

نشریه آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)



جلد ۴۰ شماره ۲

سال ۱۴۰۵

شاپا: ۴۷۵۷-۲۰۰۸

شماره پیاپی ۱۰۶

عنوان مقالات

- ۱۱۳ پایش و تحلیل زمانی- مکانی تغییرات کیفیت منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی آبخوان بهاباد یزد)
حسین سروی صدرآباد- حمیدرضا مرادی- سید حمیدرضا صادقی- اصغر زارع چاهوکی
- ۱۳۰ مقایسه روش‌های پارامتریک و تجربی در ارزیابی اثرات حفاری تونل بر آبدهی چشمه‌ها:
مطالعه موردی تونل انتقال آب هزارمسجد
امیر صابری نصر- فاطمه قطرانی نژاد- مجید دشتی برمکی
- ۱۵۵ بررسی عددی تأثیر افزایش ابعاد هندسی زهکش افقی بر عملکرد و پایداری سد خاکی نهند
توحید امیدپور علویان- ابراهیم اسدی- مهدی سلطانی ستوبادی- ائلپار همت وند
- ۱۸۳ اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در کشت گندم دوروم
علی بهشتی آل آقا- حمیدرضا چقازردی
- ۲۱۳ ارزیابی نقش باکتری‌های محرک رشد گیاه در بهبود محتوای عناصر غذایی و کاهش تجمع نیترات در اسفناج
نعیمه عنایتی ضمیر- نفیسه رنگ‌زن - مهناز مکفی
- ۲۲۹ مقایسه عملکرد مدل‌های نرو فازی، برنامه‌ریزی بیان ژن و جنگل تصادفی در برآورد مقاومت فروروی خاک
حسین علی عبد الرضا- شکراله اصغری- مهسا حسنیپور کاشانی- حسین شهاب آرخازلو

آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

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

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

تابستان سال 1405

شماره 2

جلد 40

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

دانشگاه فردوسی مشهد

صاحب امتیاز:

استاد- تغذیه نشخوارکنندگان (دانشگاه فردوسی مشهد)

رضا ولیزاده

مدیر مسئول:

استاد- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

امیر فتوت

سرمدبیر:

اعضای هیئت تحریریه:

علوم خاک (دانشگاه تبریز)

اوستان، شاهین

هواشناسی کشاورزی (دانشگاه تهران)

بذرافشان، جواد

آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، امریکا)

تقوایان، صالح

علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

خراسانی، رضا

علوم خاک (دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان)

خرمالی، فرهاد

آبیاری و زهکشی (دانشگاه فردوسی مشهد)

علیزاده، امین

علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

فتوت، امیر

خاکشناسی (دانشگاه گریفیت، استرالیا)

قدیری، حسین

علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

لکزیان، امیر

آبیاری و زهکشی (دانشگاه تهران)

لیاقت، عبدالمجید

آبیاری ومهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)

مساعدی، ابوالفضل

هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

موسوی بایگی، محمد

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

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

پست الکترونیکی: jsa3@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 (شی شماره در سال) منتشر می‌شود.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

- 113 پایش و تحلیل زمانی - مکانی تغییرات کیفیت منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی آبخوان بهاباد یزد)
حسین سروی صدرآباد - حمیدرضا مرادی - سید حمیدرضا صادقی - اصغر زارع چاهوکی
- 130 مقایسه روش‌های پارامتریک و تجربی در ارزیابی اثرات حفاری تونل بر آبدهی چشمه‌ها: مطالعه موردی تونل انتقال آب هزارمسجد
امیر صابری نصر - فاطمه قطرانی نژاد - مجید دشتی برمکی
- 155 بررسی عددی تأثیر افزایش ابعاد هندسی زهکش افقی بر عملکرد و پایداری سد خاکی نهند
توحید امیدپور علویان - ابراهیم اسدی - مهدی سلطانی ستوبادی - ائلیار همت وند
- 183 اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در کشت گندم دوروم
علی بهشتی آل آقا - حمیدرضا چقازردی
- 213 ارزیابی نقش باکتری‌های محرک رشد گیاه در بهبود محتوای عناصر غذایی و کاهش تجمع نیترات در اسفناج
نعمه عنایتی ضمیر - نفیسه رنگ‌زن - مهناز مکفی
- 229 مقایسه عملکرد مدل‌های نرو فازی، برنامه‌ریزی بیان ژن و جنگل تصادفی در برآورد مقاومت فروروی خاک
حسین علی عبد الرضا - شکراله اصغری - مهسا حسنپور کاشانی - حسین شهاب آرخازلو

Spatiotemporal Analysis of Groundwater Quality Changes: A Case Study of the Bahabad Aquifer, Yazd Province, Iran

H. Sarvi Sadrabad¹ - H.R. Moradi^{1*} - S.H.R. Sadeghi¹ - A. Zare Chahouki²

1- Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University

(*- Corresponding Author Email: harmoradi@modares.ac.ir)

2- Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Yazd University

Received: 02 January 2026	How to cite this article: Sarvi Sadrabad, H., Moradi, H.R., Sadeghi, S.H.R., & Zare Chahouki, A. (2026). Spatiotemporal analysis of groundwater quality changes: A case study of the Bahabad aquifer, Yazd Province, Iran. <i>Journal of Soil and Water</i> , 40(2), 111-126. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97330.1519
Revised: 27 June 2026	
Accepted: 06 August 2026	
Available Online: 06 August 2026	

Introduction

Degradation of water quality has emerged as one of the most critical challenges facing national water resources. Surging water demand has led to the over-exploitation of groundwater and a continuous decline in aquifer levels, subsequently triggering environmental degradation and a deteriorating trend in groundwater quality. Consequently, analyzing temporal trends and spatial variations of groundwater quality is vital for sustainable water resource management. This study aims to investigate the temporal trends of groundwater quality parameters using the Mann-Kendall test and Sen's Slope Estimator, while analyzing spatial variations through the Groundwater Quality Index (GQI) in the Bahabad aquifer.

