (2017). Endophytic *Paecilomyces formosus* LHL10 augments *Glycine max* L. adaptation to Ni-contamination through affecting *Endogenous phytohormones* and oxidative stress. *Frontiers in Plant Science*, 8, 870. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00870>
- Birhane, E., Sterck, F.J., Fetene, M., Bongers, F., & Kuyper, T.W. (2012). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance photosynthesis, water use efficiency, and growth of frankincense seedlings under pulsed water availability conditions. *Oecologia*, 169(4), 895–904. <https://doi.org/10.1007/s00442-012-2258-3>
- Bramley, H., Turner, N.C., & Siddique, K.H.M. (2013). Water use efficiency. In C. Kole (Ed.), *Genomics and Breeding for Climate-Resilient Crops* (pp. 225–268). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37048-9_6
- Brunetti, C., Saleem, A.R., Della Rocca, G., Emiliani, G., De Carlo, A., Balestrini, R., Khalid, A., Mahmood, T., & Centritto, M. (2021). Effects of plant growth-promoting rhizobacteria strains producing ACC deaminase on photosynthesis, isoprene emission, ethylene formation and growth of *Mucuna pruriens* (L.) DC. in response to water deficit. *Journal of Biotechnology*, 331, 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.03.008>
- Calvet, C., Camprubi, A., Pérez-Hernández, A., & Lovato, P.E. (2013). Plant growth stimulation and root colonization potential of in vivo versus in vitro arbuscular mycorrhizal inocula. *HortScience Horts*, 48(7), 897–901. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.7.897>
- Cardoso, I., & Kuyper, T. (2006). Mycorrhizas and tropical soil fertility. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 116(1–2), 72–84. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.03.011>

16. Carmen, C.A., Patricia, P., Rubén, B., & Victoria, S.M. (2016). Plant–Rhizobacteria interaction and drought stress tolerance in plants. In M. A. Hossain, S. H. Wani, S. Bhattacharjee, D. J. Burritt, & L.-S. P. Tran (Eds.), *Drought Stress Tolerance in Plants, Vol 1* (pp. 287–308). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28899-4_12
17. Cheng, Z., Park, E., & Glick, B.R. (2007). 1-Aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase from *Pseudomonas putida* UW4 facilitates the growth of canola in the presence of salt. *Canadian Journal of Microbiology*, 53(7), 912–918. <https://doi.org/10.1139/W07-050>
18. Crossay, T., Majorel, C., Redecker, D., Gensous, S., Medevielle, V., Durrieu, G., Cavaloc, Y., & Amir, H. (2019). Is a mixture of arbuscular mycorrhizal fungi better for plant growth than single-species inoculants? *Mycorrhiza*, 29(4), 325–339. <https://doi.org/10.1007/s00572-019-00898-y>
19. Garmendia, I., & Mangas, V. J. (2014). Comparative study of substrate-based and commercial formulations of arbuscular mycorrhizal fungi in Romaine lettuce subjected to salt stress. *Journal of Plant Nutrition*, 37(11), 1717–1731. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.889149>
20. Glick, B.R., Liu, C., Ghosh, S., & Dumbroff, E.B. (1997). Early development of canola seedlings in the presence of the plant growth-promoting rhizobacterium *Pseudomonas putida* GR12-2. *Soil Biology and Biochemistry*, 29(8), 1233–1239. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(97\)00026-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00026-6)
21. Glick, B.R., Penrose, D. M., & Li, J. (1998). A model for the lowering of plant ethylene concentrations by plant growth-promoting bacteria. *Journal of Theoretical Biology*, 190(1), 63–68. <https://doi.org/10.1006/jtbi.1997.0532>
22. Hasanpour, J., & Zand, B. (2014). Effect of wheat (*Triticum aestivum* L.) seed inoculation with bio-fertilizers on reduction of drought stress damage. *Iranian Journal of Seed Sciences and Research*, 1(2), 1–12. (In Persian with English abstract).
23. Hashem, A., Abd_Allah, E.F., Alqarawi, A.A., Al Huqail, A.A., Egamberdieva, D., & Wirth, S. (2016). Alleviation of cadmium stress in *Solanum lycopersicum* L. by arbuscular mycorrhizal fungi via induction of acquired systemic tolerance. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 23(2), 272–281. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.11.002>
24. Hosseini, S.S., Rejali, F., & Keshavarz, P. (2024). Effect of some biofertilizers on the physiological characteristics of wheat flag leaves and rhizosphere enzyme activities at different irrigation levels. *Journal of Sol Biology*, 12(1), 65–88. (In Persian with English abstract).
25. Hyde, K.D., Xu, J., Rapior, S., Jeewon, R., Lumyong, S., Niego, A.G.T., Abeywickrama, P.D., Aluthmuhandiram, J.V.S., Brahamanage, R.S., Brooks, S., Chaiyasen, A., Chethana, K.W.T., Chomnunti, P., Chepkirui, C., Chuankid, B., de Silva, N.I., Doilom, M., Faulds, C., Gentekaki, E., & Stadler, M. (2019). The amazing potential of fungi: 50 ways we can exploit fungi industrially. *Fungal Diversity*, 97(1), 1–136. <https://doi.org/10.1007/s13225-019-00430-9>
26. Jalili, F., Khavazi, K., Pazira, E., Nejati, A., Rahmani, H. A., Sadaghiani, H.R., & Miransari, M. (2009). Isolation and characterization of ACC deaminase-producing fluorescent *Pseudomonads*, to alleviate salinity stress on canola (*Brassica napus* L.) growth. *Journal of Plant Physiology*, 166(6), 667–674. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2008.08.004>
27. Jiriaie, M., Fateh, E., & Aynehband, A. (2014). Evaluation the morph physiological changes in wheat cultivars from the use of *Mycorrhiza* and *Azospirillum*. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 12(4), 841–851. (In Persian with English abstract).
28. Johansson, J.F., Paul, L.R., & Finlay, R.D. (2004). Microbial interactions in the mycorrhizosphere and their significance for sustainable agriculture. *FEMS Microbiology Ecology*, 48(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.femsec.2003.11.012>
29. Khan, Y., Shah, S., & Hui, T. (2022). The roles of arbuscular mycorrhizal fungi in influencing plant nutrients, photosynthesis, and Metabolites of Cereal Crops—A Review. *Agronomy*, 12(9), 2191. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092191>
30. Kormanik, P. P., & McGraw, A.-C. (1982). Quantification of vesicular-arbuscular mycorrhizae in plant roots. In N. C. Schenck (Ed.), *Methods and principles of mycorrhizal research* (pp. 37–47). American Phytopathological Society. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:91636228>
31. Kumar, A., Patel, J. S., Meena, V. S., & Srivastava, R. (2019). Recent advances of PGPR based approaches for stress tolerance in plants for sustainable agriculture. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 20, 101271. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101271>
32. Li, H., Guo, Q., Jing, Y., Liu, Z., Zheng, Z., Sun, Y., Xue, Q., & Lai, H. (2020). Application of streptomyces pactum Act12 enhances drought resistance in wheat. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39(1), 122–132. <https://doi.org/10.1007/s00344-019-09968-z>

33. Li, J., Meng, B., Chai, H., Yang, X., Song, W., Li, S., Lu, A., Zhang, T., & Sun, W. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate drought stress in C3 (*Leymus chinensis*) and C4 (*Hemarthria altissima*) grasses via altering antioxidant enzyme activities and photosynthesis. *Frontiers in Plant Science*, 10, 450785. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00499>
34. Lim, J.-H., & Kim, S.-D. (2013). Induction of drought stress resistance by multi-functional PGPR *Bacillus licheniformis* K11 in pepper. *The Plant Pathology Journal*, 29(2), 201–208. <https://doi.org/10.5423/PPJ.SI.02.2013.0021>
35. Majidi, A., & Rejali, F. (2023). Mycorrhizal symbiosis and glycine betaine effect foliar application on some agronomic traits of rainfed wheat in calcareous soils. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(2), 281–297. (In Persian with English abstract).
36. Malusà, E., Pinzari, F., & Canfora, L. (2016). Efficacy of biofertilizers: Challenges to improve crop production. in *Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity* (pp. 17–40). Springer India. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2644-4_2
37. Mathur, S., Tomar, R.S., & Jajoo, A. (2019). Arbuscular Mycorrhizal fungi (AMF) protects photosynthetic apparatus of wheat under drought stress. *Photosynthesis Research*, 139(1–3), 227–238. <https://doi.org/10.1007/s11120-018-0538-4>
38. Mayak, S., Tirosh, T., & Glick, B.R. (2004). Plant growth-promoting bacteria that confer resistance to water stress in tomatoes and peppers. *Plant Science*, 166(2), 525–530. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2003.10.025>
39. Moradgholi, A., Mobasser, H., Ganjali, H., Fanaie, H., & Mehraban, A. (2022). WUE, protein and grain yield of wheat under the interaction of biological and chemical fertilizers and different moisture regimes. *Cereal Research Communications*, 50(1), 147–155. <https://doi.org/10.1007/s42976-021-00145-1>
40. 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. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.12.005>
41. Nadeem, S.M., Naveed, M., Ayyub, M., Khan, M.Y., Ahmad, M., & Zahir, Z.A. (2016). Potential, limitations and future prospects of *Pseudomonas* spp. for sustainable agriculture and environment: A Review. *Soil & Environment*, 35(2).
42. Naseri, R., Barary, M., Zarea, M. J., Khavazi, K., & Tahmasebi, Z. (2017). Effect of plant growth promoting bacteria and Mycorrhizal fungi on growth and yield of wheat under dryland conditions. *Journal of Soil Biology*, 5(1), 49–66. (In Persian with English abstract).
43. Naseri rad, H., Naseri, R., Mirzaei, A., & Zarei, B. (2021). Effects of phosphorous fertilizer and mycorrhizal fungi on yield and yield components of durum wheat (*Triticum turgidum* var. durum) under rainfed condition. *Applied Field Crops Research*, 34(3), 43–68. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.21608/ajas.2021.93649.1043>
44. Oliveira, R.S., Rocha, I., Ma, Y., Vosátka, M., & Freitas, H. (2016). Seed coating with arbuscular mycorrhizal fungi as an ecotechnological approach for sustainable agricultural production of common wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A*, 79(7), 329–337. <https://doi.org/10.1080/15287394.2016.1153448>
45. Olumi somarin, S., Ajali, J., Faramarzi, A., Abdi, M., & Nazari, N. (2023). Study of the effect of irrigation, mycorrhiza, and azospirillum on the quantitative and qualitative yield of barley varieties. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(2), 407–427. (In Persian with English abstract).
46. Omidvari, S., Salamat, N., & Abdi, S. (2020). Study the effects of irrigation regime and biofertilizers on yield and yield component of wheat. *Journal of Crops Improvement*, 22(2), 193–204. (In Persian with English abstract).
47. Ortas, I., & Ustuner, O. (2014). The effects of single species, dual species and indigenous mycorrhiza inoculation on citrus growth and nutrient uptake. *European Journal of Soil Biology*, 63, 64–69. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2014.05.007>
48. Parihar, M., Rakshit, A., Rana, K., Prasad Meena, R., & Chandra Joshi, D. (2020). A consortium of arbuscular mycorrhizal fungi improves nutrient uptake, biochemical response, nodulation and growth of the pea (*Pisum sativum* L.) under salt stress. *Rhizosphere*, 15, 100235. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100235>
49. Pellegrino, E., Nuti, M., & Ercoli, L. (2022). Multiple arbuscular mycorrhizal fungal consortia enhance yield and fatty acids of *Medicago sativa*: A two-year field study on agronomic traits and tracing of fungal persistence. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.814401>
50. Phillips, J., & Hayman, D. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and

- vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55(1), 158–161. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)
51. Pons, C., & Müller, C. (2022). Impacts of Drought Stress and Mycorrhizal Inoculation on the Performance of Two Spring Wheat Cultivars. *Plants*, 11(17), 2187. <https://doi.org/10.3390/plants11172187>
52. Rahimi, Z., Hosseinpanahi, F., & Siosemardeh, A. (2019). Evaluation of yield, radiation and water use efficiency of drought resistant and susceptible wheat cultivars under different irrigation levels. *Plant Production and Genetics*, 2(1), 19–34. (In Persian with English abstract). https://jwr.uok.ac.ir/article_61144.html
53. Rehman, M.M.U., Zhu, Y., Abrar, M., Khan, W., Wang, W., Iqbal, A., Khan, A., Chen, Y., Rafiq, M., Tufail, M. A., Ye, J.-S., & Xiong, Y.-C. (2024). Moisture- and period-dependent interactive effects of plant growth-promoting rhizobacteria and AM fungus on water use and yield formation in dryland wheat. *Plant and Soil*, 502(1), 149–165. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1516690/v1>
54. Rocha, I., Duarte, I., Ma, Y., Souza-Alonso, P., Látr, A., Vosátka, M., Freitas, H., & Oliveira, R.S. (2019). Seed Coating with arbuscular mycorrhizal fungi for improved field production of Chickpea. *Agronomy*, 9(8), 471. <https://doi.org/10.3390/agronomy9080471>
55. Rocha, I., Ma, Y., Souza-Alonso, P., Vosátka, M., Freitas, H., & Oliveira, R.S. (2019). Seed coating: A tool for delivering beneficial microbes to agricultural crops. *Frontiers in Plant Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01357>
56. Rubin, R.L., van Groenigen, K.J., & Hungate, B.A. (2017). Plant growth promoting rhizobacteria are more effective under drought: a meta-analysis. *Plant and Soil*, 416(1–2), 309–323. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3199-8>
57. Ruíz-Sánchez, M., Armada, E., Muñoz, Y., García de Salamone, I.E., Aroca, R., Ruíz-Lozano, J.M., & Azcón, R. (2011). Azospirillum and arbuscular mycorrhizal colonization enhance rice growth and physiological traits under well-watered and drought conditions. *Journal of Plant Physiology*, 168(10), 1031–1037. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.12.019>
58. Sahu, P. K., & Brahma Prakash, G. P. (2016). Formulations of biofertilizers – Approaches and advances. In R. Singh, D., Singh, H., Prabha (Ed.), *Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity* (pp. 179–198). Springer India. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2644-4_12
59. Saif, S., Abid, Z., Ashiq, M.F., Altaf, M., & Ashraf, R.S. (2021). Biofertilizer formulations. In *Biofertilizers* (pp. 211–256). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119724995.ch7>
60. Siddiqui, Z. A., & Kataoka, R. (2011). Mycorrhizal inoculants: Progress in inoculant production technology. In *Microbes and Microbial Technology* (pp. 489–506). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7931-5_18
61. Smyth, E.M., McCarthy, J., Nevin, R., Khan, M. R., Dow, J.M., O’Gara, F., & Doohan, F.M. (2011). In vitro analyses are not reliable predictors of the plant growth promotion capability of bacteria; a *Pseudomonas fluorescens* strain that promotes the growth and yield of wheat. *Journal of Applied Microbiology*, 111(3), 683–692. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2011.05079.x>
62. Tabassum, B., Khan, A., Tariq, M., Ramzan, M., Iqbal Khan, M.S., Shahid, N., & Aaliya, K. (2017). Bottlenecks in commercialisation and future prospects of PGPR. *Applied Soil Ecology*, 121(October), 102–117. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.09.030>
63. Tang, H., Hassan, M.U., Feng, L., Nawaz, M., Shah, A.N., Qari, S.H., Liu, Y., & Miao, J. (2022). The critical role of arbuscular mycorrhizal fungi to improve drought tolerance and nitrogen use efficiency in crops. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.919166>
64. Treseder, K. K. (2013). The extent of mycorrhizal colonization of roots and its influence on plant growth and phosphorus content. *Plant and Soil*, 371(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1681-5>
65. Unkovich, M., Baldock, J., & Forbes, M. (2010). Variability in harvest index of grain crops and potential significance for carbon accounting. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 105, pp. 173–219). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05005-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05005-4)
66. Yagini, F., seyed sharifi, R., Khomari, S., & Gasemi, M. (2020). Effect of supplementary irrigation and seed inoculation with bio fertilizers on yield and some physiological traits of rainfed wheat. *Jispp*, 9(39), 147–163. (In Persian with English abstract). <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-1321-en.html>
67. Yavuz, D., Baştaş, K. K., Seymen, M., Yavuz, N., Kurtar, E. S., Süheri, S., Türkmen, Ö., Gür, A., & Kıymacı, G. (2023). Role of ACC deaminase-producing rhizobacteria in alleviation of water stress in watermelon. *Scientia Horticulturae*, 321, 112288. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112288>
68. Zabihi, H. R., Savaghebi, G. R., Khavazi, K., Ganjali, A., & Miransari, M. (2011). *Pseudomonas* bacteria and phosphorous fertilization, affecting wheat (*Triticum aestivum* L.) yield and P uptake under greenhouse

- and field conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, 33(1), 145–152. <https://doi.org/10.1007/s11738-010-0531-9>
69. Zahir, Z.A., Munir, A., Asghar, H.N., Shaharoona, B., & Arshad, M. (2008). Effectiveness of rhizobacteria containing ACC deaminase for growth promotion of peas (*Pisum sativum*) under drought conditions. *Journal Microbiology Biotechnology*, 18(5), 958–963. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(08\)60055-7](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(08)60055-7)
70. Zarei, T., Moradi, A., Kazemeini, S.A., Akhgar, A., & Rahi, A.A. (2020). The role of ACC deaminase producing bacteria in improving sweet corn (*Zea mays* L. var *saccharata*) productivity under limited availability of irrigation water. *Scientific Reports*, 10(1), 20361. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77305-6>
71. Zhang, X., Wang, L., Ma, F., Yang, J., & Su, M. (2017). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on carbon and nitrogen distribution and grain yield and nutritional quality in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(9), 2919–2925. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jsfa.8129>

Enhancing Phosphorus Availability and Altering Soil Biochemical Responses Through Application of Humic Acid and *Streptomyces* Inoculation

N. Khalili¹, R. Ghorbani Nasrabadi^{1*}, M. Barani Motlagh¹, R. Khodadadi¹

1- Department of Soil Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

(*- Corresponding Author Email: rgnasr@yahoo.com)

Received: 13-10-2024

Revised: 15-03-2025

Accepted: 26-03-2025

Available Online: 26-03-2025

How to cite this article:

Khalili, N., Ghorbani Nasrabadi, R., Barani Motlagh, M., & Khodadadi, R. (2025). Enhancing phosphorus availability and altering soil biochemical responses through humic acid application and *Streptomyces* inoculation. *Journal of Water and Soil*, 39(1), 35-53. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90227.1442>

Introduction

Actinobacteria are one of the most abundant microbial groups in soil and play a crucial role in preserving ecosystems. They are among the soil microbial groups capable of releasing phosphorus from low-soluble or insoluble phosphorus sources, which enhances plant growth. Their application in agricultural systems is recognized as an environmentally friendly strategy to limit the negative effects of chemical inputs and improve the availability of nutrients, especially phosphorus, in the rhizosphere. Additionally, humic acid, as an organic growth stimulant, plays an important role in improving soil fertility and biological communities, and its combined use with actinobacteria increases the efficiency of fertilizer use, particularly phosphorus-based fertilizers. Therefore, the aim of this research was: (i) to screen the phosphorus solubilization potential of actinobacteria isolates at different incubation times, (ii) to investigate the effect of adding humic acid on the phosphorus solubilization capacity actinobacteria isolates under laboratory conditions, and (iii) to monitor the impact of selected actinobacterium isolate and humic acid, at various phosphorus fertilizer levels, on soil phosphorus content, plant phosphorus uptake, and some biochemical properties of the soil.

Materials and Methods

In this study, five actinobacteria isolates, collected and purified from various agricultural, orchard, and rangeland ecosystems of Golestan Province, were screened based on their morphological characteristics. These strains were utilized for screening purposes. To prepare fresh cultures of the actinobacteria isolates, they were subcultured on solid yeast extract-malt extract agar medium. The effects of incubation time and the application of humic acid on the phosphate solubilization ability of the actinobacteria isolates were then investigated. This experiment was conducted in a factorial arrangement within a completely randomized design, with the following factors. To examine the effect of the selected superior actinobacterium isolate and its interaction with different phosphorus levels and humic acid application, a factorial pot experiment was conducted in a completely randomized design. The experimental factors included a mineral phosphorus source at three levels (control, 20 kg, and 40 kg of phosphorus per hectare from monoammonium phosphate), *Streptomyces* inoculation at two levels (control and inoculation with the selected isolate), and humic acid application at two levels (control and 2 mg per kg). The experiment was carried out on maize (Single Cross 704) with three replications. For seed preparation, a sufficient number of healthy maize seeds were selected and surface sterilized by immersing them in alcohol for 30 seconds. They were then exposed to 5%



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90227.1442>

sodium hypochlorite for 2 to 3 minutes, followed by rinsing eight times with sterile distilled water. To prepare the microbial inoculum, the selected superior isolate was grown in yeast extract-malt extract medium at an appropriate (107 CFU/mL). The seeds were then placed in pots, and one milliliter of the *Streptomyces* suspension was applied to the seeds for inoculation. At the end of the experiment, the phosphorus content in the soil and plant, as well as the soil biochemical responses were measured.

Results

Based on the results obtained from this study, the application of humic acid led to an increase in microbial biomass and enhanced phosphorus release by actinobacteria isolates under laboratory conditions. As the incubation period extended from 7 to 14 days, the solubility of phosphate showed an increasing trend. The results showed that the highest phosphorus content in the soil was associated with the combined application of a high phosphorus level (40 mg per kg) along with humic acid and *Streptomyces* inoculation. Analysis of microbial biomass phosphorus revealed that the highest level was related to the treatment combining the highest level of phosphorus fertilizer and humic acid. According to the findings related to phosphatase enzymes, the combined application of the *Streptomyces* treatment, humic acid, and phosphorus resulted in an increase in the levels of these enzymes. Additionally, the results of microbial respiration in the soil indicated that the combined treatment of *Streptomyces* and the highest level of phosphorus fertilizer enhanced microbial respiration in the soil. The phosphorus content in the plants under the combined treatments of *Streptomyces*, humic acid, and phosphorus showed that the integration of *Streptomyces* inoculation and humic acid was effective in improving soil phosphorus availability and led to an increase in the phosphorus content of the plants. The results of this study showed that inoculation with the selected *Streptomyces* isolate, along with the combined application of humic acid, enhanced the efficiency of phosphorus fertilizer utilization, making it more readily available to the plant.

Conclusion

In general, the results of current study revealed that the simultaneous application of humic acid and *Streptomyces* inoculation led to an increase in the availability of phosphorus in the soil and the phosphorus content in the plants, as well as an improvement in the biochemical responses of the soil. However, field experiments are necessary to confirm its effectiveness.

Keywords: Actinobacterium, Microbial biomass phosphorus, Microbial respiration, Phosphatase

مقاله پژوهشی

جلد ۳۹، شماره ۱، فروردین-اردیبهشت ۱۴۰۴، ص. ۳۵-۵۳

افزایش دسترسی فسفر و تغییر پاسخ‌های بیوشیمیایی خاک با کاربرد اسیدهیومیک و مایه‌زنی استریتومایسس

نیلوفر خلیلی^۱ - رضا قربانی نصرآبادی^{۱*} - مجتبی بارانی مطلق^{۱ID} - رضا خدادادی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۰۶

چکیده

اکتینوباکتری‌ها از جمله گروه‌های میکروبی خاکری بوده که دارای توانمندی آزادسازی فسفر از منابع کم محلول فسفر هستند و منجر به بهبود رشد گیاه می‌گردند. از طرفی اسیدهیومیک به‌عنوان یک ترکیب آلی محرک رشد نقش مهمی در تقویت حاصلخیزی و جامعه زیستی خاک دارد، که کاربرد تلفیقی آن‌ها سبب افزایش کارایی مصرف کودها به‌ویژه کودهای فسفره خواهد شد. بر این اساس هدف از پژوهش حاضر، تعیین میزان حل‌کنندگی فسفر توسط جدایه‌های اکتینوباکتری در زمان‌های مختلف انکوباسیون و بررسی اثر افزودن اسیدهیومیک بر میزان حلالیت فسفر توسط جدایه‌های اکتینوباکتری در شرایط آزمایشگاهی و نیز پایش تأثیر جدایه اکتینوباکتری منتخب و اسیدهیومیک در سطوح مختلف کودی فسفر بر میزان فسفر قابل دسترس خاک، فسفر گیاه و برخی خصوصیات بیوشیمیایی خاک بود. در این پژوهش تعداد پنج جدایه اکتینوباکتری مورد غربالگری قرار گرفتند. سپس اثر زمان انکوباسیون و کاربرد اسیدهیومیک بر توانمندی حلالیت فسفات جدایه‌های اکتینوباکتری مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور بررسی اثر جدایه اکتینوباکتریایی برتر منتخب و اثر متقابل آن با سطوح مختلف فسفر و کاربرد اسیدهیومیک، آزمایش گلدانی بصورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با فاکتورهای آزمایش شامل: منبع معدنی فسفر در سه سطح فسفر از منبع مونوآمونیم فسفات (شاهد، ۲۰ کیلوگرم فسفر خالص در هکتار، ۴۰ کیلوگرم فسفر خالص در هکتار)، مایه‌زنی اکتینوباکتری در دو سطح (شاهد، مایه‌زنی با جدایه منتخب)، کاربرد اسیدهیومیک در دو سطح (شاهد، کاربرد ۲ میلی گرم در کیلوگرم) در سه تکرار بر روی گیاه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ صورت گرفت. در پایان آزمایش، مقدار فسفر قابل دسترس خاک و گیاه و همچنین پاسخ‌های بیوشیمیایی خاک اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، کاربرد اسیدهیومیک سبب افزایش میزان زیست‌توده میکروبی و افزایش آزادسازی فسفر به‌وسیله جدایه‌های اکتینوباکتری در شرایط آزمایشگاهی گردید. با افزایش زمان انکوباسیون از ۷ به ۱۴ روز میزان حلالیت فسفر روند افزایشی داشت. بررسی نتایج نشان داد که بیشترین میزان فسفر قابل دسترس خاک مربوط به کاربرد تلفیقی سطح بالای فسفر (۴۰ میلی گرم در کیلوگرم) به همراه کاربرد اسیدهیومیک و مایه‌زنی استریتومایسس بوده است. بررسی میزان فسفر زیست‌توده میکروبی نشان داد که بیش‌ترین میزان آن مربوط به تیمار کاربرد تلفیقی بالاترین سطح کود فسفره و اسیدهیومیک بوده است. براساس نتایج حاصل از این پژوهش در رابطه با آنزیم‌های فسفاتاز، کاربرد تلفیقی تیمار استریتومایسس، اسیدهیومیک و فسفر سبب افزایش میزان این آنزیم‌ها گردید. همچنین، نتایج تنفس میکروبی خاک نشان داد که تیمار تلفیقی استریتومایسس و بالاترین سطح کود فسفره، سبب افزایش میزان تنفس میکروبی در خاک گردید. کاربرد تلفیقی مایه‌زنی استریتومایسس و اسیدهیومیک در فراهمی فسفر قابل دسترس خاک مؤثر بوده و سبب افزایش محتوای فسفر گیاه گردید. بر اساس نتایج این پژوهش، کاربرد همزمان اسیدهیومیک و مایه‌زنی استریتومایسس منجر به افزایش قابلیت دسترسی فسفر خاک و محتوای فسفر گیاه گردیده و همچنین منجر به بهبود پاسخ‌های بیوشیمیایی خاک گردید.

واژه‌های کلیدی: اکتینوباکتری، تنفس میکروبی، فسفاتاز، فسفر زیست‌توده میکروبی

۱- گروه مهندسی علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: rgnshr@yahoo.com)

مقدمه

فسفر (P) از جمله عناصر غذایی اصلی برای رشد و نمو گیاهان بوده و نقش مهمی در سنتز DNA، اجزای غشای سلولی (فسفولیپیدها)، آدنوزین تری فسفات (ATP)، تنفس و فتوسنتز ایفا می کند (Peng et al., 2021). فسفر در خاک به دو صورت فسفر آلی و فسفر معدنی وجود دارد. اگرچه بطور طبیعی، در خاک مقادیر زیادی فسفر وجود دارد اما معمولاً برای گیاهان غیرقابل جذب و استفاده است (Divjot et al., 2021). میزان جابجایی فسفر در خاک بسیار کم است و گیاهان نمی توانند مستقیماً فسفر را جذب و مورد استفاده قرار دهند، که این موضوع منجر به کاهش رشد و عملکرد گیاه می شود (Peng et al., 2021). کمبود فسفر، یک پدیده رایج در اکثر خاک های کشاورزی در سراسر جهان است و اکثر کشاورزان بطور مرتب از کودهای شیمیایی فسفره به منظور جلوگیری از کمبود فسفر در سیستم های زراعی استفاده می کنند (Chouyia et al., 2020). با این حال اثرات جذب و تثبیت خاک بر روی فسفر، راندمان استفاده از کود را کاهش می دهد (Dong et al., 2023). با توجه به اثرات مخرب استفاده از نهاده های شیمیایی و همچنین ضرورت تغییر مدیریت کوددهی و نیل به ترویج کشاورزی پایدار، استفاده از ریزجانداران خاکزی از جمله تکنیک های زیستی کارآمد در زمینه کشاورزی پایدار به منظور افزایش فراهمی عناصر غذایی برای گیاه می باشد (Shah & Wu, 2019). بکارگیری، شناخت و معرفی روش های سازگار با محیط زیست، در جهت تأمین و فراهمی فسفر در خاک برای گیاهان در مبحث کشاورزی پایدار، برخلاف روش های شیمیایی و غیرسازگار با محیط زیست، بسیار مهم می باشد (Da costa et al., 2015). میکروارگانیسم های حل کننده فسفات (PSMs) قادر هستند ترکیبات آلی و معدنی فسفر غیرمحلول را هیدرولیز کرده و به شکل قابل استفاده برای گیاه تبدیل کنند (Sarmah & Sarma, 2023). این گروه از میکروارگانیسم ها بطور کلی شامل گونه هایی از باکتری های *Aspergillus*, *Trichiderma*, *Actinomycete*, *Bacillus*, *Cyanobacteria*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Penicillium*, *Streptovorticillium* و *Streptomyces*, *Calothrix braunii* می باشند (Kalayu, 2019).

اکتینوباکتری ها گروه متنوعی از باکتری های گرم مثبت هستند که از توانایی بالایی در حل کردن اشکال نامحلول فسفر از طریق مکانیسم های مختلف برخوردار می باشند. این گروه از میکروارگانیسم ها در کشاورزی بدلیل سازوکارهای انحلال فسفات، نقش های اکولوژیکی از جمله چرخه مواد مغذی، تجزیه مواد آلی و

سرکوب پاتوژن های موجود در خاک و همچنین بکارگیری آن ها در جهت تولید محصولات پایدار، اهمیت بالایی دارند (Khan et al., 2024). در میان میکروارگانیسم های حل کننده فسفات، اکتینوباکتری هایی از جمله *Streptomyces*, *Actinoplanes* و *Micromonospora* از اهمیت ویژه ای برخوردارند (Aallam et al., 2021). این گروه از محرک های رشد از جمله گروه های میکروبی مفید می باشند که ویژگی های محرک رشد آن ها به ویژه حلالیت فسفر و فراهمی آن برای گیاهان مورد توجه قرار گرفته است (Wahid et al., 2016). سازوکار اصلی پیشنهاد شده برای آن ها، کاهش pH خاک و افزایش حلالیت فسفر و فراهمی آن در شرایط کمبود فسفر کل خاک می باشد (Ghorbani Nasrabadi et al., 2023). میکروارگانیسم های محرک رشد گیاه، بخش مهمی از جامعه زیستی خاک هستند که به دلیل ظرفیت آن ها برای افزایش تولید محصول از طریق مکانیسم های مختلفی از جمله تثبیت بیولوژیکی نیتروژن، تولید فیتوهورمون ها، حل شدن فسفات و فرایندهای کنترل زیستی شناخته شده هستند (Bashan et al., 2014).

مواد هومیکی بطور عمده شامل اسیدهیومیک و اسیدفولویک بوده و از پیچیده ترین و فعال ترین ترکیبات آلی در خاک می باشند که از طریق سازوکارهایی سبب تحریک گیاه و فعالیت های میکروبی می گردند. مواد هیومیکی علاوه بر تأثیر مثبتی که در خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک، ساختار خاک و فعالیت جامعه میکروبی دارند، فراهمی عناصر غذایی برای گیاه را افزایش می دهند. به طوری که عنوان شده است اسیدهیومیک با تأثیر مثبت بر رشد ریشه گیاه و بهبود تولید ریشه های جانبی سبب افزایش جذب مواد غذایی می گردد (Ekin, 2019). اخیراً گزارش شده است که کاربرد تلفیقی باکتری های محرک رشد و اسیدهیومیک به عنوان یک روش مفید در استفاده از محرک های زیستی برای گیاه بوده، که سبب بهبود رشد، افزایش عملکرد و جذب مواد غذایی می شوند (Esringü et al., 2016; Olivares et al., 2016). Pishchik et al., 2016). اولیواریس و همکاران (2017) گزارش کردند که کاربرد تلفیقی باکتری های محرک رشد و اسیدهیومیک به واسطه سازوکار مثبت تعاملی در افزایش فراهمی عناصر غذایی و انتقال آن در گیاه علاوه بر بهبود حاصلخیزی خاک سبب افزایش رشد گیاه می گردد. آن ها عنوان داشتند که مایه زنی باکتری های محرک رشد و کاربرد اسیدهیومیک یک روش مطلوب با اثرات مفید می باشد (Olivares et al., 2017). خلیلی و همکاران (Khalili et al., 2023) در بررسی مقایسه ای کاربرد اسیدهیومیک و /استرپتومایسس در شرایط درون کشتگاهی میکروبی (in vitro) و آزمایش گلدانی بیان داشتند که کاربرد اسیدهیومیک سبب افزایش میزان حلالیت فسفر در محیط کشت های مختلف میکروبی فسفر گردید. همچنین نتایج آزمایش گلدانی حاکی از بهبود شاخص های

رشدی، مورفولوژیک و فیزیولوژیک ذرت در سطوح مختلف فسفر بوده است.

پژوهشی که توسط اولیواریس و همکاران (Olivares et al., 2015) انجام شد، بیان کرد مزایای زیادی در تعامل بین میکروارگانیزم‌ها و مواد آلی از طریق غنی‌سازی محیط بیولوژیکی توسط مایه تلقیح میکروبی وجود دارد. در پژوهش اکین (Ekin, 2019) پس از بررسی اثرات کاربرد اسید هیومیک و باکتری‌های محرک رشد بر عملکرد سیب‌زمینی بیان داشت که باکتری‌های محرک رشد به واسطه خصوصیات محرک رشدی شامل: تولید IAA و ACC د آمیناز، تثبیت بیولوژیک نیتروژن و حل کردن فسفر سبب افزایش عملکرد و بهبود اثرات مثبت اسید هیومیک گردید. بر این اساس اهمیت و جایگاه اسید هیومیک و باکتری‌های محرک رشد به‌ویژه اکتینوباکتری‌ها که نتایج کمی در زمینه دامنه تأثیر آن در بهبود تولیدات کشاورزی در ایران وجود دارد بایستی مورد توجه قرار گیرد. همچنین افزایش بهره‌وری مصرف محرک‌های رشدی و کودهای فسفاته در سیستم‌های کشاورزی پایدار امری ضروری می‌باشد. در این پژوهش فرض گردید توانمندی حل‌کنندگی جدایه‌های اکتینوباکتریایی در طی دوره انکوباسیون متفاوت بوده و مایه‌زنی با جدایه منتخب/استریتوما یسس و اثرات متقابل آن با اسید هیومیک و کود فسفره می‌تواند پاسخ‌های بیوشیمیایی خاک را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین هدف از پژوهش حاضر، غربالگری میزان حل‌کنندگی فسفر توسط جدایه‌های اکتینوباکتری در زمان‌های مختلف انکوباسیون، بررسی اثر افزودن اسیدهیومیک بر میزان حلالیت فسفر توسط جدایه‌های اکتینوباکتری و پایش تأثیر جدایه اکتینوباکتری منتخب و اسید هیومیک در سطوح مختلف کودی فسفر بر فراهمی فسفر قابل دسترس خاک، مقدار فسفر گیاه و تغییر پاسخ‌های بیوشیمیایی خاک بود.

مواد و روش

خالص‌سازی و انتخاب جدایه‌های باکتریایی

در این پژوهش تعداد پنج جدایه اکتینوباکتریایی که از ریزوسفر گیاهان زراعی: گندم، پنبه، جو، ذرت و یک گیاه مرتعی مقاوم به شوری و خشکی از اراضی استان گلستان جداسازی شده، برای غربالگری مورد استفاده قرار گرفتند. شناسایی اولیه آن بر اساس رشد در محیط‌کشت ISP_2 و بر اساس خصوصیات رشدی و مورفولوژیک انجام شد. به‌منظور اطمینان حاصل کردن از خالص بودن جدایه‌های اکتینوباکتریایی مورد استفاده در پژوهش، جدایه‌ها بازکشت شده و سپس خالص‌سازی در محیط‌کشت جامد عصاره مخمر-عصاره مالت آگار (که بر حسب گرم در لیتر شامل: عصاره مالت ۱۰، عصاره مخمر ۴، گلوکز ۴، آگار ۱۵) انجام گرفت. همچنین در نهایت جدایه برتر

مورد استفاده در این پژوهش بر اساس توالی‌یابی ژن 16S rRNA شناسایی شد.

سنجش حلالیت فسفر در زمان‌های انکوباسیون و کاربرد اسیدهیومیک

جهت بررسی اثر زمان انکوباسیون و کاربرد اسیدهیومیک بر حلالیت فسفر توسط جدایه‌های اکتینوباکتریایی و همچنین انتخاب بهترین جدایه، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. فاکتورهای آزمایشی شامل: ۵ جدایه اکتینوباکتری، زمان انکوباسیون (۷، ۱۰ و ۱۴ روز) و اسیدهیومیک (کاربرد با غلظت ۰/۰۵ درصد حجمی محیط‌کشت و عدم کاربرد) در سه تکرار انجام گرفت. بعد از گذشت زمان و رشد مناسب و یکسان جدایه‌ها، در محیط پیش‌کشت عصاره مخمر-عصاره مالت، مایه‌زنی به میزان دو درصد حجمی محیط‌کشت NBRIP^۱ (که بر حسب گرم در لیتر شامل: گلوکز ۱۰، منیزیم کلرید ۵، سولفات منیزیم ۰/۲۵، کلرید پتاسیم ۰/۲، سولفات آمونیوم ۰/۲، کلسیم کلرید ۰/۵، تری کلسیم فسفات ۵) انجام شد. در این پژوهش از اسیدهیومیک پودری با نام تجاری هیومکس (شامل ۸۰ درصد اسیدهیومیک و ۲۰ درصد اسید فولویک) با غلظت ۰/۰۵ درصد در محیط‌کشت استفاده شد. همه ارلن‌ها در طی زمان انکوباسیون در دمای ۲۵ تا ۲۸ درجه سلسیوس با سرعت ۱۵۰ دور بر دقیقه (rpm) قرار داده شدند. جهت اندازه‌گیری مقدار فسفر آزاد شده توسط جدایه‌های اکتینوباکتریایی، دو میلی‌لیتر از سوسپانسیون باکتریایی با سرعت ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه (rpm) به‌مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شده و یک میلی‌لیتر از محلول رو شناور با یک میلی‌لیتر معرف آمونیوم مولیبدات وانات و سه میلی‌لیتر آب دی‌یونیزه مخلوط گردید. نمونه‌ها به‌مدت ۲۰ دقیقه در دمای آزمایشگاه قرار گرفته و سپس مقدار جذب نور در طول موج ۴۷۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر مورد سنجش قرار گرفت. سپس با استفاده از غلظت‌های مختلف فسفر (۰-۲۰ میلی‌گرم در لیتر) منحنی استاندارد تهیه شده و مقدار آزادسازی فسفر جدایه‌ها بر حسب میلی‌گرم در لیتر (mg/L) محاسبه شد (Mehta & Nautiyal, 2001).

انتخاب و شناسایی جدایه برتر

بر اساس نتایج غربالگری حلالیت فسفر در زمان‌ها مختلف انکوباسیون با حضور اسید هیومیک، جدایه ۴۷ به‌عنوان جدایه برتر انتخاب گردید. و بر اساس نتایج توالی‌یابی مولکولی 16S rRNA دارای بیش‌ترین همولوژی با جدایه/استریتوما یسس چارترتوسیس

1- National Botanical Research Institutes Phosphate Growth Medium

(*Streptomyces chartreusis*) بوده و با شماره دسترسی KJ152149 در پایگاه NCBI ثبت شده است.

آزمایش گلدانی

به منظور بررسی تأثیر جدایه باکتریایی برتر که براساس سنجش توانایی حلالیت فسفر، انتخاب شد و اثر متقابل آن با سطوح مختلف فسفر و کاربرد اسید هیومیک، آزمایش گلدانی بصورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار به صورت آنالیز واریانس سه طرفه انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل: سه سطح فسفر با استفاده از منبع کودی مونو آمونیوم فسفات (شاهد، ۲۰ کیلوگرم فسفر خالص در هکتار معادل ۰/۰۵ گرم در گلدان، ۴۰ کیلوگرم فسفر خالص در هکتار معادل ۰/۱ گرم در گلدان)، مایه زنی در دو سطح (شاهد، مایه زنی با جدایه منتخب)، افزودن هیومیک اسید در دو سطح (شاهد، کاربرد ۲ میلی گرم در کیلوگرم) بود. با توجه به اهداف این پژوهش، خاکی با میزان فسفر پایین بر اساس آزمون خاک برای انجام آزمایش انتخاب گردید (جدول ۱). خاک‌های مورد استفاده در پژوهش، از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری محوطه پردیس دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان با مختصات جغرافیایی ۳۶ درجه ۵۰ دقیقه ۲۸/۸ ثانیه عرض شمالی و ۵۴ درجه ۲۳ دقیقه و ۴۶/۶ ثانیه طول شرقی جمع آوری گردید و پس از هوا خشک کردن از الک ۲ میلی متری عبور داده شد. به منظور آماده سازی خاک، براساس آزمون خاک، جهت تأمین نیاز نیتروژن و پتاسیم، به ترتیب مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره و همچنین ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کلرید پتاسیم به خاک اضافه شد. همچنین سطوح مورد نظر فسفر از منبع کودی مونو آمونیوم فسفات به خاک گلدان‌ها اضافه شد. برای آماده سازی بذرها، تعداد کافی از بذور سالم ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ انتخاب و به منظور ضد عفونی به مدت ۳۰ ثانیه در الکل قرار داده شدند. سپس ۲ تا ۳ دقیقه آن‌ها را در هیپوکلرید سدیم ۵ درصد قرار داده و در نهایت ۸ بار با آب مقطر استریل شستشو داده شدند. به منظور تهیه مایه میکروبی، جدایه برتر منتخب را در محیط عصاره مخمر-عصاره مالت به میزان مناسب و یکسان (۱۰٪ سلول در هر میلی لیتر) رشد داده شد و بذرها را درون گلدان قرار داده و مقدار یک میلی لیتر از سوسپانسیون باکتری روی بذرها مایه زنی گردید. کاربرد اسید هیومیک در این پژوهش در دو مرحله مهم از رشد رویشی گیاه (پس از گذشت ۱۰ روز از کاشت (استقرار گیاه) و پس از گذشت ۴۰ روز از کاشت (اواخر رشد رویشی)، بصورت کود آبیاری به خاک گلدان‌ها اضافه شد. پس از گذشت ۶۵ روز از کشت گیاه (اواخر دوره رشد رویشی)، نمونه برداری از خاک و گیاه برای آزمایشات انجام گرفت.

سنجش محتوی فسفر خاک و گیاه

فسفر خاک به روش اولسن با استفاده از عصاره گیر بی کربنات سدیم انجام شد. برای این منظور عصاره گیری از خاک‌ها انجام شده و پس از تهیه محلول استاندارد و محلول مخلوط، از هر محلول استاندارد، عصاره و شاهد، مقدار ۲۵ میلی لیتر برداشته و هر کدام در یک ارلن ۱۲۵ میلی لیتر ریخته شده و ۲۵ میلی لیتر از محلول مخلوط تهیه شده به هر یک اضافه شد. ارلن‌ها به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۱۲۰ دور بر دقیقه (rpm) تکان داده شدند و بعد از صرف ۱ تا ۲ ساعت رنگ محلول درون ارلن‌ها به آبی تغییر پیدا کرد. میزان فسفر خاک در طول موج ۸۲۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت و محاسبه گردید (Olsen, 1954).

سنجش فسفر گیاه به روش هضم خشک با استفاده از معرف آمونیوم مولبیدات وانادات و محلول استاندارد مونو پتاسیم فسفات (KH₂PO₄) در طول موج ۴۷۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر ارزیابی گردید (Chapman & Pratt, 1962).

سنجش تنفس میکروبی پایه

پس از جدا نمودن ریشه‌ها، قسمتی از خاک گلدان‌ها به منظور اندازه گیری تنفس میکروبی پایه استفاده گردید. برای این منظور مقدار ۱۰ گرم خاک تازه داخل ارلن ریخته شد. سپس ۱۰ میلی لیتر سود ۰/۵ نرمال در لوله آزمایش ریخته و لوله داخل ارلن قرار داده شد. درب ارلن کاملاً بسته شده و توسط پارافیلیم درزگیری شد. همین مراحل برای نمونه شاهد (بدون خاک) نیز انجام شد. و نمونه‌ها به مدت یک هفته در دمای ۲۵ درجه سلسیوس نگهداری شدند. پس از گذشت یک هفته، به سود باقیمانده درون ظرف، ۱۰ میلی لیتر کلرور باریم ۰/۵ مولار و چند قطره معرف فنل فتالین افزوده شده و با اسید کلریدریک ۰/۵ نرمال تیترا شدند (Sparling et al., 1990). که اجزای فرمول عبارتست از: B: اسید مصرفی شاهد (میلی لیتر)، S: اسید مصرفی نمونه خاک (میلی لیتر)، N: نرمالیه اسید، E: اکی والان وزن دی اکسید کربن

$$\text{mgCO}_2 = (B - S) N \times E$$

سنجش فسفر زیست توده میکروبی و فعالیت آنزیم فسفاتاز

فسفر زیست توده میکروبی (MBP) خاک از تفریق مقادیر غلظت فسفر در عصاره‌ی تیمار شده با کلروفرم و مقدار فسفر کل تیمار نشده با کلروفرم به روش هدلی و استوارت (Hedley & Stewart, 1982) اندازه گیری شد.

(۰/۴) / (فسفر عصاره گیری شده از خاک تدخین نشده - فسفر عصاره گیری شده از خاک تدخین شده) = فسفر زیست توده میکروبی

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1- Physical and chemical properties of soil

شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	بافت خاک Soil Texture	اسیدیته خاک pH	کربن آلی Organic Carbon (%)	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	فسفر قابل جذب P _{ava} (mg kg ⁻¹)	پتاسیم قابل جذب K _{ava} (mg kg ⁻¹)	نیتروژن قابل جذب N _{av} (%)
12	64	24	لوم سیلتی Silty loam	7.2	0.8	0.85	5.7	277	0.06

EC: electrical conductivity; P_{ava}: available phosphorus; K_{ava}: available potassium; N_{av}: available nitrogen

نتایج و بحث

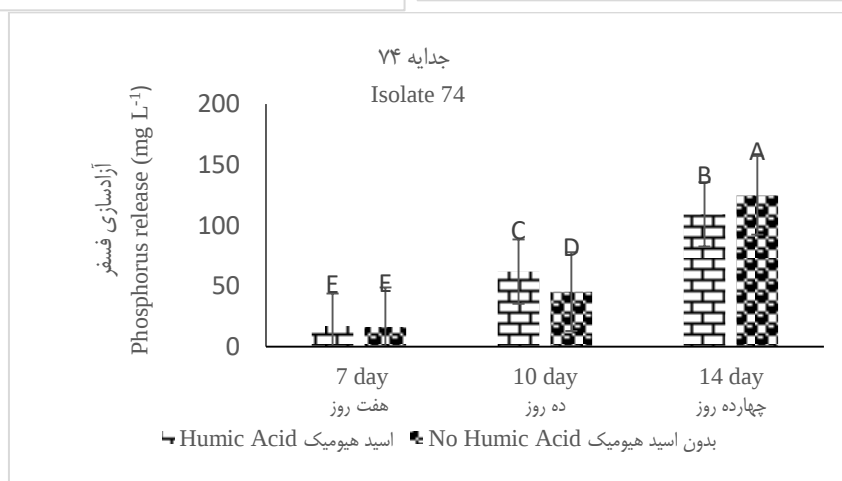
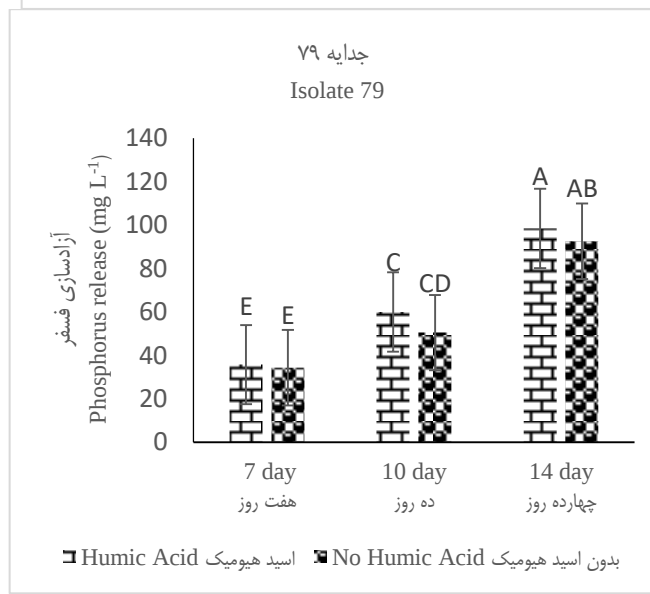
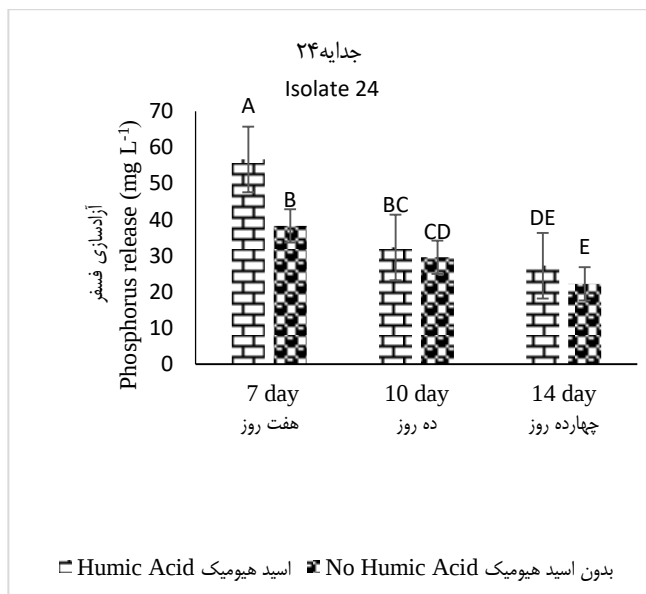
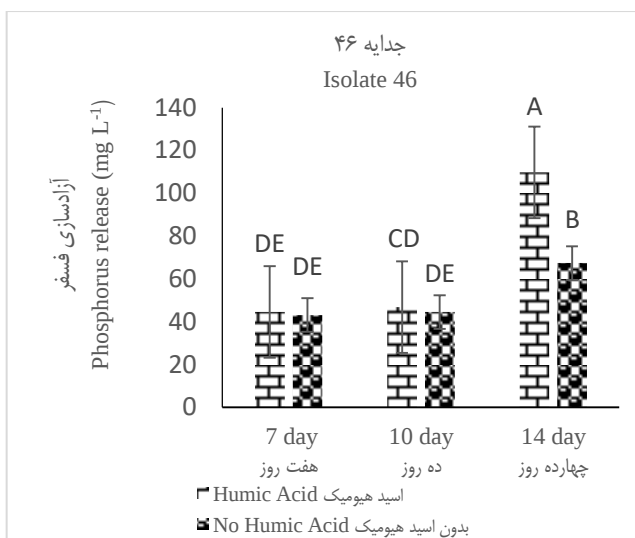
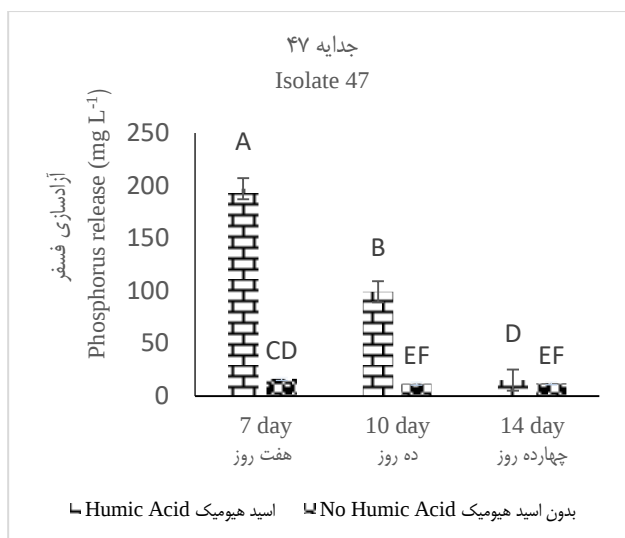
بررسی تأثیر اسید هیومیک و زمان انکوباسیون بر حلالیت فسفر توسط جدایه‌های اکتینوباکتریایی

بر اساس نتایج، بیش‌ترین میزان آزادسازی فسفر با میانگین ۱۹۷/۰۵ میلی‌گرم در لیتر در جدایه ۴۷ با حضور اسید هیومیک در زمان هفت روز ثبت شد. بررسی نتایج حاکی از اثر مطلوب کاربرد اسید هیومیک در افزایش میزان حلالیت فسفر در جدایه‌های ۷۹، ۴۷، ۴۶، ۲۴ در زمان‌های انکوباسیون مشابه دارد. در سایر زمان‌های انکوباسیون نیز در همه جدایه‌ها، بجز جدایه ۷۴ در روز ۱۴، بیش‌ترین مقدار آزادسازی فسفر در کاربرد اسید هیومیک به‌دست آمد (شکل ۱). اسید هیومیک به‌عنوان یک ماده مغذی کی لیت‌کننده، سبب فراهمی عناصر غذایی مورد نیاز رشد جدایه‌های باکتریایی می‌گردد (Yang et al., 2009). فرهت و همکاران (Farhat et al., 2015) در بررسی سازوکار حلالیت فسفر جدایه‌های *استریتوماپیس* (*Streptomyces* CTM396, CTM397) در حضور اسید هیومیک گزارش کردند که افزودن ۰/۰۵ درصد اسید هیومیک با اثر مثبت در افزایش زیست‌توده میکروبی سبب بهبود آزادسازی فسفر جدایه‌های باکتریایی شده که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. یوان و همکاران (Yuan et al., 2022) نیز بیان داشتند اسید هیومیک تأثیر مثبتی بر فراوانی جوامع میکروبی داشته و بطور کلی میزان فعالیت باکتری‌های حل‌کننده فسفات را بالا می‌برد. تأثیر زمان بر حلالیت فسفر جدایه‌های باکتریایی در سطح یک درصد معنی‌دار بود (شکل ۱). با افزایش زمان انکوباسیون از هفت به ۱۴ روز میزان حلالیت فسفر در جدایه‌های باکتریایی ۷۹، ۴۶، ۷۴ به‌ترتیب افزایش ۱۷۵/۰۶، ۱۴۶/۱۸، ۵۳۹/۸ درصدی نشان داد. درحالی‌که، در جدایه‌های ۲۴ و ۴۷ بیش‌ترین میزان حلالیت فسفر در زمان هفت روز ثبت گردید و با گذشت زمان (تا ۱۴ روز) میزان حلالیت فسفر به‌ترتیب به میزان ۵۱/۸۶، ۹۲/۳۳ درصد کاهش پیدا کرد.

جهت سنجش آنزیم فسفاتاز اسیدی یک گرم خاک مرطوب عبور داده شده از الک ۲ میلی‌متری در ارلن ۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد و سپس ۰/۲۵ میلی‌لیتر تولوئن جهت پلاسمولیز سلول‌ها و آزاد شدن آنزیم‌های درون سلولی (Alef & Nannipieri, 1995) و مقدار ۴ میلی‌لیتر بافر MUB^۱ با pH: ۶/۵ به آن اضافه گردید. سپس یک میلی‌لیتر از محلول پارا-نیتروفنیل فسفات^۲ (PNP) به نمونه‌ها اضافه شد. پس از پوشاندن ارلن‌ها، آن‌ها را مخلوط و به‌مدت یک ساعت در انکوباتور با دمای ۳۷ درجه سلسیوس قرار داده شدند. پس از انکوباسیون، یک میلی‌لیتر محلول کلرید کلسیم ۰/۵ مولار (جهت جلوگیری از پراکنده شدن ذرات رس پس از اضافه کردن سود) و ۴ میلی‌لیتر سود ۰/۵ مولار (جهت استخراج پارا نیتروفنل از خاک) اضافه نموده و پس از مخلوط کردن نمونه‌ها، سوسپانسیون را صاف کرده و مقدار جذب پارا نیتروفنل (PNP) در محلول صاف شده در طول موج ۴۰۰ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر قرائت شد (Tabatabai & Bremner, 1969). به‌منظور سنجش آنزیم فسفاتاز قلیایی نیز یک گرم از خاک توزین شده، با ۰/۲۵ میلی‌لیتر تولوئن و ۴ میلی‌لیتر بافر MUB با pH: ۱۱ و یک میلی‌لیتر محلول سوبسترای پارانیتروفنل (همانند روش قبل) مخلوط کرده و پس از انکوباسیون، صاف گردید و سپس ۴ میلی‌لیتر هیدروکسید سدیم ۰/۵ مولار و یک میل لیتر کلرید سدیم ۰/۵ مولار برای اتمام فعالیت آنزیمی به آن افزوده شد و کاملاً تکان داده شدند. سپس نمونه‌ها همانند روش قبل، توسط دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (Tabatabai & Bremner, 1969).

تجزیه داده‌ها: آنالیز آماری و مقایسه میانگین بین تیمارهای مختلف با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام شد. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون LSD (در سطح احتمال ۵ درصد) استفاده شد. همچنین برای ترسیم نمودارها از برنامه Excel استفاده شد.

- 1- Modified Universal Buffer
- 2- Para nitrophenyl phosphate



شکل ۱- اثر متقابل زمان و کاربرد اسید هیومیک بر آزادسازی فسفر توسط جدایه‌های مورد مطالعه
Figure 1- The Interaction of time and humic acid application on phosphorus release by the studied isolates

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایشی بر پارامترهای اندازه‌گیری شده در خاک و فسفر گیاه

Table 2- Analysis of variance for the effect of experimental treatments on measured soil parameters and plant phosphorus

منابع تغییرات S.O.V	محتوای فسفر گیاه Plant phosphorus content	فسفاتاز قلیایی Alkaline phosphatase	فسفاتاز اسیدی Acid phosphatase	تنفس میکروبی پایه Basic microbial respiration	فسفر زیست توده میکروبی Microbial biomass phosphorus	فسفر قابل دسترس Available P
فسفر (P)	0.0006 ^{ns}	2630.23 ^{**}	284.40 ^{**}	58.32 ^{ns}	1.01 ^{ns}	0.58 [*]
استرپتومایسس (S)	0.001 [*]	7017.97 ^{**}	2705.21 ^{**}	225 ^{ns}	2.11 [*]	0.59 [*]
اسیدهیومیک (HA)	0.00004 ^{ns}	68.72 ^{**}	805.14 ^{**}	25 ^{ns}	0.69 ^{ns}	1.61 ^{**}
استرپتومایسس × فسفر S × P	0.001 ^{**}	3040 ^{**}	182.02 ^{**}	158.33 [*]	1.32 [*]	1.44 ^{**}
فسفر × اسیدهیومیک HA × P	0.001 ^{**}	5815.52 ^{**}	316.03 ^{**}	25 ^{ns}	2.69 ^{**}	0.57 [*]
استرپتومایسس × اسیدهیومیک S × HA	0.001 ^{**}	666.84 ^{**}	104.34 ^{**}	136.11 ^{ns}	0.31 ^{ns}	0.14 ^{ns}
استرپتومایسس × اسیدهیومیک × فسفر S × HA × P	0.002 ^{**}	6393.66 ^{**}	1007.14 ^{**}	36.11 ^{ns}	0.008 ^{ns}	2.53 ^{**}
خطا Error	0.0002	2.17	3.31	38.88	0.37	0.13
ضریب تغییرات (%) CV (%)	8.19	0.42	1.45	3.51	17.69	3.78

P: Phosphorus; S: *Streptomyces*; HA: Humic Acid

معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، * معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد، ^{ns} عدم معنی‌داری

** Significant at 1%, * significant at 5%, ns non-significant

استرپتومایسس و اسید هیومیک در بالاترین سطح فسفر (۴۰ کیلوگرم فسفر در هکتار) به میزان ۱۱/۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. که با افزایش ۱۶/۲۶ درصدی اختلاف معنی‌دار با تیمار شاهد سطح بالای فسفر (۴۰ کیلوگرم فسفر در هکتار) دارد (شکل ۲). این موضوع نشان دهنده تأثیر مثبت مایه‌زنی جدایه/استرپتومایسس و کاربرد همزمان اسیدهیومیک در بهبود فراهمی فسفر قابل دسترسی خاک می‌باشد. اسیدهیومیک ترکیبی از مولکول‌های آلی و طبیعی حاصل از تجزیه میکروبی مواد آلی بوده و در نتیجه می‌تواند تأثیر مثبتی بر جذب عناصر غذایی به‌ویژه فراهمی فسفر در خاک داشته باشد (Orsi, 2014). نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تیمار تلفیقی کاربرد اسیدهیومیک و مایه‌زنی/استرپتومایسس در سطح بالای فسفر به‌عنوان تیمار بهینه با افزایش ۱۱/۶۹ درصدی، اختلاف آماری معنی‌دار با تیمار کاربرد اسیدهیومیک در بالاترین سطح فسفر دارد (شکل ۲). باکتری‌های حل‌کننده فسفات توانایی تنظیم چرخه فسفر خاک با استفاده از سازوکارهای ترشح اسیدهای آلی و تولید آنزیم فسفاتاز را دارا بوده و از این راه سبب افزایش میزان فراهمی فسفر و بهبود جذب آن در گیاه می‌گردد (Pang et al., 2024). سازوکار افزایش جذب و انتقال فسفر در گیاه توسط باکتری‌های حل‌کننده فسفات ترشح

چاوهان و همکاران (Chauhan et al., 2017) در بررسی حلالیت فسفر جدایه‌های باکتریایی (*Aneurinibacillus aneurinilyticus* strain CKMV1) بیان داشتند که افزایش زمان انکوباسیون سبب افزایش میزان حلالیت فسفر جدایه‌های باکتریایی گردید. آن‌ها ضمن اشاره به همبستگی مثبت میان افزایش زمان انکوباسیون و کاهش میزان pH محیط‌کشت، بیان داشتند که انکوباسیون ۱۲۰ ساعت بیش‌ترین میزان آزادسازی فسفر را نشان داد (Chauhan et al., 2017). چویا و همکاران (Chouyia et al., 2020) در بررسی میزان آزادسازی فسفر در شرایط آزمایشگاهی بیان داشتند که سویه‌های *Streptomyces roseocinereus* و *Streptomyces natalensis* پس از گذشت ۱۵ روز بیشترین میزان حلالیت فسفر را در شرایط آزمایشگاهی از خود نشان دادند.

فسفر خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل/استرپتومایسس × اسیدهیومیک × فسفر در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). بر اساس نتایج مقایسه میانگین بیشترین مقدار فسفر قابل دسترسی خاک در سه سطح کود فسفره مربوط به تیمار کاربرد تلفیقی مایه‌زنی

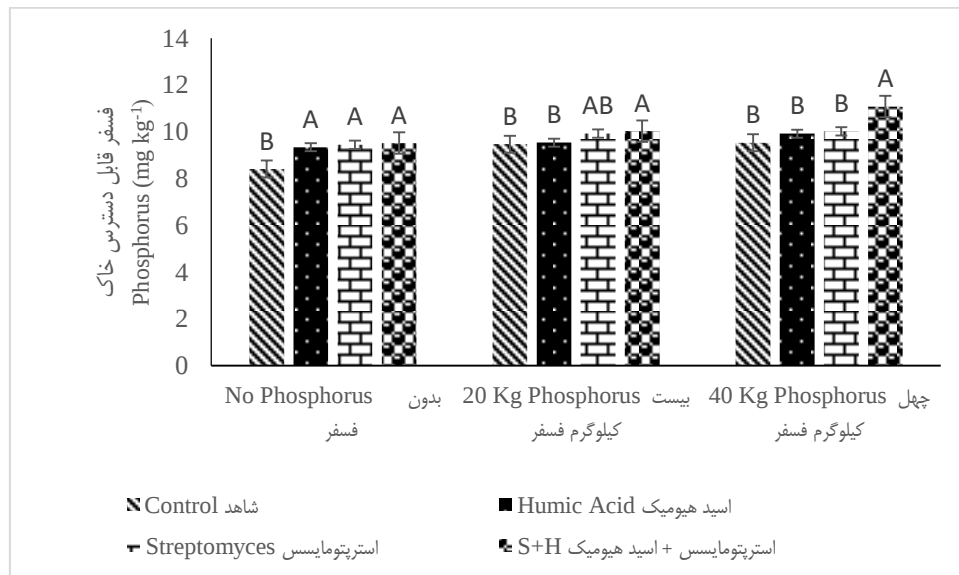
همچنین اثر اصلی باکتری در سطح آماری پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین اثر متقابل فسفر $\times$ اسید هیومیک نشان داد که بیشترین میزان در تیمار کاربرد اسید هیومیک در بالاترین سطح فسفر (۴۰ میلی گرم در کیلوگرم) با میانگین ۴/۴۶ میلی گرم بر کیلوگرم بوده که به ترتیب با افزایش ۴۶/۲ و ۳۵ درصد اختلاف معنی-دار با کاربرد بالاترین سطح فسفر و شاهد داشت (شکل ۳). فسفر زیست‌توده میکروبی بعنوان شاخصی از حاصلخیزی فسفر خاک در مدیریت فسفر در کشاورزی عنوان شده است. به عبارتی تنظیم گردش و فراهمی فسفر قابل دسترس خاک که حاصل از تجزیه بقایای گیاهی، حیوانی و تجمع فسفات بوده است، بر عهده ریزجاندان خاک می‌باشد. علاوه بر این بخشی از فسفر فراهم خاک در داخل زیست‌توده میکروبی تجمع پیدا می‌کند که تحت عنوان فسفر زیست‌توده میکروبی (MBP) شناخته می‌گردد (Peng et al., 2021). کوزولینو و همکاران (Cozzolino et al., 2021) در بررسی کاربرد باکتری‌های حل کننده فسفر و اسید هیومیک گزارش کردند کاربرد همزمان باکتری‌های محرک رشد و اسید هیومیک، تأثیرات مثبت معنی‌دار بر میزان فسفر زیست‌توده میکروبی دارد.

بررسی نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل تیمار/استرپتومایسس $\times$ فسفر نشان داد که بیشترین میزان فسفر زیست‌توده میکروبی در تیمار تلفیقی مایه‌زنی باکتری و مصرف بالاترین سطح فسفر (۴۰ میلی گرم در کیلوگرم) با میانگین ۴/۳۹ میلی گرم بر کیلوگرم ثبت گردید که با افزایش ۳۷/۱۸ درصد اختلاف آماری معنی‌دار با تیمار کاربرد فسفر به تنهایی نشان داد (شکل ۴).

اسیدهای آلی، اگزوپلی ساکارید و آنزیم فسفاتاز عنوان شده است (Yadav et al., 2017). رئیسی و حسین پور (Raiesi & Hosseinpour, 2013) گزارش کردند مایه‌زنی جدایه‌های باکتریایی به دلیل تأثیر در افزایش حلالیت فسفر، سبب افزایش جذب فسفر گیاه و همچنین افزایش میزان فسفر قابل دسترس خاک می‌گردد. کاربرد کودهای فسفره و اسیدهیومیک، سبب افزایش میزان فسفر کل و فسفر قابل جذب خاک شده و کاربرد تلفیقی اسیدهیومیک و کود فسفره بیشترین میزان محتوی فسفر قابل دسترس خاک را در مقایسه با عدم کاربرد اسیدهیومیک به ثبت رساند (Silva et al., 2023). پژوهش چوییا و همکاران (Chouyia et al., 2020) بر روی میزان حلالیت فسفر جدایه‌های مختلف/استرپتومایسس به روش غربالگری نیمه کمی صورت گرفت. آنها بیان داشتند که جدایه‌های *Streptomyces natalensis* و *Streptomyces roseocinereus* بیشترین میزان حلالیت فسفر را بصورت مقادیر حداکثر شاخص انحلال فسفر به ترتیب با مقادیر ۱/۷۵ و ۱/۶۳ در شرایط آزمایشگاهی و با استفاده از محیط کشت پیکووسکی از خود نشان دادند. همچنین در مراحل آزمون گلدانی بر روی گیاه یولاف، گیاهان تلقیح شده در مقایسه با گیاهان تلقیح نشده، افزایش معنی‌داری را در میزان حلالیت فسفر ارائه دادند.

فسفر زیست‌توده میکروبی

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثر متقابل فسفر $\times$ اسید هیومیک در سطح آماری یک درصد و مایه‌زنی/استرپتومایسس $\times$ فسفر و

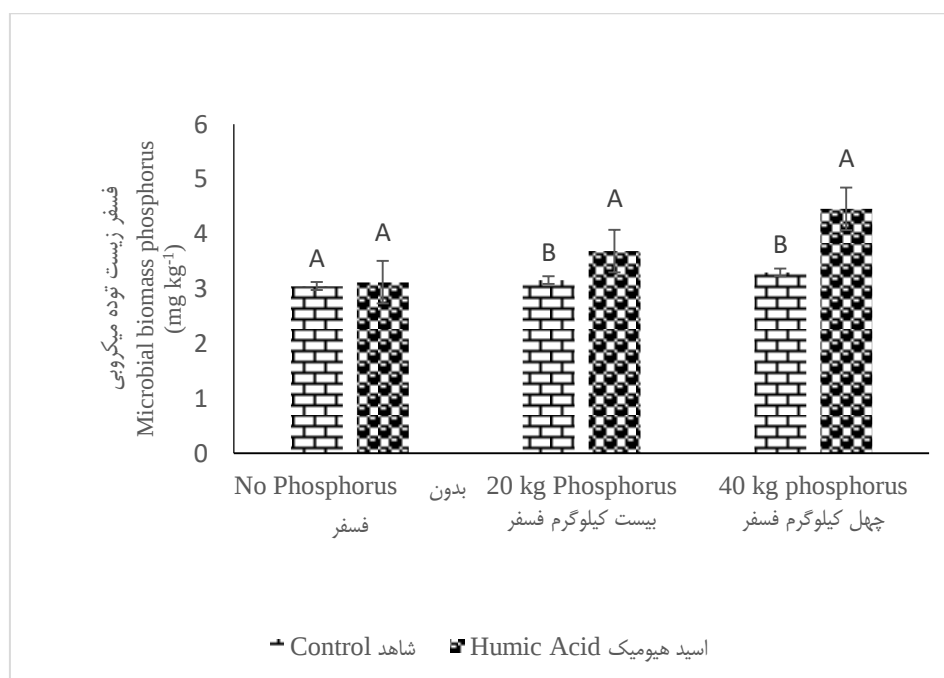


شکل ۲- اثر متقابل/استرپتومایسس و اسید هیومیک و کود فسفر بر میزان فسفر قابل دسترس خاک

Figure 2- The interactive effect of *Streptomyces*, humic acid and phosphorus fertilizer on soil available phosphorus

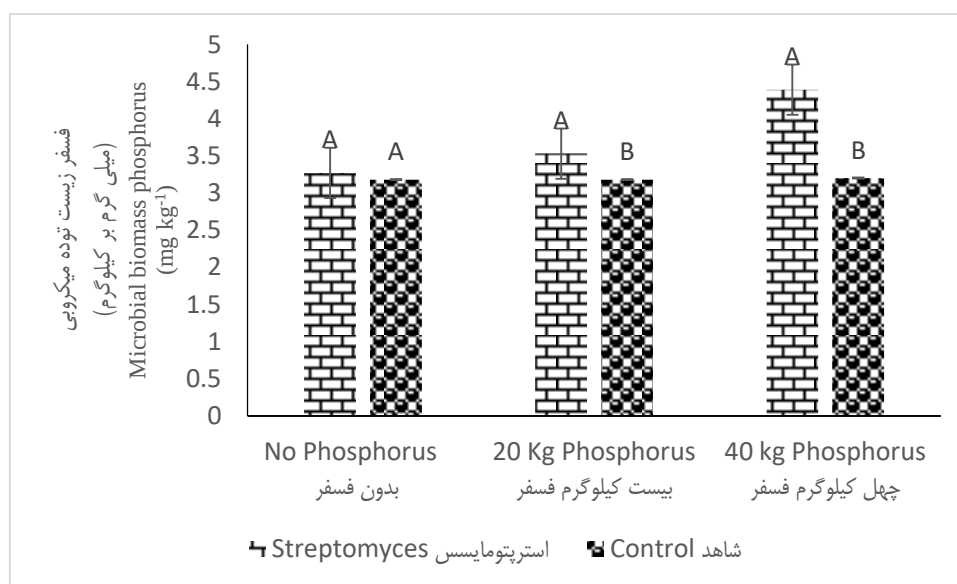
میکروبی در مقایسه با شاهد شده است. آن‌ها بیان داشتند که باکتری‌های حل‌کننده فسفات با ترشح اسیدهای آلی و معدنی سبب کاهش pH و آزادسازی فرم ویژه‌ای از فسفر محلول در ریزوسفر شده که در نتیجه آن سبب افزایش فسفر زیست‌توده میکروبی می‌گردد.

کرمی و همکاران (Karami et al., 2021) در بررسی تغییرات فسفر زیست‌توده میکروبی در نتیجه کاربرد باکتری‌های محرک رشد (*Pantoea agglomerans*, *Curtobacterium flaccumfaciens*) و منبع کودی فسفر بیان داشتند که تیمار کاربرد تلفیقی باکتری‌های محرک رشد و کود فسفره سبب افزایش معنی‌دار میزان فسفر زیست‌توده



شکل ۳- اثر متقابل کود فسفر و اسید هیومیک بر میزان فسفر زیست‌توده میکروبی

Figure 3- The interactive effect of phosphorus fertilizer and humic acid on microbial biomass phosphorus levels



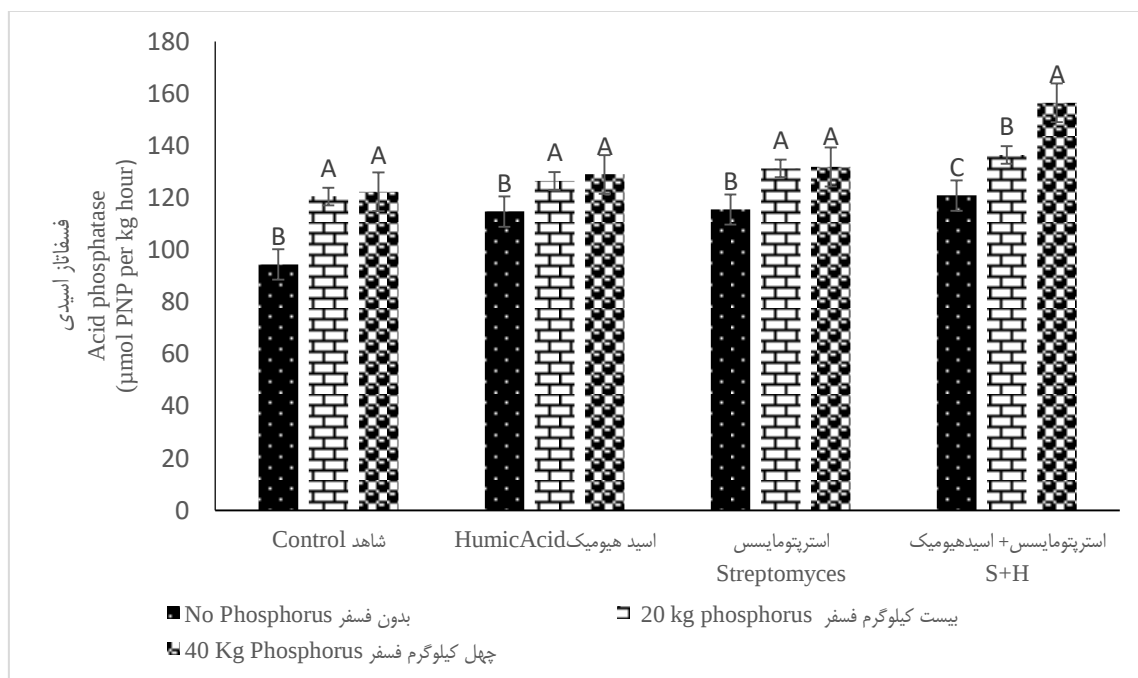
شکل ۴- اثر متقابل/استریتومایسس و کود فسفر بر میزان فسفر زیست‌توده میکروبی

Figure 4- The interactive effect of *Streptomyces* and phosphorus fertilizer on microbial biomass phosphorus levels

فسفاتاز اسیدی و قلیایی

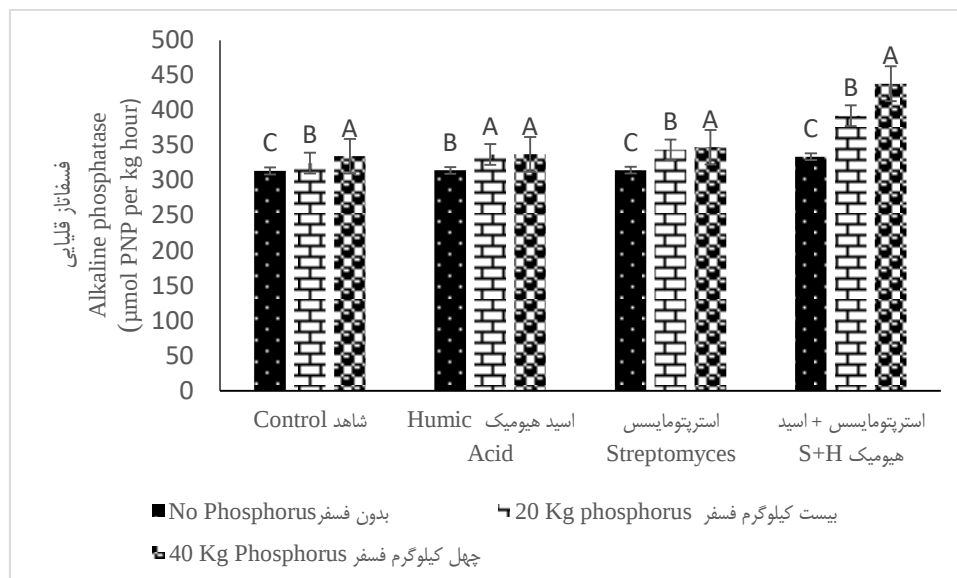
بر اساس نتایج به دست آمده در این پژوهش، اثر متقابل تیمارهای /استرپتومایسس × اسید هیومیک × فسفر بر فسفاتاز اسیدی و قلیایی در سطح آماری یک درصد معنی دار شد. بررسی نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین میزان فسفاتاز اسیدی (۱۵۶/۴۵) میکرومول PNP در کیلوگرم بر ساعت) و قلیایی (۴۳۸/۰۹) میکرومول PNP در کیلوگرم بر ساعت) در تیمار کاربرد تلفیقی مایه زنی /استرپتومایسس و اسید هیومیک در بالاترین سطح فسفر ثبت گردید (شکل ۵ و ۶) که به ترتیب با افزایش ۶۵/۶۶ و ۳۹/۶۳ درصدی اختلاف آماری معنی دار نسبت به شاهد داشت. اسپان و کوزیاکوف (Spohn & Kuzyakov, 2013) بیان داشتند که افزایش فعالیت آنزیم فسفاتاز در نتیجه کاربرد سطح بالای کود فسفر، می تواند ناشی از فعالیت آنزیم های فسفاتاز تثبیت شده در خاک باشد که به محتوی فسفر، غیر حساس است. فعالیت های آنزیمی در خاک از منابع مختلف صورت گرفته و علاوه بر فعالیت های آنزیمی ناشی از بخش زنده خاک، سایر بخش ها، از جمله آنزیم های تثبیت شده بر روی سطوح ذرات، نیز در فعالیت آنزیمی نقش دارند. آنزیم های فسفاتاز اسیدی و قلیایی یکی از آنزیم های ضروری در چرخه فسفر بوده که تغییرات آن، وابسته به تغییر و تبدیلات فراهمی فسفر در خاک می باشد، بنابراین فعالیت این آنزیم می تواند بعنوان شاخصی از قابلیت فراهمی فسفر

برای گیاهان و ریزجانداران خاک قلمداد گردد (Sheikhloo & Rasouli Sadaghiani, 2016). بچتاوی و همکاران (Bechtaoui et al., 2020) در نتیجه کاربرد باکتری های محرک رشد (*Rahnella aquatilis* (PGP30) و (*Rhizobium sp.* (RhOF57A) و (PGP291)) در گیاه باقلا (*Vicia faba*) بیان داشتند که مایه زنی باکتری سبب افزایش فعالیت آنزیم فسفاتاز در ریزوسفر و همچنین بهبود فراهمی فسفر گردید (Bechtaoui et al., 2020). خالد و همکاران (Khalid et al., 2023) در بررسی اثر کاربرد کنسرسیومی از باکتری های محرک رشد در گیاه ماش بیان داشتند که مایه زنی سبب افزایش معنی دار (۵۳ تا ۶۸٪) فعالیت آنزیم فسفاتاز (اسیدی و قلیایی) و همچنین محتوی فسفر گیاه نسبت به شاهد (عدم مایه زنی) گردید. توانایی تولید آنزیم فسفاتاز باکتری های حل کننده فسفر، سبب تسهیل هیدرولیز ترکیبات آلی و معدنی شدن فسفر در خاک شده که از این راه سبب افزایش فراهمی و انتقال فسفر در خاک و همچنین بهبود جذب گیاه می گردد (Rawat et al., 2021 ; Liu et al., 2024). شمس الدین و همکاران (Shams El-Deen et al., 2020) در مطالعه تأثیر مایه زنی باکتری های *Bacillus megaterium* و *Serratia marcescens* در گندم بیان داشتند که مایه زنی سبب افزایش قابل توجه فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی در خاک در مقایسه با شاهد (عدم مایه زنی) گردید.



شکل ۵- اثر متقابل /استرپتومایسس و اسید هیومیک و فسفر بر میزان آنزیم فسفاتاز اسیدی

Figure 5- The interactive effect of *Streptomyces*, humic acid and phosphorus on the amount of acid phosphatase enzyme



شکل ۶- اثر متقابل/استرپتومایسس و اسید هیومیک و فسفر بر میزان آنزیم فسفاتاز قلیایی

Figure 6- The interactive effect of *Streptomyces*, humic acid and phosphorus on the amount of alkaline phosphatase enzyme

بود.

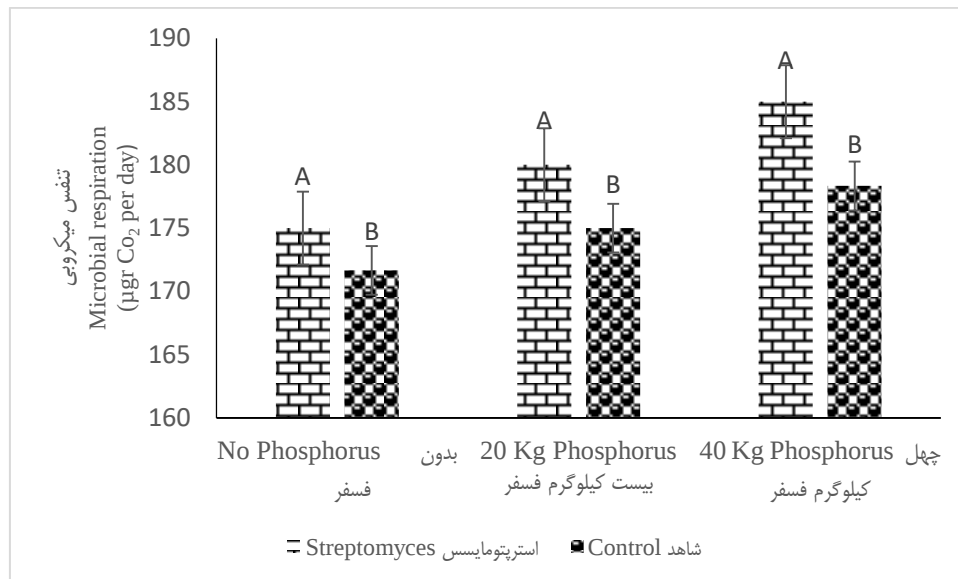
پژوهش دیگری که توسط ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2021) صورت گرفت نشان داد که افزودن منبع فسفر بصورت NaH_2PO_4 به تنهایی سبب افزایش میزان تنفس میکروبی گردید. همچنین اسمیت (Smith, 1994) گزارش کرد که افزودن سطوح فسفر از منابع فسفره مختلف، به خاک‌های دارای کمبود فسفر، سبب افزایش میزان تنفس میکروبی خواهد شد. در این راستا می‌توان به پژوهش صورت گرفته توسط وو و همکاران (Wu et al., 2022) نیز اشاره کرد که بیان داشتند افزودن فسفر مستقیماً با افزایش فسفر قابل دسترس خاک، می‌تواند بر میکروارگانیسم‌های خاک و میزان متابولیت‌های مختلف آنها تأثیرگذار باشد.

محتوی فسفر گیاه

نتایج تجزیه واریانس حاکی از معنی‌داری اثر متقابل تیمار/استرپتومایسس × اسید هیومیک × فسفر در سطح آماری یک درصد می‌باشد (جدول ۲). بررسی نتایج نشان داد که همچنان که تیمار کاربرد تلفیقی مایه‌زنی/استرپتومایسس و بالاترین سطح فسفر (۴۰ کیلوگرم در هکتار) به همراه اسید هیومیک، به‌عنوان تیمار بهینه در افزایش فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز و فسفر زیست‌توده میکروبی ثبت گردید، بیش‌ترین میزان محتوی فسفر گیاه هم در این تیمار با میانگین ۰/۲۳ درصد مشاهده شد (شکل ۸). بر این اساس می‌توان بیان داشت که کاربرد تیمار تلفیقی با بهبود زیست‌فراهمی فسفر در خاک سبب افزایش محتوی فسفر در گیاه شده است.