Materials and Methods

In this study, a total of 16 observation wells were initially considered for groundwater quality assessment. Among them, 9 wells with complete and reliable datasets were selected for detailed analysis. The required hydrochemical data were obtained from the Yazd Regional Water Authority and included major groundwater quality parameters: calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), chloride (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}), and total dissolved solids (TDS). A uniform temporal period from 2002 to 2023 was considered for all selected wells to ensure consistency in trend analysis.

To evaluate temporal variations in groundwater quality, non-parametric statistical methods, including the Mann-Kendall test and Sen's slope estimator, were employed. These methods are widely used in hydrochemical studies due to their robustness against non-normal data distributions and their ability to detect both the direction and magnitude of trends over time.

Spatial variations in groundwater quality parameters were analyzed using a range of interpolation techniques, including both deterministic and geostatistical approaches. The applied methods consisted of Inverse Distance Weighting (IDW), Radial Basis Functions (RBF), Local Polynomial Interpolation (LPI), Global Polynomial Interpolation (GPI), and Kriging. All spatial analyses were performed in a GIS environment. The optimal interpolation method for each parameter was selected based on statistical performance indicators, primarily the lowest Root Mean Square Error (RMSE) and the highest coefficient of determination (R^2).

Prior to spatial modeling, the normality of the dataset was evaluated using the Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk tests, which are commonly applied to assess data distribution characteristics. The results of these tests were used to determine whether data transformation was required before applying interpolation and statistical analyses.

Finally, the Groundwater Quality Index (GQI) was calculated to provide an integrated assessment of



Authors retain the copyright. 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.2026.97330.1519>

groundwater quality conditions. By aggregating multiple hydrochemical parameters into a single index, GQI enables a comprehensive evaluation of groundwater quality and facilitates spatial comparison across the aquifer. This index was used as a key tool for interpreting overall water quality status and supporting groundwater management decisions.

Results and Discussion

The results indicate that while the groundwater quality of the Bahabad aquifer remained within the “Acceptable” category during the study period, a slight but statistically significant downward tendency in quality was observed. Spatial distribution analysis revealed that salinity patterns and ionic concentrations are influenced more by anthropogenic pressures such as over-pumping, water table drawdown, and inter-basin water transfer than by natural geological factors.

Temporal analysis highlighted significant spatial heterogeneity; for instance, Mg^{2+} exhibited a significant increasing trend across all stations (Sen’s slope ranging from 0.05 to 0.23), whereas Na^+ and SO_4^{2-} showed decreasing or insignificant trends in certain wells. TDS displayed variable behavior, showing generally stable or slightly decreasing trends, while a sharp increase was observed at one specific station.

Furthermore, a comparison of interpolation techniques showed that under conditions of limited sampling density and weak spatial correlation, deterministic methods often yielded higher predictive accuracy than geostatistical models.

Conclusion

Despite only minor overall fluctuations in the GQI (ranging approximately between -0.5% and $+0.1\%$), the index maps did not fully capture the intensity of localized quality degradation in critical parameters such as TDS, Na^+ , and SO_4^{2-} . This indicates that composite indices like GQI may partially neutralize opposing trends among individual parameters, thereby providing a more generalized representation of groundwater quality conditions.

Trend analysis of individual parameters revealed considerable spatial heterogeneity across the aquifer. Magnesium and chloride exhibited consistent increasing trends in most monitoring wells, indicating progressive salinization, whereas sodium and sulfate showed mixed or insignificant trends in several locations. Total dissolved solids demonstrated spatially variable behavior, with localized sharp increases despite generally stable or declining trends elsewhere. This variability reflects the complex interaction between local hydrogeological conditions and human-induced pressures and confirms that groundwater quality evolution cannot be adequately described using a single parameter or uniform trend assumption.

The comparison of interpolation techniques further highlighted an important methodological implication: under conditions of limited sampling density and weak spatial autocorrelation, deterministic methods can provide more reliable estimates than geostatistical approaches. This emphasizes the need to adapt modeling strategies to data availability and hydrogeological settings, particularly in arid and semi-arid regions where monitoring networks are often sparse.

Although the Groundwater Quality Index proved effective in providing an overall assessment of groundwater status, it was less sensitive to localized deterioration in key parameters such as TDS, sodium, and sulfate. This confirms that composite indices, while useful for communication and management purposes, may mask emerging local-scale risks if used in isolation. Therefore, they should be applied alongside parameter-specific analyses rather than as standalone decision-making tools.