تنفس میکروبی

بررسی نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تنها اثر متقابل تیمار فسفر × استرپتومایسس در سطح آماری پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). بر اساس نتایج مقایسه میانگین بیش‌ترین میزان تنفس میکروبی در تیمار کاربرد تلفیقی مایه‌زنی/استرپتومایسس و بالاترین سطح فسفر به میزان ۱۸۵ میکروگرم دی اکسید کربن در روز ثبت گردید (شکل ۷). بررسی مقایسه‌ای نتایج نشان داد که مایه‌زنی/استرپتومایسس در سطوح بدون فسفر، ۲۰ و ۴۰ کیلوگرم فسفر به‌ترتیب سبب افزایش ۱/۹، ۲/۸ و ۳/۷ درصد گردید که بیش‌ترین افزایش مربوط به سطح بالای فسفر مصرف شده بود. که این موضوع نشان‌دهنده‌ی اثر مثبت کاربرد تلفیقی/استرپتومایسس و کود فسفر در بهبود تنفس میکروبی می‌باشد. به نظر می‌رسد با توجه به اینکه خاک مورد استفاده کمبود فسفر داشت، افزودن فسفر به خاک و مایه‌زنی/استرپتومایسس، سبب افزایش میزان فعالیت میکروبی و در نتیجه افزایش تنفس میکروبی در خاک شده باشد. ده شیخ و همکاران (Dehsheikh et al., 2020) در بررسی باکتری‌های تثبیت کننده نیتروژن (*Azotobacter vinlandi*) و حل‌کننده فسفر (*Pantoea* و *Pseudomonas putida*) در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* var. *thrysiflorum*) بیان داشتند که مایه‌زنی سبب افزایش ۶۰ درصدی میزان تنفس میکروبی خاک در گیاه ریحان هلندی (Thai basil) شد. همچنین، صادقی و همکاران (Sadeghi et al., 2023) بیان داشتند که استفاده از کمپوست و کود فسفره منجر به افزایش تنفس میکروبی شده و مقدار افزایش تنفس میکروبی در سطوح بالاتر فسفر، بیشتر



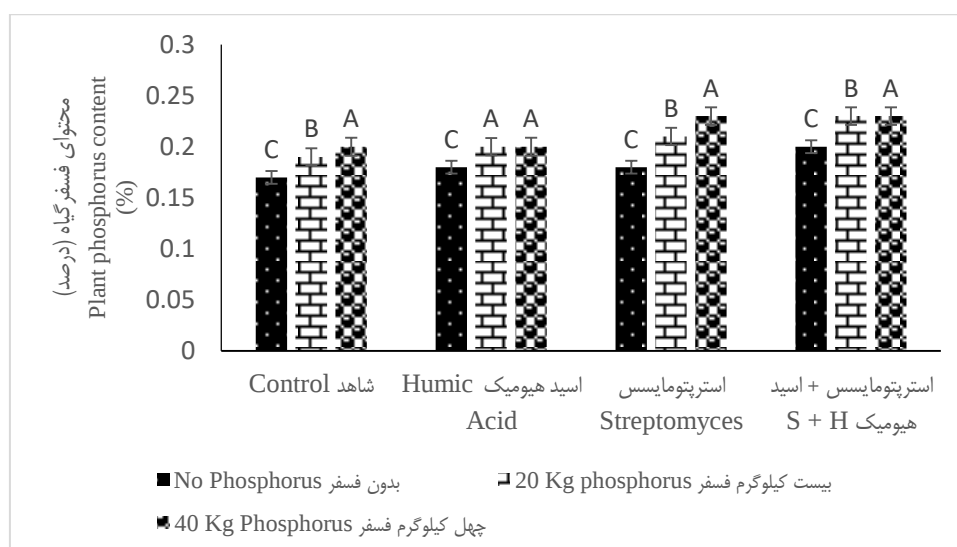
شکل ۷- اثر متقابل فسفر و استریتومایسس بر میزان تنفس میکروبی
Figure 7- The interactive effect of phosphorus and *Streptomyces* on microbial respiration

تفاوتی معنی‌داری در میزان محتوی فسفر گیاه نداشتند. اما کاربرد تلفیقی در مقایسه با تیمار شاهد در دو سطح ۲۰ کیلوگرم و ۴۰ کیلوگرم فسفر به ترتیب افزایش معنی‌دار ۲۱/۰۵ و ۱۵ درصدی را نشان داد. در پژوهش قربانی نصرآبادی و همکاران (Ghorbani Nasrabadi et al., 2023) مایه‌زنی دو جدایه استریتومایسس انتخابی (*Streptomyces* sp. UTM 1478) باعث افزایش میزان فسفر (۲۰ تا ۶۳٪) شد. آن‌ها عنوان داشتند که کاربرد ترکیبی جدایه‌های استریتومایسس و منابع مختلف فسفر (از جمله تری کلسیم فسفات، سوپرفسفات تریپل و فیتات کلسیم) علاوه بر افزایش رشد ذرت، سبب افزایش محتوای فسفر گیاه گردید. همچنین در پژوهش صورت گرفته توسط پانده و همکاران (Pande et al., 2017) نیز نتایج نشان دهنده اثر مثبت کاربرد باکتری‌های حل‌کننده فسفات بر افزایش جذب فسفر در اندام هوایی ذرت بود. کوزولینو و همکاران (Cozzolino et al., 2021) در بررسی کاربرد باکتری محرک رشد و اسید هیومیک بیان داشتند که مایه‌زنی باکتری‌های محرک رشد افزایش محتوی فسفر گیاه را به همراه دارد.

همبستگی پارامترهای فسفر در خاک و گیاه

محاسبه ضرایب همبستگی بین پارامترهای اندازه‌گیری شده در خاک و فسفر گیاه حاکی از همبستگی مثبت و معنی‌دار آنزیم‌های فسفاتاز قلیایی، اسیدی و تنفس میکروبی خاک با محتوی فسفر گیاه و فسفر قابل دسترس خاک می‌باشد. همچنین بررسی نتایج نشان داد که در بین غلظت فسفر قابل دسترس خاک و محتوی فسفر گیاه همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد.

به عبارتی دیگر مایه‌زنی استریتومایسس با بهبود تولید آنزیم‌های فسفاتاز (اسیدی و قلیایی) و اسیدهای آلی سبب افزایش فراهمی فسفر با تبدیل فسفر آلی و معدنی به فرم‌های قابل جذب در ریزوسفر شده است. این در حالی است که اسید هیومیک با بهبود فعالیت میکروبی، افزایش نفوذپذیری غشای ریشه و تشکیل کمپلکس‌های پایدار با کاتیون‌ها قابلیت دسترسی فسفر در خاک را تقویت نموده است. که در نتیجه کاربرد تلفیقی مایه‌زنی استریتومایسس و اسید هیومیک همراه با کود فسفر، نه تنها فسفر زیست‌توده میکروبی را به عنوان مخزن موقت فسفر افزایش داده است، بلکه چرخه معدنی‌سازی و فراهمی فسفر در خاک و گیاه را افزایش داده است. چابوت و همکاران (Chabot et al., 1996) بیان داشتند که علی‌رغم مصرف کودهای فسفره در خاک، اغلب آن‌ها به راحتی برای گیاه قابل دسترس نبوده و پاسخ عملکردی ناچیزی در گیاهان ایجاد می‌شود. افضل و همکاران (Afzal et al., 2019) بیان داشتند که باکتری‌های محرک رشد می‌توانند با حالالت فسفات از طریق تولید اسیدهای آلی، آنزیم فسفاتاز و تولید ترکیبات کلات‌کننده سبب افزایش معدنی‌سازی و فراهمی فسفر می‌گردد. همچنین رزا و همکاران (Rosa et al., 2022) در پژوهشی با هدف کاربرد باکتری‌های محرک رشد و سطوح فسفر در گیاه نیشکر بیان داشتند که مایه‌زنی با باکتری‌های محرک رشد غلظت بالاتری از فسفر در گیاه را به ثبت رساند. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار بیش‌تری از فسفر کودی به علت جذب توسط کلونیدهای خاک به سرعت از دسترس گیاه خارج می‌شود. که کاربرد برخی از باکتری‌های محرک رشد قادر به افزایش دسترسی فسفر در گیاه می‌باشند. بررسی مقایسه‌ای نتایج نشان داد که کاربرد تلفیقی مایه‌زنی استریتومایسس × اسید هیومیک در دو سطح فسفر



شکل ۸- اثر متقابل/استریتوما یسس و اسید هیومیک و فسفر بر میزان غلظت فسفر گیاه

Figure 8- The interactive effect of *Streptomyces*, humic acid and phosphorus on the amount of plant phosphorus content

جدول ۳- نتایج همبستگی پیرسون بین خصوصیات خاک و فسفر گیاه در تیمارهای مختلف

Table 3- Pearson correlation coefficients between soil properties and plant phosphorus across the treatments

متغیرها Variables	فسفر گیاه Plant phosphorus	فسفر زیست‌توده میکروبی Microbial biomass phosphorus	فسفاتاز قلیایی Alkaline phosphatase	فسفاتاز اسیدی Acid phosphatase	تنفس میکروبی پایه Basic microbial respiration	فسفر خاک Soil phosphorus
فسفر گیاه Plant phosphorus	1					
فسفر زیست‌توده میکروبی Microbial biomass phosphorus	-0.295 ^{ns}	1				
فسفاتاز قلیایی Alkaline phosphatase	**0.896	-0.269 ^{ns}	1			
فسفاتاز اسیدی Acid phosphatase	**0.726	-0.059 ^{ns}	0.725 *	1		
تنفس میکروبی Microbial respiration	**0.417	-0.256 ^{ns}	0.651 *	0.529 ^{ns}	1	
فسفر خاک Soil phosphorus	**0.69	-0.092 ^{ns}	0.79 *	0.817 *	0.472 ^{ns}	1

**معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، * معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد، ^{ns} عدم معنی‌داری

** Significant at 1%, * significant at 5%, ns non-significant

همبستگی ۰/۸۱۷ می‌باشد (جدول ۳).

در پژوهش انجام شده توسط حسینی و همکاران (Hoseini et al., 2023) که تلقیح میکروبی با *Rhizophagos intraradices* و

بیش‌ترین میزان ضریب همبستگی مربوط به همبستگی مثبت میان فسفاتاز قلیایی و فسفر گیاه با ضریب همبستگی ۰/۸۹۶ و همچنین فسفاتاز اسیدی با فسفر قابل دسترس خاک با ضریب

Serendipita indica به بذر گیاه ذرت (*Zea mays*) انجام شد، همبستگی مثبت و معنی‌داری بین فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی با میزان فسفر قابل دسترس خاک با ضرایب همبستگی ۰/۷۸ و ۰/۸۱ بدست آمد که تأثیر فعالیت آنزیم‌ها را بر افزایش دسترسی فسفر نشان داد. طبق پژوهش مارگالف و همکاران (Margalef et al., 2017)، از آنجایی که بطور کلی افزودن کودهای فسفره به خاک روی حفظ رشد و انجام متابولیسم‌های مختلف میکروارگانیسم‌ها و سایر فعالیت‌ها و همچنین روی افزایش میزان آنزیم فسفاتاز قلیایی مؤثر است، بنابراین می‌توان گفت افزایش میزان فسفر قابل دسترس خاک به واسطه افزودن کودهای فسفره در پژوهش حاضر، می‌تواند دلیلی مؤثر برای ایجاد همبستگی مثبت بین میزان فسفر قابل استفاده و میزان فسفاتاز قلیایی نیز باشد. نتایج به‌دست آمده از پژوهش ناهیدان و قاسم زاده (Nahidan & Ghasmzadeh, 2022) نشان داد که تغییرات فعالیت‌های میکروبی و آنزیم‌های مرتبط با چرخه فسفر از جمله فسفاتازها می‌توانند بر فسفر قابل دسترس خاک، تأثیرگذار باشند. همچنین در این پژوهش، همبستگی مثبت و معنی‌دار بین فسفر قابل دسترس با تنفس میکروبی و فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز قلیایی و اسیدی دیده شد.

نتیجه‌گیری

جدایه‌های اکتینوباکتری مورد بررسی در این پژوهش پاسخ

مناسبی به حالیت فسفر در نتیجه ی افزودن اسید هیومیک به محیط‌کشت نشان دادند. بررسی نتایج نشان داد که ۶۰ درصد از جدایه‌های اکتینوباکتر، با افزایش زمان انکوباسیون از ۷ به ۱۴ روز حالیت فسفر افزایشی داشتند این در صورتی بود که ۴۰ درصد جدایه‌ها روندی کاهشی در میزان حالیت فسفر به ثبت رساندند. بر اساس نتایج کاربرد تلفیقی/استریتومایسس و اسید هیومیک به‌عنوان یک راهکار زیستی مؤثر، سبب افزایش زیست‌فراهمی فسفر در خاک و جذب آن توسط گیاه از طریق مکانیسم‌های هم‌افزا شده است. به‌طوری‌که تیمار کاربرد تلفیقی/استریتومایسس و اسید هیومیک در سطح بالای فسفر بیش‌ترین میزان فسفر قابل دسترس خاک، فعالیت فسفاتاز اسیدی و قلیایی، فسفر زیست‌توده میکروبی و محتوی فسفر گیاه را به ثبت رساند. بررسی نتایج نشان داد که مایه‌زنی/استریتومایسس در سطح بالای فسفر روند افزایشی در میزان تنفس میکروبی پایه خاک نشان داد که این موضوع حاکی از پاسخ مثبت جامعه زیستی خاک به کاربرد تلفیقی مایه‌زنی/استریتومایسس و مصرف کود فسفر می‌باشد. به‌طور کلی کاربرد تلفیقی مایه‌زنی/استریتومایسس، اسید هیومیک و مصرف ۴۰ کیلوگرم فسفر در هکتار با بهبود شرایط زیستی مرتبط با فسفر در خاک نقش مهمی در زیست‌فراهمی فسفر در خاک و گیاه داشته، که برای اطمینان بیش‌تر انجام آزمایش مزرعه‌ای برای اثبات کارایی آن ضروری است.

References

- Aallam, Y., Dhiba, D., Lemriss, S., Souiri, A., Karray, F., Rasafi, T.E., & Hamdali, H. (2021). Isolation and characterization of phosphate solubilizing *Streptomyces* sp. endemic from sugar beet fields of the Beni-Mellal region in Morocco. *Microorganisms*, 9, 914. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9050914>
- Afzal, I., Shinwari, Z.K., Sikandar, S., & Shahzad, S. (2019). Plant beneficial endophytic bacteria: Mechanisms, diversity, host range and genetic determinants. *Microbiological Research*, 221, 36-49. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.02.001>
- Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). Methods in applied soil microbiology and biochemistry.
- Bashan, Y., de-Bashan, L.E., Prabhu, S.R., & Hernandez, J.P. (2014). Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998–2013). *Plant and Soil*, 378, 1-33. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1956-x>
- Bechtaoui, N., Rakkami, A., Benidire, L., Tahiri, A.I., Göttfert, M., & Oufdou, K. (2020). Effects of PGPR co-inoculation on growth, phosphorus nutrition and phosphatase/phytase activities of faba bean under different phosphorus availability conditions. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29(2), 1557-1565. <https://doi.org/10.15244/pjoes/110345>
- Chabot, R., Antoun, H., & Cescas, M.P. (1996). Growth promotion of maize and lettuce by phosphate-solubilizing *Rhizobium leguminosarum* biovar phaseoli. *Plant and Soil*, 184, 311-321. <https://doi.org/10.1007/BF00010460>
- Chapman, H.D., & Pratt, P.F. (1962). Methods of analysis for soils, plants and waters. *Soil Science*, 93, 68. <https://doi.org/10.1097/00010694-196201000-00015>
- Chauhan, A., Guleria, S., Balgir, P.P., Walia, A., Mahajan, R., Mehta, P., & Shirkot, C.K. (2017). Tricalcium phosphate solubilization and nitrogen fixation by newly isolated *Aneurini bacillus aneurinilyticus* CKMV1 from rhizosphere of *Valeriana jatamansi* and its growth promotional effect. *Brazilian Journal of Microbiology*, 48, 294-304. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.12.001>
- Chouyia, F.E., Romano, I., Fechtali, T., Fagnano, M., Fiorentino, N., Visconti, D., & Pepe, O. (2020). P-solubilizing *Streptomyces roseocinereus* MS1B15 with multiple plant growth-promoting traits enhance barley development and regulate rhizosphere microbial population. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1137. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01137>

- org/10.3389/fpls.2020.01137
10. Cozzolino, V., Monda, H., Savy, D., Di Meo, V., Vinci, G., & Smalla, K. (2021). Cooperation among phosphate solubilizing bacteria, humic acids and Arbuscular mycorrhizal fungi induces soil microbiome shifts and enhances plant nutrient uptake. *Journal of Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8(1), 1-18. <https://doi.org/10.1186/s40538-021-00230-x>
11. Da Costa, E.M., de Lima, W., Oliveira-Longatti, S.M., & de Souza, F.M. (2015). Phosphate-solubilising bacteria enhance *Oryza sativa* growth and nutrient accumulation in an oxisol fertilized with rock phosphate. *Ecological Engineering*, 83, 380-385. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.06.045>
12. Dehsheikh, A.B., Sourestani, M.M., Zolfaghari, M., & Enayatizamir, N. (2020). Changes in soil microbial activity, essential oil quantity, and quality of Thai basil as response to biofertilizers and humic acid. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120439. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120439>
13. Divjot, K., Rana, K.L., Tanvir, K., Yadav, N., Yadav, A.N., & Kumar, M. (2021). Biodiversity, current developments and potential biotechnological applications of phosphorus-solubilizing and-mobilizing microbes: a review. *Pedosphere*, 31, 43-75. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(20\)60057-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60057-1)
14. Dong, Z., Liu, Y., Li, M., Ci, B., Lu, X., Feng, X., & Ma, F. (2023). Effect of different NPK fertilization timing sequences management on soil-petiole system nutrient uptake and fertilizer utilization efficiency of drip irrigation cotton. *Scientific Reports*, 13, 14287. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40620-9>
15. Ekin, Z. (2019). Integrated use of humic acid and plant growth promoting rhizobacteria to ensure higher potato productivity in sustainable agriculture. *Journal of Sustainability*, 11, 123-417. <https://doi.org/10.3390/su11123417>
16. Esringü, A., Kaynar, D., Turan, M., & Ercisli, S. (2016). Ameliorative effect of humic acid and plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on Hungarian vetch plants under salinity stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47, 602-618. <https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1141922>
17. Farhat, M.B., Boukhris, I., & Chouayekh, H. (2015). Mineral phosphate solubilization by *Streptomyces* sp. CTM396 involves the excretion of gluconic acid and is stimulated by humic acids. *FEMS Microbiology Letters*, 362, 5. <https://doi.org/10.1093/femsle/fnv008>
18. Ghorbani Nasrabadi, R., Greiner, R., Mayer-miebach, E., & Menezes-Blackburn, D. (2023). Phosphate solubilizing and phytate degrading *Streptomyces* isolates stimulate the growth and P accumulation of maize (*Zea mays*) fertilized with different phosphorus sources. *Geomicrobiology Journal*, 40, 325-336. <https://doi.org/10.1080/01490451.2023.2168799>
19. Hedley, M.J., Stewart, J.W.B., & Chauhan, B. (1982). Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal*, 46, 970-976. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050017x>
20. Hoseini, S.S., Zalaghi, R., Enayatizamir, N., & Feizian, M. (2023). The effect of sewage sludge application on soil phosphatase activity and nutrients uptake by maize plant inoculated with symbiotic fungi. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 13(4), 45-62. (In Persian with English abstract)
21. Kalayu, G. (2019). Phosphate solubilizing microorganisms: promising approach as biofertilizers. *International Journal of Agronomy*, 4917256. <https://doi.org/10.1155/2019/4917256>
22. Karami, Y., Samadi, A., fallah Nosratabad, A., Sepehr, E., & Barin, M. (2021). Quantitative evaluation of dissolved and microbial biomass phosphorus released from insoluble phosphates by some strains in order to select efficient bacteria. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 11(4), 55-75. (In Persian with English abstract).
23. Khalid, R., Khalid, A., Shabaan, M., Asghar, H.N., & Zahir, Z.A. (2023). Phosphorous (P)-solubilizing *Rhizobacteria* improve P availability to Mung bean via enhanced soil phosphatase activity and improve its growth. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(4), 6155-6166. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01473-3>
24. khalili, N., Ghorbani Nasrabadi, R., Baranimotlagh, M., & Khodadadi, R. (2023). The effect of humic acid and inoculation of actinomycetes isolates on phosphorus solubilization in laboratory condition and phosphorus content in maize (*Zea mays*). *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 13(2), 75-94. (In Persian with English abstract).
25. Khan, N., Siddiqui, M.H., Ahmad, S., Ahmad, M.M., & Siddiqui, S. (2024). New insights in enhancing the phosphorus use efficiency using phosphate-solubilizing microorganisms and their role in cropping system. *Geomicrobiology Journal*, 1-11. <https://doi.org/10.1080/01490451.2024.2331111>
26. Liu, F., Qian, J., Zhu, Y., Wang, P., Hu, J., Lu, B., & Li, F. (2024). Phosphate solubilizing microorganisms increase soil phosphorus availability: a review. *Geomicrobiology Journal*, 41(1), 1-16. <https://doi.org/10.1080/01490451.2023.2272620>
27. Margalef, O., Sardans, J., FernandezMartínez, M., Molowny-Horas, R., Janssens, I.A., Ciais, P., Goll, D., Richter, A., Obersteiner, M., Asensio, D., & Penuelas, J. (2017). Global patterns of phosphatase activity in natural soils. *Scientific Reports*, 7(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01418-8>
28. Mehta, S., & Nautiyal, C.S. (2001). An efficient method for qualitative screening of phosphate solubilizing

- bacteria. *Journal of Current Microbiology*, 43, 51-56. <https://doi.org/10.1007/s002840010259>
29. Nahidan, S., & Ghasmzadeh, M. (2022). Biochemical phosphorus transformations in a calcareous soil as affected by earthworm, cow manure and its biochar additions. *Applied Soil Ecology*, 170, 104310. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104310>
 30. Olivares, F.L., Aguiar, N.O., Rosa, R.C.C., & Canellas, L.P. (2015). Substrate biofortification in combination with foliar sprays of plant growth promoting bacteria and humic substances boosts production of organic tomatoes. *Scientia Horticulturae*, 183, 100-108. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.11.012>
 31. Olivares, F.L., Busato, J.G., de Paula, A.M., da Silva Lima, L., Aguiar, N.O., & Canellas, L.P. (2017). Plant growth promoting bacteria and humic substances: crop promotion and mechanisms of action. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 4, 1-13. <https://doi.org/10.1186/s40538-017-0112-x>
 32. Olsen, S.R. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *US Department of Agriculture*.
 33. Orsi, M. (2014). Molecular dynamics simulation of humic substances. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 1, 1-14. <https://doi.org/10.1186/s40538-014-0010-4>
 34. Pande, A., Pandey, P., Mehra, S., Singh, M., & Kaushik, S. (2017). Phenotypic and genotypic characterization of phosphate solubilizing bacteria and their efficiency on the growth of maize. *Journal of Genetic Engineering Biotechnology*, 15(2), 379-391. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2017.06.005>
 35. Pang, F., Li, Q., Solanki, M. K., Wang, Z., Xing, Y. X., & Dong, D. F. (2024). Soil phosphorus transformation and plant uptake driven by phosphate solubilizing microorganisms. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1383813. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1383813>
 36. Peng, Y., Duan, Y., Huo, W., Xu, M., Yang, X., Wang, X., & Feng, G. (2021). Soil microbial biomass phosphorus can serve as an index to reflect soil phosphorus fertility. *Biology and Fertility of Soils*, 57, 657-669. <https://doi.org/10.1007/s00374-021-01563-3>
 37. Pishchik, V.N., Vorobyov, N.I., Walsh, O.S., Surin, V.G., & Khomyakov, Y.V. (2016). Estimation of synergistic effect of humic fertilizer and *Bacillus subtilis* on lettuce plants by reflectance measurements. *Journal of Plant Nutrition*, 39, 1074-1086. <https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1061551>
 38. Raiesi, T., & Hosseini, A. (2013). The Rhizospheric Effects of Wheat (*Triticum aestivum* L.) on Phosphorus Release Kinetics. *Water and Soil*, 27(4), 780-791. (In Persian with English abstract)
 39. Rawat, P., Das, S., Shankhdhar, D., & Shankhdhar, SC. (2021). Phosphate solubilizing microorganisms: mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(1), 49-68. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00342-7>
 40. Rosa, P.A.L., Galindo, F.S., Oliveira, C.E.D.S., Jalal, A., Mortinho, E.S., Fernandes, G.C., Marega, E.M.R., Buzetti, S., & Teixeira Filho, M.C.M. (2022). Inoculation with plant growth-promoting bacteria to reduce phosphate fertilization requirement and enhance technological quality and yield of sugarcane. *Microorganisms*, 10(1), 192. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10010192>
 41. Sadeghi, E., Ghorbani Nasrabadi, R., Movahedi Naeini, S.A.R., Baranimotlagh, M., Khoshhal Sarmast, M., & Pahlevan-Rad, M.R. (2023) Using compost and triple superphosphate fertilizer to promote soil microbial and enzymatic properties and maize (*Zea mays*) growth in loess soil. *Agricultural Engineering*, 46(2), 121-139. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01940-5>
 42. Sarmah, R., & Sarma, A.K. (2023). Phosphate solubilizing microorganisms: A review. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 54, 1306-1315. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2142238>
 43. Shah, F., & Wu, W. (2019). Soil and crop management strategies to ensure higher crop productivity within sustainable environments. *Sustainability*, 11, 1485. <https://doi.org/10.3390/su11051485>
 44. Shams El-Deen, R.O., El-Azeem, A., Samy, A.M., Abd Elwahab, A.F., & Mabrouk, S.S. (2020). Effects of phosphate solubilizing microorganisms on wheat yield and phosphatase activity. *Egyptian Journal of Microbiology*, 55 (The 14th Conference of Applied Microbiology), 71-86. <https://doi.org/10.21608/ejm.2020.20675.1137>
 45. Sheikhloo, F., & Rasouli Sadaghiani, M. (2016). Effects of different agronomic and forest land uses on soil enzyme activity. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(1), 205-216. (In Persian with English abstract).
 46. Silva, L.I.D., Pereira, M.C., Carvalho, A.M.X.D., Buttrós, V.H., Pasqual, M., & Dória, J. (2023). Phosphorus-solubilizing microorganisms: a key to sustainable agriculture. *Agriculture*, 13(2), 462. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020462>
 47. Smith, S. (1994). Effect of soil pH on availability to crops of metals in sewage sludge-treated soils. I. Nickel, copper and zinc uptake and toxicity to ryegrass. *Environmental Pollution*, 85(3), 321-327. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(94\)90054-X](https://doi.org/10.1016/0269-7491(94)90054-X)
 48. Sparling, G.P., Feltham, C.W., Reynolds, J., West, A.W., & Singleton, P. (1990). Estimation of soil microbial C by a fumigation-extraction method: use on soils of high organic matter content, and a reassessment of the kEC-factor. *Soil Biology and Biochemistry*, 22(3), 301-307. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(90\)90104-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(90)90104-8)
 49. Spohn, M., & Kuzyakov, Y. (2013). Phosphorus mineralization can be driven by microbial need for carbon. *Soil*

- Biology and Biochemistry*, 61, 69-75. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.02.013>
50. Tabatabai, M.A., & Bremner, J.M. (1969). Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 1, 301-307. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(69\)90012-1](https://doi.org/10.1016/0038-0717(69)90012-1)
51. Wahid, F., Sharif, M., Steinkellner, S., Khan, M.A., Marwat, K.B., & Khan, S.A. (2016). Inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate solubilizing bacteria in the presence of rock phosphate improves phosphorus uptake and growth of maize. *Pakistan Journal of Botany*, 48, 739-747.
52. Wu, W., Wang, F., Xia, A., Zhang, Z., Wang, Z., Wang, K., & Cui, X. (2022). Meta-analysis of the impacts of phosphorus addition on soil microbes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 340, 108180. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108180>
53. Yadav, H., Fatima, R., Sharma, A., & Mathur, S. (2017). Enhancement of applicability of rock phosphate in alkaline soils by organic compost. *Applied Soil Ecology*, 113, 80-85. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.02.004>
54. Yang, J., Kloepper, J.W., & Ryu, C.M. (2009). Rhizosphere bacteria help plants tolerate abiotic stress. *Trends in Plant Science*, 14, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2008.10.004>
55. Yuan, Y., Gai, S., Tang, C., Jin, Y., Cheng, K., Antonietti, M., & Yang, F. (2022). Artificial humic acid improves maize growth and soil phosphorus utilization efficiency. *Journal of Applied Soil Ecology*, 179, 104-587. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104587>
56. Zhang, J., Li, Y., Wang, J., Chen, W., Tian, D., & Niu, S. (2021). Different responses of soil respiration and its components to nitrogen and phosphorus addition in a subtropical secondary forest. *Forest Ecosystems*, 8, 1-13. <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00313-z>

Identification and Prioritization of the Most Suitable Strategies for Improving the Health of the Ilam Dam Watershed Using the SWOT Method

E. Fathi¹, M. Ekhtesasi^{1*}, A. Talebi¹, J. Mosaffaie²

1- Rangeland and Watershed Department, Faculty of Natural Resources and Desertology, Yazd University, Yazd, Iran
(*- Corresponding Author Email: Mr_Ekhtesasi@yazd.ac.ir)

2- Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 17-11-2024	How to cite this article: Fathi, E., Ekhtesasi, M., Talebi, A., & Mosaffaie, J. (2025). Identification and prioritization of the most suitable strategies for improving the health of the Ilam dam watershed using the SWOT method. <i>Journal of Water and Soil</i> , 39(1), 55-71. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90768.1446
Revised: 03-01-2025	
Accepted: 18-01-2025	
Available Online: 18-01-2025	

Introduction

Watersheds, as diverse ecosystems, play a fundamental role in water provision, soil conservation, biodiversity, and ecological sustainability. In addition to delivering environmental services, these areas serve as vital resources for supporting the livelihoods and well-being of local communities. However, population growth, climate change, land-use changes, and overexploitation have imposed significant pressures on these ecosystems, jeopardizing their health and natural functionality. The degradation of these areas can lead to serious consequences for water resources, biodiversity, and environmental sustainability. Therefore, identifying and implementing effective strategies to preserve and enhance watershed health is essential. In this regard, the present study utilizes the strategic SWOT model to identify the strengths, weaknesses, opportunities, and threats within the Ilam Dam watershed and aims to propose practical solutions for improving and strengthening the health of these valuable ecosystems.

Materials and Methods

To achieve optimal strategies for resource management and improving the health of the study area, the SWOT analysis method was employed. This method provides a comprehensive framework for developing operational strategies by identifying existing strengths, weaknesses, opportunities, and threats. Data for this research were collected through field studies, specialized interviews with local experts, and a review of scientific resources and available information. To enhance accuracy and reliability in evaluating and weighting internal and external factors, the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Expert Choice software were utilized. Subsequently, the collected data were analyzed using the Internal Factor Evaluation (IFE) and External Factor Evaluation (EFE) matrices, leading to the formulation of appropriate strategies. These strategies were categorized into four main types: aggressive, conservative, competitive, and defensive. Finally, to ensure the selection of the best options, the Quantitative Strategic Planning Matrix (QSPM) was applied. At this stage, each strategy was scored and prioritized based on its attractiveness and feasibility, ensuring the identification of the most effective and actionable strategies.

Results and Discussion



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90768.1446>

According to the results of this study, seven factors were identified as strengths and seven as weaknesses (internal factors), along with seven opportunities and seven threats (external factors). The total score for strengths was 3.33, and for weaknesses, it was 3.57. Additionally, the score for opportunities was calculated at 3.54, while threats scored 3.28. Based on these scores and the internal and external factors evaluation matrix analysis, the WO strategy position was recommended, with specific solutions determined for each strategy. In the SO strategy, the QSPM matrix analysis indicated that optimal management of surface and groundwater resources, along with the establishment of suitable infrastructure for water capture and storage (strategy SO2), was recognized as the top priority. Within the ST strategy, the strategy of leveraging high organizational and local capacity to address the negative impacts of climate change and sustainably engage stakeholders and local communities in decision-making and watershed resource protection (strategy ST4) was prioritized. For the WO strategy, enhancing water and soil conservation programs and developing research and management initiatives through encouragement, support, and both material and spiritual contributions for specialized studies (strategy WO2) was identified as the main priority. Likewise, under the WT strategy, expanding and diversifying educational programs, developing educational content on water crises and climate change, and addressing the consequences of natural resource degradation in the basin, along with planning and approving national and international projects on climate change and dust storm mitigation (strategy WT1), emerged as the top priority. These strategies can provide an effective framework for improving resource management in watersheds and addressing environmental challenges.

Conclusion

The findings of this study clearly demonstrate that strengthening protective, managerial, and educational programs plays a crucial role in improving the health of this watershed. These strategies, by optimizing available opportunities and minimizing weaknesses, can significantly contribute to sustainable development and effective natural resource conservation. In particular, the implementation of these programs requires collaboration and synergy among the local community, governmental and non-governmental organizations, and related agencies. It is recommended that conservation and management planning be accompanied by education and awareness initiatives for the local community, so residents understand the importance of preserving natural resources and are encouraged to participate in conservation efforts. This active community involvement not only enhances the effectiveness of these strategies but also contributes to achieving desirable outcomes and ecosystem sustainability, setting the stage for more effective management and long-term conservation of water and soil resources.

Keywords: Ilam Dam, Management, Strategy, SWOT, Watershed health

شناسایی و اولویت‌بندی مناسب‌ترین راهبردهای بهبود سلامت آبخیز سد ایلام با روش SWOT

احسان فتحی^۱ - محمدرضا اختصاصی^{۱*} - علی طالبی^۱ - جمال مصفاei^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹

چکیده

حوزه‌های آبخیز، به‌عنوان بوم‌سازگان‌های متنوع، نقش مهمی در ارائه خدمات بوم‌سازگانی به جوامع محلی دارند. با توجه به فشارهای فزاینده بر این مناطق در سراسر جهان، پژوهشگران در تلاش‌اند با استفاده از روش‌های علمی مؤثر و پایدار از تخریب و زوال این حوزه‌ها جلوگیری کنند. این پژوهش با هدف شناسایی و اولویت‌بندی راهبردهای بهبود سلامت آبخیز سد ایلام به عنوان یک حوزه مهم در ارائه خدمات به ویژه تأمین آب برای مصارف شرب و کشاورزی با استفاده از مدل SWOT انجام شده است. داده‌ها از طریق مطالعات میدانی، مصاحبه با کارشناسان، بررسی منابع و جلسات طوفان فکری جمع‌آوری شدند. برای وزن‌دهی عوامل داخلی و خارجی از فرآیند AHP و نرم‌افزار Expert Choice استفاده شد. سپس براساس نتایج ماتریس ارزیابی، راهبردهای مناسب تدوین و با ماتریس QSPM اولویت‌بندی شدند. در مجموع ۷ عامل قوت، ۷ عامل ضعف، ۷ فرصت و ۷ تهدید شناسایی شدند. امتیازات نقاط قوت ۳/۳۳، نقاط ضعف ۳/۵۷، فرصت‌ها ۳/۵۴ و تهدیدها ۳/۲۸ به‌دست آمد. براساس این نتایج، راهبرد WO پیشنهاد شد. راهبردهای اولویت‌بندی شده شامل مدیریت مطلوب آب‌های سطحی و زیرزمینی (SO2)، استفاده از ظرفیت سازمانی و بومی برای مقابله با تغییر اقلیم (ST4)، تقویت برنامه‌های حفاظت خاک و آب و توسعه تحقیقات (WO2) و توسعه برنامه‌های آموزشی مرتبط با بحران آب و تغییر اقلیم (WT1) هستند. در نهایت، اجرای این راهبردها با بهبود مدیریت منابع آب، تقویت آگاهی‌های محلی و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی، می‌تواند به تقویت تاب‌آوری جامعه محلی، حفظ منابع طبیعی و بهبود کیفیت زندگی آنها کمک کند. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده اهمیت ویژه تقویت برنامه‌های حفاظتی، مدیریتی و آموزشی در جهت بهبود سلامت آبخیز سد ایلام است. پیشنهاد می‌شود که اجرای این راهبردها با همکاری و مشارکت فعال جامعه محلی و نهادهای مرتبط صورت گیرد تا بتوان به بهترین نتایج دست یافت.

واژه‌های کلیدی: راهبرد، سد ایلام، سلامت آبخیز، مدیریت، SWOT

مقدمه

آبخیز نقش مهمی در سلامت و رفاه کلی اکوسیستم‌ها، جوامع و محیط‌زیست ایفا می‌کنند (Nasiri Khiavi et al., 2024). سلامت حوزه آبخیز به‌عنوان بسط مفهوم بوم‌سازگان و یا سلامت بوم‌شناختی در مقیاس حوزه آبخیز به کار می‌رود. سلامت آبخیز همچنین به حفظ وضعیت عادی چنین سامانه سازگار پیچیده‌ای اشاره دارد (Mosaffaie et al., 2021). سلامت در عملکرد آنها متأثر از پدیده‌های غیرانسانی از جمله تغییرات آب و هوایی، خشکسالی و غیره است. از طرفی، فعالیت‌های انسانی مانند تخریب، جنگل‌زدایی و نظایر آن سبب کاهش سلامت آبخیزها و تشدید عملکرد منفی پدیده‌های

حوزه‌های آبخیز سامانه‌های اجتماعی - بوم‌شناختی هستند که در آن انسان‌ها و دیگر موجودات زنده با محیط فیزیکی و یکدیگر تعامل دارند (Cabello et al., 2015; Gari et al., 2018). آبخیزهای سالم از نقش غیرقابل انکاری در تأمین نیازها و ارائه خدمات سالم در بخش‌های مختلف به ذینفعان برخوردار هستند (Hazbavi et al., 2018a; Ervinia et al., 2019). خدمات حوزه آبخیز برای انسان ضروری هستند و از تأمین آب، غذا تا مزایای فرهنگی و کارکردهای زیست‌محیطی را شامل می‌شوند (Hamel et al., 2018). حوزه‌های

۱- گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: Mr_Ekhtesasi@yazd.ac.ir

۲- پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

بوم‌گردی پایدار را در سواحل دریایی Bontang در اندونزی مورد مطالعه قرار دادند و بدین منظور برای شناسایی راهبردهای جایگزین از مدل SWOT و ماتریس QSPM استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد مدیریت پایدار در این منطقه باید در راستای بهبود استفاده از نقاط قوت و فرصت‌ها با استفاده از راهبردهای متنوع و تهاجمی به حداکثر برسد. جعفری و همکاران (Jafari et al., 2021)، به ارزیابی عوامل مؤثر بر عملکرد و بهره‌وری اقتصادی پروژه‌های آبخیزداری در حوزه آبخیز سد قشلاق با استفاده از مدل SWOT پرداختند. بر اساس نتایج مدل SWOT، وضعیت راهبردی در ربع ST و WT قرار گرفته، از نوع محافظه کارانه و تدافعی است. یعنی راهبرد باید در جهت کاهش زیان ناشی از تهدیدها و نقاط ضعف با استفاده از نقاط قوت حوزه باشد. پتوسی و همکاران (Petousi et al., 2017) به ارزیابی اقدامات مدیریت منابع آب از طریق تجزیه و تحلیل SWOT در جزیره Crete در یونان پرداختند. آن‌ها طرح مدیریتی که برای حوضه رودخانه Crete انجام شده بود را با استفاده از این مدل ارزیابی کرده و راهبردهایی را ارائه کردند. راهبردهای آنها در این خصوص شامل کاهش آب برای آبیاری، کنترل کود، بهره‌برداری از چشمه‌های کارستی، بازیافت پساب و ساخت سدهای کوچک بود. صادقی و همکاران (Sadeghi et al., 2021) در پژوهشی به بررسی مدیریت جامع و مشکل محور حوزه آبخیز برارود استان مازندران با استفاده از چارچوب برنامه‌ریزی راهبردی SWOT پرداختند. بدین منظور ابتدا نقاط قوت، ضعف، فرصت و تهدید تعیین و سپس ماتریس SWOT و برنامه‌ریزی راهبردی کمی برای اولویت‌بندی راهبردها تهیه شد. بر اساس نتایج، وضعیت حوزه آبخیز مورد مطالعه، متوسط است و مناسب‌ترین نوع راهبرد، از نوع محافظه کارانه است. همچنین بهترین راهبرد در حوزه آبخیز، راهبرد تقویت حس رضایت‌مندی ساکنین شناسایی شد. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که استفاده از مدل SWOT با توجه به شناسایی دقیق نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدها در هر حوزه آبخیز برای ارزیابی منابع آبخیز و ارائه راهبردهای مدیریتی می‌تواند بهبود قابل توجهی در مدیریت منابع آبخیز و پایداری حوزه‌های آبخیز داشته باشد. مدل SWOT یکی از مهم‌ترین ابزارهای پشتیبانی تصمیم است که به عنوان ابزاری عملی و علمی، به طور قابل ملاحظه‌ای با درک واقعیات و رفع مشکلات جهت تعیین راهبردها به تصمیم‌گیران کمک خواهند نمود. این رویکرد با بررسی عوامل داخلی و عوامل خارجی تأثیرگذار بر عملکرد یک سیستم، به تصمیم‌گیرنده کمک می‌کند، راهبرد خود را بر مبنای نقاط قوتی تدوین نماید که ضعف‌هایش را کاهش دهد و یا از فرصت‌هایش برای احتراز از تهدیدها استفاده کند (Einloo et al., 2022). در این مطالعه به منظور

غیرانسانی می‌شود (Tsai et al., 2021). رشد جمعیت و لزوم تأمین نیازهای زیستی انسان به ویژه در کشورهای در حال توسعه، منجر به استفاده‌های غیراصولی از منابع سرزمین شده است که در پی آن تغییرات کاربری و پوشش زمین را به دنبال خواهد داشت (Bahremand et al., 2018). راهبرد افزایش تولید با بهره‌کشی بیش از حد از منابع، امروزه کشور را با بحران جدی، به ویژه در زمینه آب و محیط‌زیست، مواجه کرده است. از طرفی مدیریت ناصحیح منابع آب و سرزمین، امنیت آبی و غذایی کشور را در معرض تهدید قرار داده است (Khajoi, 2016; Hazbavi et al., 2019). در همین راستا، اخیراً ارزیابی و مدیریت جامع آبخیزها، در مجامع علمی بین‌المللی به عنوان رویکردی مؤثر و کارا برای مدیریت آب، سرزمین و منابع وابسته به آن‌ها و ایجاد تعادل بین نیازهای اقتصادی-اجتماعی جوامع آبخیزنشین و سلامت و پایداری بوم سازگان مطرح شده است (Hazbavi et al., 2018b; 2018c; 2020). حال با توجه به روند تخریب روزافزون منابع طبیعی و لزوم مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز کشور و همچنین با توجه به این امر که آبخیزهای سالم و پایدار خدمات بوم‌سازگان بسیاری در زمینه‌های مختلف فیزیکی، زیستی و بهبود شرایط اقتصادی و اجتماعی را ارائه می‌دهند؛ لذا ارائه راهبردهایی جهت بهبود سلامت حوزه‌های آبخیز ضروری به نظر می‌رسد. روش‌ها و مدل‌های مختلفی جهت تعیین و تدوین راهبردهای در زمینه‌های مختلف وجود دارد که حاوی مفهوم و بینش خاص خود بوده و از فن و دستورالعمل مخصوص پیروی می‌کند. از جمله مدل‌هایی که با اولویت‌بندی معیارها در راستای مدیریت راهبردی عمل می‌کند، مدل SWOT است. مدل SWOT سرواژه قوت‌ها (S)، ضعف‌ها (W)، فرصت‌ها (O) و تهدیدها (T) است. مدل برنامه‌ریزی راهبردی SWOT اولین بار در سال ۱۹۵۰ توسط Smith و Kristiansen مطرح شد (Kalliorasa et al., 2010). SWOT یکی از مدل‌های تصمیم‌گیری است که برای دستیابی به نتایج سودمند در حوضه‌های مختلف مطالعاتی، تحلیل ظرفیت‌های محلی و به طور کلی در راستای نیل به اهداف مطالعات برنامه‌ریزی توسعه یکپارچه در ابعاد اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و ساختاری مورد استفاده قرار می‌گیرد (Molaei Hashjin Zahedi Dafchahi, 2010). SWOT، ابزاری کارآمد برای شناسایی عوامل درونی (نقاط قوت و ضعف) و عوامل تأثیرگذار بیرونی منطقه (فرصت‌ها و تهدیدها) و شناسایی مسائل راهبردی و ارائه راهبردهای مناسب استفاده می‌شود (Rahmani et al., 2010). مطالعات متعددی در بکارگیری مدل SWOT در زمینه‌های مختلف انجام گرفته است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. آسپانی و همکاران (Aspian et al., 2019) راهبردهای توسعه

شمال کاهش می‌یابد. لیتولوژی غالب حوضه نیز شامل آهک دولومیتی و مارنی، آهک رسی - مارن و آهک رسی و شیل-مارن، گچ، آهک رسی و انیدریت و رسوبات آبرفتی کواترن می‌باشد. کاربری‌های آبخیز مورد مطالعه شامل مرتع، جنگل، اراضی کشاورزی دیم و آبی، باغ و مناطق مسکونی که مناطق مسکونی هستند. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

روش تحقیق

مدل راهبردی SWOT

مدل SWOT یکی از ابزارهای راهبردی تطابق قوت و ضعف درون سامانه با فرصت‌ها و تهدیدهای برون سامانه است. از این دیدگاه این الگو یک برنامه‌ریزی بلندمدت است که قوت‌ها و فرصت‌ها را به حداکثر و ضعف‌ها و تهدیدها را به حداقل ممکن می‌رساند (Alimoradi et al., 2022).

ارزیابی عوامل داخلی^۱ (IFE)

در مدل راهبردی SWOT عوامل داخلی یا درونی شامل قوت‌ها (یک نوع مزیت داخل آبخیز است که می‌توان از آن‌ها برای تحقق اهداف توسعه پایدار خدمات آبخیز استفاده کرد) و ضعف‌ها (یک نوع محدودیت یا کمبود در داخل آبخیز که مانعی برای تحقق اهداف محسوب می‌شوند) است. این عوامل در داخل خود آبخیز وجود دارند و در تعیین وضعیت حوزه آبخیز نقش مهمی دارند.

ارزیابی عوامل خارجی^۲ (EFE)

در مدل راهبردی SWOT عوامل خارجی یا بیرونی شامل فرصت‌ها (ویژگی‌هایی از محیط خارج آبخیز که می‌توان از آن‌ها برای تحقق اهداف توسعه پایدار خدمات داخل آبخیز بهره برد) و تهدیدها (ویژگی‌هایی از محیط خارج آبخیز که می‌توانند سلامت یا سطح خدمات آبخیز را کاهش داده و مانعی برای تحقق اهداف محسوب شوند) است. این عوامل از کنترل آبخیز خارج بوده و از خارج از آبخیز بر آن اثر می‌گذارند. در مرحله بعد پس از فهرست کردن هر یک از عوامل خارجی و داخلی، از برآیند هر یک از این عوامل، چهار نوع استراتژی WO، SO، WT و ST تعیین می‌شود (جدول ۱).

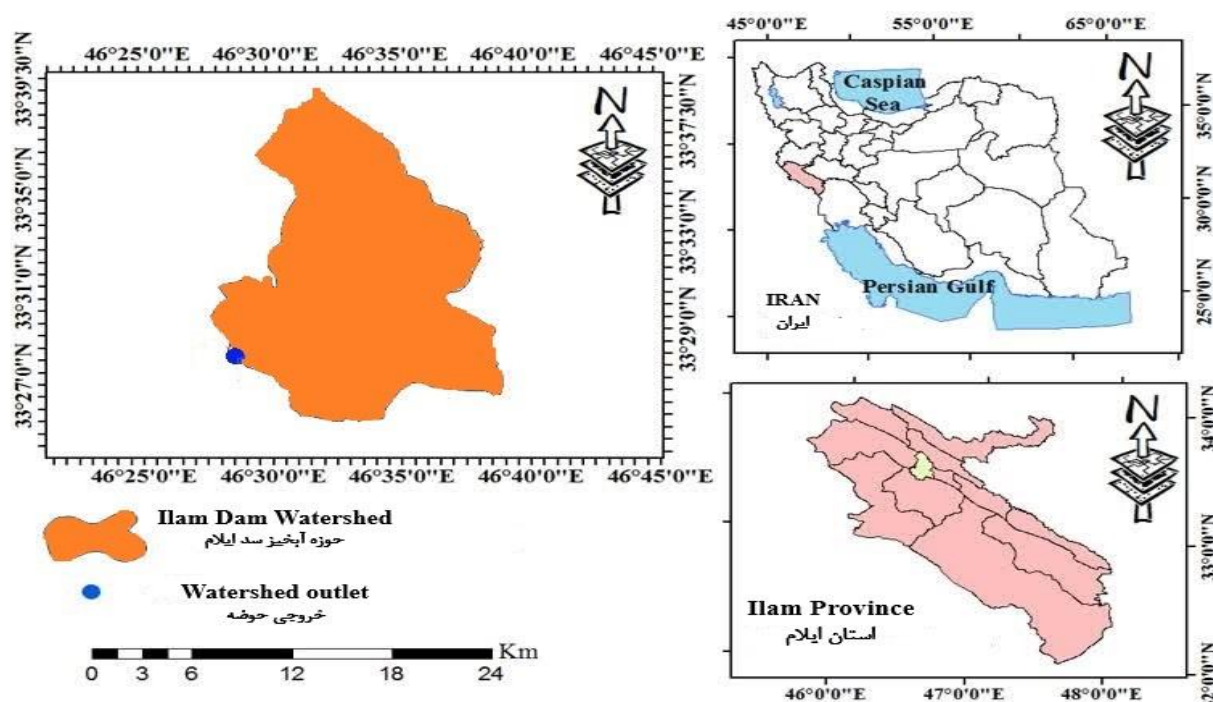
هدف از راهبردهای تهاجمی (SO)، استفاده از نقاط قوت برای بهره‌برداری از فرصت‌ها و دستیابی به آن‌ها است. راهبردهای رقابتی یا اقتضایی (ST) نیز با هدف استفاده از نقاط قوت برای کاهش تهدیدهای خارجی و دستیابی به آنها است.

شناسایی و اولویت‌بندی مناسب‌ترین راهبردهای بهبود سلامت آبخیز سد ایلام از روش SWOT استفاده شد. بررسی منابع بیانگر این است که در مطالعات گذشته علی‌رغم استفاده از مدل SWOT در مسائل مرتبط با مدیریت منابع طبیعی، به موضوع سلامت آبخیز با این روش پرداخته نشده است. در این تحقیق، سلامت آبخیز از جنبه‌های مختلف نظیر مدیریت منابع آب، خاک، پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی بررسی شده است. سلامت آبخیز به معنای حفظ و بهبود کیفیت منابع طبیعی، جلوگیری از تخریب محیط‌زیست و بهره‌برداری پایدار از منابع آب و خاک می‌باشد. تخریب مداوم در آبخیزها، سلامت و ارائه خدمات آن‌ها برای موجودات زنده و انسان را کاهش می‌دهد (Sadoddin et al., 2016). دانش سلامت آبخیز با یک رویکرد جامع به دنبال حفظ بوم‌سازگان‌های طبیعی از طریق حفاظت از حوزه‌های سالم و جلوگیری از تغییر و اختلال آنها است (EPA, 2011). از آنجا که حوزه آبخیز سد ایلام در تأمین خدمات آبخیز به‌ویژه تأمین آب برای مصارف شرب و کشاورزی نقش اساسی دارد به همین دلیل، در این تحقیق، با تحلیل گزینه‌ها و معیارهای مؤثر بر حوزه آبخیز بر اساس نظرات خبرگان، بازدیدهای میدانی و پرسش‌گری از جوامع محلی، از روش مدل تحلیلی SWOT برای تعیین بهترین راهبردهای بهبود سلامت در این حوزه آبخیز استفاده شده است.

مواد و روش

موقعیت منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز سد ایلام با مساحت ۲۵۵۳۰ هکتار در استان ایلام قرار گرفته و از نظر موقعیت بین ۴۶° ۱۶' ۴۴" تا ۴۶° ۱۸' ۲۴" طول شرقی و ۳۳° ۱۹' ۴" تا ۳۳° ۳۲' ۱۲" عرض شمالی قرار دارد. بر این اساس حداکثر ارتفاع این حوضه ۲۶۰۴ متر و حداقل ارتفاع آن ۱۰۵۲ متر از سطح دریا می‌باشد. ارتفاع متوسط این حوضه از سطح دریا ۱۸۲۸ متر و شیب متوسط حوضه نیز ۲۰ درصد می‌باشد. متوسط بارش سالانه در این حوضه در دوره آماری سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ حدود ۵۶۰ میلی‌متر و میانگین دمای حداکثر و حداقل نیز به ترتیب ۲۳/۲۵ و ۱۱/۰۶ درجه سانتی‌گراد است. محاسبات تعیین اقلیم نشان می‌دهد بر اساس روش آمبرژه نوع اقلیم منطقه نیمه‌مرطوب معتدل و در روش دومارتن نوع اقلیم مدیترانه‌ای است. حوضه مورد مطالعه در زون زاگرس چین خورده قرار گرفته است. واحدهای سنگی و آبرفتی موجود در حوضه مربوط به ادوار مختلف زمین‌شناسی می‌باشند. سن واحدهای سنگی مختلف منطقه درجات عمومی از سمت جنوب غرب به سمت شمال شرق و شمال کاهش می‌یابد. سن واحدهای سنگی مختلف منطقه درجات عمومی از سمت جنوب غرب به سمت شمال شرق و



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه
Figure 1- Location of the study area

جدول ۱- راهبردهای مدل SWOT
Table 1- SWOT Model Strategies

عوامل بیرونی External Factor	فرصت‌ها Opportunities	تهدیدها Threats
عوامل درونی Internal Factor		
قوت‌ها Strengths	راهبرد تهاجمی (SO) Aggressive Strategy	راهبرد رقابتی (ST) Competitive Strategy
ضعف‌ها Weaknesses	راهبرد محافظه کارانه (WO) Conservative Strategy	راهبرد تدافعی (WT) Defensive Strategy

گزارشات و وضع موجود، م صاحبه با کار شنا سان و برگزاری جلسات طوفان فکری عوامل داخلی و خارجی به صورت اولیه شناسایی شدند. سپس پرسشنامه براساس طیف لیکرت طراحی و عواملی که بر اساس میانگین حساسی امتیاز بالاتر از سه داشتند، به عنوان عوامل مهم تر انتخاب و پذیرفته شدند. بر این اساس تعداد ۲۸ عامل انتخاب شد. جامعه آماری شامل ۲۸ نفر است که شامل ۱۴ نفر از کارشناسان مرتبط (اداره کل محیط زیست، منابع طبیعی، جهاد کشاورزی، شرکت آب منطقه ای و اساتید دانشگاهی) و ۱۴ نفر از آبخیز نشینان می باشد. معیار انتخاب آبخیز نشینان شامل تجربه زیست در منطقه و مشارکت در فعالیتهای حفاظت منابع بوده است. توزیع فراوانی جامعه آماری جهت تعیین مهم ترین عوامل داخلی و خارجی در جدول ۲ آورده شده است.

راهبردهای محافظه کارانه یا انطباقی (WO) به منظور رفع نقاط ضعف با بهره گیری از فرصت های خارجی برای دستیابی به اهداف طراحی شده اند. راهبردهای تدافعی یا بقایی (WT) نیز با هدف کاهش نقاط ضعف به منظور مقابله با تهدیدهای خارجی و تحقق آنها ارائه خواهد شد.

تحلیل SWOT شامل مراحل زیر است:

۱- استخراج فهرست عوامل درونی آبخیز (ضعف ها و قوت ها) و عوامل خارجی (یعنی تهدیدها و فرصت ها) (براساس مرور منابع، مطالعات کتابخانه ای، جلسات حضوری و نظر کارشناسان و خبرگان و برگزاری جلسه های طوفان فکری): در ابتدا با استفاده از بازدید میدانی،

جدول ۲- توزیع فراوانی جامعه آماری حوزه آبخیز سد ایلام

Table 2- Frequency Distribution of the Statistical Population of the Ilam Dam Watershed

جامعه آماری	تعداد	درصد
Statistical population	Number	Percentage
متخصصین دانشگاهی	6	21.42
Academic specialists		
کارشناسان	8	28.58
Experts		
آبخیزنشینان	14	50
Watershed residents		

گرفته می‌شود. این نمره بین ۱ (کم جذاب‌ترین) تا ۴ (جذاب‌ترین) قرار می‌گیرد. در تعیین امتیاز جذابیت باید به این سؤال پاسخ داده شود: آیا این عامل در انتخاب راهبرد مذکور اثرگذار است یا خیر. در نهایت برای محاسبه جمع نمره‌های جذابیت (TAS^۴) از ضرب امتیاز وزن‌دار در نمره جذابیت استفاده می‌شود (Dehghan Chenari et al., 2022).

نتایج و بحث

عوامل داخلی و خارجی شناسایی شده در حوزه آبخیز سد ایلام و وزن‌دهی عوامل آنها که بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از پرسشنامه و با بهره‌گیری از روش AHP، توسط نرم‌افزار Expert Choice11 صورت گرفت در جدول‌های ۳ تا ۶ ارائه شده است. نرخ ناسازگاری عوامل قوت (۰/۰۹)، ضعف (۰/۰۹)، فرصت‌ها (۰/۰۹) و تهدیدها (۰/۰۸) کمتر از ۰/۱ به دست آمد که نشان می‌دهد نتایج مقایسه زوجی از دقت قابل قبولی برخوردار است. بعد از تعیین وزن هر عامل با استفاده از AHP، میزان اهمیت هر عامل براساس نظرات خبرگان با امتیازی بین ۱ تا ۴ مشخص و در نهایت از حاصل ضرب وزن در امتیاز، امتیاز وزنی محاسبه شد (جدول‌های ۳ تا ۶).

عوامل قوت نقش کلیدی در ارتقای سلامت آبخیز دارند. S1 و S4 منابع آبی پایدار و باکیفیت را برای تأمین نیازهای انسانی و اکوسیستمی تضمین می‌کنند و پایه‌ای برای بهبود سلامت آبخیز هستند. S2 و S3 با جلوگیری از فرسایش خاک، تقویت جذب آب و افزایش تنوع زیستی، پایداری زیست‌محیطی را تقویت می‌کنند. همچنین، S6 و S7 نقش مهمی در جلب حمایت مردمی برای اجرای راهبردهای مدیریت منابع و حفاظت از اکوسیستم ایفا می‌کنند. این عوامل، نه تنها سلامت فعلی آبخیز را حفظ می‌کنند، بلکه زمینه‌ای برای توسعه پایدار فراهم می‌سازند.

از ضریب نسبی روایی (CVR^۱) مبتنی بر نظر خبرگان جهت بررسی اعتبار یا روایی ابزار تحقیق استفاده شد (CVR= 0.49). بعد از تکمیل پرسشنامه، برای بررسی قابلیت اعتماد ابزار اندازه‌گیری (پایایی پرسشنامه) از روش آلفای کرونباخ^۲ (رابطه ۱) استفاده شد.

$$\alpha = (1 - \frac{\sum_{i=1}^n S_i^2}{\sigma^2}) \quad (1)$$

در این رابطه، α ضریب پایایی کرونباخ، n تعداد گویه‌های پرسشنامه، S_i^2 واریانس هر گویه و σ^2 واریانس کل آزمون است. اگر ضریب آلفا بیش از ۰/۷ باشد نشان دهنده پایایی مورد تأیید پرسشنامه است (Gliem & Gliem, 2003). مقدار آلفای کرونباخ در این پرسشنامه ۰/۸۵۳ محاسبه شد که با توجه به اینکه این مقدار بزرگتر از ۰/۷ است پایایی پرسشنامه مورد تأیید قرار گرفت.

۲- تعیین اوزان نسبی برای هر یک از عوامل داخلی و خارجی حوزه آبخیز با بکارگیری تکنیک تحلیل سلسله‌مراتبی: بعد از مشخص شدن عوامل قوت و ضعف (عوامل داخلی) و عوامل فرصت و تهدید (عوامل خارجی) در گام دوم برای وزن‌دهی و اولویت‌بندی عوامل نهایی از تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP^۳) با کمک نرم‌افزار Expert Choice11 استفاده شد. ۳- تعیین امتیاز یا مقادیر عوامل درونی و بیرونی در حوزه آبخیز سد ایلام ۴- محاسبه امتیاز وزنی هر یک از عوامل داخلی و خارجی آبخیز با ضرب اوزان در امتیاز آنها ۵- تدوین راهبردها مبتنی بر ملاحظه زوجی هر یک از عوامل درونی و بیرونی ۶- محاسبه برآیند امتیازات وزنی عوامل درونی و بیرونی و تعیین موقعیت راهبردی حوزه آبخیز.

ماتریس برنامه‌ریزی راهبردی کمی (QSPM^۴)

بعد از تعیین راهبرد با استفاده از مدل SWOT، راهبردهایی ارائه می‌شوند که به منظور تعیین اولویت و جذابیت هر یک از راهبرها از ماتریس برنامه‌ریزی راهبردی کمی استفاده شد. در این روش، برای هر یک از راهبردهای نوشته شده، یک نمره جذابیت (AS^۵) در نظر

4- Quantitative Strategic Planning Matrix
5- Attractive Scores
6- Total Attractive Scores

1- Content Validity Ratio
2- Cronbach Alpha method
3- Analytical Hierarchy process

جدول ۳- ماتریس ارزیابی نقاط قوت در حوزه آبخیز سد ایلام با استفاده از روش نظرسنجی و تحلیل AHP
Table 3- Evaluation Matrix of Strengths in the Ilam Dam Watershed Using the Survey Method and AHP Analysis

کد Code	قوت‌ها Strengths	وزن Weight	امتیاز Score	امتیاز وزنی Weighted score
S ₁	وجود رودخانه و چشمه‌های پرآب و دائمی The presence of rivers and abundant, permanent springs	0.247	3	0.741
S ₂	وجود و تنوع پوشش گیاهی مناسب به خصوص درختان The existence and diversity of suitable vegetation, especially trees	0.333	4	1.32
S ₃	بارندگی و شرایط اقلیمی مناسب Favorable rainfall and climatic conditions	0.153	3	0.459
S ₄	کیفیت مناسب منابع آب سطحی و چشمه‌ها Good quality of surface water and springs	0.138	4	0.552
S ₅	جاذبه‌های گردشگری Tourist attractions	0.032	2	0.064
S ₆	وجود منابع درآمدزایی فرعی، گیاهان دارویی و صنعتی، پرورش زنبورعسل و صنایع دستی در آبخیز The presence of supplementary income sources, medicinal and industrial plants, beekeeping, and handicrafts in the watershed	0.050	2	0.1
S ₇	وجود شورای روستایی، دهیاری و برخورداری از ظرفیت بالای مشارکت‌پذیری بدلیل تجانس قومی طایفه‌ای The existence of a village council, local governance, and a high capacity for community participation due to tribal and ethnic cohesion	0.047	2	0.094
	جمع کل Total	1	-	3.33

جدول ۴- ماتریس ارزیابی نقاط ضعف در حوزه آبخیز سد ایلام با استفاده از روش نظرسنجی و تحلیل AHP
Table 4- Evaluation Matrix of Weaknesses in the Ilam Dam Watershed Using the Survey Method and AHP Analysis

کد Code	ضعف‌ها Weaknesses	وزن Weight	امتیاز Score	امتیاز وزنی Weighted score
W ₁	تبخیر بیش از حد آب از مخزن سد Excessive water evaporation from the dam reservoir	0.037	3	0.11
W ₂	کاهش حجم مخزن در اثر رسوبگذاری Reduction in reservoir volume due to sedimentation	0.028	3	0.084
W ₃	ساخت و ساز غیرمجاز و تغییر کاربری با تخریب جنگل‌ها و مراتع و اراضی کشاورزی Unauthorized construction and land-use changes resulting in the destruction of forests, rangelands, and agricultural lands	0.210	3	0.84
W ₄	عدم وجود برنامه جامع مدیریتی در حوضه با وجود اهمیت بالای منطقه Lack of a comprehensive management plan in the watershed despite the area's high importance	0.205	4	0.82
W ₅	وجود سازندهای حساس و زیاد بودن فرسایش آبی در حوزه آبخیز Presence of sensitive formations and high levels of water erosion in the watershed	0.117	2	0.234
W ₆	شیب زیاد و سیلخیزی بالای حوزه آبخیز و همچنین صعب‌العبور بودن مسیرها در بالادست آبخیز به‌منظور انجام فعالیت‌های آبخیزداری Steep slopes, high flood potential, and difficult access routes in the upstream areas for implementing watershed management activities	0.062	2	0.124
W ₇	آگاهی اندک جامعه محلی از اهمیت مسائل محیط‌زیستی و منابع طبیعی Low awareness among the local community about the importance of environmental and natural resource issues	0.341	4	1.36
	جمع کل Total	1	-	3.57

غیرمجاز و تغییر کاربری اراضی (W3) باعث تخریب زیستگاه‌ها و تشدید فرسایش خاک می‌شود. همچنین W4، مانع از اجرای اقدامات منسجم برای حفظ منابع طبیعی است. وجود سازندهای حساس و

عوامل ضعف شناسایی‌شده، تهدیدی جدی برای سلامت و پایداری آبخیز محسوب می‌شوند. W1 و W2 منابع آبی را تحت فشار قرار داده و ظرفیت ذخیره سازی را کاهش می‌دهند. ساخت و سازهای

تنش‌های آبی و تضعیف اکوسیستم می‌شود. T3، فشار زیادی به منابع طبیعی وارد کرده و موجب تخریب جنگل‌ها و مراتع می‌شود. T4، که ناشی از پمپاژ و افزایش تقاضای آب خارج از حوضه است، تهدیدی جدی برای تأمین آب شرب و کشاورزی محسوب می‌شود. T5، به‌ویژه در اثر توسعه راه‌ها و فعالیت‌های عمرانی، می‌تواند به تخریب زیستگاه‌ها و آسیب به زیرساخت‌ها منجر شود. T6، به‌ویژه در پی تغییرات اقلیمی، موجب تغییر الگوی جریان آب و کاهش ذخایر آبی می‌شود. T7، بر سلامت اکوسیستم تأثیر منفی گذاشته و به فرسایش خاک و کاهش تنوع زیستی منتهی می‌شود. این تهدیدها نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و مدیریت بهینه منابع طبیعی برای کاهش اثرات منفی آن‌ها هستند.

تعیین راهبردها با استفاده از مدل تحلیلی SWOT

بعد از شناسایی و تحلیل عوامل داخلی و خارجی به منظور ارائه برنامه‌های مدیریتی مناسب برای بهبود وضعیت سلامت حوزه آبخیز سد ایلام راهبردهایی مشخص شدند. بر اساس تحلیل SWOT، راهبردهای مناسب برای تقویت نقاط قوت، کاهش نقاط ضعف، بهره‌برداری از فرصت‌ها و مقابله با تهدیدها به شرح زیر در جدول‌های ۷ تا ۱۰ به ترتیب راهبردهای مربوط به SO، ST، WO و WT ارائه شده است.

فرسایش آبی بالا (W5)، همراه با شیب زیاد و سیل‌خیزی بالا (W6)، فرایندهای تخریبی را تشدید کرده و اجرای پروژه‌های آبخیزداری را دشوار می‌سازد. علاوه بر این، W7، چالش‌هایی در جلب مشارکت مردمی برای حفاظت از منابع ایجاد می‌کند. این ضعف‌ها ضرورت تدوین و اجرای راهبردهای مدیریتی جامع را دوچندان می‌سازند.

عوامل فرصت نقش کلیدی در بهبود و پایداری سلامت آبخیز ایفا می‌کنند. O1، بستر مناسبی برای ارائه راهکارهای نوآورانه فراهم می‌کنند. O2، از طریق کاهش فرسایش و تقویت پوشش گیاهی، به تثبیت خاک و حفظ منابع آب کمک می‌کند. O3، چارچوبی حقوقی برای حفاظت از منابع طبیعی فراهم کرده و اجرای سیاست‌های زیست‌محیطی را تسهیل می‌کند. O4 فرصت هم‌افزایی و بهره‌گیری از تجربیات بین‌المللی را ایجاد می‌کند. O5، انگیزه مسئولان را برای اجرای برنامه‌های حفاظتی افزایش می‌دهد. O6، می‌تواند منجر به مدیریت جامع‌تر و پایدارتر منابع طبیعی شود. O7، نیز با کاهش فشار بر منابع زیستی، سلامت اکوسیستم را تقویت می‌کند. این فرصت‌ها، با برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح، می‌توانند تغییرات مثبت قابل‌توجهی در سلامت آبخیز ایجاد کنند.

عوامل تهدید می‌توانند آسیب‌های جدی به سلامت آبخیز وارد کنند و پایداری آن را به خطر بیندازند. T1، نه تنها به سلامت آبخیز نشینان آسیب می‌زند بلکه به کاهش پوشش گیاهی و افت تولیدات کشاورزی می‌انجامد. T2، منجر به کاهش منابع آبی، افزایش

جدول ۵- ماتریس ارزیابی فرصت‌ها در حوزه آبخیز سد ایلام با استفاده از روش نظرسنجی و تحلیل AHP

Table 5- Evaluation Matrix of Opportunities in the Ilam Dam Watershed Using the Survey Method and AHP Analysis

کد Code	فرصت‌ها Opportunities	وزن Weight	امتیاز Score	امتیاز وزنی Weighted score
O ₁	وجود مراکز دانشگاهی و تحقیقاتی و روند افزایشی دستاوردهای علمی و پژوهشی در زمینه مدیریت منابع طبیعی و منابع آب The presence of academic and research centers and the increasing trend of scientific and research achievements in natural resource and water resource management	0.037	2	0.074
O ₂	توسعه فعالیت‌های حفظ مراتع و جنگل‌ها جهت کاهش فرسایش Development of rangeland and forest conservation activities to reduce erosion	0.401	4	1.604
O ₃	بیانیه‌ها و قوانین بین‌المللی و مصوبات داخلی در مورد منابع طبیعی و محیط‌زیست International declarations and domestic regulations on natural resources and the environment	0.072	2	0.144
O ₄	توجه جامعه جهانی به مدیریت یکپارچه حوزه‌های آبخیز در سالهای اخیر Global attention to integrated watershed management in recent years	0.047	2	0.094
O ₅	توجه مسئولان به اهمیت راهبردی آبخیز به دلیل تأمین آب شرب Authorities' recognition of the strategic importance of the watershed due to its role in drinking water supply	0.119	4	0.476
O ₆	بهره‌گیری از رویکردهای نوین، دانش بومی و NGOها در مدیریت منابع طبیعی Utilization of modern approaches, indigenous knowledge, and NGOs in natural resource management	0.183	4	0.732
O ₇	توسعه طرح تغییر تأمین سوخت Development of fuel supply change initiatives	0.141	3	0.423
	جمع کل Total	1	-	3.54

جدول ۶- ماتریس ارزیابی تهدیدها در حوزه آبخیز سد ایلام با استفاده از روش نظرسنجی و تحلیل AHP

Table 6- Matrix for Evaluating Threats in the Ilam Dam Watershed Using the Survey Method and AHP Analysis

کد Code	تهدیدها Threats	وزن Weight	امتیاز Score	امتیاز وزنی Weighted score
T ₁	هجوم ذرات گرد و غبار و تبعات منفی آن بر سلامت آبخیزنشینان، آفت‌زدگی و خشکیدگی درختان و کاهش تولید محصولات کشاورزی The influx of dust particles and their negative consequences on the health of watershed inhabitants, pest infestation, tree dieback, and reduced agricultural production	0.126	3	0.378
T ₂	خشکسالی‌های پی‌درپی در سال‌های اخیر Consecutive droughts in recent years	0.328	4	1.308
T ₃	تقاضا برای واگذاری و تغییر کاربری اراضی حوزه برای احداث خانه باغ برای خوشنشینان (سرمایه‌داران) Demand for land allocation and land-use change within the watershed for the construction of villa gardens by affluent individuals (investors)	0.105	2	0.21
T ₄	افت سطح آب رودخانه و سد به دلیل پمپاژ و افزایش تقاضای آب خارج از حوزه Decline in river and dam water levels due to pumping and increased water demand outside the watershed	0.081	2	0.162
T ₅	تشدید زمین‌لغزش و حرکت‌های توده‌ای به دلیل توسعه راه‌ها و فعالیت‌های عمرانی Intensification of landslides and mass movements caused by road development and construction activities	0.044	2	0.088
T ₆	افزایش خط ارتفاعی برف و تغییر رژیم آبی رودخانه Rise in the snowline elevation and changes in the river hydrological regime	0.128	3	0.384
T ₇	کاهش بیوماس و پوشش گیاهی به دلیل افزایش احتمال آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع Reduction in biomass and vegetation cover due to the increased risk of forest and rangeland fires	0.188	4	0.752
	جمع کل Total	1	-	3.28

جدول ۷- راهبرد تهاجمی (SO)

Table 7- Offensive strategy (SO)

کد Code	راهبرد Strategy	براساس نقاط قوت و فرصت‌ها Based on strengths and opportunities
SO1	توسعه زیرساخت‌های گردشگری پایدار با تمرکز بر حفاظت از منابع طبیعی و همکاری با سازمان‌های محیط‌زیستی و استفاده از تجربیات بین‌المللی در این زمینه (انسجام برون سازمانی) Development of sustainable tourism infrastructure with a focus on protecting natural resources, collaborating with environmental organizations, and leveraging international experience in this field (inter-organizational cohesion)	S1, S2, S4, S5, O4, O5
SO2	مدیریت مطلوب آب‌های سطحی و زیرزمینی و ایجاد زیرساخت‌های مناسب برای مهار و ذخیره آب (حکمرانی صحیح آب) Effective management of surface and groundwater resources and establishing suitable infrastructure for water harvesting and storage (proper water governance)	S1, S3, S4, O2, O5, O6
SO3	ایجاد ساز و کار مشترک بین شورا، دهیاری‌ها و آبخیزنشینان، با دستگاه‌های اجرایی در انجام طرح‌ها (انسجام درون حوضه‌ای) Establishing a joint mechanism between councils, rural management offices, and watershed inhabitants in collaboration with executive agencies for project implementation (intra-watershed cohesion)	S5, S6, S7, O2, O3, O4, O5, O6, O7
SO4	استفاده از جمعیت فعال اقتصادی، نهادها و بخش‌های مختلف به‌منظور توسعه واحدهای تولید گیاهان دارویی - توسعه زنبورداری، صنایع دستی و صنعت بوم‌گردی (انسجام درون حوضه‌ای) Utilizing the active economic population, institutions, and various sectors to develop medicinal plant production units, expand beekeeping, handicrafts, and eco-tourism industries (intra-watershed cohesion)	S5, S6, O6

نتایج حاصل از جدول‌های ۳ تا ۶ نشان می‌دهد که در گروه نقاط قوت، گویه وجود و تنوع پوشش گیاهی مناسب به‌خصوص درختان (S2) با امتیاز وزنی ۱/۳۲ به‌عنوان مهم‌ترین نقطه قوت، در گروه ضعیف‌ها، گویه آگاهی اندک جامعه محلی از اهمیت مسائل محیط زیستی و منابع طبیعی (W7) با امتیاز وزنی ۱/۳۶ به‌عنوان مهم‌ترین

نقطه ضعف حوضه، در گروه فرصت‌ها، گویه توسعه فعالیت‌های حفظ مراتع و جنگل‌ها جهت کاهش فرسایش (O2) با امتیاز وزنی ۱/۶۱ به‌عنوان مهم‌ترین فرصت و گویه T2 یعنی خشک‌سالی‌های پی‌درپی در سال‌های اخیر با امتیاز وزنی ۱/۳۰۸ به‌عنوان مهم‌ترین تهدید بر حوزه آبخیز شناسایی شدند.

جدول ۸- استراتژی رقابتی (ST)
Table 8- Competitive strategy (ST)

کد Code	راهبرد Strategy	براساس نقاط قوت و تهدیدها Based on strengths and threats
ST1	جلب مشارکت‌های آبخیزنشینان در ترویج، حفاظت و بهره‌مندی پایدار از منابع طبیعی و قراردادن حوضه در اولویت طرح‌های مدیریت جامع آبخیز Engaging watershed residents in promoting, protecting, and sustainably utilizing natural resources, and prioritizing the watershed in comprehensive watershed management plans	S6, S7, T2, T3, T7
ST2	تدوین و اجرای برنامه‌های مدیریت پایدار منابع آب و بهره برداری بهینه و ساماندهی مطلوب منابع آبی Developing and implementing sustainable water resource management programs to ensure optimal utilization and effective organization of water resources	S1, S3, S4, T2, T4, T6
ST3	تقویت سامانه‌های پیشگیری و کنترل آفات از طریق آموزش کشاورزان، استفاده از روش‌های بیولوژیک و طبیعی برای مبارزه با آفات، و ارتقاء سامانه‌های پیشگیری از آفات و آتشسوزی Strengthening pest prevention and control systems through farmer education, using biological and natural methods for pest control, and enhancing systems for pest and fire prevention	S2, S3, T1, T7
ST4	استفاده از ظرفیت بالای سازمانی و بومی منطقه برای مقابله با تبعات منفی تغییر اقلیم و جلب مشارکت پایدار ذینفعان و جوامع محلی در تصمیم‌گیری‌ها و حفاظت و بهره برداری بهینه از منابع آبخیز Leveraging the region's significant organizational and local capacities to address the adverse impacts of climate change, while ensuring the sustainable participation of stakeholders and local communities in decision-making, conservation, and the optimal use of watershed resources	S5, S6, S7, T2, T4, T6, T7

جدول ۹- راهبرد محافظه‌کارانه (WO)
Table 9- Conservative strategy (WO)

کد Code	راهبرد Strategy	براساس نقاط ضعف و فرصت‌ها Based on weaknesses and opportunities
WO1	برگزاری برنامه‌های مشترک آموزشی - ترویجی بین مسئولین و آبخیزنشینان به منظور افزایش سطح آگاهی و مدیریت مشارکتی (تقویت انسجام برون سازمانی) Organizing joint educational-promotional programs between officials and watershed residents to raise awareness and foster participatory management (enhancing inter-organizational cohesion)	W3, W7, O3, O4, O6
WO2	تقویت برنامه‌های حفاظت خاک و آب و توسعه برنامه‌های تحقیقاتی و مدیریتی (تشویق، حمایت و مشارکت‌های مادی و معنوی) جهت انجام مطالعات تخصصی Strengthening soil and water conservation programs and expanding research and management initiatives (encouraging, supporting, and facilitating financial and non-financial participation) to conduct specialized studies	W2, W5, W6, O1, O2, O5, O6
WO3	استفاده از رویکردهای نوین، آموزش و ترویج فرهنگ منابع طبیعی و محیط‌زیست، افزایش روند و استفاده از دستاوردهای علمی و پژوهشی در زمینه مدیریت حوزه آبخیز Utilizing modern approaches, promoting education and a culture of natural resource and environmental stewardship, and enhancing the application and adoption of scientific and research findings in watershed management	W4, W7, O1, O5, O6, O7
WO4	ارتقا حفظ و مدیریت مراتع و جنگل‌ها و تصویب و اجرا قوانین سختگیرانه جهت جلوگیری از تغییرات کاربری نامناسب در حوضه Improving the conservation and management of rangelands and forests, and enacting and enforcing strict regulations to prevent inappropriate land-use changes within the watershed	W2, W3, O2, O3, O6

بر روی محور افقی و عمودی نمودار منتقل و محل تلاقی آنها تعیین می‌شود. باتوجه به نتایج در شکل ۲، موقعیت قرارگیری وضعیت فعلی راهبردهای مورد ارزیابی به منظور بهبود وضعیت سلامت در حوزه آبخیز سد ایلام را آورده شده است. براساس شکل ۲، موقعیت

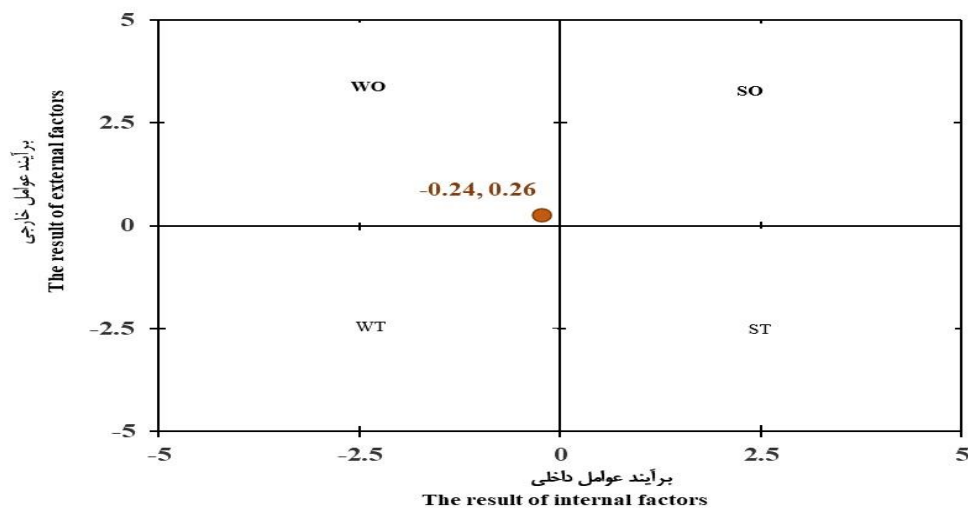
در ادامه جهت ارزشیابی عوامل درونی و بیرونی نمودار موقعیت راهبردی آبخیز ترسیم شد. بدین‌منظور ابتدا یک علامت منفی برای امتیاز کلی عوامل مخرب (نقاط ضعف و تهدیدها) در نظر گرفته می‌شود. سپس برآیند امتیاز وزنی عوامل داخلی و خارجی را به‌ترتیب

اولویت‌بندی راهبردهای مشخص شده با استفاده از ماتریس برنامه‌ریزی راهبردی کمی (QSPM) نتایج ماتریس کمی QSPM برای چهار راهبرد WO، ST، SO و WT به ترتیب در جدول‌های ۱۱ تا ۱۴ ارائه شده است. جذابیت هر راهبرد، توان و قابلیت آن راهبرد در برخورد مناسب با عوامل داخلی و خارجی را نشان می‌دهد.

راهبردی نشان می‌دهد که نقاط ضعف و فرصت‌ها در برتری قرار دارند. به عبارت دیگر، راهبردهای محافظه‌کارانه یا انطباقی (WO) در نظر گرفته شده‌اند تا با بهره‌گیری از فرصت‌های خارجی به رفع نقاط ضعف و دستیابی به اهداف تعیین شده کمک کنند.

جدول ۱۰- راهبرد تدافعی (WT)
Table 10- Defensive strategy (WT)

کد Code	راهبرد Strategy	براساس نقاط ضعف و تهدیدها Based on weaknesses and threats
WT1	توسعه و تنوع‌بخشی برنامه‌های آموزشی و نیز تدوین محتوای آموزشی در رابطه با بحران آب و تغییر اقلیم و پیامدهای تخریب منابع طبیعی در حوضه، و برنامه‌ریزی و تصویب طرح‌های ملی و فراملی در زمینه تغییر اقلیم و مبارزه با ریزگردها Expanding and diversifying educational programs and developing educational content related to the water crisis, climate change, and the consequences of natural resource degradation in the watershed, as well as planning and approving national and transnational initiatives on climate change and combating dust storms	W1, W3, W4, W7, T1, T2, T3, T4, T7
WT2	وضع قوانین و اصلاحات در نحوه جلوگیری از کشاورزی در عرصه‌های جنگلی و نظارت بر تغییر کاربری اراضی و ساخت و سازهای غیراصولی در حاشیه رودخانه‌ها Enacting laws and reforms to prevent agricultural activities in forested areas and monitoring land-use changes and unregulated construction along riverbanks	W3, T3, T6, T7
WT3	طراحی، توسعه و راهاندازی سامانه‌های هشدار سیل، خشکسالی، آتشسوزی و ... به منظور مدیریت و جلوگیری از تخریب منابع طبیعی Designing, developing, and deploying flood, drought, wildfire, and other warning systems to manage and prevent the degradation of natural resources	W4, T2, T7
WT4	حفاظت از اراضی، حفظ و احیاء پوشش گیاهی و تقویت و اجرای اقدامات آبخیزداری جهت کاهش و کنترل فرسایش Protecting lands, preserving and restoring vegetation cover, and strengthening and implementing watershed management measures to reduce and control erosion	W2, W3, W5, W6, T1, T3, T5, T7



شکل ۲- تعیین راهبردهای بهبود وضعیت سلامت آبخیز سد ایلام در ماتریس SWOT

Figure 2- Determining the strategies to improve the health status of the Ilam Dam watershed in the SWOT matrix

جدول ۱۱- ماتریس کمی QSPM برای راهبردهای SO
Table 11- QSPM quantitative matrix for SO strategies

عامل Agent	وزن Weight	SO							
		SO1	SO2		SO3		SO4		
		جذابیت Attractiveness	جذابیت کلی Overall attractiveness	جذابیت Attractiveness	جذابیت کلی Overall attractiveness	جذابیت Attractiveness	جذابیت کلی Overall attractiveness	جذابیت Attractiveness	جذابیت کلی Overall attractiveness
S1	0.741	2	1.48	3	2.22	-	-	-	-
S2	1.32	2	2.64	2	2.64	2	2.64	2	2.64
S3	0.459	-	-	3	1.37	-	-	1	0.459
S4	0.552	-	-	3	1.65	-	-	2	1.1
S5	0.064	3	0.192	2	0.128	1	0.064	3	0.192
S6	0.1	2	0.2	-	-	2	0.2	3	0.3
S7	0.094	2	0.188	2	0.188	3	0.282	2	0.188
O1	0.074	1	0.074	2	0.148	1	0.074	-	-
O2	1.60	1	1.60	2	3.2	2	3.2	-	-
O3	0.144	2	0.288	-	-	1	0.144	-	-
O4	0.094	2	0.188	2	0.188	1	0.094	-	-
O5	0.476	2	0.952	3	1.42	2	0.952	-	-
O6	0.732	-	-	-	-	1	0.732	3	2.19
O7	0.423	-	-	-	-	2	0.846	-	-
جمع Sum		-	6.94	-	13.15	-	9.22	-	7.06
رتبه جذابیت Attractiveness rating		4			1		2		3

جدول ۱۲- ماتریس کمی QSPM برای راهبردهای ST
Table 12- QSPM quantitative matrix for ST strategies

عامل Agent	وزن Weight	ST							
		ST1	ST2		ST3		ST4		
		جذابیت Attractiveness	جذابیت کلی Overall attractiveness	جذابیت Attractiveness	جذابیت کلی Overall attractiveness	جذابیت Attractiveness	جذابیت کلی Overall attractiveness	جذابیت Attractiveness	جذابیت کلی Overall attractiveness
S1	0.741	-	-	3	2.22	-	-	1	0.741
S2	1.32	1	1.32	-	-	3	3.96	1	1.32
S3	0.459	-	-	2	0.918	-	-	-	-
S4	0.552	1	0.552	2	1.1	-	-	1	0.552
S5	0.064	-	-	-	-	-	-	-	-
S6	0.1	2	0.2	-	-	-	-	2	0.2
S7	0.094	3	0.282	-	-	-	-	3	0.282
T1	0.378	-	-	-	-	3	1.13	-	-
T2	1.31	2	2.62	2	2.62	-	-	3	3.93
T3	0.21	1	0.21	-	-	-	-	1	0.21
T4	0.162	-	-	3	0.486	-	-	1	0.162
T5	0.088	-	-	-	-	-	-	-	-
T6	0.384	-	-	1	0.384	-	-	1	0.384
T7	0.752	2	1.5	-	-	3	2.25	1	0.752
جمع Sum		-	6.68	-	7.72	-	7.34	-	8.53
رتبه جذابیت Attractiveness rating		4		3		2		1	

عنوان اولویت اول مشخص شده است که بر مدیریت مطلوب آب‌های سطحی و زیرزمینی و ایجاد زیرساخت‌های مناسب برای مهار و ذخیره آب تأکید دارد. این راهبرد با استفاده بهینه از منابع آب و کاهش

نتایج حاصل از تحلیل جدول‌های ۱۱ تا ۱۴ نشان می‌دهد که در راستای بهبود وضعیت حوزه آبخیز سد ایلام، راهبردهای مختلفی باید اتخاذ شود. در راهبرد SO (نقاط قوت و فرصت‌ها)، راهبرد SO2 به

هدررفت آن‌ها، می‌تواند به پایداری منابع آبی منطقه کمک کند. در معرفی شده است. راهبرد ST (نقاط قوت و تهدیدها)، راهبرد ST4 به‌عنوان اولویت اول

جدول ۱۳- ماتریس کمی QSPM برای راهبردهای WO
Table 13- QSPM quantitative matrix for WO strategies

عامل Agent	وزن Weight	WO							
		WO1		WO2		WO3		WO4	
		جذابیت Attractiveness	جذابیت کلی Overall attractiveness	جذابیت Attractiveness	جذابیت کلی Overall attractiveness	جذابیت Attractiveness	جذابیت کلی Overall attractiveness	جذابیت Attractiveness	جذابیت کلی Overall attractiveness
W1	0.11	-	-	-	-	-	-	-	-
W2	0.084	-	-	3	0.252	-	-	3	0.252
W3	0.84	3	0.25	1	0.84	-	-	3	0.25
W4	0.82	1	0.82	-	-	2	1.64	-	-
W5	0.234	-	-	3	0.7	-	-	1	0.234
W6	0.124	-	-	2	0.248	-	-	-	-
W7	1.36	3	4.08	-	-	3	4.08	-	-
O1	0.074	1	0.074	2	0.074	3	0.222	-	-
O2	1.60	-	-	3	4.8	-	-	3	4.8
O3	0.144	2	0.288	-	-	-	-	3	0.432
O4	0.094	-	-	-	-	-	-	-	-
O5	0.476	-	-	2	0.952	1	0.476	-	-
O6	0.732	1	0.732	2	1.46	3	2.19	1	0.732
O7	0.423	-	-	-	-	1	0.423	-	-
جمع Sum		-	6.24	-	9.32	-	9.03	-	6.7
رتبه جذابیت Attractiveness rating		4		1		2		3	

جدول ۱۴- ماتریس کمی QSPM برای راهبردهای WT
Table 14- QSPM quantitative matrix for WT strategies

عامل Agent	وزن weight	WT							
		WT1		WT2		WT3		WT4	
		جذابیت Attractiveness	جذابیت کلی Overall attractiveness	جذابیت Attractiveness	جذابیت کلی Overall attractiveness	جذابیت Attractiveness	جذابیت کلی Overall attractiveness	جذابیت Attractiveness	جذابیت کلی Overall attractiveness
W1	0.11	1	0.11	-	-	-	-	-	-
W2	0.084	-	-	-	-	-	-	3	0.25
W3	0.84	2	1.68	3	2.52	-	-	2	1.68
W4	0.82	1	0.82	-	-	2	1.64	-	-
W5	0.234	-	-	-	-	-	-	2	0.468
W6	0.124	-	-	-	-	1	0.124	2	0.248
W7	1.36	2	2.72	-	-	-	-	-	-
T1	0.378	2	0.756	-	-	1	0.378	2	0.756
T2	1.31	2	2.62	-	-	3	3.93	-	-
T3	0.21	2	0.42	3	0.63	-	-	1	0.21
T4	0.162	1	0.162	-	-	-	-	-	-
T5	0.088	-	-	-	-	-	-	3	0.264
T6	0.384	-	-	1	0.384	-	-	-	-
T7	0.752	2	1.5	2	1.5	3	2.25	2	1.5
جمع Sum		-	10.78	-	5.03	-	8.32	-	5.37
رتبه جذابیت Attractiveness rating		1		4		2		3	

این راهبرد بر استفاده از ظرفیت بالای سازمانی و بومی منطقه برای مقابله با تبعات منفی تغییر اقلیم و جلب مشارکت پایدار ذینفعان

راهبردهایی برای بهبود استفاده از آن‌ها پردازند. از طرف دیگر، شناسایی فرصت‌ها و تهدیدات خارجی مثل تغییرات اقلیمی یا تغییرات سیاست‌های ملی در حوزه آبخیز، به مدیران این امکان را می‌دهد که استراتژی‌هایی را برای مقابله با این تهدیدات طراحی کنند و از فرصت‌های موجود به بهترین نحو بهره‌مند شوند. با استفاده از این تحلیل، مدیران می‌توانند راهبردهایی را تدوین کنند که با بهره‌گیری از قوت‌ها، مقابله با ضعف‌ها، بهره‌گیری از فرصت‌ها و مقابله با تهدیدات بهینه‌سازی شده‌اند، به‌طوری که مدیریت منابع موجود در آبخیز از جمله آب و خاک و حفظ بهره‌وری و پایداری در حوزه آبخیز تقویت شود.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف شناسایی و اولویت‌بندی راهبردهای مناسب برای بهبود سلامت حوزه آبخیز سد ایلام، از مدل راهبردی SWOT برای ارزیابی نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدها بهره گرفته است. علاوه‌براین، با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و نرم‌افزار Expert Choice، وزن‌دهی دقیق‌تری به عوامل داخلی و خارجی اختصاص داده شد. در نهایت، با استفاده از ماتریس QSPM، امتیاز جذابیت و اولویت‌بندی راهبردها تعیین شد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که حوزه آبخیز سد ایلام دارای نقاط قوت قابل توجهی است، اما نقاط ضعف و تهدیدهای موجود نیز نباید نادیده گرفته شوند. امتیاز بالاتر نقاط ضعف نسبت به نقاط قوت و امتیاز بالاتر فرصت‌ها نسبت به تهدیدها، نشان‌دهنده نیاز به اتخاذ راهبردهای مناسب برای بهره‌برداری از فرصت‌ها و کاهش نقاط ضعف است. در این راستا، راهبرد استفاده از فرصت‌ها برای غلبه بر نقاط ضعف به‌عنوان راهبرد پیشنهادی انتخاب شد. این راهبرد شامل اقداماتی نظیر برگزاری برنامه‌های آموزشی برای افزایش آگاهی جامعه محلی، تقویت برنامه‌های حفاظت از خاک و آب، حمایت از تحقیقات محلی، استفاده از رویکردهای نوین و ترویج فرهنگ محیط‌زیست و حفظ و مدیریت جنگل‌ها و مراتع از طریق جلوگیری از تغییرات کاربری نامناسب است. اجرای این راهبردها می‌تواند به افزایش پایداری و بهبود کیفیت منابع آبخیز، کاهش نقاط ضعف، بهره‌برداری بهینه از فرصت‌ها و در نهایت ارتقای شرایط محیط‌زیستی و اقتصادی منطقه کمک کند. در نهایت، اجرای موفق این راهبردها می‌تواند الگویی برای سایر حوزه‌های آبخیز در کشور باشد و به توسعه پایدار در سطح ملی کمک نماید.