Overall, the findings highlight the urgent need for improved groundwater management in the Bahabad aquifer. Controlling excessive abstraction, regulating industrial withdrawals, and strengthening long-term monitoring programs are essential to prevent further degradation. Integrating spatial analysis with trend-based assessments can provide a more reliable framework for sustainable groundwater management, particularly in arid regions experiencing increasing water stress.

Keywords: Bahabad, Inter-basin water transfer, Groundwater quality index (GQI), Quality trend, Water table

پایش و تحلیل زمانی- مکانی تغییرات کیفیت منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی آبخوان بهاباد یزد)

حسین سروی صدرآباد^۱ - حمیدرضا مرادی^{۱*} - سید حمیدرضا صادقی^۱ - اصغر زارع چاهوکی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۵

چکیده

امروزه یکی از مهم‌ترین مشکلات منابع آبی کشور کاهش کیفی منابع آب است. نیاز روزافزون آب منجر به بهره‌برداری بی‌رویه از آب زیرزمینی و افت مداوم سطح آب در آبخوان‌ها شده است و به تبع آن مشکلات زیست‌محیطی و ازجمله کیفیت آب زیرزمینی نیز در خطر قرار گرفته و روندی رو به نابودی را ایجاد نموده است. ازاین‌رو تحلیل روندهای زمانی و تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی نقش بسزایی در مدیریت پایدار منابع آب ایفا می‌کند. هدف پژوهش حاضر بررسی روند زمانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی با بهره‌گیری از آزمون من‌کندال و برآورد شیب سن و همچنین تحلیل تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از شاخص کیفیت منابع آب زیرزمینی (GQI) در آبخوان بهاباد می‌باشد. بدین‌منظور از پارامترهای کل جامدات محلول، کلر، سولفات، سدیم، کلسیم و منیزیم مربوط به ۹ چاه در دوره زمانی ۱۴۰۲-۱۳۸۱ جهت بررسی روند زمانی و مکانی استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان بهاباد طی دوره زمانی ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۲ در طبقه قابل قبول قرار دارد، اما روند کاهشی اندک اما معناداری در کیفیت مشاهده شد. بررسی توزیع مکانی پارامترهای کیفی حاکی از آن است که الگوی شوری و غلظت یون‌ها بیش از عوامل زمین‌شناختی طبیعی، تحت تأثیر فشارهای انسانی ازجمله برداشت بی‌رویه، افت سطح ایستابی و انتقال بین‌حوضه‌ای آب قرار دارد. تحلیل روند زمانی با استفاده از آزمون‌های آماری، ناهمگنی مکانی قابل ملاحظه‌ای را آشکار ساخت. پارامتر Mg^{2+} در تمام ایستگاه‌ها روند افزایشی معنادار داشت به‌طوری‌که مقدار شیب سن بین ۰/۰۵ تا ۰/۲۳ متغیر است، درحالی‌که Na و SO_4^{2-} در برخی چاه‌ها روند کاهشی یا بدون روند نشان دادند. TDS نیز عمدتاً روندهای متفاوتی (اغلب کاهشی اما در یک ایستگاه افزایشی شدید) از خود بروز داد. همچنین مقایسه روش‌های درون‌یابی نشان داد که در شرایط نمونه‌برداری محدود و همبستگی مکانی ضعیف، روش‌های قطعی اغلب دقت پیش‌بینی بالاتری نسبت به روش‌های زمین‌آماری (کریجینگ و کریجینگ بیزین تجربی) ارائه کردند. در نهایت، با وجود کاهش اندک شاخص GQI (در بازه‌ای بین ۰/۵- تا ۰/۱+ درصد)، نقشه تغییرات آن نتوانست شدت محلی کاهش کیفیت به‌ویژه در پارامترهای تعیین‌کننده مانند TDS، Na^+ و SO_4^{2-} را به‌طور کامل منعکس کند. این یافته بیانگر آن است که شاخص‌های ترکیبی مانند GQI می‌توانند اثرات متضاد روندهای پارامتری را تا حدی خنثی کرده و تصویری متعادل‌تر و واقع‌بینانه‌تر از وضعیت کلی کیفیت ارائه دهند. در انتها مشخص شد، تغییرپذیری مکانی آلاینده‌های مختلف و طیف گسترده پارامترهای اندازه‌گیری شده و همچنین توصیف کیفیت آب، امری دشوار است؛ بنابراین استفاده از شاخص‌ها می‌توانند شرایط کلی کیفیت آب را به‌طور خلاصه و قابل‌درک ارائه کنند.

واژه‌های کلیدی: انتقال آب، بهاباد، روند کیفیت، سطح ایستابی، شاخص کیفیت آب زیرزمینی

۱- گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: hmrmodi@modares.ac.ir

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

مقدمه

آبخوان‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ذخایر راهبردی آب، نقش تعیین‌کننده‌ای در تأمین نیازهای شرب، کشاورزی و صنعتی ایفا می‌کنند. در بسیاری از مناطق کشور، به‌ویژه نواحی خشک و نیمه‌خشک، محدودیت منابع آب سطحی موجب شده است که اتکا به آب‌های زیرزمینی به گزینه‌ای اجتناب‌ناپذیر برای تأمین آب تبدیل شود. با این حال، گسترش آلاینده‌های شیمیایی ناشی از فعالیت‌های شهری و صنعتی، تغییر الگوهای کشاورزی و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی از طریق حفر چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق بدون توجه به توان طبیعی آبخوان‌ها، فشار فزاینده‌ای بر این منابع وارد کرده است.