و جوامع محلی در تصمیم‌گیری‌ها و حفاظت و بهره‌برداری بهینه از منابع آبخیز تمرکز دارد. این مشارکت می‌تواند منجر به تقویت همبستگی اجتماعی و افزایش کارایی برنامه‌های مدیریتی شود. در راهبرد WO (نقاط ضعف و فرصت‌ها)، راهبرد WO2 به‌عنوان اولویت اول شناخته شده است. این راهبرد بر تقویت برنامه‌های حفاظت خاک و آب و توسعه برنامه‌های تحقیقاتی و مدیریتی با تأکید بر تشویق، حمایت و مشارکت‌های مادی و معنوی جهت انجام مطالعات تخصصی تأکید دارد. این رویکرد می‌تواند به بهبود اطلاعات و دانش فنی در زمینه مدیریت منابع طبیعی کمک کند. در نهایت، در راهبرد WT (نقاط ضعف و تهدیدها)، راهبرد WT1 به‌عنوان اولویت اول مشخص شده است. این راهبرد بر توسعه و تنوع‌بخشی برنامه‌های آموزشی و تدوین محتوای آموزشی در رابطه با بحران آب و تغییر اقلیم و پیامدهای تخریب منابع طبیعی در حوضه تمرکز دارد. همچنین، برنامه‌ریزی و تصویب طرح‌های ملی و فراملی در زمینه تغییر اقلیم و مبارزه با ریزگردها نیز در این راهبرد مورد تأکید قرار گرفته است. این راهبردها از طریق ارتقای مدیریت یکپارچه منابع آبی، کاهش اثرات مخرب تغییرات اقلیمی، تقویت حفاظت از خاک و آب، و افزایش آگاهی و مشارکت جامعه محلی، به بهبود کیفیت منابع آب، کاهش فرسایش خاک، افزایش پوشش گیاهی و ارتقای پایداری و بهبود سلامت آبخیز کمک می‌کنند. نتایج پژوهش متقیان و همکاران (Motaghian et al., 2024) با عنوان ارائه بهترین برنامه مدیریتی جهت مدیریت جامع حوضه آبریز دوابی استان تهران با استفاده از ماتریس SWOT و QSPM بیانگر غلبه قوت‌ها بر ضعف‌ها و همچنین فرصت‌ها بر تهدیدها بود. توکلی و همکاران (Tavakoli et al., 2021) در تهیه سند راهبردی مدیریت جامع حوزه آبخیز میمه در استان ایلام با استفاده از مدل SWOT و QSPM، وجود رودخانه‌های دائمی را نقطه قوت، نداشتن الگوی کاشت و آمایش در مقیاس‌های کاربردی را نقطه ضعف، مشارکت دادن جامعه محلی در اجرای پروژه‌های منابع طبیعی را فرصت و پیامدهای منفی تغییر اقلیم را جزو تهدیدها ارزیابی نموده و معتقدند برنامه‌ریزی‌های آینده‌نگر منطقه بایستی فرصت‌های منطقه را در راستای توسعه قوت‌ها و غلبه بر ضعف‌ها، همواره مد نظر قرار دهند. استفاده از روش SWOT در مدیریت حوزه آبخیز به‌طور قابل توجهی می‌تواند به تحقق اهداف مؤثری در بهبود کیفیت منابع آب، کاهش خطرات زیست‌محیطی، و افزایش پایداری بوم‌سازگان‌ها کمک کند. این روش با شناسایی نقاط قوت و ضعف داخلی حوزه آبخیز، به مدیران امکان می‌دهد تا به بهترین شکل از منابع و توانمندی‌های خود استفاده کنند و به طراحی

References

- Alimoradi, M., Talebi, A., & Karimi, H. (2022). Analysis of factors affecting watershed management and providing

- appropriate management strategy using SWOT model (Doeiraj River watershed area). *Extension and Development of Watershed Management*, 9(35), 1-10. (In Persian with English abstract). https://www.wmji.ir/article_254169.html?lang=en
2. Aspiany, A., Anggoro, S., & Gunawan, B.I. (2019). Strategies for sustainable ecotourism development in the marine waters of Bontang City, Indonesia. *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation*, 12(5), 1779-1787.
 3. Bahremand, A., Onagh, M., & Komaki, C.B. (2018). Impacts of land use changes scenarios on water balance components using WetSpa model (Case study: Ziarat Watershed of Golestan Province). *Journal of Watershed Management Research*, 9(17), 168-181. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.29252/jwmr.9.17.168>
 4. Cabello, V., Willaarts, B. A., Aguilar, M., & del Moral Ituarte, L. (2015). River basins as social-ecological systems: Linking levels of societal and ecosystem water metabolism in a semiarid watershed. *Ecology and Society*, 20(3). <https://doi.org/10.5751/ES-07778-200320>
 5. Dehghan Chenari, M., Barzegari Banadkooki, F., & Saremi Naeini, M.A. (2022). Investigating effects of water transfer project from Oman or (Persian Gulf) to desert ecosystem of Yazd province using SWOT analysis. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 16(58), 1-12. (In Persian with English abstract).
 6. Einloo, F., Ekhtesasi, M.R., Ghorbani, M., & Abdinejad, P. (2022). Determining the most appropriate management strategies for balancing the Abhar Plain Aquifer using the SWOT analytical model. *Journal of Watershed Management Research*, 13(25), 179-187. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.52547/jwmr.13.25.179>
 7. Environment Protection Agency. (2011). ealthy Watersheds Initiative, National Framework and Action Plan. EPA 841-R -11-005. <https://www.asdwa.org/2011/10/07/epa-releases-its-2011-healthy-watersheds-framework-and-action-plan/>
 8. Ervinia, A., Huang, J., Huang, Y., & Lin, J. (2019). Coupled effects of climate variability and land use pattern on surface water quality: An elasticity perspective and watershed health indicators. *Science of The Total Environment*, 693, 133592. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133592>
 9. Gari, S.R., Guerrero, C.E.O., Bryann, A., Icely, J.D., & Newton, A. (2018). A DPSIR-analysis of water uses and related water quality issues in the Colombian Alto and Medio Dagua Community Council. *Water Science*, 32(2), 318-337. <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2018.06.001>
 10. Gliem, J.A., & Gliem, R.R. (2003). Calculating, interpreting, and reporting Cronbach's alpha reliability coefficient for Likert-type scales. In *Midwest research-to-practice conference in adult, continuing, and community education* (Vol. 1, pp. 82-87). <https://hdl.handle.net/1805/344>
 11. Hamel, P., Riveros-Iregui, D., Ballari, D., Browning, T., Céleri, R., Chandler, D., Chun, K.P., Destouni, G., Jacobs, S., Jasechko, S., Johnson, M., Krishnaswamy, J., Poca, M., Pompeu, P.V., & Rocha, H. (2018). Watershed services in the humid tropics: opportunities from recent advances in ecohydrology. *Ecohydrology*, 11(3), 1e42. <https://doi.org/10.1002/eco.1921>
 12. Hazbavi, Z., Baartman, J. E., Nunes, J.P., Keesstra, S.D., & Sadeghi, S.H. (2018a). Changeability of reliability, resilience and vulnerability indicators with respect to drought patterns. *Ecological Indicators*, 87, 196-208. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.054>
 13. Hazbavi, Z., Keesstra, S.D., Nunes, J.P., Baartman, J.E., Gholamalifard, M., & Sadeghi, S.H. (2018b). Health comparative comprehensive assessment of watersheds with different climates. *Ecological Indicators*, 93, 781-790. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.078>
 14. Hazbavi, Z., Parchami, N., Alaei, N., & Babaei, L. (2020). Assessment and analysis of the Koozeh Topraghi watershed health status, Ardabil province, Iran. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 9(3), 121-142. (In Persian with English abstract). <https://sanad.iau.ir/en/Article/829138>
 15. Hazbavi, Z., Sadeghi, S.H.R., & Gholamalifard, M. (2019). Comparative analysis of variability of health assessment indicators of pressure, state, and response in Shazand watershed. In *13th National Conference on Watershed Management Science and Engineering of Iran and 3rd National Conference on Conservation of Natural Resources and Environment October 4 and 5, 2016, Mohaghegh Ardabili University*. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.52547/jwmr.12.24.1>
 16. Hazbavi, Z., Sadeghi, S.H., & Gholamalifard, M. (2018c). Land cover-based watershed health assessment. *AGROFOR International Journal*, 3, 47-55. <http://doi.org/10.7251/AGRENG1803047H>
 17. Jafari, M., Ekhtesasi, M.R., & Fatahi Ardakani, A. (2021). Evaluation of factors affecting the performance and economic productivity of watershed management projects using SWOT model. *Watershed Engineering and Management*, 13(2), 328-338. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.52547/jwmr.11.22.132>
 18. Kallioras, A., Pliakas, F., Diamantis, I., & Kallergis, G. (2010). SWOT analysis in groundwater resources management of coastal aquifers: a case study from Greece. *Water International*, 35(4), 425-441. <https://doi.org/10.1080/02508060.2010.508929>
 19. Molaei Hashjin, N., & Zahedi Dafchahi, K. (2010). Planning integrated rural development using SWOT analysis model in Khomam district, Rasht. *Rural Research Quarterly*, 1(22), 133-154. (In Persian). <https://www.magiran.com/p902006>
 20. Mosaffaie, J., Jam, A.S., Tabatabaei, M.R., & Kousari, M.R. (2021). Trend assessment of the watershed health based

- on DPSIR framework. *Land Use Policy*, 100, 104911. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104911>
21. Motaghian, M., Ghazavi, R., & Alavinia, S.H. (2024). Presenting the best management plan for the comprehensive management of Doabi watershed in Tehran province using SWOT and QSPM matrix. *Hydrogeomorphology*, 11(38), 140-123.
22. Nasiri Khiavi, A.N., Tavoosi, M., Khodamoradi, H., & Kuriqi, A. (2024). Integration of watershed eco-physical health through algorithmic game theory and supervised machine learning. *Groundwater for Sustainable Development*, 101216. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101216>
23. Petousi, I., Fountoulakis, M., Papadaki, A., Sabathianakis, I., Daskalakis, G., Nikolaidis, N., & Manios, T. (2017). Assessment of water management measures through SWOT analysis: the case of Crete Island, Greece. *International Journal of Education and Learning Systems*, 2, 59-62. [https://www.iaras.org/iaras/filedownloads/ijes/2017/008-0010\(2017\).pdf](https://www.iaras.org/iaras/filedownloads/ijes/2017/008-0010(2017).pdf)
24. Rahmani, B., Shams, M., & Hatamifar, S. (2010). Feasibility study on tourism development in Malayer using SWOT model. *Geography Quarterly and Environmental Studies Journal*, 1(3), 13-25. (In Persian). <file:///C:/Users/Ehsan/Downloads/6000313890302.pdf>
25. Sadeghi, S.H., Khaledi Darvishan, A., Vafakhah, M., Moradi Rekabdarkolaei, H., Nasiri Khiavi, A., Rajabi, M.R., & Zaki, S.A. (2021). Integrated and problem-based management of the watershed using strategic planning framework. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 15(52), 63-66. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.61186/jwmr.14.27.15>
26. Sadoddin, A., Sheikh, V.B., Ownegh, M., Najafi Nejad, A., & Sadeghi, H.R. (2016). Development of a national mega research project on the integrated watershed management for Iran. *Environmental Resources Research*, 4(2), 231-238.
27. Tavakoli, M., Fathizad, H., & Hamidian, M. (2021). Preparing strategic plan for integrated watershed management using SWOT and QSPM (Case study: Meymeh watershed, Ilam Province). *Journal of Watershed Management Research*, 12(24), 13-27. <https://doi.org/10.52547/jwmr.12.24.13>
28. Tsai, Y.W., Lin, J.Y., & Chen, Y.C. (2021). Establishment of the watershed health indicators and health check of reservoirs. *Ecological Indicators*, 127, 107779. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107779>

Kinetics of Zinc, Manganese and Magnesium Release from Layered Double Hydroxides (Mg-Zn-Mn-Al-LDH): Effect of Citric Acid and Tartaric Acid

Z. Movahedi Rad¹, M. Hamidpour^{2*}, A. Tajabadipour²

1- Department of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran

2- Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran

(* - Corresponding Author Email: m.hamidpour@vru.ac.ir)

Received: 24-11-2024

Revised: 17-02-2025

Accepted: 17-03-2025

Available Online: 17-03-2025

How to cite this article:

Movahedi Rad, Z., Hamidpour, M., & Tajabadipour, A. (2025). Kinetics of zinc, manganese and magnesium release from layered double hydroxides (Mg-Zn-Mn-Al-LDH): Effect of citric acid and tartaric acid. *Journal of Water and Soil*, 39(1), 73-89. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90947.1448>

Introduction

Recently, layered double hydroxides (LDHs) with a unique structure and unbeatable characteristics have been widely studied and investigated in various fields. One of these fields is the investigating the potential of these compounds to supply essential nutrients for plants. Several studies have reported the application of LDHs as fertilizers for macronutrients and micronutrients. These compounds have a very high potential as fertilizers and can increase agricultural productivity. Micronutrients such as Zn, Cu and Mn can be structurally incorporated in the metal hydroxide layer. According to recent research, LDHs have shown a suitable potential to release micronutrients. However, more studies are needed to enhance our understanding of the mechanism and reaction of layered double hydroxides in different conditions. Although various studies have explored the potential of LDHs as slow-release fertilizers, our research focuses on the role of citric acid and tartaric acid and as well as the ratio of divalent to trivalent cations on the kinetics of Zn, Mn and Mg release from Mg-Zn-Mn-Al-LDH intercalated with nitrate.

Materials and Methods

All chemicals used in this study including citric acid ($C_6H_8O_7 \cdot H_2O$), tartaric acid ($C_4H_6O_6$) KCl, Zn ($(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$), Mn($(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$) Mg($(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) and Al($(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$) were of analytical grades, purchased from Chem-Lab or Merck Chemical Corporations. Solutions were prepared using decarbonated ultrapure water (electrical resistivity = 18 MΩcm). The LDHs were synthesized by co-precipitation method at constant pH = 9.2-9.6. Two types of LDHs were synthesized by varying the $M^{+2}(Zn+Mn+Mg)/M^{+3}(Al)$ ratios of 3:1 and 4:1 in the precursor solution while stirring vigorously in a nitrogen atmosphere. The pH was kept at 9.2-9.6 by adding volumes of 3 M NaOH. The LDH crystals were allowed to ripen in the mixture for 2 hours, after which the precipitates were centrifuged at 3000 rpm for 20 min and washed several times with distilled water and placed in an oven at 70°C for 8 hours to dry.

The chemical composition of the synthesized layered double hydroxides (LDHs) was analyzed using furnace atomic absorption spectrophotometry (SavantAA, GBC) following acid digestion. The physical, chemical, and morphological characteristics of the LDHs were assessed through several techniques, including X-ray diffraction (Panalytical X Pert Pro X-ray diffractometer), field emission scanning electron microscopy (FE-SEM, Sigma VP), Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR, Nicolet iS10 spectrometer), and Brunauer-Emmett-Teller (BET, BELSORP Mini II) analysis.



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90947.1448>

A batch study was conducted to evaluate the effects of varying M^{2+}/M^{3+} ratios in LDHs and the influence of citric acid and tartaric acid on the release of Zn, Mn, and Mg from LDH (3:1) and LDH (4:1). In brief, 0.01 g of synthesized LDH was placed in a centrifuge tube and mixed with 10 ml of background electrolyte (0.01 M KCl) and 1.25 mM of citric acid or tartaric acid, maintaining an initial pH of 6–7 at a constant temperature of 25 ± 0.5 °C. Blank samples (without ligands) were also included for comparison. The suspensions were shaken for time periods ranging from 5 to 720 minutes at an agitation speed of 180 rpm. After shaking, the supernatant was separated by centrifugation at 4000 rpm for 20 minutes. The concentrations of Zn, Mn, and Mg in the supernatant solutions were determined using graphite furnace atomic absorption spectrophotometry.

To describe the time-dependent release of Zn, Mn, and Mg, several kinetic models were tested. Among the five models evaluated, the pseudo-second-order and power function models provided the best fit for the kinetic data. Additionally, the chemical species present in the initial solution and the saturation index (SI) of various minerals were predicted using the Visual MINTEQ 3.1 computer code.

Results and Discussion

The results indicated that the calculated molar ratio of divalent cations to trivalent cations closely matched the molar ratios used in the synthesis of the layered double hydroxide (LDH) samples. The X-ray diffraction (XRD) patterns for both LDH (3:1) and LDH (4:1) samples exhibited strong and sharp peaks corresponding to the 003 and 006 reflections, confirming the layered structure of the synthesized materials. Fourier-transform infrared (FT-IR) spectroscopy revealed two significant absorption bands around 3480 cm^{-1} and 1620 cm^{-1} in all synthesized LDH materials, which are indicative of stretching vibrations associated with the O-H groups in the hydroxide layers and the interlayer water molecules. Additionally, a sharp band at approximately 1382 cm^{-1} in LDH (3:1) and a band at around 1354 cm^{-1} in LDH (4:1) were attributed to the antisymmetric stretching mode of the nitrate anion present in the LDH structure. The specific surface areas of LDH (3:1) and LDH (4:1) were measured at $5.50\text{ m}^2/\text{g}$ and $16.54\text{ m}^2/\text{g}$, respectively. Correspondingly, the average pore diameters were found to be 1.92 nm for LDH (3:1) and 2.55 nm for LDH (4:1), indicating differences in porosity between the two samples. The time-dependent cumulative release of Zn, Mn, and Mg from LDH (3:1) and LDH (4:1) in the presence and absence of citric acid and tartaric acid was investigated. The release of these micronutrients was accelerated in the presence of both organic acids. The release process appeared to occur in two stages: during the initial stage (0 to 50 minutes), the release rate of Zn, Mn, and Mg was rapid, followed by a period from 50 to 720 minutes where the release rate either fixed or slightly increased.

In this research, among the non-linear models which were used to determine the release kinetics of Zn, Mn, and Mg, the one with the highest R^2 values was chosen. The R^2 values ranged from 0.81 to 0.99 for the pseudo-first-order model, 0.89 to 0.93 for the pseudo-second-order model, 0.97 to 0.99 for the Elovich model, 0.89 to 0.99 for the power function model, and 0.55 to 0.86 for the parabolic diffusion model. Ultimately, the pseudo-second-order and power function models were chosen to analyze the kinetic data. The amount of Zn, Mn and Mg released at equilibrium (q_e) were higher in the presence of citric acid (42%) compared to tartaric acid. Additionally, the release of these elements was greater from LDH (4:1) than from LDH (3:1). This suggests that increasing the ratio of divalent cations to trivalent cations reduces the stability of LDH, enhancing the release of micronutrients.

Conclusion

The results of this study demonstrated that the release of Zn, Mn, and Mg from layered double hydroxides (LDHs) was influenced by time, the type of low molecular weight organic acid, and the ratio of divalent to trivalent cations in the LDH structure. Kinetic modeling revealed that the release rates of Zn, Mn, and Mg from LDH with a 4:1 ratio were higher than those from LDH with a 3:1 ratio. Additionally, the dissolution rates of LDHs were faster in the presence of citric acid compared to tartaric acid. To further assess the potential of LDHs as slow-release micronutrient fertilizers in calcareous soils, additional greenhouse and soil experiments are recommended.

Keywords: Kinetic models, Low molecular weight organic acid, Micronutrients, Slow-release fertilizer

سینتیک رهاسازی روی، منگنز و منیزیم از هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای Mg-Zn-Mn-Al-LDH تحت تأثیر اسید سیتریک و اسید تارتاریک

زهرا موحدی راد^۱ - محسن حمیدپور^{۲*} - احمد تاج آبادی پور^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۷

چکیده

اخیراً پتانسیل هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای در تأمین عناصر ضروری گیاهان به‌طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش Mg-Zn-Mn-Al-LDH با آنیون بین لایه‌ای نیترات با دو نسبت کاتیون دو به سه ظرفیتی 3:1 (LDH (3:1)) و 4:1 (LDH (4:1)) به روش هم‌سویی تهیه شد. پس از بررسی ویژگی‌های ساختاری و مورفولوژیکی با استفاده از تکنیک‌های XRD، SEM، FTIR و BET، روند رهاسازی عناصر روی، منگنز و منیزیم از آن‌ها در حضور و عدم حضور اسیدهای آلی سیتریک و تارتاریک با مطالعات پیمانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. از بین مدل‌های سینتیکی مختلف، مدل‌های تابع توانی و شبه مرتبه دوم به‌دلیل دارا بودن ضریب تبیین (R^2) بیشتر و خطای تخمین استاندارد کمتر (SE) جهت برازش بر داده‌های سینتیکی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد اسیدهای آلی نقش مهمی در رهاسازی عناصر از ساختار LDH داشته به‌گونه‌ای که در حضور اسید سیتریک، از LDH (3:1) مقدار رهاسازی روی، منگنز و منیزیم به‌ترتیب ۹۹، ۹۹ و ۹۱ درصد و از LDH (4:1) به‌ترتیب ۹۷، ۹۸ و ۸۵ درصد بیشتر از عدم حضور این اسید بود. همچنین در حضور اسید تارتاریک مقدار رهاسازی روی، منگنز و منیزیم از LDH (3:1) به‌ترتیب ۹۹، ۹۰ و ۸۹ درصد و از LDH (4:1) این مقادیر ۹۳، ۸۶ و ۶۹ درصد بیشتر از عدم حضور این اسید بود. نسبت کاتیون دو به سه ظرفیتی در ساختار LDH تأثیر مستقیم بر پایداری LDH داشته و افزایش این نسبت منجر به کاهش پایداری LDH گردید. با توجه به نتایج حاصل می‌توان در رویکردی جدید هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای را به‌عنوان ترکیبات کودی با قابلیت آزادسازی آرام عناصر غذایی در شرایط کمبود آن‌ها و در حضور گیاه مورد بررسی بیشتر قرار داد.

واژه‌های کلیدی: اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم، عناصر کم مصرف، کودهای کندرها، مدل‌های سینتیکی

مقدمه

تبخیر، آلودگی به فلزات سنگین و راندمان پایین جذب توسط گیاه، اثر نامطلوبی بر اقتصاد و محیط زیست دارند (Lakshani et al., 2023). در این راستا به‌منظور افزایش بهره‌وری کشاورزی، توسعه و کاربرد موادی که علاوه بر سازگاری با محیط زیست بتوانند عناصر غذایی ضروری گیاه را به آرامی آزاد نموده و نیاز گیاه را تأمین کنند، ضروریست. در بین انواع ترکیبات موجود، می‌توان به هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای^۳ به‌عنوان یکی از گزینه‌ها جهت رسیدن به اهداف ذکر

تأمین نیاز غذایی جمعیت رو به رشد جهان از اهمیت ویژه و قابل توجهی برخوردار است (Alexandratos & Bruinsma, 2012). در این راستا استفاده از کودهای شیمیایی به‌عنوان یک راهبرد متداول برای تأمین عناصر غذایی مورد نیاز گیاه و افزایش تولید محصول متداول بوده اما به‌دلیل دارا بودن ویژگی‌هایی مانند حلالیت زیاد،

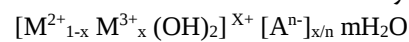
۱- گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲- گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: m.hamidpour@vru.ac.ir

شده اشاره نمود. این ترکیبات پتانسیل بسیار بالایی برای استفاده به صورت کود کدرها و افزایش تولید محصولات کشاورزی دارند (Zhang et al., 2019; & Roy et al., 2023).

هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای (LDHs)، گروهی از رس‌های آنیونی با بار مثبت و دارای ساختاری شبیه به کانی برو سایت هستند (Li & Duan, 2005). در این ترکیبات بخشی از کاتیون‌های دوظرفیتی که در شبکه هشت وجهی با گروه‌های هیدروکسیل هم‌آرایی شده‌اند، با کاتیون‌های سه ظرفیتی جایگزین شده و در نتیجه مقداری بار مثبت خنثی نشده در ساختار ترکیب به وجود می‌آید که به وسیله آنیون‌های بین لایه‌ای خنثی می‌گردد (Zhang et al., 2021). معمولاً جهت توصیف ساختار هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای فرمول زیر ارائه می‌گردد:



که در آن M^{2+} و M^{3+} به ترتیب کاتیون‌های فلزی دو ظرفیتی و سه ظرفیتی، A^{n-} آنیون n ظرفیتی و x برابر نسبت مولی کاتیون سه ظرفیتی به دو ظرفیتی $(M^{2+}+M^{3+})/M^{3+}$ است (Kameliya et al., 2023).

این ترکیبات به عنوان سامانه‌های هیبریدی دارای کاربردهای متنوع در زمینه‌های پزشکی (به ویژه داروسازی و ژن درمانی)، الکتروشیمی، فتوشیمی و محیط زیست می‌باشند (Figueredo Benicio et al., 2018). اخیراً گزارش‌هایی از کاربرد این ترکیبات در حوزه کشاورزی به عنوان منابعی برای ذخیره و رهاسازی آهسته مواد شیمیایی مانند علف‌کش‌ها، تنظیم کننده‌های رشد و عناصر غذایی منتشر شده است (Cardoso et al., 2006; Benicio et al., 2017; Bernardo et al., 2017).

هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای دارای پایداری مناسبی در شرایط محیطی هستند (Khan et al., 2023) اما درون خاک این پایداری تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله وجود اسیدهای آلی قرار می‌گیرد. طیف وسیعی از اسیدهای آلی در خاک وجود دارند که غلظت آن‌ها در محدوده 10^{-3} تا 10^{-4} مول بر لیتر برای خاک‌هایی با ۲۰ درصد رطوبت گزارش شده است (Evans, 1991). اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم نقش بسیار مهمی در تحرک، فراهمی زیستی و انتقال عناصر از بخش‌های مختلف خاک به سوی ریشه گیاهان دارند که در بین آن‌ها اسید سیتریک و اسید تارتاریک در باروری خاک اهمیت ویژه‌ای دارند (Adeleke et al., 2017). یکی دیگر از عوامل مؤثر بر رهاسازی عناصر از این ترکیبات نسبت کاتیون دو ظرفیتی به سه ظرفیتی در ساختار هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای است. همراه با افزایش تعداد کاتیون سه ظرفیتی و کاهش تعداد کاتیون دو ظرفیتی پایداری LDH افزایش می‌یابد و بالعکس و این فرایند به دلیل تأثیر مقدار بار مثبت در ظرفیت تبادل آنیونی و تأثیر بر قدرت پیوند بین لایه‌های هیدروکسید و آنیون‌های بین لایه‌ای می‌باشد (Everaert

et al., 2016). نسبت کاتیون دو ظرفیتی به سه ظرفیتی منجر به تغییر در اندازه بلورهای LDH می‌شود. همچنین کاتیون‌های دو ظرفیتی نیز با تأثیر بر مکان‌های واکنش‌های ردوکس بر میزان پایداری این ترکیبات اثر مستقیم دارند (Khan et al., 2023).

در متون علمی متعدد گزارش‌های مختلفی از مطالعه این ترکیبات جهت بررسی پتانسیل آن‌ها در تأمین عناصر غذایی پرمصرف و کم مصرف ارائه شده است. به عنوان مثال حلاج‌نیا و همکاران (Halajnia et al., 2013) پتانسیل آزادسازی نیترات از Mg-Al-LDH را بررسی کردند. اواررت و همکاران (Everaert et al., 2016) نیز رهاسازی فسفر از Mg-Al-LDH را مطالعه نمودند. لوپز و همکاران (López-Rayó et al., 2017) به بررسی رهاسازی روی از Zn-Mg-Fe-LDH پرداختند. حاتمی و همکاران (Hatami et al., 2018) رهاسازی فسفر از Zn-Al-LDH با دو نسبت مولی مختلف Zn/Al (۲ و ۳) را با کود سوپر فسفات تریپل مقایسه کردند. سونگخوم و همکاران (Songkhum et al., 2018) رهاسازی روی و بور از Zn-Al-LDH و همچنین شفیق و همکاران (Shafigh, Hamidpour & Furrer, 2019) رهاسازی روی از Zn-Mg-Fe(III)-LDH با آنیون بین لایه‌ای فسفات و نیترات در حضور اسیدهای آلی را مورد مطالعه قرار دادند. اواررت و همکاران (Everaert et al., 2023) رهاسازی مولیبدن از Zn-Al-LDH با آنیون بین لایه‌ای مولیبدات در نسبت مختلف روی به آلومینیوم (۲، ۳ و ۴) را مورد بررسی قرار دادند. حاتمی و فتوت (Hatami & Fotovat, 2023) نیز Zn[Mn]Al-LDHs را به عنوان ماتریکسی جهت رهاسازی بور، روی و منگنز در محیط شبیه سازی شده محلول خاک در حضور اسیدهای آلی بررسی کردند. حسن‌زاده و همکاران (Hassanzadeh et al., 2024) کارایی هیدروکسید دوگانه لایه‌ای را به عنوان کود کدرهای فسفر در حضور ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه، مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌اند. با وجود مطالعات گسترده انجام شده در زمینه LDHs، تاکنون تحقیقات محدودی به بررسی آزادسازی همزمان عناصر روی، منگنز و منیزیم از هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای با آنیون بین لایه‌ای نیترات در نسبت‌های متفاوت کاتیون‌های دو به سه ظرفیتی تحت تأثیر اسیدهای آلی سیتریک و تارتاریک پرداخته‌اند. بنابراین تحقیق حاضر، با هدف مقایسه رهاسازی روی، منگنز و منیزیم از Mg-Zn-Mn-Al-LDH در دو نوع LDH (3:1) و LDH (4:1) تحت تأثیر اسید سیتریک و اسید تارتاریک در طی زمان‌های متفاوت و مطالعه سینتیک رهاسازی این عناصر از ترکیبات سنتز شده انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از روش هم‌رسوبی^۱ جهت ساخت Mg-Zn-Mn-Al(III)-LDH با آنیون بین لایه‌ای نیترات و با نسبت‌های کاتیون دو به سه ظرفیتی سه به یک و چهار به یک (به ترتیب LDH (3:1) و LDH (4:1)) استفاده شد (Everaert et al., 2016). برای این منظور نمک‌های نیترات روی ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$)، نیترات منگنز ($Mn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$)، نیترات منیزیم ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) و نیترات آلومینیوم ($Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$) مورد استفاده قرار گرفتند. برای ساخت LDH (3:1) و LDH (4:1) نمک‌های حاوی کاتیون‌های دو ظرفیتی در غلظت‌های به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۸ مولار و نمک حاوی کاتیون سه ظرفیتی در غلظت‌های به ترتیب ۰/۶ و ۰/۷۵ مولار تهیه گردید و عمل سنتز در محدوده pH ۹/۹-۹/۲ و در شرایط اتمسفر نیتروژن انجام شد. به منظور تنظیم pH از محلول NaOH با غلظت ۳ مولار استفاده شد. سپس جهت طی شدن مرحله پیرشدگی^۲ ر سوبات سفید رنگ تشکیل شده به مدت ۲ ساعت به حال خود رها شدند. پس از گذشت مدت زمان ذکر شده عمل سانتریفیوژ با سرعت ۳۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه جهت جدا نمودن رسوبات از محلول، انجام شد. سپس، طی چندین مرتبه عمل شستشو با آب مقطر دو بار تقطیر و سانتریفیوژ (با سرعت ۳۵۰۰ دور در دقیقه و مدت زمان ۲۰ دقیقه) خروج نمک‌های اضافی انجام شد و در نهایت رسوبات به مدت ۸ ساعت در آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس خشک شدند.

برای بررسی وضعیت ساختار بلوری از دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD) مدل Bruker D8 Advance، با پرتو $CuK\alpha$ با طول موج ۰/۱۵۴ نانومتر در ۴۰ کیلوولت و ۴۰ میلی‌آمپر در محدوده زوایای اندازه‌گیری ۲θ بین ۵ تا ۷۹/۹۷ درجه، مورفولوژی و نوع اتم‌های موجود در ساختمان ترکیبات سنتز شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM مجهز به EDS (Zeiss, Germany) نوع پیوند از طریق طیف‌سنجی مادون قرمز (FT-IR) مدل (Nicolet iS10) در محدوده عدد موجی $4000-500\text{ cm}^{-1}$ و سطح ویژه با دستگاه اندازه‌گیری سطح ویژه (BET) ارزیابی گردید.

برای بررسی سینتیک رهاسازی روی، منگنز و منیزیم از LDH (3:1) و LDH (4:1) در حضور اسید سیتریک و اسید تارتاریک مقدار ۱۰ میلی‌گرم از هر LDH توزین و به لوله‌های فالكون حاوی ۱۰ میلی‌لیتر الکترولیت زمینه ۰/۰۱ مولار کلرید پتا سیم در حضور و عدم حضور اسیدهای آلی با غلظت ۱/۲۵ میلی‌مولار با pH اولیه ۶-۷ و در دو تکرار اضافه گردید. سوسپانسیون‌ها در دوره‌های زمانی ۵، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰، ۴۸۰ و ۷۲۰ دقیقه تکان داده شده و سپس به وسیله سانتریفیوژ با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه محلول

زال رویی از بخش جامد جدا گردید. غلظت عناصر روی، منگنز و منیزیم به وسیله دستگاه طیف‌سنج اتمی (Savant AA, CBC) در محلول رویی اندازه‌گیری شد.

برازش مدل‌های سینتیکی بر داده‌های رهاسازی تجمعی عناصر روی، منگنز و منیزیم توسط فرم غیر خطی معادله‌های شبه مرتبه اول، شبه مرتبه دوم، الووچ ساده شده، تابع توانی و پخشیدگی پارابولیکی در محیط نرم‌افزار DataFit9 انجام شد (جدول ۱). معادلاتی که دارای بالاترین ضریب تبیین (R^2) و کمترین خطای استاندارد (SE)، که فرمول محاسبه آن در ذیل آمده است، جهت پیش‌بینی سینتیک رهاسازی عناصر انتخاب و نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel رسم گردید.

$$SE = \sum_{n=1}^N (\hat{r}_n - r_n)^2 \quad (۱)$$

در این معادله $\hat{r}_n$ و r_n به ترتیب میانگین مقدار عنصر اندازه‌گیری شده (واقعی) و میانگین مقدار عنصر برآورد شده توسط مدل در زمان t می‌باشند (Wang & Lu, 2018).

نتایج و بحث

الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های LDH سنتز شده در شکل ۱ نشان داده شده است. الگوهای پراش پرتو ایکس در LDH (3:1) و LDH (4:1) مطابق با ویژگی‌های ساختاری مورد انتظار در هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای است و دارای پیک‌های تیز و قوی در 2θ حدود ۱۱ و ۲۳ درجه که مربوط به صفحات ۰۰۳ و ۰۰۶ و پیک‌های پهن و نامتقارن در 2θ ‌های بالاتر مربوط به صفحات ۰۱۲، ۰۱۵، ۰۱۸، ۱۱۰ (2θ حدود ۶۰ درجه) و ۱۱۳ (2θ حدود ۶۲ درجه) می‌باشد. نتایج الگوی پراش پرتو ایکس موفقیت‌آمیز بودن سنتز ترکیبات LDH را تأیید می‌نماید (Meili et al., 2019).

ویژگی‌های مربوط به شبکه^۳ نمونه‌های سنتز شده در جدول ۲ ارائه شده‌اند. پارامتر a که با کوتاه‌ترین فاصله کاتیون-کاتیون در لایه درونی ورقه شبه بروسایت مطابقت دارد از طریق معادله ۲ قابل محاسبه است:

$$a = 2 \times d_{(110)} \quad (۲)$$

پارامتر c که نشان‌دهنده ضخامت بین لایه‌ای است از طریق معادله ۳ محاسبه گردید:

$$c = 3 \times d_{(003)} \quad (۳)$$

و پارامتر D که نشان‌دهنده اندازه کریستال‌های^۴ تشکیل شده است از طریق معادله ۴ محاسبه شد:

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cdot \cos\theta} \quad (۴)$$

3- Lattice parameters

4- Crystallite size

1- Co-Precipitation

2- Ripened

جدول ۱- مدل‌های سینتیکی مورد استفاده

Table 1- Used kinetic models

مدل‌های سینتیکی Kinetics model	معادلات Equations	پارامترها Parameters
شبه مرتبه اول Pseudo-first-order	$q_t = q_e (1 - e^{-k_1 t})$	t = زمان تعادل (دقیقه) t = Equilibrium time (min) q_t = مقدار عنصر رها شده (میلی گرم بر گرم) در زمان q_t = the amount of released elements (mg g ⁻¹) at time q_e = مقدار عنصر رها شده (میلی گرم بر گرم) در زمان تعادل q_e = the amount of released elements (mg g ⁻¹) at equilibrium time K_1 = ثابت سرعت معادله سینتیکی شبه مرتبه اول K_1 = rate constant of pseudo-first order
شبه مرتبه دوم Pseudo-second-order	$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t}$	t = زمان تعادل (دقیقه) t = Equilibrium time (min) q_t = مقدار عنصر رها شده (میلی گرم بر گرم) در زمان q_t = the amount of released elements (mg g ⁻¹) at time q_e = مقدار عنصر آزاد شده (میلی گرم بر گرم) در زمان تعادل q_e = the amount of released elements (mg g ⁻¹) at equilibrium time K_2 = ثابت سرعت معادله سینتیکی شبه مرتبه دوم (گرم بر میلی گرم در دقیقه) K_2 = rate constant of pseudo-second-order kinetic equation (g mg ⁻¹ min ⁻¹) $h = k_2 q_e^2$ = مقدار رهاسازی اولیه (میلی گرم بر گرم در دقیقه) h = the initial release rate value (mg g ⁻¹ min ⁻¹)
تابع توانی Power function	$q_t = at^b$	t = زمان تعادل (دقیقه) t = Equilibrium time (min) q_t = مقدار عنصر رها شده (میلی گرم بر گرم) در زمان q_t = the amount of released elements (mg g ⁻¹) at time a و b = ثابت‌های معادله تابع توانی a and b = constant of power function
پخشیدگی پارابولیک Parabolic diffusion	$q_t = Rt^{\frac{1}{2}} + C$	R = ثابت سرعت معادله سینتیکی پخشیدگی پارابولیک (میلی گرم بر گرم در دقیقه) R = the rate constant of the parabolic diffusion kinetic equation (mg g ⁻¹ min ⁻¹) C = عرض از مبدا معادله پخشیدگی پارابولیک C = Parabolic diffusion equation y-intercept
الوویچ Elovich	$q_t = \left(\frac{1}{\beta}\right) \ln(\alpha\beta) + \left(\frac{1}{\beta}\right) \ln t$	t = زمان تعادل (دقیقه) t = Equilibrium time (min) q_t = مقدار عنصر رها شده (میلی گرم بر گرم) در زمان q_t = the amount of released elements (mg g ⁻¹) at time α و β = ثابت‌های معادله الوویچ α and β = constant of Elovich

کوچک‌تری (۰/۵۳ آنگستروم) نسبت به یون‌های دو ظرفیتی روی، منگنز و منیزیم (شعاع یونی در محدوده ۰/۶۵ تا ۰/۸۰ آنگستروم) دارد (Mishra et al., 2018) و همین ویژگی منجر به افزایش فاصله کاتیون-کاتیون در LDH با مقدار یون دو ظرفیتی بیشتر گردیده است.