تداوم این روندها سبب کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی شده و در نتیجه، دسترسی به آب با کیفیت مناسب در مناطق خشک و نیمه‌خشک را به یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی و مدیریتی تبدیل کرده است. در واکنش به این بحران، انتقال آب بین‌حوضه‌ای به‌عنوان یکی از راهکارهای تأمین آب در مناطق کم‌آب در دستور کار متولیان قرار گرفته است. با این حال، نبود نگاه جامع و یکپارچه در اجرای این طرح‌ها، منجر به بروز تنش‌های اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی میان حوضه‌های مبدأ و مقصد شده است. در چنین شرایطی، توجه به پایش و مدیریت کیفیت منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک، به‌عنوان راهکاری اساسی برای افزایش خودتکایی آبی و کاهش وابستگی به منابع انتقالی، اهمیت دوچندانی می‌یابد. از سوی دیگر، حرکت به‌سوی توسعه پایدار به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش‌روی جوامع انسانی در قرن بیست‌ویکم مطرح است؛ به‌گونه‌ای که دسترسی به منابع آب کافی با کیفیت مطلوب، شرطی اساسی برای تحقق توسعه پایدار تلقی می‌شود و کمبود یا افت کیفیت منابع آب، یکی از اصلی‌ترین موانع دستیابی به آن و استقرار پایدار جمعیت به‌شمار می‌رود (Kundzewicz, Alipour et al., 2017; Wang et al., 2013; 1999).

اگرچه مفهوم کیفیت آب زیرزمینی واضح به نظر می‌رسد، اما چگونگی بررسی و ارزیابی آن، نیاز به برخی ترفندها دارد (Babiker et al., 2007; Chenini & Khemiri, 2009). ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی بیانگر میزان مناسب بودن آن برای کاربردهای مختلف از جمله مصارف شرب انسان و دام، آبیاری کشاورزی و استفاده‌های صنعتی است. از این‌رو، تمرکز ارزیابی‌های کیفی آب نه بر تعریف مطلق کیفیت، بلکه بر سنجش میزان انطباق ویژگی‌های آب با نوع و هدف مصرف در جامعه قرار دارد (DashtiBarmaki et al., 2014; Elamassi, 2012). بر این اساس استانداردهای مختلفی برای هر متغیر تعریف شده

است که اگر آب از این استاندارد تجاوز کند، قبل از استفاده باید تصفیه شود (Cordoba et al., 2010). سازمان بهداشت جهانی^۱ (WHO)، به‌عنوان یکی از سازمان‌های متولی این امر، استانداردهایی از غلظت یون‌ها در آب آشامیدنی معرفی کرده است. همچنین جهت اعلام و یا مقایسه کیفیت آب در مناطق مختلف، شاخص‌هایی بر اساس میزان پارامترهای کیفیت آب مطرح شده که شاخص کیفیت آب زیرزمینی^۲ (GQI) یکی از این شاخص‌ها است. این شاخص ازجمله شاخص‌هایی است که بر پایه GIS استوار است و برای بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی می‌توان از آن استفاده کرد. این شاخص توسط بابیکر و همکارانش (Babiker et al., 2007) به‌منظور استنباط بهتر از غلظت یون‌های اصلی از کل سطح منطقه ارائه شد.

به‌منظور بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی علاوه بر بررسی مکانی کیفیت آب، بررسی روند زمانی کیفیت جهت آگاهی از شرایط آبخوان‌ها و مدیریت صحیح و با برنامه نیز بسیار حائز اهمیت می‌باشد. آزمون من‌کندال از روش‌های ناپارامتری می‌باشد که ابتدا توسط من (Mann, 1945) ارائه و سپس توسط کندال (Kendall, 1975) توسعه یافت. در روش‌های ناپارامتری اساس کار بر تفاوت داده‌های مشاهداتی است. به گونه‌ای که این روش‌ها مستقل از توزیع آماری سری‌های زمانی بوده و خصوصاً برای سری‌هایی که چولگی و کشیدگی زیاد دارند مناسب‌تر از روش‌های پارامتری می‌باشند. ترکیب نتایج حاصل از بررسی‌های مکانی و زمانی می‌تواند ما را در جهت مدیریت درست و آگاهی از مشکلات و مسائل پیش‌رو یاری دهد و گرایش و مسیر حرکت کیفیت منابع آب در مناطق مختلف را تعیین کند.

طی سال‌های اخیر، مطالعات زیادی (Alipour et al., 2017; DashtiBarmaki et al., 2014; Dustmohammadian et al., 2021; El Baba, 2020; Grzywna & Bronowicka-Mielniczuk, 2020; Ibrahim, 2019; Khosravi et al., 2016; Mann, 1945; Nasser et al., 2021; Nouraki & Hooshmand, 2021; Parsaie et al., 2020; Sarvi Sadrabad & Zare Chahouki, 2022; Sun et al., 2019; Torabipoudeh et al., 2020; WHO, 2004; Zenebe et al., 2025) در خصوص کیفیت منابع آب زیرزمینی و تحلیل و تفسیر آن صورت گرفته است که در ادامه به جدیدترین و مرتبط‌ترین آن‌ها اشاره خواهد شد. سروی صدرآباد و زارع چاهوکی (Sarvi Sadrabad & Zare Chahouki, 2022) به بررسی روند زمانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی با استفاده از آزمون من‌کندال و تخمین گر شیب سن و بررسی تغییر مکانی کیفیت آب زیرزمینی پرداختند. نتایج نشان داد پارامترهای سولفات، سدیم و کل جامدات محلول در بیشتر چاه‌ها روند کاهشی داشته است، اما شاخص‌های کلسیم، منیزیم و کلر دارای روند افزایشی بوده است و همه

1- World Health Organization (WHO)

2- Groundwater Quality Index (GQI)

همراه داشته باشد.

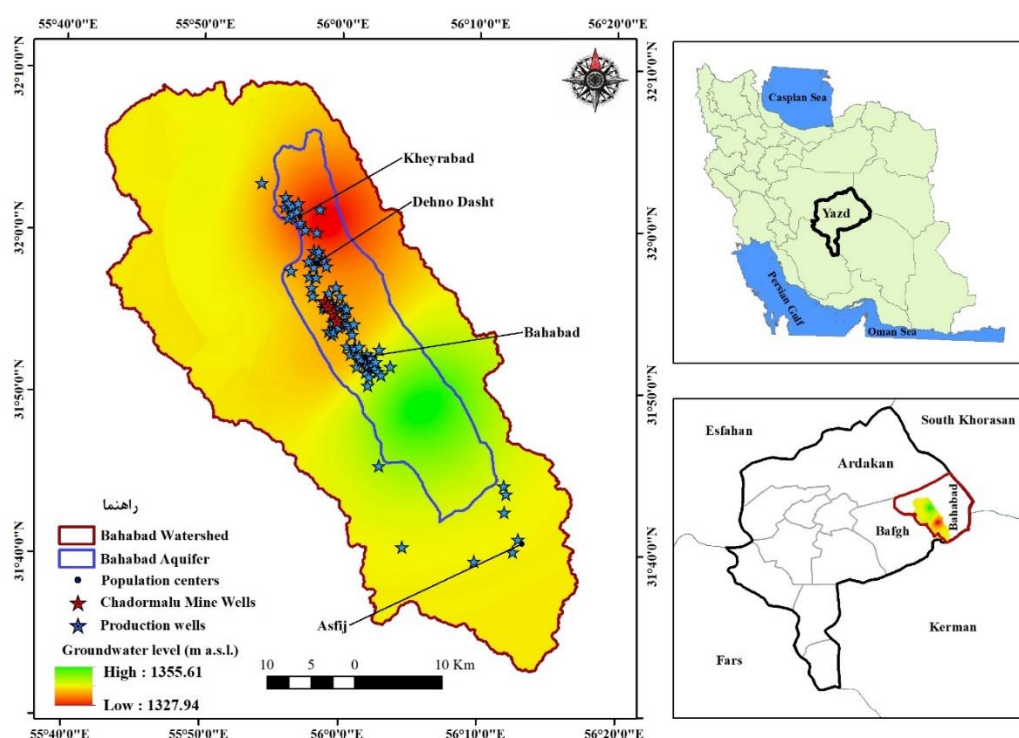
از سوی دیگر، توسعه فعالیت‌های صنعتی و ایجاد فرصت‌های شغلی در این شهرستان، این منطقه را به یکی از نواحی مهاجرپذیر کشور تبدیل کرده است که خود موجب افزایش تقاضا برای منابع آب می‌شود. در چنین شرایطی، پایش کیفیت آب زیرزمینی و ارزیابی اثر عوامل طبیعی و انسانی مؤثر بر وضعیت آبخوان‌ها در مقیاس‌های مکانی و زمانی گوناگون، ضرورتی انکارناپذیر به شمار می‌رود.

از این‌رو بررسی کیفیت آب زیرزمینی و ارزیابی تأثیرات عوامل مختلف بر آبخوان‌ها در مقیاس زمانی و مکانی مختلف امری مهم می‌باشد. برای بررسی روند زمانی و مکانی و همچنین تعیین کیفیت منابع آب زیرزمینی، روش‌ها و شاخص‌های متنوعی معرفی و توسعه داده شده است، که هر کدام از این روش‌ها از فاکتورهای مختلف، برای ارزیابی کیفیت آب بهره می‌گیرند. پژوهش‌های مرتبط نشان داد، استفاده از هر کدام این روش‌ها به تنهایی نمی‌تواند گویای وضعیت و گرایش کیفیت منابع آب زیرزمینی باشد. از این‌رو در پژوهش حاضر از روش ترکیبی برای بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت منابع آب استفاده شد. همچنین پژوهش‌ها نشان داد تحلیل تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی در مناطق خشک ایران، عمدتاً محدود بوده و در موارد معدودی به ارتباط آن با انتقال آب بین‌حوضه‌ای پرداخته‌اند. این پژوهش‌ها عمدتاً بر آبخوان‌هایی متمرکز بوده‌اند که به‌عنوان مقصد یا میزبان طرح‌های انتقال آب مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. در مقابل، بررسی نظام‌مند وضعیت کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان‌هایی که به‌عنوان مبدأ برداشت و انتقال آب بین‌حوضه‌ای عمل می‌کنند، به‌ویژه در مناطق خشک، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو، انجام پژوهش حاضر با تمرکز بر آبخوان بهاباد، به‌عنوان یکی از منابع برداشت آب برای مصارف خارج از حوضه، می‌تواند خلأ موجود در ادبیات پژوهش را پوشش داده و اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی فراهم آورد.