فاصله بین لایه‌ای (c) در LDH (3:1) برابر با ۲۳/۸۹۹ و در LDH (4:1) برابر با ۲۴/۱۳۴ آنگستروم بود. همان‌طور که مشخص است همراه با افزایش نسبت کاتیون دو به سه ظرفیتی فاصله کاتیون-کاتیون (a) و فاصله بین لایه‌ای (c) نیز افزایش یافته که این روند با

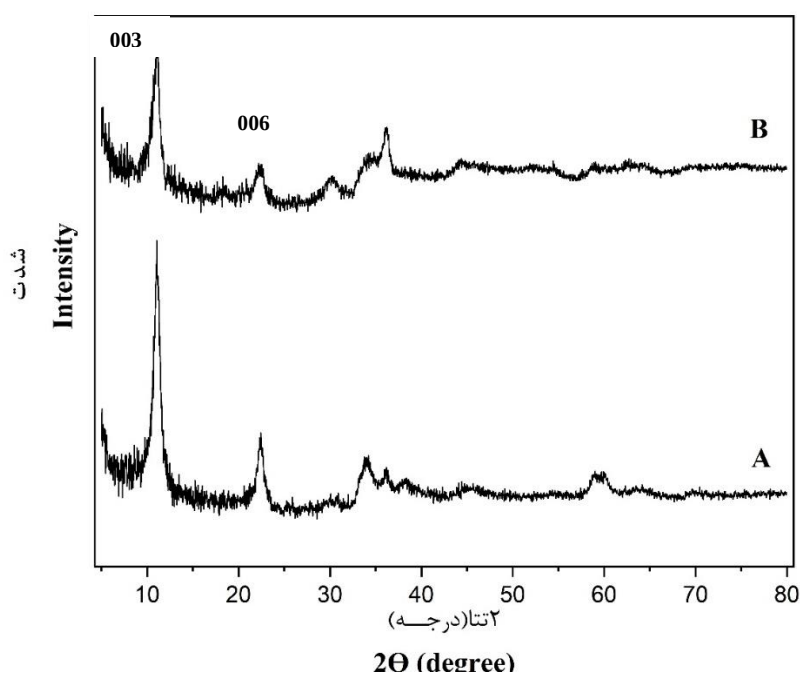
که در این معادله λ برابر با طول موج پرتو CuK α که برابر با ۰/۱۵۴۰۶ نانومتر و β برابر با FWHM^۱ در 2θ مربوط به $d_{(003)}$ و بر حسب نانومتر می‌باشد (Koilaraj & Kannan, 2010).

فاصله کاتیون-کاتیون (a) در LDH (3:1) و LDH (4:1) به ترتیب برابر با ۳/۰۸۱ و ۳/۱۲۴ آنگستروم است. مقدار a به دست آمده در محدوده a گزارش شده برای انواع LDHs می‌باشد (Hassanzadeh et al., 2024). همراه با کاهش مقدار آلومینیوم در ترکیب مقدار این پارامتر افزایش یافته است. زیرا در مقایسه شعاع یونی کاتیون‌های سه و دو ظرفیتی یون آلومینیوم شعاع یونی

1- Full width at half maximum

و شرایط آزمایشگاهی باشد (Koilarj & Kannan, 2010). در متون علمی، مقادیر متفاوتی برای فاصله بین لایه‌ای در ساختارهای LDHs حاوی آنیون بین لایه‌ای نیترات گزارش شده است. بعضی از محققین فاصله بین لایه‌ای ۸/۶۷ آنگستروم را برای $Mg-Al-NO_3$ ارائه کرده‌اند (Lozano-Luner *et al.*, 2023). ایمران و همکاران (Imran *et al.*, 2016) این فاصله را برای ترکیب $Mg-Fe-NO_3$ LDH حدود ۸/۰ آنگستروم گزارش نموده‌اند. همچنین حسن‌زاده و همکاران (Hassanzadeh *et al.*, 2024) فاصله بین لایه‌ای ۷/۹۴ تا ۸/۰ آنگستروم را برای LDH حاوی نیترات ذکر کرده‌اند.

نتایج مطالعات محققین مختلف مطابقت دارد (Thevento *et al.*, 1989; Rojas *et al.*, 2010; Klemkaite *et al.*, 2011). به‌طور کلی پارامترهای شبکه به دست آمده در محدوده گزارش شده توسط سایر محققین قرار داشتند. فاصله بین لایه‌ای (d-spacing) در LDHs یک پارامتر ساختاری کلیدی است که تحت تأثیر عوامل متعددی مانند نوع آنیون، نسبت مولی یون‌های فلزی و شرایط سنتز قرار می‌گیرد. تفاوت‌های مشاهده‌شده در d-spacing در مطالعات مختلف می‌تواند ناشی از تغییرات در ترکیب شیمیایی، نوع آنیون بین لایه‌ای، روش‌های سنتز،

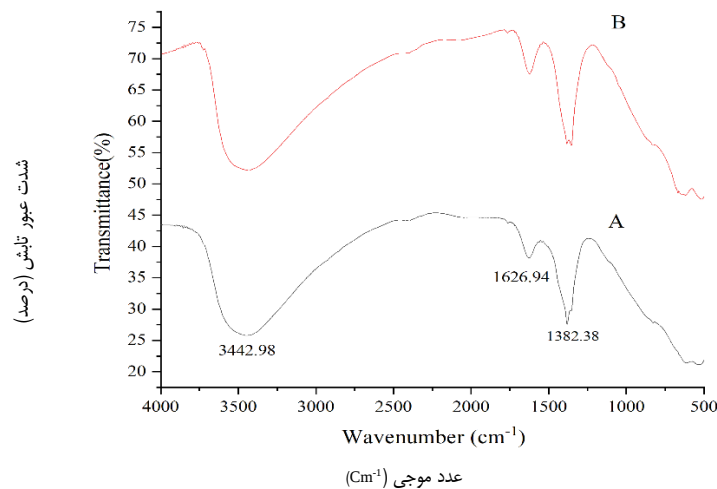


شکل ۱- الگوی پراش نگار پرتو ایکس (A) LDH (3:1) و (B) LDH (4:1)
Figure 1- XRD pattern of LDH (3:1) (A) and LDH (4:1) (B)

جدول ۲- پارامترهای شبکه LDHs
Table 2- Lattice parameters of LDHs

نوع LDH LDH Type	نسبت کاتیون دو به سه ظرفیتی Divalent to Trivalent Cation Ratio	پارامترهای لاتیکی (Å) Lattice parameters			
		$d_{(003)}$ (Å)	$d_{(110)}$ (Å)	فاصله کاتیون-کاتیون (a) Cation-cation distance (Å)	فاصله بین لایه‌ای (c) Thickness of the interlayer (Å)
LDH (3:1)	3	7.966	1.540	3.081	23.899
LDH (4:1)	4	8.045	1.562	3.124	24.134

اندازه کریستال
Crystallite sizes (nm)



شکل ۲- طیف مادون قرمز LDH (3:1) (A) و LDH (4:1) (B)
Figure 2- FT-IR spectra of LDH (3:1) (A) and LDH (4:1) (B)

به عنا صر روی، منگنز و آلومینیوم بوده که سنتز موفقیت‌آمیز LDHs را تأیید می‌نماید.

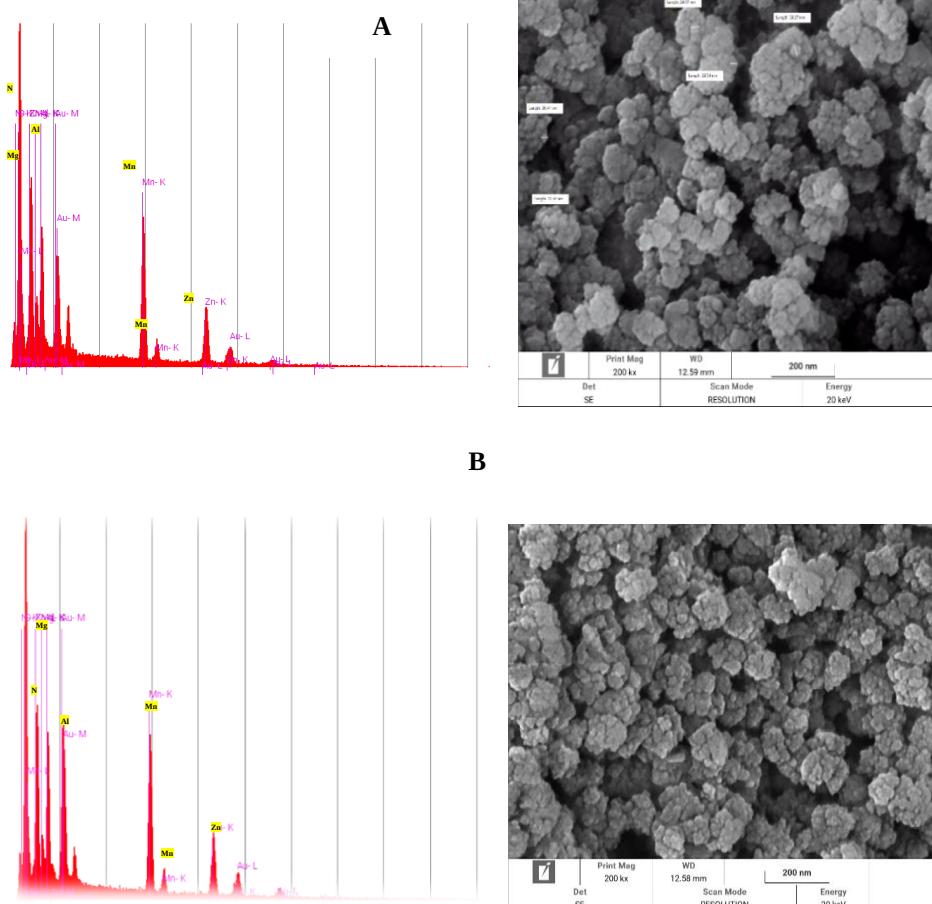
رها سازی تجمعی عناصر روی، منگنز و منیزیم از LDH (3:1) و LDH (4:1) در حضور و عدم حضور اسید سیتریک و اسید تارتاریک در شکل ۴ نشان داده شده است.

استفاده از اسیدهای آلی منجر به افزایش فرآیند رها سازی عناصر روی، منگنز و منیزیم از هر دو نوع LDH نسبت به تیمار بدون حضور اسیدهای آلی در طول زمان گردید و روند آزاد سازی عناصر با یک شیب ملایم بعد از زمان ۷۲۰ دقیقه همچنان ادامه داشت (شکل ۴). از سوی دیگر سرعت رها سازی عناصر غیر یکنواخت و قابل تشخیص در دو مرحله متفاوت بود. مرحله اول حدوداً در ۵۰ دقیقه ابتدای آزمایش رخ داد که رها سازی عناصر دارای شیب تندتر و سرعت بالاتر در مقایسه با مرحله دوم بود. مرحله دوم که بعد از ۵۰ دقیقه اتفاق افتاد شیب ملایم‌تر و سرعت کم‌تری داشت. به احتمال زیاد در زمان‌های ابتدای آزمایش سطوح خارجی و لبه‌های LDHs نقش پررنگ‌تری در رها سازی عناصر ایفا کردند و از آنجایی که دسترسی به این مکان‌ها سریع‌تر رخ اتفاق می‌افتد، در نتیجه سرعت انحلال و آزاد سازی عناصر نیز بیشتر شد. در مرحله دوم رها سازی از سطوح داخلی و یا سطوحی با انرژی متفاوت انجام گرفته است (Sparks, 1986). به طور کلی سرعت کندترین مرحله تعیین کننده سرعت انتقال جرم در طول مدت انحلال خواهد بود (Baranimotlagh & Gholami, 2013). نتایج به دست آمده مشابه نتایج گزارش شده توسط سایر محققین بود (Songkhum et al., 2018; Shafigh et al., 2019; Nunes et al., 2020).

طیف FTIR مربوط به LDH (3:1) و LDH (4:1) مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به این طیف می‌توان ساختار LDH (3:1) و LDH (4:1) را مورد بررسی و شناسایی قرار داد. وجود باند پهن در محدوده 3480 و 1620 cm^{-1} نشان‌دهنده ارتعاشات کششی گروه‌های هیدروکسیل و لرزش پیوندهای OH-OH بر روی هم و مولکول‌های آب بین لایه‌ای است. به طور کلی باندهایی که در محدوده کمتر از 1000 cm^{-1} ظاهر می‌شوند مربوط به کشیدگی پیوندهای کاتیون فلزی با گروه‌های هیدروکسیل می‌باشد. باریکه جذبی در 1382 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی آنیون نیترات و در نتیجه نشان‌دهنده جای‌گیری نیترات بین لایه‌ای در ساختار LDH (3:1) است.

بررسی نتایج حاصل از طیف سنجی مادون قرمز LDH (4:1) نیز وجود گروه‌های هیدروکسیل و مولکول‌های آب بین لایه‌ای و آنیون نیترات را تأیید می‌نماید. اما دو شانه‌ای شدن باریکه جذبی در محدوده 1380 و 1354 cm^{-1} وجود یک باند ضعیف در محدوده 1354 cm^{-1} نشان دهنده حضور مقدار اندکی کربنات در ساختار ترکیب است که احتمالاً در هنگام سنتز و آماده سازی نمونه‌ها توسط سیستم از هوا جذب شده است (Benicio et al., 2018).

تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) و طیف سنج پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) مربوط به هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای مورد مطالعه در شکل ۳ ارائه گردیده است. بر اساس این تصاویر ذرات LDH (3:1) و LDH (4:1) دارای ذرات منظم و بشقابی شکل بودند که این نوع مورفولوژی به عنوان مورفولوژی متداول برای این ترکیبات در نظر گرفته شده است (Dalla Nora et al., 2020). نتایج آنالیز طیف تفکیک انرژی (EDS) به طور مشخص شامل پیک‌های مربوط

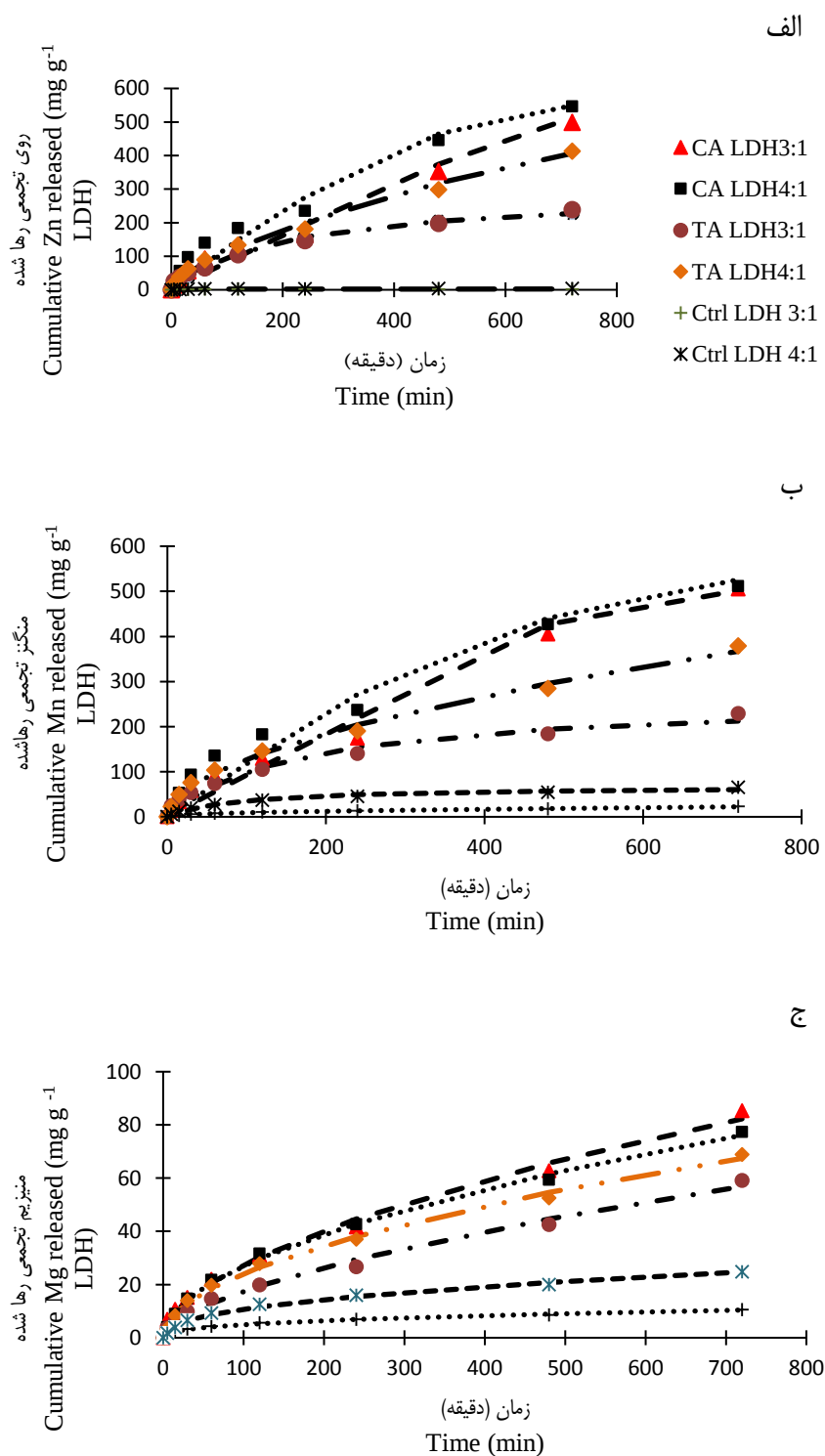


شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی و طیف سنج پراش انرژی پرتو ایکس در LDH (3:1) (A) و LDH (4:1) (B)
Figure 3- SEM images and EDS spectra of LDH (3:1) (A) and LDH (4:1) (B)

با اسید تارتاریک می‌باشد (Essington, 2015; Zabyszak *et al.*, 2018).

از آنجایی که بررسی سینتیک واکنش‌ها اطلاعات مهمی راجع به ماهیت واکنش در زمان معین ارائه می‌دهد، در این پژوهش به منظور مشخص نمودن سینتیک رهاسازی عناصر روی، منگنز و منیزیم از LDH (3:1) و LDH (4:1)، آنالیز رگرسیون غیر خطی برای برازش مدل‌های سینتیکی بر داده‌های رهاسازی عناصر در دوره‌های زمانی مختلف مورد استفاده قرار گرفت. از بین مدل‌های غیر خطی مورد استفاده، مدل شبه مرتبه اول دارای R^2 بین ۰/۹۹ - ۰/۸۱، مدل شبه مرتبه دوم دارای R^2 بین ۰/۹۹ - ۰/۸۹، مدل الویج دارای R^2 بین ۰/۹۷ - ۰/۹۳، مدل تابع توانی دارای R^2 بین ۰/۸۹ - ۰/۹۹ و مدل پخشیدگی پارابولی دارای R^2 بین ۰/۸۶ - ۰/۵۵ بود.

مقایسه تأثیر نوع اسید آلی بر مقدار رهاسازی روی، منگنز و منیزیم از LDH (3:1) و LDH (4:1) نشان داد اسید سیتریک قدرت بیشتری در رهاسازی عناصر از LDHs داشته است و در هر دو نوع LDH رهاسازی عناصر در حضور اسید سیتریک بیش از رهاسازی در حضور اسید تارتاریک بود. به طور مشخص در ساختار LDH (3:1) حضور اسید سیتریک موجب افزایش بیش از ۱۰۰ درصدی در رهاسازی عناصر روی و منگنز و افزایش ۴۴ درصدی در رهاسازی منیزیم در مقایسه با اسید تارتاریک شد. همچنین در LDH (4:1) اسید سیتریک به ترتیب باعث افزایش ۳۲، ۳۵ و ۱۳ درصدی در رهاسازی عناصر روی، منگنز و منیزیم نسبت به اسید تارتاریک گردید. وجود سه گروه کربوکسیل و گونه‌های شیمیایی مختلف لیگاند‌های کمپلکس کننده اسید سیتریک در انواع H_2L ، H_3L و HL و L و توانایی آن در تشکیل کمپلکس‌های دودندانه، سه‌دندانه و چنددندانه با یون‌های فلزی مختلف همراه با افزایش pH و همچنین pK_{a1} برابر با ۳/۱۳ دلیل آزادسازی بیشتر عناصر در حضور اسید سیتریک در مقایسه



شکل ۴- سینتیک رهاسازی روی (الف)، منگنز (ب) و منیزیم (ج) از LDH (3:1) و LDH (4:1) در حضور و عدم حضور (Ctrl) اسید سیتریک (CA) و اسید تارتاریک (TA) با برازش مدل شبه مرتبه دوم بر داده‌های سینتیکی

Figure 4- The kinetics of Zn(a), Mn(b) and Mg(c) released LDH (3:1) and LDH (4:1) in the absence (Ctrl) or presence of the Citric acid (CA) and Tartaric acid (TA) data. Curves have been fitted as pseudo-second-order

(3:1) و LDH (4:1) به ترتیب و ۱۱/۸۷ و ۱۰/۹۵ و مقادیر ضریب b به ترتیب ۰/۴۴ و ۰/۸۱ تعیین شد (جدول ۳). در عدم حضور اسید تارتاریک نیز مقادیر ضریب a برای این دو ساختار به ترتیب ۱/۰۵ و ۵/۳ و مقادیر ضریب b به ترتیب ۰/۴۶ و ۰/۳۸ بود (جدول ۳). در بررسی رها سازی منیزیم از LDH (3:1) و LDH (4:1) در حضور اسید سیتریک مقادیر ضریب a به ترتیب ۲/۱۱ و ۲/۴۲ و در عدم حضور اسید سیتریک، این مقادیر به ترتیب ۰/۸۴ و ۱/۵۲ به دست آمد (جدول ۳). علاوه بر این مقادیر ضریب b برای این دو نوع ساختار LDH در حضور اسید سیتریک به ترتیب ۰/۵۶ و ۰/۵۲ و در تیمار عدم حضور اسید سیتریک به ترتیب ۰/۳۸ و ۰/۴۲ تعیین شد (جدول ۳). بیشتر بودن ضریب a و کمتر بودن ضریب b برای LDH (4:1) نشان دهنده بالاتر بودن سرعت رها سازی منیزیم در حضور اسید سیتریک از LDH (4:1) نسبت به LDH (3:1) است (Motaghian & Hosseinpour, 2014). در حضور اسید تارتاریک نیز مقادیر ضریب a برای LDH (3:1) و LDH (4:1) به ترتیب ۱/۱ و ۲/۲ و در عدم حضور اسید تارتاریک به ترتیب ۰/۸۴ و ۱/۵۲ و مقادیر ضریب b برای این دو ساختار در حضور اسید تارتاریک به ترتیب ۰/۵۹ و ۰/۵۲ و در عدم حضور اسید تارتاریک به ترتیب ۰/۳۸ و ۰/۴۲ به دست آمد (جدول ۳). نتایج نشان داد که در زمان‌های اولیه انجام واکنش، رها سازی منیزیم از LDH (4:1) در حضور اسید تارتاریک با سرعت بیشتری نسبت به LDH (3:1) انجام شد. به طور کلی، این یافته‌ها نشان داد که نوع ساختار LDH و نوع اسید آلی تأثیر قابل توجهی بر سینتیک رها سازی منیزیم دارد.

در بررسی پارامترهای حاصل از مدل شبه مرتبه دوم در رها سازی روی از LDH (3:1) در حضور اسید سیتریک مقدار سرعت رها سازی اولیه (h) برابر با ۰/۸۴ میلی گرم بر گرم در دقیقه، در حضور اسید تارتاریک این پارامتر برابر با ۱/۴۲ میلی گرم بر گرم در دقیقه و بدون حضور اسید سیتریک و اسید تارتاریک این پارامتر ۰/۰۷ میلی گرم بر گرم در دقیقه به دست آمد. علاوه بر این مقدار غلظت روی تعادلی محاسبه شده (qe) در LDH (3:1) هم در حضور اسید سیتریک و هم در حضور اسید تارتاریک در مقایسه با عدم حضور اسید سیتریک و اسید تارتاریک افزایش ۹۹ درصدی را نشان داد (جدول ۳). در رها سازی روی از LDH (4:1) در حضور اسید سیتریک و اسید تارتاریک مقدار h به ترتیب برابر با ۱/۳۳ و ۱/۱۱ میلی گرم بر گرم در دقیقه و بدون حضور دو نوع اسید این پارامتر ۰/۲۸ میلی گرم بر گرم در دقیقه به دست آمد. غلظت روی تعادلی (qe) در LDH (4:1) در حضور اسیدهای آلی سیتریک و تارتاریک در مقایسه با عدم حضور این اسیدها به ترتیب افزایش ۹۷ درصدی و ۹۳ درصدی داشت.

با توجه به این که معادلات سینتیکی شبه مرتبه اول، الویج ساده شده و پارابولیکی در مقایسه با معادلات تابع توانی و شبه مرتبه دوم قادر به توصیف مناسب رها سازی عناصر مورد مطالعه نبودند در ادامه بررسی نشدند و مدل‌های تابع توانی و شبه مرتبه دوم با ضریب تبیین بزرگتر (R^2) و خطای استاندارد کمتر (SE) جهت تحلیل داده‌های سینتیکی مورد استفاده قرار گرفتند. مطالعات متعددی کارایی مدل شبه مرتبه دوم و تابع توانی را در تحلیل داده‌های سینتیکی تأیید نموده‌اند (Olama et al., 2010; Hansen & Strawn, 2003). جدول ۳ پارامترهای سینتیکی مدل تابع توانی و مدل شبه مرتبه دوم را نشان می‌دهد.

در مدل تابع توانی مقدار ضرایب a و b شاخص تعیین کننده مقدار سرعت انجام واکنش به ویژه در ساعات اولیه انجام واکنش می‌باشند. ضریب b عددی مثبت و کوچک‌تر از ۱ است. پارامتر a غلظت اولیه عنصر رها شده را نشان می‌دهد. افزایش در مقدار ضریب a و کاهش مقدار ضریب b افزایش سرعت واکنش را نشان می‌دهد (Motaghian et al., 2016; Peng et al., 2018).

در رها سازی روی از LDH (3:1) و LDH (4:1) ضریب a در حضور اسید سیتریک به ترتیب ۱/۵۹ و ۵/۱۷ و در عدم حضور اسید سیتریک به ترتیب ۰/۴۶ و ۰/۶۹ بود (جدول ۳). علاوه بر این، مقدار ضریب b برای این دو نوع LDH در حضور اسید سیتریک به ترتیب ۰/۸۸ و ۰/۷۳ و در عدم حضور اسید سیتریک به ترتیب ۰/۲۶ و ۰/۲۷ تعیین شد (جدول ۳). بیشتر بودن ضریب a و کمتر بودن ضریب b برای LDH (4:1) نشان دهنده سرعت رها سازی بیشتر روی از LDH (4:1) در حضور اسید سیتریک در مقایسه با LDH (3:1) است (Motaghian et al., 2016). مقادیر ضریب a برای رها سازی روی از LDH (3:1) و LDH (4:1) در حضور اسید تارتاریک به ترتیب ۱/۰۲ و ۵/۲۲ و در عدم حضور اسید سیتریک به ترتیب ۰/۴۶ و ۰/۶۹ بود (جدول ۳). همچنین مقدار ضریب b برای آن‌ها به ترتیب ۰/۴۸ و ۰/۶۶ به دست آمد که در اینجا نیز ضریب a نشان می‌دهد در زمان‌های اولیه انجام واکنش در حضور اسید تارتاریک، رها سازی روی از LDH (3:1) در مقایسه با LDH (4:1) با سرعت بیشتری انجام شده است (Reyhanitabar & Gilkes, 2010).

در بررسی رها سازی منگنز از ساختارهای LDH (3:1) و LDH (4:1) در حضور اسید سیتریک، مقادیر ضریب a به ترتیب ۱/۰۲ و ۳/۳۳ به دست آمد (جدول ۳). همچنین مقادیر ضریب b برای این دو نوع LDH در حضور اسید سیتریک به ترتیب ۰/۹۷ و ۰/۸۱ و در عدم حضور اسید سیتریک ۰/۴۶ و ۰/۳۸ تعیین شد (جدول ۳). این نتایج نشان داد که سرعت واکنش رها سازی منگنز از ساختار LDH (4:1) در حضور اسید سیتریک در مقایسه با LDH (3:1) بیشتر است. از سوی دیگر، در حضور اسید تارتاریک، مقادیر ضریب a برای LDH

جدول ۳- پارامترهای مدل سینتیکی برازش داده شده بر داده‌های رهاسازی روی، منگنز و منیزیم در عدم حضور (Ctrl) و حضور اسید سیتریک (CA) و اسید تارتاریک (TA)

Table 4- The kinetic parameters release of Zn, Mn, and Mg from the LDH (3:1) and LDH (4:1) in the absence (Ctrl) and presence of Citric acid (CA) and Tartaric acid (TA)

			معادله شبه مرتبه دوم Pseudo second order model					معادله تابع توانی Power function model			
نوع اسید آلی Organic acid type	نوع LDH LDH Type		q _e (mg g ⁻¹)	K ₂ (g mg ⁻¹ min ⁻¹)	h (mg g ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	SE	a	b	R ²	SE
روی Zinc	LDH (3:1)	Ctrl	2.49	0.01	0.07	0.99	6.21	0.46	0.26	0.89	0.27
		CA	5656.70	3×10 ⁻⁸	0.84	0.98	28.42	1.59	0.88	0.99	27.84
		TA	292.52	2×10 ⁻⁵	1.42	0.98	12.69	10.20	0.48	0.99	4.17
	LDH (4:1)	Ctrl	55.30	0.02	0.28	0.99	0.17	0.69	0.27	0.88	0.53
		CA	2015.71	3.3×10 ⁻⁷	1.33	0.96	45.37	5.17	0.73	0.98	36.00
		TA	847.57	1.6×10 ⁻⁶	1.11	0.97	25.56	5.22	0.66	0.99	15.57
منگنز Manganese	LDH (3:1)	Ctrl	25.33	2×10 ⁻⁴	0.15	0.96	1.45	1.05	0.46	0.99	0.84
		CA	8471.53	1.3×10 ⁻⁸	0.94	0.98	29.08	1.02	0.97	0.98	29.79
		TA	260.75	2×10 ⁻⁵	1.59	0.97	14.05	11.87	0.44	0.99	2.74
	LDH (4:1)	Ctrl	67.98	1.61×10 ⁻⁴	0.74	0.98	3.28	5.30	0.38	0.98	2.85
		CA	4348.49	6.38×10 ⁻⁸	1.21	0.97	44.22	3.33	0.81	0.98	40.13
		TA	498.35	6.7×10 ⁻⁶	1.66	0.96	25.07	10.95	0.53	0.99	10.05
منیزیم Magnesium	LDH (3:1)	Ctrl	10.68	3.06×10 ⁻⁴	0.12	0.96	0.69	0.84	0.38	0.99	0.35
		CA	119.72	2.00×10 ⁻⁵	0.33	0.97	5.63	2.11	0.56	0.99	2.42
		TA	92.97	2.00×10 ⁻⁵	0.19	0.97	3.83	1.10	0.59	0.99	1.97
	LDH (4:1)	Ctrl	26.64	3.00×10 ⁻⁴	0.21	0.98	1.32	1.52	0.42	0.99	0.89
		CA	185.79	5.3×10 ⁻⁶	0.18	0.89	9.98	2.42	0.52	0.99	1.56
		TA	86.84	4.5×10 ⁻⁵	0.34	0.97	4.04	2.20	0.52	0.99	1.57

حضور اسید سیتریک افزایش ۹۱ درصدی و در حضور اسید تارتاریک افزایش ۸۹ درصدی را نشان داد (جدول ۳). در رهاسازی منیزیم از LDH (4:1) در حضور اسید سیتریک و اسید تارتاریک مقدار h به ترتیب برابر با ۰/۱۸ و ۰/۳۴ میلی گرم بر گرم در دقیقه به دست آمد. غلظت منیزیم تعادلی (q_e) در LDH (4:1) در حضور هر دو نوع اسید آلی سیتریک و تارتاریک در مقایسه با عدم حضور اسید سیتریک و اسید تارتاریک به ترتیب افزایش ۸۵ درصدی و ۶۹ درصدی داشت (جدول ۳).

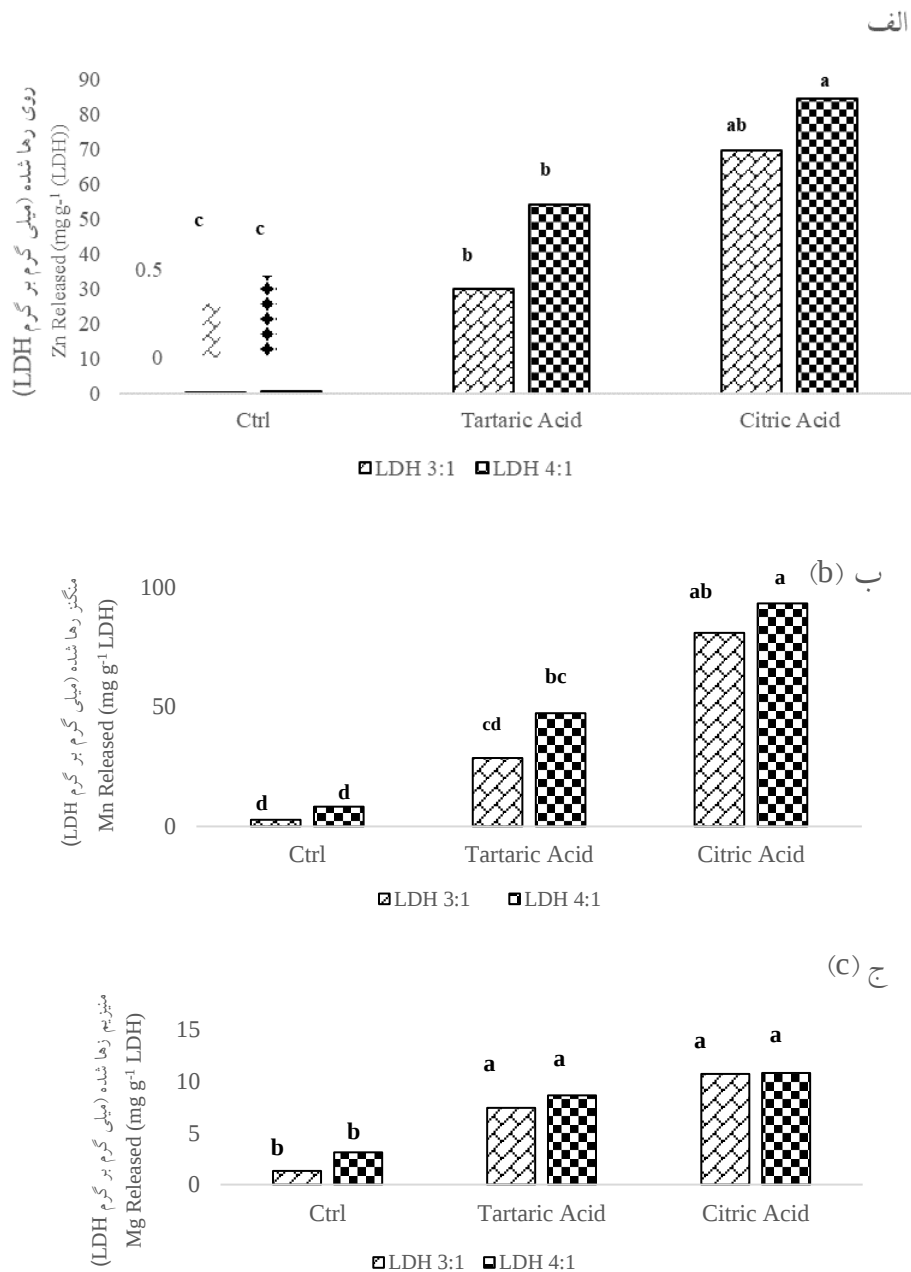
حضور اسیدهای آلی سیتریک و تارتاریک اثر قابل توجهی بر پارامترهای مدل شبه مرتبه دوم گذاشت. سرعت رهاسازی اولیه عناصر (h) و مقایسه آن در رهاسازی عناصر روی، منگنز و منیزیم در LDH (3:1) و LDH (4:1) با عدم حضور اسید سیتریک و اسید تارتاریک نشان داد که وجود اسیدهای آلی به دلیل تشکیل گونه‌های کمپلکس و افزایش گونه‌های محلول تأثیر قابل توجهی بر سرعت انحلال و رهاسازی عناصر داشته است. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که اسید سیتریک توانایی بیشتری در رهاسازی عناصر از LDHs در مقایسه با اسید تارتاریک داشت (شکل ۴). علت این امر می‌تواند بالاتر بودن ثابت پایداری کمپلکس سیترات با فلزات و تشکیل کمپلکس‌های چند دندانه سیترات با فلزات که حاصل داشتن سه گروه کربوکسیلیک باشد (Essington, 2015). به عبارت دیگر اسید تارتاریک به دلیل داشتن دو گروه کربوکسیلیک، تشکیل کمپلکس‌های دو دندانه و با

در رهاسازی منگنز از LDH (3:1) در حضور اسید سیتریک مقدار سرعت رهاسازی اولیه (h) برابر با ۰/۹۴ میلی گرم بر گرم در دقیقه، در حضور اسید تارتاریک این پارامتر برابر با ۱/۵۹ میلی گرم بر گرم در دقیقه و بدون حضور اسید سیتریک و اسید تارتاریک این پارامتر ۰/۱۵ میلی گرم بر گرم در دقیقه بود. علاوه بر این مقدار غلظت منگنز تعادلی محاسبه شده (q_e) در LDH (3:1) در حضور اسید سیتریک افزایش ۹۹ درصدی و در حضور اسید تارتاریک افزایش ۹۰ درصدی را در مقایسه با عدم حضور اسید سیتریک نشان داد (جدول ۳). در رهاسازی منگنز از LDH (4:1) در حضور اسید سیتریک و اسید تارتاریک مقدار h به ترتیب برابر با ۱/۲۱ و ۱/۶۶ میلی گرم بر گرم در دقیقه و در عدم حضور این دو اسید این پارامتر ۰/۷۴ میلی گرم بر گرم در دقیقه به دست آمد. غلظت منگنز تعادلی (q_e) در LDH (4:1) در حضور دو نوع اسید آلی سیتریک و تارتاریک در مقایسه با عدم حضور اسید سیتریک و اسید تارتاریک به ترتیب افزایش ۹۸ درصدی و ۸۶ درصدی داشت (جدول ۳).

در رهاسازی منیزیم از LDH (3:1) در حضور اسید سیتریک مقدار h برابر با ۰/۳۳ میلی گرم بر گرم در دقیقه، در حضور اسید تارتاریک این پارامتر برابر با ۰/۱۹ میلی گرم بر گرم در دقیقه و بدون حضور اسید سیتریک و اسید تارتاریک این پارامتر ۰/۱۲ میلی گرم بر گرم در دقیقه بود. علاوه بر این مقدار غلظت منیزیم تعادلی محاسبه شده (q_e) در LDH (3:1) در حضور اسید سیتریک در مقایسه با عدم

همکاران (2017)، شفیق و همکاران (Shafigh *et al.*, 2019)، لکشانی و همکاران (Lakshani *et al.*, 2023) و موحدی راد و حمیدپور (Movahedirad & Hamidpour, 2024) اشاره نمود.

ثابت پایداری کمپلکس کمتر می‌دهد (Essington, 2015). پژوهشگران متعددی در تحقیقات خود نتایج مشابهی گزارش نموده‌اند که از آن جمله می‌توان به نتایج آدلک و همکاران (Adeleke *et al.*,)



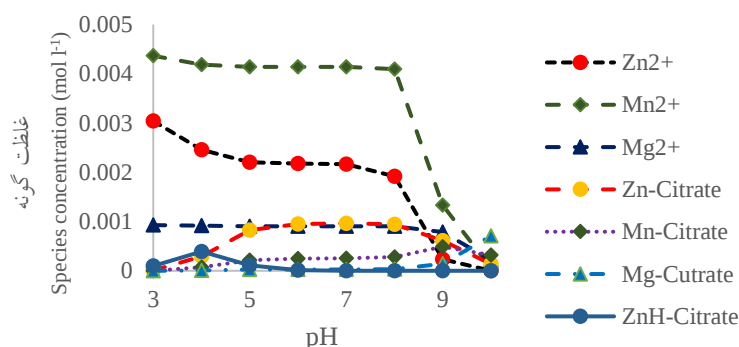
شکل ۵- رهاسازی روی (الف)، منگنز (ب) و منیزیم (ج) تعادلی از LDH (4:1) و LDH (3:1) در حضور و عدم حضور اسید سیتریک و اسید تارتاریک

(میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن می‌باشند)

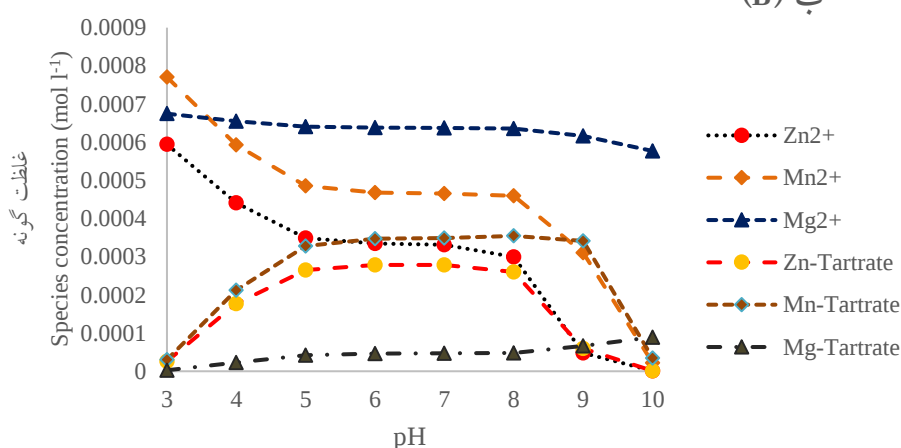
Figure 5- Zn (a), Mn (b) and Mg (c) released from LDH (3:1) and LDH (4:1) in the absence (Ctrl) or presence of the Citric acid and Tartaric acid

(Same letter within each column are not significantly different according to Duncan test at $p \leq 0.05$)

(A) الف



(B) ب



شکل ۶- گونه‌بندی عناصر روی، منگنز و منیزیم در حضور اسید سیتریک (الف) و اسید تارتاریک (ب)

Figure 6- Speciation of zinc, manganese and magnesium in the presence of Citric Acid (A) and Tartaric acid (B)

در (4:1) در مقایسه با LDH (3:1) بیشتر بود. علاوه بر این، مقدار رها سازی عناصر در حضور اسید سیتریک نسبت به اسید تارتاریک افزایش قابل توجهی داشت و این مقدار در مقایسه با عدم حضور اسید آلی اختلاف میانگین معنی‌داری را نشان داد.

ثبات و پایداری هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای به نوع کاتیون‌های دو ظرفیتی و سه ظرفیتی، نسبت آن‌ها و همچنین آنیون بین لایه‌ای بستگی دارد (Khan, Tahir & Khan, 2023). ونگ و همکاران (Wang et al., 2017) گزارش نموده‌اند که نسبت کاتیون‌های دو به سه ظرفیتی اثر قابل توجهی بر رها سازی لحظه‌ای عناصر دارند. تغییر نسبت مولی کاتیون‌ها منجر به تغییر پایداری LDH می‌گردد. با کاهش نسبت مولی کاتیون سه ظرفیتی و با افزایش نسبت کاتیون‌های دو ظرفیتی به سه ظرفیتی پایداری LDH کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از این پژوهش مشابیه نتایج اوررت و همکاران

در شکل ۵ مقایسه اثر نوع LDH بر رها سازی عناصر در زمان تعادل نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است مقدار رها سازی روی، منگنز و منیزیم از LDH (4:1) بیشتر از مقدار رها سازی این عناصر از LDH (3:1) است علاوه بر این نتایج نشان داد که LDH (3:1) و LDH (4:1) به ترتیب دارای سطح ویژه ۵/۵ و ۱۶/۵۴ متر مربع در گرم و به‌طور میانگین دارای قطر منافذ ۱/۹۲ و ۲/۵۵ نانومتر بودند و احتمالاً سطح ویژه بیشتر و میانگین قطر ذرات بزرگ‌تر در LDH (4:1) نسبت به LDH (3:1) منجر به افزایش دسترسی به سطوح LDH گردیده و همین امر رها سازی بیشتر عناصر از LDH (4:1) را به دنبال داشته است.

اگر چه از نظر آماری اختلاف معنی‌داری بین دو نوع LDH از نظر رها سازی روی و منگنز از در حضور اسید سیتریک و اسید تارتاریک وجود نداشت اما نتایج نشان داد که مقدار روی آزاد شده از LDH

رهاسازی عناصر از فاز جامد به فاز محلول افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد عواملی همچون نوع اسید آلی، زمان و نسبت کاتیون دو ظرفیتی به سه ظرفیتی در ساختار هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای در رهاسازی عناصر روی، منگنز و منیزیم از آن نقش مستقیم داشته و تشکیل گونه‌های کمپلکس اسیدهای آلی با عناصر موجود در ساختار LDHs سرعت رهاسازی عناصر را افزایش داده است که می‌توان این شرایط را شبیه محلول خاک در ریزوسفر و جذب عناصر توسط ریشه گیاهان فرض نمود. اگر چه نتایج این پژوهش نشان داد که می‌توان با ساخت هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای در نسبت‌های کاتیون دو ظرفیتی به سه ظرفیتی متفاوت، در مقدار و چگونگی آزادسازی عناصر کم‌مصرف تأثیر گذاشت ولی به‌منظور تأیید کارایی LDHs به‌عنوان یک کود کندرها برای تأمین عناصر کم مصرف مورد نیاز گیاه در خاک‌های آهکی انجام مطالعات گلخانه‌ای و خاکی نیاز است.

(Everaert et al., 2016) بود.

به‌منظور تفسیر اثر اسید سیتریک و اسید تارتاریک بر روند انحلال و آزادسازی عناصر از LDH (3:1) و LDH (4:1) از گونه‌بندی شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار Visual Minteq استفاده گردید که نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است.

همان‌گونه که در شکل ۶ مشخص است در حضور اسید سیتریک (شکل ۶ الف) و اسید تارتاریک (شکل ۶ ب) علاوه بر گونه‌های آزاد Zn^{2+} ، Mn^{2+} و Mg^{2+} در دامنه pH بین ۳ تا ۸، در محلول گونه‌های کمپلکس Zn-Citrate، Mn-Citrate، Zn-Citrate، Mg-Citrate، Tartrate، Mn-Tartrate و Mg-Tartrate نیز تشکیل شده‌اند. موحدی راد و حمیدپور (Movahedirad & Hamidpour, 2024) گزارش نمودند در حضور اسید مالیک تشکیل گونه‌های کمپلکس بدون بار عناصر روی، منگنز و منیزیم با آنیون ملات منجر به افزایش سرعت رهاسازی این عناصر می‌گردد. در حضور اسیدهای آلی تشکیل گونه‌های کمپلکس در مقایسه با شرایط بدون حضور اسیدهای آلی منجر به افزایش انحلال کانی و رهاسازی عناصر ساختاری آن می‌گردد. تشکیل گونه‌های کمپلکس منجر به کاهش جذب سطحی و کاهش رسوب کاتیون‌های آزاد شده گردیده و همچنین حضور این گونه‌ها در فاز محلول از غلظت گونه‌های آزاد کاسته و در نتیجه

References

- Adeleke, R., Nwangburuka, C., & Oboirien, B. (2017). Origins, roles and fate of organic acids in soils: A review. *South African Journal of Botany*, 108, 393-406. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.09.002>
- Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). *World Agriculture Towards 2030/2050: the 2012 revision*. ESA Work. Paper No 12-03. Global Perspective Studies Team FAO Agricultural Development Economics Division.
- Baranmotlagh, M., & Gholami, M. (2013). Time-dependent zinc desorption in some calcareous soils of Iran. *Pedosphere*, 23(2), 185-193. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60006-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60006-5)
- Benicio, L.P.F., Constantino, V.R.L., Pinto, F.G., Vergutz, 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>
- Benicio, L.P.F., Eulalio, D., Guimaraes, L.D.M., Pinto, F.G., Costa, L.M.D., & Tronto, J. (2018). Layered double hydroxides as hosting matrices for storage and slow release of phosphate analyzed by stirred-flow method. *Materials Research*, 21(6), e20171004. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-1004>
- Bernardo, M.P., Moreira, F.K., & Ribeiro, C. (2017). Synthesis and characterization of eco-friendly Ca-Al-LDH loaded with phosphate for agricultural applications. *Applied Clay Science*, 137, 143-150. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.12.022>
- Cardoso, L.P., Celis, R., Cornejo, J., & Valim, J.B. (2006). Layered double hydroxides as supports for the slow release of acid herbicides. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(16), 5968-5975. <https://doi.org/10.1021/jf061026y>
- Dalla Nora, F.B., Lima, V.V., Oliveira, M.L., Hosseini-Bandegharai, A., de Lima Burgo, T.A., Meili, L., & Dotto, G.L. (2020). Adsorptive potential of Zn-Al and Mg-Fe layered double hydroxides for the removal of 2-nitrophenol from aqueous solutions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 103913. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103913>
- Essington, M.E. (2015). *Second edition Soil and Water Chemistry: an Integrative Approach*. CRC press.
- Evans Jr, A. (1991). Influence of low molecular weight organic acids on zinc distribution within micronutrient pools and zinc uptake by wheat. *Journal of Plant Nutrition*, 14(12), 1307-1318. <https://doi.org/10.1080/01904169109364287>
- Everaert, M., Warrinnier, R., Baken, S., Gustafsson, J.P., De Vos, D., & Smolders, E. (2016). Phosphate-exchanged Mg-Al layered double hydroxides: A new slow release phosphate fertilizer. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(8), 4280-4287. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b00778>

12. Everaet, M., Andelkovic, I.B., Smolders, E., Degryse, F., Baird, R., & McLaughlin, M.J. (2023). Layered transition metal molybdates as new slow-release micronutrient fertilizer matrices for Zn, Cu, and Mo. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(20), 7859-7867. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00498>
13. Figueredo Benicio, L.P., Eulalio, D., Guimaraes, L.D.M., Pinto, F.G., Da Costac, L.M., & Tronto, J. (2018). Layered double hydroxides as hosting matrices for storage and slow release of phosphate. *Materials Research-Ibero-American Journal of Materials*, 21(6). <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-1004>
14. Hansen, J.C., & Strawn, D.G. (2003). Kinetics of phosphorus release from manure-amended alkaline soil. *Soil Science*, 168(12), 869-879. <https://doi.org/10.1097/01.ss.0000106408.84926.8f>
15. Halajnia, A., Oustan, S., Najafi, N., Khataee, A.R., & Lakzian, A. (2013). Adsorption-desorption characteristics of nitrate, phosphate and sulfate on Mg-Al layered double hydroxide. *Applied Clay Science*, 80, 305-312. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.05.002>
16. Hassanzadeh, A., Hamidpour, M., Abbaszadeh Dahaji, P., Akhgar, A., & Kariman, K. (2024). Maximizing the efficiency of layered double hydroxides as a slow-release phosphate fertilizer: A study on the impact of plant growth-promoting rhizobacteria. *Applied Clay Science*, 262, 107620. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2024.107620>
17. 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). <https://doi.org/10.1134/s1061933x20060058>
18. 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. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.032>
19. Imran, A., López-Rayó, S., Magid, J., & Hansen, H.C.B. (2016). Dissolution kinetics of pyroaurite-type layered double hydroxide doped with Zn: perspectives for pH controlled micronutrient release. *Applied Clay Science*, 123, 56-63. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.12.016>
20. Kameliya, J., Verma, A., Dutta, P., Arora, C., Vyas, S., & Varma, R.S. (2023). Layered double hydroxide materials: A Review on their preparation characterization and applications. *Inorganics*, 11(121), 1-22. <https://doi.org/10.3390/inorganics11030121>
21. Khan, A.A., Tahir, M., & Khan, N. (2023). LDH-based nanomaterials for photocatalytic applications: A comprehensive review on the role of bi/trivalent cations, anions, morphology, defect engineering, memory effect, and heterojunction formation. *Journal of Energy Chemistry*, 84, 242-276. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.04.049>
22. Klemkaite, K., Prosycevas, I., Taraskevicius, R., Khinsky, A., & Kareiva, A. (2011). Synthesis and characterization of layered double hydroxides with different cations (Mg, Co, Ni, Al), decomposition and reformation of mixed metal oxides to layered structures. *Open Chemistry*, 9(2), 275-282. <https://doi.org/10.2478/s11532-011-0007-9>
23. Koilraj, P., & Kannan, S. (2010). Phosphate uptake behavior of ZnAlZr ternary layered double hydroxides through surface precipitation. *Journal of Colloid and Interface Science*, 341(2), 289-297. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.09.059>
24. Lakshani, N., Wijerathne, H.S., Sandaruwan, C., Kottegodā, N., & Karunarathne, V. (2023). Release kinetic models and release mechanisms of controlled-release and slow-release fertilizers. *ACS Agricultural Science & Technology*, 3(11), 939-956. <https://doi.org/10.1021/acsagascitech.3c00152>
25. Li, F., & Duan, X. (2005). Applications of layered double hydroxides. *Struct Bond*, 119, 193-223.
26. Lozano-Lunar, A., Otero, R., Álvarez, J.I., Jiménez, J.R., & Fernández-Rodríguez, J.M. (2023). Application of layer double hydroxide in cementitious matrices for the improvement of the double barrier technique in the immobilisation of lead waste. *Applied Clay Science*, 238, 106938. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.106938>
27. López-Rayó, S., Imran, A., Bruun Hansen, H.C., Schjoerring, J.K., & 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. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02604>
28. Meili, L., Lins, P.V., Zanta, C.L.P.S., Soletti, J.I., Ribeiro, L.M.O., Dornelas, C.B., & Vieira, M.G.A. (2019). MgAl-LDH/Biochar composites for methylene blue removal by adsorption. *Applied Clay Science*, 168, 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.10.012>
29. Mishra, G., Dash, B., & Pandey, S. (2018). Layered double hydroxides: A brief review from fundamentals to application as evolving biomaterials. *Applied Clay Science*, 153, 172-186. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.12.021>
30. Motaghian, H.R., Hosseinpour, A., & Kiani, S. (2016). Zinc and copper release kinetics in a calcareous soil amended with manure and vermicompost. *Journal of Water and Soil*, 30(2), 581-593. (In Persian with English abstract).
31. Motaghian, H.R., & Hosseinpour, A.R. (2014). Impact of sewage sludge application on zinc desorption kinetics in some calcareous soils. *Environmental Earth Sciences*, 71, 4647-4655. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2855-4>

32. Movahedirad, Z., & Hamidpour, M. (2024). Release of zinc, manganese and magnesium from Mg-Zn-Mn-Al-LDH: Effect of malic acid and divalent to trivalent cation ratios in mineral structure. *Water and Soil*, 38(4), 495-509. (In Persian with English abstract).
33. Nunes, V.L.N., Mulvaney, R.L., Cantarutti, R.B., Pinto, F.G., & Tronto, J. (2020). Improving nitrate fertilization by encapsulating Zn-Al layered double hydroxides in alginate beads. *Nitrogen*, 1, 125-136. <https://doi.org/10.3390/nitrogen1020011>
34. Olama, V., Ronaghi, A., Karimian, N., Ghasemi-Fasaei, R., Yasrebi, J., & Tavajjoh, M. (2010). Copper release behavior in two calcareous soils amended with three organic materials. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41(20), 2448-2458. <https://doi.org/10.1080/00103624.2010.511376>
35. Peng, L., Liu, P., Feng, X., Wang, Z., Cheng, T., Liang, Y., & Shi, Z. (2018). Kinetics of heavy metal adsorption and desorption in soil: Developing a unified model based on chemical speciation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 224, 282-300. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.01.014>
36. Reyhanitabar, A., & Gilkes, R.J. (2010). Kinetics of DTPA extraction of zinc from calcareous soils. *Geoderma*, 154(3-4), 289-293. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.10.016>
37. Rojas, R., Barriga, C., De Pauli, C.P., & Avena, M.J. (2010). Influence of carbonate intercalation in the surface-charging behavior of Zn-Cr layered double hydroxides. *Materials Chemistry and Physics*, 119(1-2), 303-308. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2009.09.001>
38. Roy, A.S., de Beer, M., Pillai, S.K., & Ray, S.S. (2023). Application of layered double hydroxides as a slow-release phosphate source: A Comparison of hydroponic and soil systems. *ACS Omega*, 8(17), 15017-15030. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07862>
39. 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>
40. Songkhum, P., Wuttikhun, T., Chanlek, N., Khemthong, P., & Laohasurayotin, 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>
41. Sparks, D.L. (1986). Kinetics of ionic reactions in clay minerals and soils. *Advances in Agronomy*, 38, 231-266. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60677-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60677-X)
42. Thevenot, F., Szymanski, R., & Chaumette, P. (1989). Preparation and characterization of Al-rich Zn-Al hydrotalcite-like compounds. *Clays and Clay Minerals*, 37(5), 396-402. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1989.0370502>
43. Wang, W., & Lu, Y., (2018). Analysis of the mean absolute error (MAE) and the root mean square error (RMSE) in assessing rounding model. *IOP Conf. Series: Materials Science Engineering*, 324, 012049. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/324/1/012049>
44. Wang, X., Lin, Y., Su, Y., Zhang, B., Li, C., Wang, H., & Wang, L. (2017). Design and synthesis of ternary-component layered double hydroxides for high-performance supercapacitors: understanding the role of trivalent metal ions. *Electrochimica Acta*, 225, 263-271. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.12.160>
45. Zabiszak, M., Nowak, M., Taras-Goslinska, K., Kaczmarek, M.T., Hnatejko, Z., & Jastrzab, R. (2018). Carboxyl groups of citric acid in the process of complex formation with bivalent and trivalent metal ions in biological systems. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 182, 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2018.01.017>
46. Zhang, Sh., Gao, N., Shen, T., Yang, Y., Gao, B., Li, Y.C., & Wan, Y. (2019 a). One-step synthesis of superhydrophobic and multifunctional nano copper-modified bio-polyurethane for controlled-release fertilizers with multilayer air shields. new insight of improvement mechanism. *Journal of Materials Chemistry*, 7, 9503-9509. <https://doi.org/10.1039/C9TA00632J>
47. Zhang, Y., Xu, H., & Lu, S. (2021). Preparation and application of layered double hydroxide nanosheets. *Royal Society of Chemistry*, 11, 24254-24281. <https://doi.org/10.1039/d1ra03289e>

Growth, Physiological and Sucrose Indicators of Sugarcane Varieties to Silicon Application under Salinity Conditions

A. Ansori Savari¹, M. Nabipour^{1*}, M. Farzaneh¹

1- Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

(* - Corresponding Author Email: m.nabipour@scu.ac.ir)

Received: 08-12-2024	How to cite this article:
Revised: 02-02-2025	Ansori Savari, A., Nabipour, M., & Farzaneh, M. (2025). Growth, physiological and sucrose indicators of sugarcane varieties to silicon application under salinity conditions.
Accepted: 04-02-2025	<i>Journal of Water and Soil</i> , 39(1), 91-104. (In Persian with English abstract).
Available Online: 04-02-2025	https://doi.org/10.22067/jsw.2025.91154.1456

Introduction

The high water demand of sugarcane in arid and semi-arid regions, combined with declining rainfall, has led to increased use of drainage water as a strategy for sustainable production management. It has been estimated that 20% of all cultivated land and 33% of irrigated agricultural land are affected by high salinity. Salinity stress poses two main threats to plants: ionic toxicity and osmotic stress. Ionic toxicity occurs when there is a significant accumulation of Na^+ in plant leaves under saline conditions. This disrupts the balance of water and ions, damages organelle structures, inhibits growth, and can ultimately lead to plant death. Some studies have shown that ion toxicity caused by Na^+ can inflict more irreversible damage on plants than osmotic stress. Silicon application (Si) showed improved photosynthetic efficiency, growth, and yield compared to plants under salt stress. Previous studies have also shown that silicon treatments can increase salinity tolerance in various plants, including wheat, corn, rice, and canola. However, the extent of silicon-mediated benefits under salinity can vary greatly between species and is largely dependent on the plant's capacity for element uptake dictated by its genetic makeup. There is limited information regarding the use of drainage water in sugarcane irrigation management in arid and semi-arid regions, as well as the potential for improving salinity stress through silicon application. Therefore, this study was conducted to evaluate the effects of Si on two sugarcane varieties irrigated with salt water.

Materials and Methods

The pot experiment was conducted in a greenhouse under natural light at the agricultural site of Sugarcane Dehkhoda Company in Khuzestan Province, Iran, in 2021-2022. The temperature and humidity percentages are indicated in Figure 1. This study was carried out as split-split plot design based on randomized Block design (RBD). The main plot factors included three levels of salinity: control of $1.4 \pm 0.2 \text{ dS.m}^{-1}$ (S0) from the river water source, salinity stress of $4.1 \pm 0.2 \text{ dS.m}^{-1}$ (S1), and salinity stress of $8.2 \pm 0.2 \text{ dS.m}^{-1}$ (S2) from the drain water source, with a sub-factor of variety treatment (CP73-21 and CP69-1062). The silicon application timing was also considered as a sub-factor, with four levels: Si0, non-silicon application (Control); Si1, one month before salinity stress; Si2, during salinity stress; and Si3, after 30 days of salt stress, silicon was applied. The sugarcane sprouts are grown in polyethylene pots 100 cm in height and 45 cm in width. Each pot contained 100 kg of soil. A total of 216 experimental units were used during the experiment. The experimental pots were filled with a mixture of field soil and sugarcane filter cake in a 3:1 ratio. The results of the chemical analysis of field soil and filter cake are presented in Table 2. The salt stress was applied 113 days after growing cuttings and continued until harvest.



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.91154.1456>

Results and Discussion

The results of the first year showed that salt stress significantly reduced the height of the sugarcane stalk. Also, at the salinity stress levels of 4.1 and 8.2 dS/m, the SPAD index decreased by 22.3% and 27%, respectively. Additionally, leaf sheath moisture dropped by 6.4% and 11.8%, electrolyte leakage increased by 11% and 22.7%, and the photosynthesis rate decreased by 28% and 42% compared to the control treatment. The optimal time to apply silicone fertilizer was one month prior to the onset of stress, which resulted in a significant improvement in all studied traits at salinity stress levels of 1.4 dS/m (control) and 4.1 dS/m. Furthermore, the qualitative analysis of sugarcane syrup in the second year revealed a decrease in sucrose percentage (14.1% and 33.5%, respectively) and white sugar content (12.6% and 40.9%, respectively) at salinity stress levels of 4.1 and 8.2 dS/m. The photosynthesis rate of sugarcane leaves decreased by 28.3 to 41.8 percent under salt stress levels of 4.1 and 8.2 dS, respectively. The CP69-1062 variety exhibited a better response compared to the CP73-21 variety, showing relative superiority in all growth and physiological traits studied.

Conclusion

The results also indicated that the optimal time to apply silicon fertilizer to sugarcane plants was one month before the onset of stress, resulting in a significant improvement in all studied traits. The application of silicon fertilizer led to a 1 percent increase in sucrose, 3.7 percent increase in syrup purity, and 3 percent increase in white sugar yield compared to no application.

Acknowledgments

We would like to express our special thanks to the Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz for the financial support (Grant number SCU.AA98.336).

Keywords: Drainage water, Stem height, Sucrose percentage, Stress

واکنش شاخص‌های رشدی، فیزیولوژیک و ساکارز واریته‌های مختلف نیشکر به کاربرد سیلیکون در شرایط شوری آب

علی انصوری سواری^۱ - مجید نبی پور^{۱*} - معصومه فرزانه^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۶

چکیده

شوری یکی از عوامل تنش‌زا است که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر رشد و عملکرد گیاهان تأثیر می‌گذارد. به‌منظور ارزیابی تأثیر سیلیکون بر رشد و عملکرد نیشکر تحت تنش شوری حاصل از زه‌آب زراعت نیشکر، آزمایشی در دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ و ۱۴۰۲-۱۴۰۱ به‌صورت گلدانی در مجموعه کشاورزی شرکت کشت و صنعت نیشکر دهخدا در قالب آزمایش اسپلیت اسپلیت پلات و طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتور اصلی آبیاری در سه سطح شوری ۱/۴ (شاهد)، ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر، دو واریته CP73-21 و CP69-1062 و زمان کاربرد سیلیکون در چهار سطح شاهد (بدون کاربرد سیلیکون)، یک‌ماه قبل از تنش، همزمان با تنش و یک‌ماه بعد از اعمال تنش شوری به‌عنوان فاکتور فرعی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد، تنش شوری ارتفاع ساقه نیشکر را به‌شدت کاهش داد. با آبیاری در سطح شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب شاخص سبزیگی ۲۲/۳ و ۲۷ درصد، رطوبت نسبی برگ ۶/۴ و ۱۱/۸ درصد، نشت الکترولیت ۱۱ و ۲۲/۷ درصد، سرعت فتوسنتز ۲۸ و ۴۲ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت. همچنین کاهش ۱۴/۱ و ۳۳/۵ درصدی ساکارز و ۲۰/۵ و ۴۲/۸ درصدی شکر سفید به‌ترتیب در آبیاری با سطوح شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر، برای واریته CP69-1062 نسبت به تیمار شاهد بدون تنش مشاهده شد. واریته CP69-1062 در همه صفات رشدی و فیزیولوژیکی توانایی بهتری نسبت به واریته CP73-21 از خود نشان داد. بهترین زمان کاربرد کود سیلیکون یک‌ماه قبل از اعمال تنش بود که سبب افزایش معنی‌دار همه صفات مورد مطالعه در تیمارهای آبیاری شده با سطوح شوری ۱/۴ و ۴/۱ دسی‌زیمنس بر متر نسبت به عدم کاربرد سیلیکون گردید. با کاربرد سیلیکون درصدهای ساکارز، خلوص و شکر سفید به‌ترتیب ۱، ۳/۷ و ۳ درصد در واریته CP69-1062 افزایش یافت. نتایج این تحقیق نشان داد استفاده از زه‌آب با شوری بالا از طریق ایجاد تنش یونی و اسمزی سبب کاهش ارتفاع ساقه نیشکر می‌گردد. لذا در سال‌هایی که منابع آبی کاهش پیدا می‌یابد می‌توان با اختلاط زه‌آب‌ها با شوری پایین و آب رودخانه به تولید پایدار نیشکر ادامه داد. همچنین به‌منظور کاهش شرایط تنش شوری می‌توان با تغذیه زود هنگام نیشکر با کود سیلیکون از آسیب‌های تنش کاست.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع ساقه، تنش، درصد ساکارز، زه‌آب

مقدمه

عملکرد بالاتری است (FAO, 2024)، و یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی کشور محسوب می‌شود. گرمایش جهانی تأثیر زیادی بر شاخص‌های اقلیمی از جمله تغییر الگوی بارندگی، افزایش موج‌های گرمایی و سرمای، سیل، خشکسالی و سایر تنش‌های غیر زنده گذاشته است (Parmesan et al., 2022). منابع آبی و بارندگی در استان خوزستان نیز از این تغییرات بی‌نصیب نبوده و در برخی سال‌ها به شدت

کل تولید صنعت نیشکر ایران در سال ۲۰۲۳ بالغ بر ۸/۵۹ میلیون تن بوده (با متوسط عملکرد ۹۴/۲۷ تن در هکتار) به‌عنوان یکی از مجموعه‌های نیشکر کوچک در جهان شناخته می‌شود که در مقایسه با متوسط عملکرد جهانی (۷۴/۹۵ تن در هکتار)، دارای ۲۵/۷ درصد

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

(*) - نویسنده مسئول: (Email: m.nabipour@scu.ac.ir)

خارج از کشور صورت گرفته است. امکان کاربرد زه آبهای حاصل از کشت، جهت آبیاری این گیاه، محدود و نادر مطالعه شده است. همچنین کاربرد سیلیکون و تأثیر آن بر نیشکر تحت تنش شوری در داخل کشور به طور گسترده بررسی نشده است.

مواد و روش‌ها

به منظور ارزیابی تأثیر سیلیکون بر رشد و کیفیت شربت نیشکر تحت تنش شوری آب، آزمایشی دو ساله طی سال‌های ۱۴۰۱-۱۴۰۰ و ۱۴۰۲-۱۴۰۱ به صورت گلدانی در گلخانه سایت کشاورزی شرکت کشت و صنعت نیشکر دهخدا اجرا شد. آزمایش سال اول به صورت اسپلیت اسپلیت پلات در قالب بلوک کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتور اصلی آبیاری در سه سطح شاهد با شوری $(\pm 0/2)$ و $1/4$ دسی‌زیمنس بر متر از آب رودخانه (S0) و شوری‌های $(\pm 0/2)$ و $4/1$ دسی‌زیمنس بر متر (به ترتیب S1 و S2) از منبع آب زه‌آب، فاکتور فرعی تیمار وارپته در دو سطح با نام‌های CP69- و CP73-21 و 1062 و زمان کاربرد سیلیکون در چهار سطح شاهد بدون کاربرد سیلیکون (Si0)، یک‌ماه قبل از تنش (Si1)، همزمان با تنش (Si2) و یک‌ماه بعد از اعمال تنش شوری (Si3) به عنوان فاکتور فرعی اجرا در نظر گرفته شد. آزمایش سال دوم به صورت اسپلیت پلات در قالب بلوک کامل تصادفی بر روی وارپته CP69-1062 که براساس نتایج آزمایش سال اول، متحمل‌تر به تنش شوری تعیین شد، در سه تکرار انجام شد. فاکتور اصلی شامل آبیاری در سه سطح شوری مشابه سال اول و فاکتور فرعی زمان کاربرد سیلیکون در دو سطح عدم کاربرد (شاهد) و زمان مؤثرتر در آزمایش اول، یک‌ماه قبل از تنش (Si1) بود. از لوله پلی اتیلن آبیاری از جنس پلی اتیلن نرم با قطر $45/7$ سانتی‌متر و به طول ۱۲۰ سانتی‌متر به عنوان گلدان (وزن خاک گلدان ۸۶ کیلوگرم) استفاده شد. گلدان‌ها با خاک زراعی و فیلتریک نیشکر^۲ به نسبت ۳ به ۱ پر شدند. قلمه‌ها به طول ۳ تا ۴ سانتی‌متر بریده شده و در لیوان‌های یک‌بار مصرف جوانه‌دار شده و سپس به گلدان‌های اصلی منتقل شدند (۵ بوته در گلدان و پس از استقرار به ۳ بوته تنک شدند). کود سیلیکونی از نوع پودری (SiO_2) تولید شرکت آریا شیمی حاوی ۷۰ درصد عنصر سیلیسیم به مقدار توصیه شده ۴ کیلوگرم در هکتار به کار برده شد. کود سیلیکون در سه زمان ۵ برگی، ۷ برگی و ۹ برگی نیشکر مطابق با یک ماه قبل، هم‌زمان و یک ماه بعد از اعمال تنش شوری همراه با آبیاری استفاده شد.

کاهش یافته است. از آنجایی که نیشکر یک محصول با بازده زیست توده بالا است که به مقدار قابل توجهی آب نیاز دارد، لذا مدیریت آبیاری مؤثر برای تولید موفق و پایدار نیشکر ضروری است. با این حال، آب حاصل از زه‌آبی زمین‌های زیر کشت نیشکر خوزستان در صورت مدیریت مقادیر Na^+ و Cl^- می‌تواند منبع بسیار خوبی برای جبران کم آبی در برخی از ماه‌های سال باشد. یکی دیگر از عواملی که در رابطه با تنش شوری باید در نظر گرفته شود، تأثیر آن بر ترکیبات مغذی نیشکر است. تحت تنش شوری، گیاهان غلظت بالای پتاسیم و غلظت کم سدیم را در سیتوزول حفظ می‌کنند (Zhu, 2003). توانایی حفظ نسبت سیتوزولی K^+/Na^+ باعث افزایش تحمل به شوری در گیاهان می‌شود (Chao et al., 2013). نیشکر به عنوان یک گیاه گلیکوفیت نسبتاً به تنش شوری حساس است (Patade et al., 2008) و مشخص شده است که استفاده از آب شور اثرات نامطلوبی بر عملکرد و کیفیت آن دارد. تحقیقات نشان داده است که عملکرد گیاه نیشکر تحت تنش شوری در هدایت الکتریکی ۷ دسی‌زیمنس بر متر تا نزدیک به ۵۰ درصد کاهش می‌یابد (Gomathi & Thandapani, 2005). از نظر کیفیت، هر یک دسی‌زیمنس بر متر افزایش در شوری خاک (آستانه $1/7$ دسی‌زیمنس بر متر) باعث کاهش حدود $0/6$ درصد در عدد بریکس^۱ و درصد ساکارز عصاره نیشکر می‌گردد (Lingle & Wiegand, 1997). کاربرد برخی عناصر تغذیه‌ای مانند کلسیم (Al-Rubaiee, 2024)، پتاسیم (Che et al., 2022)، منگنز (Rao et al., 2015)، سیلیکون (Bocharnikova et al., 2023)، اسید سالیسیلیک (Hoque et al., 2020) و ... نشان داده است که می‌تواند مقاومت در برابر تنش شوری را در گیاهان افزایش دهد. نقش سیلیکون در تحمل به تنش خشکی و شوری، و اثرات مفید سیلیسیم بر رشد گیاه در شرایط کمبود مواد مغذی (Hernandez-Apaolaza, 2014) و یا سایر تنش‌های غیر زنده (Guntzer et al., 2011) گزارش شده است. سیلیکون در افزایش تحمل نیشکر به تنش شوری با بهبود پاسخ‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی توانایی بسزایی دارد. این ماده اثرات نامطلوب شوری را با تنظیم هوموستاز یونی، به ویژه با کاهش جذب سدیم و تقویت جذب پتاسیم و سایر مواد مغذی ضروری، که برای حفظ عملکردهای سلولی در شرایط تنش حیاتی است، نقش دارد (Abbasi et al., 2023; Ebeed et al., 2024).

با توجه به افزایش تقاضا برای آبیاری در تولید نیشکر، مطالعه بیشتر در مورد اثرات تنش شوری بر نیشکر در ایران به طور فزاینده‌ای ضروری می‌باشد. بررسی‌های تنش شوری بر گیاه نیشکر عمدتاً به صورت آزمایشگاهی و با استفاده از نمک NaCl به طور گسترده در داخل و

فسفر، نیتروژن و کلسیم می‌باشد و یکی از راه حل‌های جایگزینی کودهای شیمیایی در تغذیه مزارع نیشکر است.

۱- بریکس (Brix)، درصد مواد جامد حل شده در شربت نیشکر می‌باشد.

۲- فیلتریک نیشکر (Sugarcane filter cake): این ماده باقیمانده از تصفیه شیره استخراج شده از آسیاب‌ها بوده که حاوی مواد آلی و مواد معدنی مهم مانند

جدول ۱- نتایج آنالیز خصوصیات فیزیوشیمیایی خاک، فیلترکیک و آب زه‌آب مورد مطالعه

Table 1- Results of the analysis of the physicochemical properties of the soil, filter cake, and drainage water studied

پارامترها Parameters	Soil Texture	EC (dS.m ⁻¹) ^۱	pH (H ₂ O)	OM (%)	OC (%)	N (%)	Total P (%)	Total K (%)	Na ⁺ (%)	Si (mg/kg)	Cl ⁻ (Meq/L)	Ca ⁺² (Meq/L)	Mg ⁺² (Meq/L)
خاک Soil	Silty loam	2.32	7.6	1.88	1.09	0.07	12.49	492	14.5	1.05	21.54	19.2	14.5 2
زه‌آب Drainage water	-	8.49	7.85	-	-	-	-	-	66.5	-	53.58	14.36	10.1 4
فیلترکیک نیشکر Sugarcane filter cake	-	1.28	7.8	38.5 3	22.4	1.42	1.68	0.44	0.22	-	-	-	-

$$RP\% = \left(\frac{EC1-EC0}{EC2-EC0} \right) \times 100 \quad (2)$$

اندازه‌گیری سرعت فتوسنتز با استفاده از دستگاه IRGA (Biosynthetic LTD, Hoddoson, UK LCA 4) انجام شد. در این روش پس از تنظیم دستگاه، حدود ساعت ۹ صبح تا نهایت ۱۲ ظهر قسمت وسطی برگ بالغ در داخل محفظه اندازه‌گیری قرار داده و در یک محدوده مشخص از تابش فعال فتوسنتزی (۱۳۰۰ تا ۱۵۰۰ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه) بعد از ۶۰ ثانیه عدد مربوطه برای ۳ برگ از دو بوته انتخابی ثبت و میانگین آن‌ها محاسبه می‌شود (Gehring, 2013).

در انتهای فصل رشد (۲۸۸ روز بعد از کشت در گلدان‌های اصلی)، تعداد سه ساقه به‌طور تصادفی برداشت و پس از سرزنی و حذف پوشال، عصاره با آسیاب سه غلطکی استخراج شد. درصد ساکارز عصاره (Pol) استخراج شده با دستگاه پلاریمتر (Schmidt, Canada W2 Brix) با دستگاه رفاکتر (Schmidt, Canada-SCHMIDT, Dur) تعیین شد (Chen & Chou, 1993; KG, 2009). درصد ساکارز واقعی (Main Pol) با توجه به درصد قرائت شده و ضرایب جدول مربوطه محاسبه شد. درجه خلوص (pyt) با استفاده از رابطه (۳) تعیین گردید که در آن، pol درصد ساکارز و brix درصد بریکس است.

$$pyt (\%) = \frac{Pol}{Brix} \quad (3)$$

برای محاسبه درصد شکر سفید یا تصفیه شده (RS) از رابطه (۴) محاسبه شد (KG, 2009). برای این منظور ابتدا بایستی درصد شکر زرد را محاسبه کنیم. شکر زرد از دو رابطه نسبت کیفیت (۴) و عملکرد (۵) محاسبه می‌شود.

$$Quality Ratio = \frac{79.3126 \times (pyt-1)}{(pyt-1)-35.5} \div Main Pol \quad (4)$$

$$Yield = \frac{100}{Quality Ratio} \quad (5)$$

$$RS = Yield \times 0.83 \quad (6)$$

برای جلوگیری از شستشوی کود سیلیکون و دسترسی بهتر ریشه گیاه به این کود، مقدار بکار رفته در هر زمان در دو قسط (دو نوبت آبیاری به فاصله ۳ روز) اعمال گردید. کود پایه براساس آزمون خاک و نیاز کوددهی، اوره ۷ گرم (در ۳ قسط) و سوپر فسفات به مقدار ۵ گرم در هر گلدان به‌کار برده شد. در برای تهیه محلول‌های شوری از یک مخزن ۵ هزار لیتری برای نگهداری آب رودخانه و دو مخزن ۲ هزار لیتری برای آب زه‌آب استفاده شد. تهیه سطوح شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر با اختلاط نسبت‌های متفاوت از آب زه‌آب و آب رودخانه حاصل شدند. در تاریخ ۲۰ خردادماه زمانی که مرحله پنجه‌زنی پایان یافته و گیاه در مرحله اولیه رشد سریع بود (۷-۸ برگ)، تیمار تنش شوری بصورت پلکانی اجرا شد. مشخصات خصوصیات فیزیوشیمیایی خاک زراعی، فیلترکیک و آب زه‌آب در جدول ۱ ارائه شده است.

به‌منظور اندازه‌گیری ارتفاع ساقه گیاه نیشکر یک بوته از هر تیمار به‌عنوان نماینده مشخص و ارتفاع آن هر هفته مطابق سیستم کراب لاگی شرکت‌های توسعه نیشکر ثبت گردید. شاخص سبزیگی برگ، با استفاده از دستگاه کلروفیل متر (SPAD-502, Minolta, Japan) از آخرین برگ‌های کاملاً توسعه یافته انجام شد. برای تعیین درصد رطوبت نسبی برگ با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید. که RWC درصد رطوبت نسبی برگ، FW وزن تازه برگ (گرم)، SW وزن اشباع شده برگ (گرم) و DW وزن خشک برگ (گرم) می‌باشد (Ritchie et al., 1990).

$$RWC (\%) = \frac{(FW-DW)}{(SW-DW)} \times 100 \quad (1)$$

درصد نشت الکترولیت (RP) با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردید که در آن EC۰ هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) قرائت شده اولیه ۳ تا ۵ ثانیه بعد از قرار دادن قطعات ۱ تا ۲ سانتی‌متری برگ در آب مقطر، EC۱ هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) قرائت شده نمونه بعد از ۲۴ ساعت نگهداری در دمای ۴ درجه و EC۲ هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) نمونه‌ها بعد از ۱۵ دقیقه اتوکلاو و خنک شدن در دمای اتاق می‌باشد (Zhao et al., 1992).

تجزیه آماری

تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام گرفت و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد. برازش معادلات و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Sigma Plot انجام شد. داده‌های تغییرات مقدار ارتفاع تجمعی نیشکر طبق رابطه (۷) با تابع سه پارامتره گاوس برازش داده شد. در این رابطه Y ، مقدار سرعت رشد هفتگی نیشکر (سانتی‌متر در هفته) در هر زمان (x) از فصل رشد می‌باشد، b ، شیب خط و x_0 زمانی است که گیاه به حداکثر مقدار رشد در هفته می‌رسد.

$$Y = ae^{[-0.5(b(x-x_0)^2)]} \quad (7)$$

نتایج و بحث

ارتفاع ساقه نیشکر تحت تأثیر تنش شوری، واریته و کاربرد سیلیکون

نتایج تجزیه واریانس صفات در سال اول نشان داد که تیمارهای

تنش شوری، واریته و کاربرد سیلیکون و برهمکنش کاربرد سیلیکون و تنش شوری در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری بر ارتفاع ساقه نیشکر داشتند (جدول ۲).

نتایج سال اول نشان داد ارتفاع ساقه واریته CP69-1062 به‌طور معنی‌داری از واریته CP73-21 بلندتر بود. در هر دو واریته به‌طور میانگین با افزایش شوری تا سطح ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر ارتفاع ساقه نسبت به شاهد به‌ترتیب ۳۴/۶ و ۶۵/۵ درصد کاهش نشان داد. برهمکنش کاربرد سیلیکون و تنش شوری نشان داد کاربرد سیلیکون باعث افزایش ارتفاع ساقه در تمام سطوح شوری شد و این افزایش ارتفاع ساقه با مصرف زودهنگام سیلیکون (Si1) به‌طور معنی‌داری بیشتر بود به‌طوری‌که نسبت به شاهد در هر سه سطح شوری، بیشترین ارتفاع ساقه مربوط به زمانی بود که سیلیکون یک‌ماه قبل از تنش (Si1) مصرف شد و ارتفاع ساقه در کاربرد همزمان سیلیکون و اعمال تنش شوری (Si2) در گروه آماری بعدی قرار گرفتند. با کاربرد دیرهنگام سیلیکون از تأثیر آن بر ارتفاع ساقه کاسته شد و فقط در سطح شوری ۴/۱ دسی‌زیمنس بر متر افزایش ارتفاع ساقه نسبت به شاهد مربوطه‌اش معنی‌دار گردید (شکل ۱).

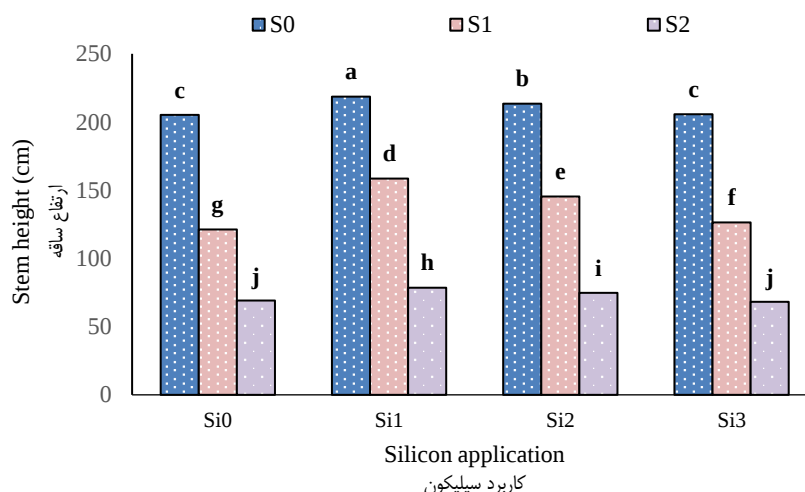
جدول ۲- نتایج سال اول تجزیه واریانس (میانگین مربعات) ارتفاع و برخی صفات فیزیولوژیکی دو واریته نیشکر تحت تنش شوری و کاربرد سیلیکون

Table 2- Results of the first year of analysis (mean of squares) of variance of height and some physiological traits of two sugarcane varieties under salt stress and silicon application

منابع تغییرات Sources of variance	df	ارتفاع ساقه Stam height	شاخص سبزیگی SPAD	سرعت فتوسنتز Photosynthesis rate	رطوبت غلاف برگ Leaf-sheath moisture	نشت الکترولیت Electrolyte leakage
بلوک Block	2	0.09	0.23	13.40	4.81	1.46
تنش شوری (S) Salinity stress	2	210.45**	943.83**	3249**	506.2**	2689**
خطای (S) Error (S)	4	0.02	2.84	12.08	0.55	0.18
واریته (V) Variety	1	0.08 ^{ns}	18.50**	256.8**	18.80**	97.53**
S×V	2	0.009 ^{ns}	0.22 ^{ns}	32.52**	2.73 ^{ns}	1.34 ^{ns}
خطای (V) Error (V)	6	0.010	0.46	4.03	0.45	0.65
سیلیکون (Si) Silicon	3	2.90**	5.53*	5.70*	18.15**	12.65**
S×Si	6	0.42**	0.59 ^{ns}	0.29 ^{ns}	2.76*	0.88 ^{ns}
V×Si	3	0.006 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.69 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.50 ^{ns}
S×V×Si	6	0.019 ^{ns}	0.21 ^{ns}	1.69 ^{ns}	0.51 ^{ns}	0.66 ^{ns}
خطای کل Total error	36	0.029	0.23	1.52	0.95	0.75
درصد ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)		2.99	1.33	2.95	1.22	2.38

^{ns}، ** و * به‌ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

^{ns}، ** and *: non-significant, significant at $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$, respectively.



شکل ۱- برهمکنش کاربرد سیلیکون و تنش شوری بر ارتفاع ساقه نیشکر

نکته: عدم کاربرد سیلیکون (Si0)، کاربرد سیلیکون یک ماه قبل از تنش (Si1)، کاربرد سیلیکون همزمان با تنش شوری (Si2) و کاربرد سیلیکون یک ماه بعد از تنش شوری (Si3)، میانگین‌هایی که حروف مشترک دارند در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

Figure 1- Interaction effect of silicon application and salinity stress on sugarcane stem height

Notes. No application of silicon (Si0), application of silicon one month before salinity stress (Si1), sametime with salinity stress (Si2) and one month after salinity stress (Si3). The means with the same letter in the column have no differences ($P < 0.05$)

هفته کمتر و با شیب ملایمتری به حداکثر ارتفاع ساقه در هر دو شرایط تنش و عدم تنش رسید (جدول ۳).