هدف پژوهش حاضر بررسی روند زمانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی با بهره‌گیری از آزمون من‌کندال و برآورد شیب سن و همچنین تحلیل تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از شاخص کیفیت منابع آب زیرزمینی (GQI) در آبخوان بهاباد می‌باشد.

پارامترها به جز TDS، در دوره زمانی مورد بررسی بر اساس طبقه‌بندی سازمان بهداشت جهانی در حد مجاز قرار داشتند. نتایج نهایی پژوهش حاضر نشان داد، آب انتقالی با کیفیت مناسب توانسته افزایش میزان کل جامدات محلول، سولفات و سدیم را کنترل کند و موجب افزایش کلر در این مناطق شود. خسروی و همکاران (Khosravi et al., 2016) به مطالعه تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت یزد- اردکان با استفاده از GQI پرداختند. نتیجه نشان داد، سه پارامتر مواد جامد محلول، سدیم و کلر با داشتن بیشترین ضریب رتبه‌بندی به‌ترتیب دارای بیشترین تأثیر در مقدار شاخص GQI و در نتیجه کیفیت آب زیرزمینی هستند. همچنین روند شاخص GQI در منطقه مورد مطالعه نزولی است و کاربری اراضی نقش بسیار زیادی در کاهش میزان کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت یزد- اردکان دارد. پارسایی و همکاران (Parsaie et al., 2020) مطالعه‌ای جهت بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی از نظر شرب و کشاورزی در دشت قروه در استان کردستان با استفاده از داده‌های سالانه ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۳ انجام دادند. نتایج بدست آمده در مورد کیفیت آب‌های زیرزمینی از نظر شرب و کشاورزی نشان داد که مساحت مناطق دارای کلاس‌های مناسب‌تر در حال کاهش و مساحت مناطق دارای کلاس‌های نامناسب در حال افزایش است. نورکی و هوشمند (Nouraki & Hooshmand, 2021) طی مطالعه‌ای به بررسی روند و الگوی توزیع مکانی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های کیفی آب با استفاده از آزمون‌های ناپارامتری و روش‌های درونیابی در دشت همدان بهار پرداختند. در پایان مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی مکانی شاخص WQI^۱ نشان داد که در ابتدا و انتهای دوره آماری ۱۰ ساله مورد بررسی میزان شاخص در کل سطح دشت یک روند کاهشی دارد. ناصری و همکاران (Nasseri et al., 2021) از یک رویکرد مکانی-زمانی کریجینگ برای بررسی الگوی کیفی حاکم بر تالاب بامدژ براساس چند شاخص کیفیت آب استفاده کرد. سبزواری و زینی‌وند (Sabzevari et al., 2020) اخیراً در دشت بروجرد- دورود با روش ناپارامتری من‌کندال و شاخص ذکر شده به بررسی کیفیت منابع آب زیرزمینی پرداخته و قدرت ارزیابی روش‌های ناپارامتری در روندیابی فاکتورهای کیفی را مناسب ارزیابی کردند.

اقلیم خشک و بارش محدود شهرستان بهاباد، در کنار تشدید تنش‌های آبی، موجب افزایش فشار بر منابع آب زیرزمینی این منطقه شده است. در سال‌های اخیر، علاوه بر مصارف محلی، بخشی از آب برداشت‌شده از آبخوان بهاباد از طریق تعدادی چاه عمیق وابسته به فعالیت‌های صنعتی و معدنی برای تأمین نیازهای خارج از محدوده حوضه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این الگوی بهره‌برداری، ضمن افزایش برداشت از آبخوان، می‌تواند پیامدهای قابل‌توجهی بر کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی به



شکل ۱- نقشه سطح ایستابی و موقعیت جغرافیایی آبخوان بهاباد

Figure 1- Groundwater level map and location of Production wells of Bahabad aquifer

۸/۷ درصد شرب می‌باشد. چهار چاه اختصاصی معدن چادرملو سالانه حدود ۳/۸ میلیون متر مکعب آب را برای مصارف صنعتی و معدنی به خارج از حوضه منتقل می‌کنند.

روش تحقیق

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل اطلاعات کیفی آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای آبخیز بهاباد بوده که از شرکت آب منطقه‌ای استان یزد دریافت شده و بازه زمانی ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۲ را در بر می‌گیرد. در پژوهش حاضر، بررسی روند تغییرات زمانی منابع آب زیرزمینی آبخوان بهاباد با آزمون‌های ناپارامتری من‌کندال و تخمین‌گر شیب سن انجام گردید و جهت بررسی روند مکانی و ارزیابی و طبقه‌بندی کیفیت از طریق روش‌های درونیابی مناسب و شاخص کیفی منابع آب زیرزمینی (GQI) استفاده شد. با بررسی‌های انجام‌شده ۱۶ چاه مشاهداتی جهت اندازه‌گیری شاخصه‌های کیفی وجود داشت که تنها ۹ چاه با داده‌های کامل و قابل استفاده شناسایی شد. این اطلاعات از شرکت آب منطقه‌ای استان یزد دریافت گردید و شامل یون‌های کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^{+})، کلر (Cl^{-})، سولفات (SO_4^{2-}) و کل جامدات محلول (TDS) می‌باشد که در همه چاه‌ها دوره زمانی برابر (۱۳۸۱-۱۴۰۲) در نظر گرفته شد.