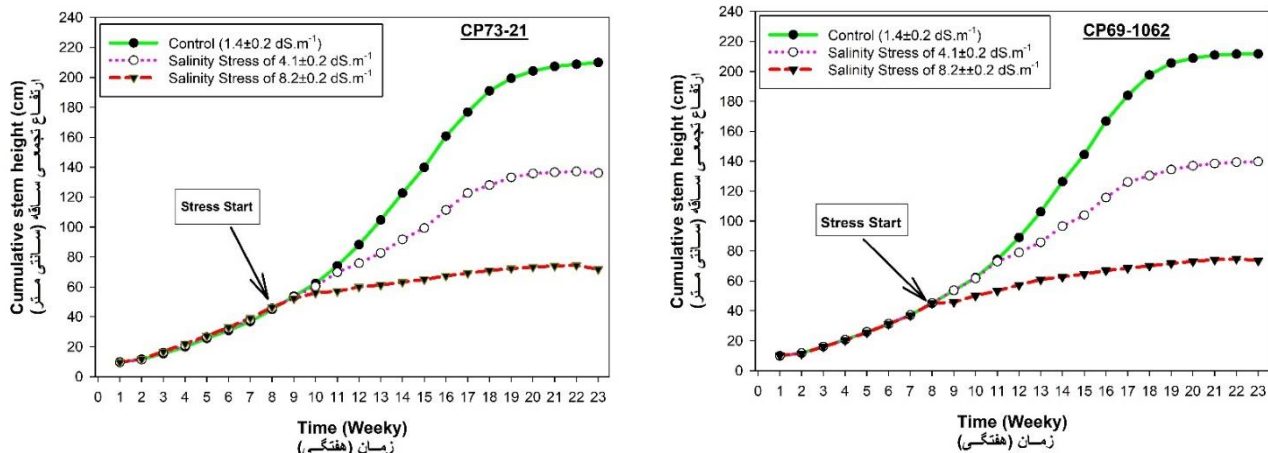
تنش شوری باعث ایجاد تنش اسمزی و کاهش توانایی ریشه نیشکر در جذب آب می‌شود و حتی در شرایط شدید شوری باعث ایجاد سمیت یونی Na^+ و Cl^- خواهد شد. کاهش توانایی جذب آب باعث کاهش RWC شده و گیاه فشار تورگر خود را از دست داده و موجب خشکی فیزیولوژیکی می‌گردد. علاوه بر این، هدایت روزنه‌ای کاهش یافته و بسته شدن روزنه باعث کاهش فتوسنتز و ارتفاع ساقه خواهد شد. ارتفاع ساقه نیشکر حساسترین صفت نسبت به تنش شوری می‌باشد (Zhao et al., 2020).

صفات فیزیولوژیک نیشکر تحت تأثیر تنش شوری، واریته و کاربرد سیلیکون

شاخص سبزی‌نگی: با توجه به نتایج تجزیه واریانس سال اول، تیمارهای تنش شوری و واریته در سطح یک درصد و کاربرد سیلیکون در سطح احتمال پنج درصد تأثیر معنی‌داری بر شاخص سبزی‌نگی برگ نیشکر داشتند (جدول ۲). با افزایش سطح شوری، کاهش ۲۲/۳ و ۲۷ درصدی میزان سبزی‌نگی به ترتیب در سطح شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر نسبت به شاهد مشاهده شد (جدول ۴). شاخص سبزی‌نگی در واریته CP69-1062 با اختلاف معنی‌داری، ۲/۷ درصد بیشتر از واریته CP73-021 بود.

مطالعه‌ای که بر روی ذرت انجام شده، نشان داد که گیاهان تیمار شده با سیلیکون باعث بهبود کارایی فتوسنتز و افزایش ویژگی‌های رشدی و عملکرد در مقایسه با گیاهان عدم کاربرد سیلیکون تحت تنش شوری شدند (Khan et al., 2017). علاوه بر ذرت، تأثیر کاربرد سیلیکون در بهبود تحمل به شوری در سایر گیاهان مانند برنج (Flam-Shepherd et al., 2018) و کلزا (Hashemi et al., 2010) نیز گزارش شده است. مزایای کاربرد سیلیکون تحت تنش شوری تا حد زیادی از گونه‌ای به گونه دیگر متفاوت است و بیشتر به خصوصیات ژنتیکی گیاه برای جذب عنصر بستگی دارد (Dhiman et al., 2021). کاربرد سیلیکون گیاهان را در برابر آسیب غشایی ناشی از نمک محافظت می‌کند (Aras et al., 2020). کود سیلیکونی همچنین به غشای سلولی گیاهانی که تحت تنش شوری رشد می‌کنند، استحکام می‌بخشد (Zhang et al., 2018).

داده‌های ارتفاع ساقه نیشکر در طی فصل براساس معادله سه پارامتری گاوس برازش شد که به‌طور معنی‌داری نشان داد در بین سه سطح تنش شوری، بیشترین ارتفاع ساقه (۲۱۵ سانتی‌متر) در تیمار شاهد برای واریته CP69-1062 و کمترین ارتفاع ساقه (۷۴/۱۱ سانتی‌متر) در تیمار تنش شوری ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر برای واریته CP73-21 حاصل شد. افزایش سطح تنش شوری از ۴/۱ دسی‌زیمنس بر متر در تیمار شاهد به ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر سبب کاهش ۶۵/۴ و ۶۵ درصدی به ترتیب در ارتفاع ساقه واریته CP73-21 و CP69-1062 شد (شکل ۲). واریته CP69-1062 نسبت به واریته CP73-21 در تعداد



شکل ۲- روند تغییرات ارتفاع هفتگی نیشکر در طی فصل رشد (هر نقطه در هر سطح شوری میانگینی از ۴ سطح کاربرد سیلیکون در ۳ تکرار) در دو واریته نیشکر CP73-21 و CP69-1062
(نقاط داده‌های اندازه‌گیری و خطوط حاصل از برازش تابع هستند)

Figure 2- The trend of weekly height changes of sugarcane during the growing season (each point at each salinity level is an average of 4 levels of silicon loading in 3 replicates) in two sugarcane varieties CP73-21 and CP69-1062
(The data points measured and the lines resulting are function fits)

جدول ۳- ضرایب حاصل از برازش معادله سه پارامتری گاوس به داده‌های ارتفاع نیشکر در طی فصل رشد تحت تنش شوری واریته‌های CP69-1062 و CP73-21

Table 3- Fitted three-parameter Gaussian equation coefficients to sugarcane height data during the growing season under salinity stress of CP73-21 and CP69-1062 varieties

سطوح شوری Salinity levels	a (حداکثر ارتفاع (سانتی‌متر)) a (Maximum height (cm))	b (شیب خط) b (Line slope)	x ₀ (تعداد هفته رسیدن به حداکثر ارتفاع) x ₀ (Time to reach maximum height)	R ²	سطح احتمال Probability level
CP73-21					
Control (1.4±0.2 dS.m ⁻¹)	211.740 (2.117)	7.907 (0.182)	22.089 (0.265)	0.997	0.0001
S1 (4.1±0.2 dS.m ⁻¹)	138.078 (1.090)	9.266 (0.172)	22.025 (0.249)	0.998	0.0001
S2 (8.2±0.2 dS.m ⁻¹)	74.117 (1.302)	10.163 (0.533)	19.063 (0.574)	0.969	0.0001
CP69-1062					
Control (1.4 dS.m ⁻¹)	215.00 (2.359)	7.639 (0.203)	21.709 (0.284)	0.996	0.0001
S1 (4.1±0.2 dS.m ⁻¹)	140.125 (0.742)	9.038 (0.118)	21.655 (0.165)	0.999	0.0001
S2 (8.2±0.2 dS.m ⁻¹)	74.290 (0.969)	9.855 (0.374)	19.679 (0.432)	0.986	0.0001

اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده خطای استاندارد می‌باشد.

Standard errors are in parentheses

رنگدانه‌های فتوسنتزی، راندمان تولید محصول نیشکر را کاهش می‌دهد (Sharma et al., 2021).

محتوای رطوبت نسبی برگ: تنش شوری، واریته و کاربرد سیلیکون و برهمکنش تنش شوری و کاربرد سیلیکون تأثیر معنی‌داری بر محتوای رطوبت نسبی برگ نیشکر داشتند (جدول ۲). واریته CP69-1062 توانست رطوبت نسبی غلاف بالاتری (۱/۲ درصد) در مقایسه با واریته CP73-21 در خود حفظ نماید (جدول ۴). در سطوح شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر رطوبت نسبی برگ به ترتیب ۶/۴ و ۱۰/۸ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. محتوای نسبی آب برگ معیار مهمی برای ارزیابی توانایی مقابله با تنش شوری است (Abdelaal et

در میان تیمارهای کاربرد سیلیکون، کاربرد زودهنگام سیلیکون در یک‌ماه قبل از تنش شوری و بعد از آن کاربرد همزمان با تنش شوری به‌طور معنی‌داری شاخص سبزیگی بالاتری نسبت به شاهد (۳۵/۶ درصد) داشتند (جدول ۴).

کاربرد سیلیکون یک‌ماه بعد از تنش شوری سبب افزایش معنی‌دار شاخص سبزیگی نسبت به شاهد نگردید. کاهش سبزیگی نیشکر تحت تنش شوری تا ۵۶ درصد در مقایسه با تیمارهای بدون تنش گزارش شده است. لذا در شرایط تنش شوری، محتوای کلروفیل نیشکر در اثر فوتواکسیداسیون رنگدانه‌های فتوسنتزی و تخریب کلروفیل، کاهش می‌یابد. هرگونه وقفه در پتانسیل فتوسنتزی ناشی از کاهش

محتوای کلروفیل و محتوای نسبی آب در گیاهان تیمار شده گردید (Tuna et al., 2008). در برنج، رسوب سیلیکون در بافت‌های ریشه باعث کاهش جریان ورود یون‌های سدیم شد (Gong et al., 2006). **نشت الکترولیت برگ:** تأثیر تنش شوری، واریته و کاربرد سیلیکون بر نشت الکترولیت برگ نیشکر معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج حاصل از مقایسه میانگین نشان داد در سطح تنش شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر نشت الکترولیت برگ به ترتیب از ۳۴/۳ درصد در شاهد به ۴۰/۲ و ۴۴/۴ درصد افزایش یافت (جدول ۴). واریته CP73-21 مقدار ۲/۳ درصد نشت الکترولیت بیشتری نسبت به واریته CP69-1062 نشان داد. افزایش نشت الکترولیت برگ واریته CP73-21 نشان‌دهنده پایداری کم آن نسبت به شوری می‌باشد. نشت الکترولیت برگ معیار مهمی برای ارزیابی توانایی مقابله با تنش شوری است (Abdelaal et al., 2019). بین زمان‌های کاربرد کود سیلیکون از لحاظ آماری نیز اختلاف معنی‌داری مشاهده شد (جدول ۴). به‌طوری‌که بیشترین مقدار نشت الکترولیت برگ نیشکر مربوط به تیمار شاهد به میزان ۳۷/۲ درصد بود و با مصرف سیلیکون در یک‌ماه قبل از تنش و هم‌زمان با تنش این درصد به ۳۵/۵ و ۳۵/۶ درصد کاهش یافت که این کاهش نسبت به شاهد معنی‌دار بود. تخریب غشای پلاسمایی در اثر افزایش نشت الکترولیت با افزایش تنش شوری گزارش شده است (Norozi et al., 2019).

al., 2019). کاهش پتانسیل آبی ریزوسفر بدلیل تجمع بیش از حد نمک، موجب کاهش محتوی رطوبت نسبی می‌شود و توانایی جذب آب از خاک توسط گیاه کاهش می‌یابد (Ashraf et al., 2017). گیاه ذرت رشد یافته در سطوح بالای تنش شوری سبب کاهش قابل توجهی در محتوای نسبی آب برگ (۳۴-۴۰ درصد) می‌شود (Ali et al., 2021; Shah et al., 2021). گزارش شده است که تنش شوری در مراحل اولیه رشد نیشکر موجب کاهش رطوبت نسبی برگ خواهد شد اما در مراحل رشد سریع نیشکر تأثیر معنی‌داری ندارد (Brindha et al., 2019).

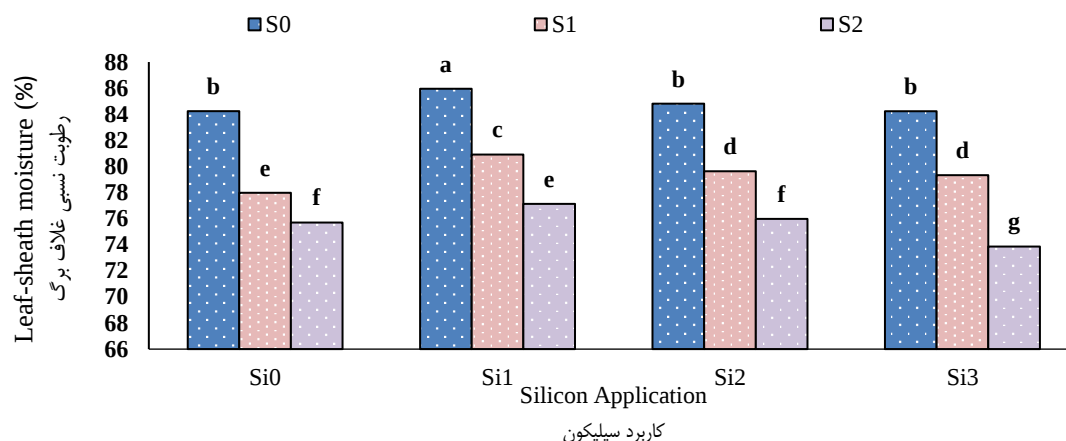
کاربرد سیلیکون سبب بهبود درصد رطوبت نسبی برگ نیشکر نسبت به شاهد شد. بیشترین رطوبت نسبی برگ نیشکر در همه سطوح شوری مربوط به تیمار یک‌ماه قبل از تنش بود. تأخیر در کاربرد سیلیکون، سبب شد که از تأثیر این بهبود دهنده در حفظ رطوبت نسبی برگ خصوصاً در سطوح شوری بالاتر کاسته شود (شکل ۳). برخی مطالعات نشان دادند که سیلیکون به‌عنوان مانعی مکانیکی از جذب Na^+ توسط ریشه‌ها شده و از کاهش پتانسیل اسمزی جلوگیری می‌نماید، لذا سبب بهبود روابط آبی گیاه می‌شود. کاربرد سیلیکون، جذب سدیم و انتقال از ریشه به اندام هوایی را تحت تنش شوری در نیشکر تا حد زیادی مهار کرد (Ashraf et al., 2009). سیلیسیم اثرات مضر تنش شوری را بر ارقام گندم دوروم و نان کاهش داده و سبب بهبود

جدول ۴- نتایج میانگین اثرات ساده سال اول صفات فیزیولوژیکی دو واریته نیشکر تحت تنش شوری و کاربرد سیلیکون
Table 4- Results of the average simple effects of the first year of physiological traits of two sugarcane varieties under salt stress and silicon application

تیمارها Treatments	ارتفاع ساقه Stem height (cm)	سبزی‌نگی SPAD	سرعت فتوسنتز Photosynthetic rate ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{M}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$)	رطوبت غلاف Sheath moisture (%)	نشت الکترولیت Electrolyte leakage (%)
تنش شوری (Salinity stress)					
Control ($1.4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	210.7 ^a	43.4 ^a	54.5 ^a	84.8 ^a	34.3 ^c
$4.1 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$	137.8 ^b	33.7 ^b	39.1 ^b	79.4 ^b	40.2 ^b
$8.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$	72.6 ^c	31.7 ^c	31.7 ^c	75.6 ^c	44.4 ^a
واریته‌ها (Varieties)					
CP73-21	139.2 ^b	35.8 ^b	39.9 ^a	79.4 ^b	37.5 ^a
CP69-1062	141.6 ^a	36.8 ^a	43.6 ^b	80.4 ^a	35.1 ^b
سیلیکون (Silicon)					
Si0	131.8 ^c	35.6 ^b	41.0 ^b	79.3 ^c	37.2 ^a
Si1	151.9 ^a	36.8 ^a	42.3 ^a	81.3 ^a	35.5 ^b
Si2	144.5 ^b	36.6 ^a	42.0 ^a	80.1 ^b	35.6 ^b
Si3	133.4 ^c	36.1 ^{ab}	41.7 ^{ab}	79.1 ^c	36.7 ^a

عدم کاربرد سیلیکون (Si0)، کاربرد سیلیکون یک ماه قبل از تنش شوری (Si1)، کاربرد سیلیکون هم‌زمان با تنش شوری (Si2) و کاربرد سیلیکون یک‌ماه بعد از تنش شوری (Si3). میانگین‌هایی که حروف مشترک دارند در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

No application of silicon (Si0), application of silicon one month before salinity stress (Si1), sametime with salinity stress (Si2) and one month after salinity stress (Si3). The means with the same letter in the column have no differences ($P < 0.05$)



شکل ۳- برهمکنش تنش شوری و کاربرد سیلیکون بر رطوبت نسبی غلاف برگ نیشکر

Figure 3- Interaction between salinity and silicon application on sugarcane leaf sheath moisture

دسی‌زیمنس بر متر را بین ۴/۲ تا ۸/۹ درصد گزارش داده‌اند (Dhansu et al., 2022).

درصد خلوص: بر اساس نتایج تجزیه واریانس، تنش شوری و کاربرد سیلیکون و برهمکنش تنش شوری و کاربرد سیلیکون اثر معنی‌داری بر درصد خلوص شربت ساقه نیشکر داشتند (جدول ۵). در شرایط عدم تنش شوری، تفاوت معنی‌داری بین درصد خلوص در کاربرد و عدم کاربرد سیلیکون مشاهده نشد ولی کاربرد سیلیکون، افزایش معنی‌دار درصد خلوص شربت در شرایط تنش نسبت به تیمارهای عدم کاربرد سیلیکون را در پی داشت (شکل ۴).

درصد بریکس: با توجه به نتایج، درصد بریکس به‌صورت معنی‌داری تحت تأثیر تنش شوری و کاربرد سیلیکون قرار گرفت (جدول ۵). با توجه به معنی‌دار شدن برهمکنش، تأثیر کاربرد سیلیکون بر درصد بریکس بسته به سطح شوری آب متغیر بود. به عبارتی در تیمار شاهد (عدم وجود تنش شوری) کاربرد سیلیکون تأثیر معنی‌داری بر درصد بریکس نشان نداد. اما در زمان وجود تنش شوری، کاربرد کود سیلیکون سبب کاهش معنی‌دار درصد بریکس نسبت به شاهد گردید (شکل ۴).

درصد شکر سفید: درصد شکر سفید یا شکر تصفیه شده، صفتی قابل اطمینان برای ارزیابی کیفیت شربت ساقه نیشکر می‌باشد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که تنش شوری و کاربرد سیلیکون تأثیر معنی‌داری بر درصد شکر سفید نیشکر داشت (جدول ۵). درصد شکر سفید با افزایش شوری آب از سطح شاهد (۱/۴ دسی‌زیمنس بر متر) به شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب از ۱۰/۷۵ به ۸/۵۵ و ۶/۱۴ درصد کاهش یافت. در هر سطح شوری، کاربرد سیلیکون افزایش درصد شکر سفید (۸/۶۱ درصد) نسبت به عدم کاربرد سیلیکون (۸/۳۵ درصد) را در برداشت داشت.

کوددهی سیلیکون به گیاهان آنها را در برابر آسیب‌های ناشی از شوری محافظت می‌کند (Aras et al., 2020). کود سیلیکونی همچنین به غشای سلولی گیاهانی که تحت تنش شوری رشد کرده، استحکام می‌بخشد. افزودن کود سیلیکون در خاک‌های شور سبب کاهش نشت الکترولیتی شده و از این رو نشت یونی غشای پلاسمای و کاهش پراکسیداسیون لیپیدی جلوگیری می‌کند (Heile et al., 2021). همچنین گزارش شده، کاربرد سیلیکون پراکسیداسیون لیپیدها، نشت الکترولیت و محتوای H_2O_2 را در گیاهان نخود تحت تنش شوری کاهش داد (Shahid et al., 2015). این نشان‌دهنده این است که سیلیکون به‌طور بالقوه دارای اثر ضد تنش شوری بواسطه تثبیت غشای پلاسمایی است (Yan et al., 2021).

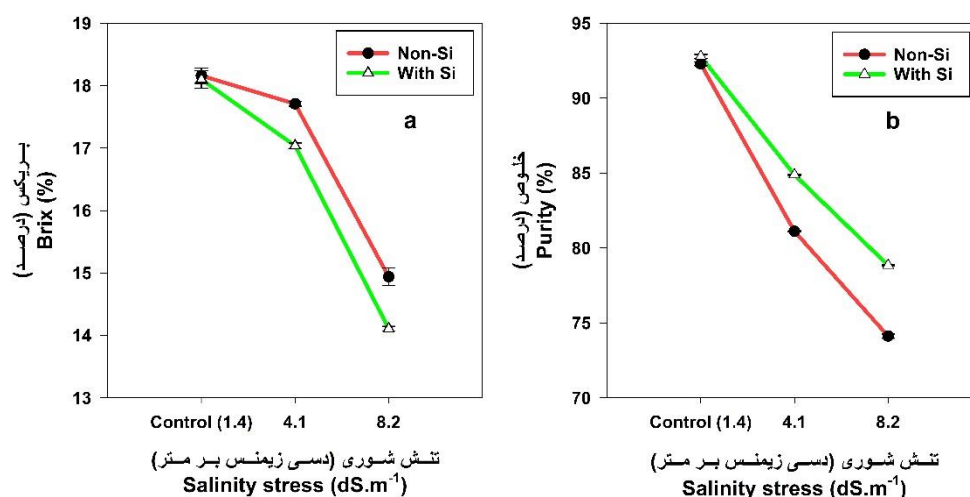
تأثیر کاربرد سیلیکون بر صفات کیفی شربت ساقه نیشکر تحت شرایط شوری آب

درصد ساکارز: نتایج تجزیه واریانس نشان داد تنش شوری تأثیر معنی‌داری بر درصد ساکارز عصاره نیشکر داشت (جدول ۵). بیشترین درصد ساکارز به میزان ۱۶/۸ درصد در تیمار شاهد با شوری ۱/۴ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شد. تنش شوری تأثیر منفی بر کیفیت شربت گذاشت به‌طوری‌که درصد ساکارز عصاره به ۱۴/۴ و ۱۱/۲ درصد به‌ترتیب در سطوح شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر کاهش یافت. این کاهش درصد ساکارز از تنش یونی ناشی از تجمع بیش از حد عناصر سمی Na^+ و Cl^- در سلول‌های پارانشیم ساقه و کاهش ظرفیت قندسازی بود. تنش شوری در نیشکر سبب کاهش کیفیت شربت نیشکر می‌گردد (Brindha et al., 2019). برخی گزارشات کاهش درصد ساکارز عصاره ساقه نیشکر تحت شرایط تنش سطوح شوری ۴ تا ۱۲

جدول ۵- نتایج سال دوم تجزیه واریانس و برش‌دهی برهمکنش تنش شوری و کاربرد سیلیکون بر فاکتورهای کیفی شربت نیشکر
Table 5- Results of the second year of variance analysis and segmentation of the interaction of salinity stress and silicon application on quality factors of sugarcane stalk juice

منابع تغییرات Sources of variance	df	درصد ساکارز Pol%	درصد بریکس Brix%	درصد خلوص Purity%	درصد شکر سفید RS%
بلوک Block	2	0.016	0.077	2.11	0.014
تنش شوری (S) Salinity stress	2	47.09**	21.69**	39.12**	31.83**
خطای شوری Salinity error	4	0.018	0.079	2.25	0.015
کاربرد سیلیکون Si S×Si	3	0.073ns	1.23**	40.59**	0.31**
خطای کل S×Si	6	0.018ns	0.24*	7.37*	0.047ns
خطای کل Total error	18	0.022	0.045	1.19	0.009
درصد ضریب تغییرات CV(%)		1.05	1.27	1.30	1.13

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



شکل ۴- برهمکنش تنش شوری و کاربرد سیلیکون بر درصد بریکس (a) و درصد پیوریته (b) شربت نیشکر

Figure 4- Interaction of salinity stress and silicon application on Brix percentage (a) and purity percentage (b) of sugarcane juice

منجر به کاهش کیفی شربت ساقه و استحصال شکر سفید خواهد شد. تجمع یون‌های با غلظت بالا در سلول‌های ذخیره‌ای ساقه ممکن است بر بیان ژن اینورتاز تأثیر بگذارد (Hussain et al., 2003). افزودن پتاسیم و سیلیکون باعث افزایش درصد استخراج و بهبود کیفیت شربت ساقه در نیشکر می‌گردد که می‌تواند به اثرات آنها بر فعالیت آنزیم مربوط باشد (Munns et al., 2006). پتاسیم و سیلیکون فعالیت‌های اینورتاز، پراکسیداز، پلی فنل اکسیداز، فسفاتاز و آدینوزین تری فسفاتاز را در نیشکر تنظیم می‌کنند. کاهش فعالیت فسفاتاز منبع بیشتری از پیش سازهای ضروری با انرژی بالا مورد نیاز برای رشد بهینه نیشکر و تولید قند را فراهم می‌کند (Savant et al., 1999).

تنش شوری از چند طریق درصد شکر تصفیه شده را کاهش می‌دهد. در مرحله نخست، تنش شوری از طریق کاهش سطح برگ و منبع فتوسنتز، رشد نیشکر را کاهش داده و در نتیجه از میزان ساقه و زیست‌توده کاسته می‌شود، که این امر سبب کاهش شکر سفید تولیدی در واحد سطح خواهد شد (Lingle & Wiegand, 1997). تنش شوری با ایجاد تنش اسمزی، گیاه را تحت تنش خشکی فیزیولوژیکی قرار داده و میزان عصاره قابل استحصال (ضریب استحصال ساقه) را بشدت کاهش می‌دهد. علاوه بر این، تنش شوری سبب بروز تنش یونی در نیشکر می‌شود. در این شرایط راه کار دفاعی گیاه نیشکر انباشت یون‌های مضر Na^+ و Cl^- در سلول‌های ذخیره‌ای ساقه می‌باشد، که

همچنین گزارش شده است که پتاسیم، سنتز قند را در نیشکر با تنظیم فعالیت آنزیم‌های مختلف و با انتقال مؤثر قندها به اندام‌های مخزن بهبود می‌بخشد (Gomathi & Thandapani, 2005).

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد استفاده از زه‌آب با شوری بالا از طریق ایجاد تنش یونی و اسمزی سبب کاهش ارتفاع ساقه نیشکر می‌گردد. لذا در سال‌هایی که منابع آبی کاهش می‌یابد، می‌توان با اختلاط زه‌آب‌ها با شوری پایین و آب رودخانه با تقبل کاهش در رشد و ارتفاع ساقه نیشکر به تولید پایدار نیشکر ادامه داد. با توجه به حساسیت نیشکر به شوری، افزایش تنش شوری سبب تشدید کاهش ارتفاع ساقه نیشکر بین ۳۴/۸ تا ۶۵ درصد به‌ترتیب در سطوح شوری ۴/۱ تا ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر در هر دو واریته مورد مطالعه شد. همچنین رطوبت نسبی برگ نیشکر در سطح شوری ۴/۱ دسی‌زیمنس ۶/۴ درصد و سطح شوری ۸/۲ دسی‌زیمنس مقدار رطوبت نسبی را ۱۰/۸ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش داد. نشست الکترولیت برگ نیز با افزایش سطح شوری نیز به‌شدت افزایش یافت (به‌ترتیب ۱۷/۲ و ۲۹/۶ درصد). واکنش سرعت فتوسنتز برگ نیشکر تحت تأثیر تنش شوری بین ۲۸/۳ تا ۴۱/۸ درصد به‌ترتیب در سطوح تنش ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس کاهش یافت. واریته CP69-1062 عکس‌العمل بهتری نسبت به واریته CP73-21

از خود نشان داد و تقریباً در همه صفات رشدی و فیزیولوژی مورد مطالعه برتری نسبی از خود نشان داد. همچنین نتایج نشان دادند بهترین زمان کاربرد کود سیلیکون برای گیاه نیشکر، یک‌ماه قبل از اعمال تنش بود که سبب افزایش معنی‌دار همه صفات مورد مطالعه گردید. کاربرد کود سیلیکون توانست ۱ درصد ساکارز، ۳/۷ درصد خلوص شربت و ۳ درصد استحصال شکر سفید را نسبت به عدم کاربرد بهبود دهد.

در نهایت پیشنهاد می‌گردد با توجه به توانایی واریته CP69-1062 در مقابله با تنش شوری، به‌منظور کاهش ریسک و حفظ پایداری تولید شرکت توسعه نیشکر خوزستان در شرایط تغییرات اقلیمی فعلی، این واریته توسعه داده شود. همچنین در شرایط کاهش آورد آب رودخانه و بروز تنش کم‌آبی و خشکسالی، امکان اختلاط آب زه‌آب با آب رودخانه به منظور آبیاری گیاه نیشکر با تقبل کاهش محدودی در رشد گیاه اقدام گردد. در این شرایط می‌توان با استفاده از آب‌های زه‌آبی با درجه شوری پایین‌تر بشرط کاربرد زود هنگام کود سیلیکون از اثرات ناشی از شوری کاست و پایداری تولید نیشکر را بهبود بخشید.

سپاسگزاری

بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز به خاطر تقبل هزینه‌های این تحقیق قدردانی می‌گردد (شماره پژوهانه SCU.AA1401.336).

References

- Abbasi, R.P., Rafiq, K., Fatima, S., Javed, M.T., Azeem, M., & Akram, M.S. (2023). In vitro silicon supplementation enhanced acclimatisation and growth of sugarcane (*Saccharum officinarum*) via improved antioxidant and nutrient acquisition patterns in saline soil. *Functional Plant Biology*, 51(1), NULL. <https://doi.org/10.1071/FP22275>
- Abdelaal, K.A., EL-Maghraby, L.M., Elansary, H., Hafez, Y.M., Ibrahim, E.I., El-Banna, M., El-Esawi, M., & Elkelish, A. (2019). Treatment of sweet pepper with stress tolerance-inducing compounds alleviates salinity stress oxidative damage by mediating the physio-biochemical activities and antioxidant systems. *Agronomy*, 10(1), 26. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010026>
- Al-Rubaiee, F.A.A. (2024). Mitigation of salinity stress effects in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) by using calcium chloride. *Nabatia*, 12(1), 26-42. <https://doi.org/10.21070/nabatia.v12i1.1636>
- Ali, M., Afzal, S., Parveen, A., Kamran, M., Javed, M.R., Abbasi, G.H., Malik, Z., Riaz, M., Ahmad, S., Chattha, M.S., Ali, M., Ali, Q., Uddin, M.Z., Rizwan, M., & Ali, S. (2021). Silicon mediated improvement in the growth and ion homeostasis by decreasing Na(+) uptake in maize (*Zea mays* L.) cultivars exposed to salinity stress. *Plant Physiology Biochemical*, 158, 208-218. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.10.040>
- Aras, S., Keles, H., & Eşitken, A. (2020). Silicon nutrition counteracts salt-induced damage associated with changes in biochemical responses in apple. *Bragantia*, 79, 1-7. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20190153>
- Ashraf, M., Rahmatullah, Afzal, M., Ahmed, R., Mujeeb, F., Sarwar, A., & Ali, L. (2009). Alleviation of detrimental effects of NaCl by silicon nutrition in salt-sensitive and salt-tolerant genotypes of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Plant and Soil*, 326(1-2), 381-391. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0019-9>
- Ashraf, M., Shahzad, S.M., Imtiaz, M., Rizwan, M.S., & Iqbal, M.M. (2017). Ameliorative effects of potassium nutrition on yield and fiber quality characteristics of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) under NaCl stress. *Soil Environment*, 36(1), 51-58. <https://doi.org/10.25252/SE/17/31054>
- Bocharnikova, E.A., Nikpay, A., Majumdar, S., Ziaee, M., & Matichenkov, V.V. (2023). Bioactive silicon: Approach to enhance sugarcane yield under stress environment. In *Agro-industrial Perspectives on Sugarcane Production under Environmental Stress* (pp. 85-105). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3955-6_5
- Brindha, C., Vasantha, S., & Arunkumar, R. (2019). The response of sugarcane genotypes subjected to salinity

- stress at different growth phases. *Journal of Plant Stress Physiology*, 5, 28-33. <https://doi.org/10.25081/jpsp.2019.v5.5643>
10. Chao, D.Y., Dilkes, B., Luo, H., Douglas, A., Yakubova, E., Lahner, B., & Salt, D.E. (2013). Polyploids exhibit higher potassium uptake and salinity tolerance in Arabidopsis. *Science*, 341(6146), 658-659. <https://doi.org/10.1126/science.1240561>
11. Che, Y., Fan, D., Wang, Z., Xu, N., Zhang, H., Sun, G., & Chow, W.S. (2022). Potassium mitigates salt-stress impacts on photosynthesis by alleviation of the proton diffusion potential in thylakoids. *Environmental and Experimental Botany*, 194, 104708. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104708>
12. Chen, J.C., & Chou, C.C. (1993). *Cane sugar handbook: a manual for cane sugar manufacturers and their chemists*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1177/003072706400400412>
13. Dhansu, P., Kumar, R., Kumar, A., Vengavasi, K., Raja, A.K., Vasantha, S., Meena, M.R., Kulshreshtha, N., & Pandey, S.K. (2022). Differential physiological traits, ion homeostasis and cane yield of sub-tropical sugarcane varieties in response to long-term salinity stress. *Sustainability*, 14(20), 13246. <https://doi.org/10.3390/su142013246>
14. Dhiman, P., Rajora, N., Bhardwaj, S., Sudhakaran, S.S., Kumar, A., Raturi, G., Chakraborty, K., Gupta, O. P., Devanna, B.N., Tripathi, D.K., & Deshmukh, R. (2021). Fascinating role of silicon to combat salinity stress in plants: An updated overview. *Plant Physiol Biochem*, 162, 110-123. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.023>
15. Ebeed, H.T., Ahmed, H.S., & Hassan, N.M. (2024). Silicon transporters in plants: Unravelling the molecular Nexus with sodium and potassium transporters under salinity stress. *Plant Gene*, 100453. FAO. (2024). *faostat*, <https://doi.org/10.1016/j.plgene.2024.100453>
16. Flam-Shepherd, R., Huynh, W.Q., Coskun, D., Hamam, A.M., Britto, D.T., & Kronzucker, H.J. (2018). Membrane fluxes, bypass flows, and sodium stress in rice: the influence of silicon. *Journal of Experimental Botany*, 69(7), 1679-1692. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx460>
17. Gehring, C. (2013). Cyclic Nucleotide Signaling in Plants.
18. Gomathi, R., & Thandapani, T. (2005). Salt stress in relation to nutrient accumulation and quality of sugarcane genotypes. *Sugar Technology*, 7, 39-47. <https://doi.org/10.1007/bf02942416>
19. Gong, H.J., Randall, D.P., & Flowers, T.J. (2006). Silicon deposition in the root reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by reducing bypass flow. *Plant Cell Environment*, 29(10), 1970-1979. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01572.x>
20. Guntzer, F., Keller, C., & Meunier, J.-D. (2011). Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1), 201-213. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0039-8>
21. Hashemi, A., Abdolzadeh, A., & Sadeghipour, H.R. (2010). Beneficial effects of silicon nutrition in alleviating salinity stress in hydroponically grown canola, *Brassica napus* L., plants. *Soil Science & Plant Nutrition*, 56(2), 244-253. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2009.00443.x>
22. Heile, A.O., Aslam, Z., Hussain, A., Aslam, M., Saleem, M.H., Abualreesh, M.H., Alatawi, A., & Ali, S. (2021). Alleviation of cadmium phytotoxicity using silicon fertilization in wheat by altering antioxidant metabolism and osmotic adjustment. *Sustainability*, 13(20), 11317. <https://doi.org/10.3390/su132011317>
23. Hernandez-Apaolaza, L. (2014). Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? A review. *Planta*, 240(3), 447-458. <https://doi.org/10.1007/s00425-014-2119-x>
24. Hoque, T.S., Sohag, A.A.M., Burritt, D.J., & Hossain, M.A. (2020). Salicylic acid-mediated salt stress tolerance in plants. *Plant Phenolics in Sustainable Agriculture*, 1, 1-38. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4890-1_1
25. Hussain, A., Khan, Z.I., Rashid, M.H., Ashraf, M., & Akhtar, M.S. (2003). Soil salinity effects on sugarcane productivity, biochemical characteristics, and invertase activity. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*, 1(2), 114-121.
26. KG, A.B. (2009). *International commission for uniform methods of sugar Analysis (ICUMSA)*. Barlin.
27. Khan, W.U.D., Aziz, T., Hussain, I., Ramzani, P.M.A., & Reichenauer, T.G. (2017). Silicon: a beneficial nutrient for maize crop to enhance photochemical efficiency of photosystem II under salt stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(5), 599-611. <https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1233322>
28. Lingle, S.E., & Wiegand, C.L. (1997). Soil salinity and sugarcane juice quality. *Field Crops Research*, 54(2-3), 259-268. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00058-0](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00058-0)
29. Munns, R., James, R.A., & Lauchli, A. (2006). Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *Journal of Experimental Botany*, 57(5), 1025-1043. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj100>
30. Norozi, M., ValizadehKaji, B., Karimi, R., & Nikoogoftar Sedghi, M. (2019). Effects of foliar application of potassium and zinc on pistachio (*Pistacia vera* L.) fruit yield. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 6(1), 113-123.
31. Parmesan, C., Morecroft, M.D., & Trisurat, Y. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability* GIEC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
32. Patade, V.Y., Suprasanna, P., & Bapat, V.A. (2008). Effects of salt stress in relation to osmotic adjustment on

- sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) callus cultures. *Plant Growth Regulation*, 55(3), 169-173. <https://doi.org/10.1007/s10725-008-9270-y>
33. Rao, V.P., Sengar, R., Singh, S., & Sharma, V. (2015). Molecular and metabolic perspectives of sugarcane under salinity stress pressure. *Progressive Agriculture*, 15(1), 77-84.
34. Ritchie, S.W., Nguyen, H.T., & Holaday, A.S. (1990). Leaf water content and gas-exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop Science*, 30(1), 105-111. <https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000010025x>
35. Savant, N.K., Korndörfer, G.H., Datnoff, L.E., & Snyder, G.H. (1999). Silicon nutrition and sugarcane production: a review. *Journal of Plant Nutrition*, 22(12), 1853-1903. <https://doi.org/10.1080/01904169909365761>
36. Shah, T., Latif, S., Saeed, F., Ali, I., Ullah, S., Alsahli, A.A., Jan, S., & Ahmad, P. (2021). Seed priming with titanium dioxide nanoparticles enhances seed vigor, leaf water status, and antioxidant enzyme activities in maize (*Zea mays* L.) under salinity stress. *Journal of King Saud University-Science*, 33(1), 101207. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.10.004>
37. Shahid, M.A., Balal, R.M., Pervez, M.A., Abbas, T., AQUEEL, M.A., Javaid, M.M., & Garcia-Sanchez, F. (2015). Foliar spray of phyto-extracts supplemented with silicon: an efficacious strategy to alleviate the salinity-induced deleterious effects in pea (*Pisum sativum* L.). *Turkish Journal of Botany*, 39(3), 408-419. <https://doi.org/10.3906/bot-1406-84>
38. Sharma, A., Singh, R.K., Singh, P., Vaishnav, A., Guo, D.-J., Verma, K.K., Li, D.-P., Song, X.-P., Malviya, M.K., & Khan, N. (2021). Insights into the bacterial and nitric oxide-induced salt tolerance in sugarcane and their growth-promoting abilities. *Microorganisms*, 9(11), 2203. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9112203>
39. Tuna, A.L., Kaya, C., Higgs, D., Murillo-Amador, B., Aydemir, S., & Girgin, A.R. (2008). Silicon improves salinity tolerance in wheat plants. *Environmental and Experimental Botany*, 62(1), 10,16. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.06.006>
40. Yan, G., Fan, X., Zheng, W., Gao, Z., Yin, C., Li, T., & Liang, Y. (2021). Silicon alleviates salt stress-induced potassium deficiency by promoting potassium uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal Plant Physiology*, 258-259, 153379. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2021.153379>
41. Zhang, W., Yu, X., Li, M., Lang, D., Zhang, X., & Xie, Z. (2018). Silicon promotes growth and root yield of *Glycyrrhiza uralensis* under salt and drought stresses through enhancing osmotic adjustment and regulating antioxidant metabolism. *Crop Protection*, 107, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.01.005>
42. Zhao, D., Zhu, K., Momotaz, A., & Gao, X. (2020). Sugarcane plant growth and physiological responses to soil salinity during tillering and stalk elongation. *Agriculture*, 10(12), 608. <https://doi.org/10.3390/agriculture10120608>
43. Zhao, Y., Aspinall, D., & Paleg, L. (1992). Protection of membrane integrity in *Medicago sativa* L. by glycinebetaine against the effects of freezing. *Journal of Plant Physiology*, 140(5), 541-543. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)80785-6](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)80785-6)
44. Zhu, J.K. (2003). Regulation of ion homeostasis under salt stress. *Current Opinion in Plant Biology*, 6(5), 441-445. [https://doi.org/10.1016/s1369-5266\(03\)00085-2](https://doi.org/10.1016/s1369-5266(03)00085-2)

Contents

Assessment of the GRI Index Compliance in Groundwater Drought in the Qazvin Plain, Iran	1
M. Jamshidi Avanaki, K. Ebrahimi, S.S. Hashemi	
Comparing the Effects of Bacterial and Fungal Biofertilizers on Wheat Yield and Water Use Efficiency under Drought Stress: The Role of ACC-deaminase and Various Fungal Formulations	17
S.S. Hosseini, F. Rejali, P. Keshavarz	
Enhancing Phosphorus Availability and Altering Soil Biochemical Responses Through Application of Humic Acid and <i>Streptomyces</i> Inoculation	35
N. Khalili, R. Ghorbani Nasrabadi, M. Barani Motlagh, R. Khodadadi	
Identification and Prioritization of the Most Suitable Strategies for Improving the Health of the Ilam Dam Watershed Using the SWOT Method	55
E. Fathi, M. Ekhtesasi, A. Talebi, J. Mosaffaie	
Kinetics of Zinc, Manganese and Magnesium Release from Layered Double Hydroxides (Mg-Zn-Mn-Al-LDH): Effect of Citric Acid and Tartaric Acid	73
Z. Movahedi Rad, M. Hamidpour, A. Tajabadipour	
Growth, Physiological and Sucrose Indicators of Sugarcane Varieties to Silicon Application under Salinity Conditions	91
A. Ansori Savari, M. Nabipour, M. Farzaneh	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 39

No. 1

Mar.-Apr. 2025

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	Ferdowsi University of Mashhad
Bazrafshan, J.	Agricultural Meteorology	Faculty of Agricultural Engineering and Technology
Fotovat, A.	Soil Science	Ferdowsi University of Mashhad
Ghadiri, H.	Soil Science	Griffith University
Khorassani, R.	Soil Science	Ferdowsi University of Mashhad
Khormali, F.	Soil Science	Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan
Lakzian, A.	Soil Science	Ferdowsi University of Mashhad
Liaghat, A.	Irrigation and Drainage	University of Tehran
Mosaedi, A.	Irrigation and Civil Eng.	Ferdowsi University of Mashhad
Mousavi Baygi, M	Agricultural Meteorology	Ferdowsi University of Mashhad
Oustan, Sh.	Soil Science	Tabrzi University
Taghvaeian, S.	Irrigation	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

Web Site: <https://jsw.um.ac.ir/>

Journal of Water and Soil is published bimonthly (six issues per year).



Ferdowsi University
of Mashhad

Vol. 39 No. 1

2025

Journal of Water and Soil

(Agricultural Science and Technology)

ISSN:2008-4757

Contents

- Assessment of the GRI Index Compliance in Groundwater Drought in the Qazvin Plain, Iran 1**
M. Jamshidi Avanaki, K. Ebrahimi, S.S. Hashemi
- Comparing the Effects of Bacterial and Fungal Biofertilizers on Wheat Yield and Water Use Efficiency under Drought Stress: The Role of ACC-deaminase and Various Fungal Formulations..... 17**
S.S. Hosseini, F. Rejali, P. Keshavarz
- Enhancing Phosphorus Availability and Altering Soil Biochemical Responses Through Application of Humic Acid and *Streptomyces* Inoculation 35**
N. Khalili, R. Ghorbani Nasrabadi, M. Barani Motlagh, R. Khodadadi
- Identification and Prioritization of the Most Suitable Strategies for Improving the Health of the Ilam Dam Watershed Using the SWOT Method 55**
E. Fathi, M. Ekhtesasi, A. Talebi, J. Mosaffaie
- Kinetics of Zinc, Manganese and Magnesium Release from Layered Double Hydroxides (Mg-Zn-Mn-Al-LDH): Effect of Citric Acid and Tartaric Acid 73**
Z. Movahedi Rad, M. Hamidpour, A. Tajabadipour
- Growth, Physiological and Sucrose Indicators of Sugarcane Varieties to Silicon Application under Salinity Conditions..... 91**
A. Ansori Savari, M. Nabipour, M. Farzaneh