مواد و روش‌ها

خصوصیات منطقه مورد مطالعه

آبخوان بهاباد واقع در حوضه آبخیز بهاباد و جزئی از قسمت جنوبی دشت بهاباد است که در شرق استان یزد و در شهرستان بهاباد قرار دارد. مساحت این آبخوان حدود ۲۹۹/۷۹ کیلومتر مربع می‌باشد. بر اساس داده‌های ایستگاه هواشناسی بهاباد (دریافتی از سازمان هواشناسی استان یزد) که از سال ۱۳۷۷ احداث شده، این منطقه دارای آب‌وهوای خشک تا نیمه‌خشک و متوسط بارندگی حدود ۱۵۳/۹ میلی‌متر در سال است. حداکثر درجه حرارت ثبت‌شده در منطقه طبق اطلاعات موجود در آمارنامه‌های هواشناسی ۴۵ درجه سانتی‌گراد و حداقل تا ۱۷ درجه زیر صفر رسیده است. مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه در بهاباد ۳۰۶۸ میلی‌متر است. حداکثر تبخیر ماهیانه ۵۰۸/۱ میلی‌متر در تیرماه و کمترین آن مربوط به دی‌ماه به میزان ۵۲/۶ میلی‌متر است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان و کشور، تراز آب زیرزمینی بهاباد، موقعیت آبخوان و چاه‌های برداشت در آن را نشان می‌دهد.

در حوضه آبخیز بهاباد، ۲۹۳ منبع آب زیرزمینی شامل چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق، قنات‌ها و چشمه‌ها وجود دارد که مجموع برداشت سالانه از آن‌ها حدود ۴۰/۴۲ میلیون متر مکعب است. مصرف آب در این حوضه عمدتاً شامل ۷۴/۹ درصد کشاورزی، ۱۶/۴ درصد صنعت و

جدول ۱- پارامترهای مربوط به چاه‌های مشاهده‌ای مورد بررسی در آبخوان بهاباد (وضعیت موجود)

Table 1- Quality parameters of monitoring wells in the Bahabad aquifer (Existing conditions)

کد چاه	utmx	utmy	So ₄ (mg/L)	Cl(mg/L)	Hco ₃ (mg/L)	TDS (mg/L)	Na ₋ (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)
Q1	402809	3533165	76.96	47.94	2.24	7629	67.35	15.78	25.54
Q2	406198	3527687	12.88	23.97	3.68	2976	33.29	17.36	10.38
Q3	405359	3531952	16.66	14.1	3.6	2224	66.03	5.72	6.39
Q4	407612	3518445	3.12	2.26	5.76	740	46	3.16	3.03
Q5	408583	3525018	13	10.29	4	1293	52.17	6.55	7.35
Q6	409112	3524265	9.78	5.64	4.5	1292	55.82	4.58	4.07
Q7	412060	3510016	7.9	3.95	4	996	46.27	3.63	4.63
Q8	414427	3503337	14.15	6.06	3.92	1643	34.32	6.94	9.9
Q9	424178	3510712	15.55	17.2	4.8	2725	52.71	7.69	11.18

$$\beta = \frac{x_t - x_s}{t - s} \quad (۱)$$

در این رابطه: x_t و x_s به ترتیب داده‌های مشاهده‌ای در زمان t و s می‌باشد. به طوری که t یک واحد زمانی بعد از s است. با اعمال این رابطه برای هر دو جفت داده مشاهده‌ای، یک سری زمانی از شیب‌های محاسبه شده به دست می‌آید که از محاسبه میانه این سری زمانی، شیب خط روند (β_{med}) حاصل می‌آید. مقدار مثبت (β_{med}) حاکی از صعودی بودن روند و مقدار منفی آن نشان‌دهنده نزولی بودن روند می‌باشد (Torabipoudeh et al., 2020). هر دو روش مذکور با استفاده از نرم‌افزار XLSTAT 2019 انجام گردید. همچنین برای تحلیل روند در سطح آبخوان بهاباد، مقدار بزرگی روند (β_{med}) و همچنین وجود یا عدم وجود روند بدست آمده برای هر چاه در محیط GIS ترسیم شد.

الگوی مکانی کیفیت آب زیرزمینی

برای بررسی تغییرات مکانی پارامترهای کیفی، از روش‌های مختلف درونیابی (قطعی و زمین‌آمار) استفاده شد. بدین منظور، روش‌های مختلف درونیابی در نرم‌افزار GIS با یکدیگر مقایسه و روش بهینه با توجه به RMSE کمتر و R^2 بیشتر به دست آمد. روش‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر، کریجینگ^۱، عکس فاصله (IDW)^۲، توابع شعاعی (RBF)، تخمین گر موضعی (GPI)^۳ و تخمین گر عام (LPI)^۴ می‌باشد. همچنین در پژوهش حاضر برای بررسی نرمالیت داده‌ها به عنوان پایه‌ای‌ترین آزمون‌های آماری از آزمون‌های کلموگروف اسمیرنوف^۵ و شاپیرو ویک^۶ استفاده گردید. همچنین به منظور انتخاب روش درونیابی مناسب، ویژگی‌های آماری و مکانی فاکتورهای مورد بررسی از جمله وجود روند مکانی، ساختار همبستگی فضایی و همسان گردی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند تا شرایط به کارگیری دقیق و

در جدول ۱ مشخصات و پارامترهای موجود مربوط به چاه‌های مشاهده‌ای ارائه شده است. با توجه به اطلاعات موجود، اندازه‌گیری‌های کیفیت آب زیرزمینی دو بار در سال انجام شده است که یکی در فصل بهار و دیگری در فصل پاییز می‌باشد. در مطالعه حاضر همچنین جهت مقایسه‌ی میزان پارامترهای دشت از استاندارد سازمان بهداشت جهانی (Wang et al., 2013) استفاده گردید. در زیر روش‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر توضیح داده می‌شود.

محاسبه روند زمانی از طریق روش‌های ناپارامتری

همانند دیگر آزمون‌های آماری، روش روندیابی من‌کندال نیز بر اساس مقایسه بین فرض صفر و فرض یک عمل می‌کند و تصمیم‌گیری نهایی در خصوص پذیرش یا رد فرض صفر انجام می‌شود. در این آزمون، فرض صفر نشان‌دهنده تصادفی بودن داده‌ها و عدم وجود روند در سری زمانی است، در حالی که رد فرض صفر (پذیرش فرض یک) بیانگر وجود یک روند معنادار در داده‌ها می‌باشد. در این تحقیق آزمون من‌کندال برای سطح اطمینان ۹۹ درصد به کار گرفته شده است که مقدار $Z_{\alpha/2}$ برابر ۲/۶۵ می‌باشد. دلیل عدم استفاده از سطح ۹۵ درصد اطمینان، نزدیکی نتایج حاصل از دو سطح اطمینان مذکور می‌باشد. در صورت مثبت بودن آماره‌ی روند، سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن آن، روند نزولی در نظر گرفته می‌شود. برای اندازه‌گیری میزان روند می‌توان شیب تخمینی β را توسط رابطه‌ای که توسط سن (Sen, 1968) ارائه و توسط هیرش و همکاران (Hirsch et al., 1982) توسعه یافت محاسبه کرد. این روش همانند روش من‌کندال بر اساس مفهوم تفاوت بین مشاهدات یک سری زمانی بنا نهاده شده است. رابطه به صورت زیر تعریف شده است:

4- Local Polynomial interpolation
5- Kolmogorov-Smirnov
6- Shapiro-Wilk

1- Kriging
2- Inverse Distance Weighting
3- Global Polynomial interpolation

صحيح روش‌های درون‌یابی برای هر پارامتر تعيين و بهترین روش انتخاب و مورد استفاده قرار گیرد.

پس از انتخاب بهترین مدل جهت درون‌یابی هر یک از فاکتورهای کیفی، اقدام به استخراج نقشه پهنه‌بندی با استفاده از داده‌های نقطه‌ای در دو سال ۱۳۸۱ و ۱۴۰۲ شد و با استفاده از شاخص کیفی آب زیرزمینی (GQI) اقدام به استخراج نقشه شاخص مذکور شد. انتخاب این دو سال به این دلیل صورت گرفت که چاه‌های مشاهده‌ای در این بازه زمانی دارای داده‌های منظم، قابل اتکا و قابل مقایسه بوده و امکان تحلیل تغییرات زمانی کیفیت آب زیرزمینی را فراهم می‌کردند. لازم به ذکر است فاکتورهای کیفی مورد بررسی در روند زمانی و مکانی یکسان بوده است.

توسعه شاخص کیفی آب‌های زیرزمینی

شاخص کیفیت آب زیرزمینی، ترکیب داده‌های آب با کیفیت‌های مختلف در دسترس را به شکلی قابل درک در می‌آورد. این شاخص ارائه‌دهنده روشی برای مختصرسازی شرایط کلی کیفیت آب است که می‌تواند به خوبی ارائه شود و به درک این مسئله که آیا کیفیت کلی آب زیرزمینی خطری بالقوه برای استفاده‌های مختلف آب است یا خیر، کمک می‌کند. در نهایت این شاخص با استفاده از غلظت یون‌های مهم مانند (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^+)، کلر (Cl^-)، سولفات (SO_4^{2-}) و کل جامدات محلول (TDS)، به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان و نشان دادن موفقیت در حفظ و بهبود و همچنین بررسی وضعیت کلی آب زیرزمینی کمک می‌کند. مراحل محاسبه این شاخص نیز به شرح زیر می‌باشد (Babiker et al., 2007; Sarvi Sadraabad & Zare, 2022; Chahouki, 2022).

نقشه اولیه

غلظت اندازه‌گیری شده در هر سلول (نقشه‌های استخراجی با کمک روش‌های مناسب درون‌یابی در مرحله قبل) و غلظت استاندارد بهداشت جهانی (Torabipoudeh et al., 2020) را به واسطه رابطه شاخص اختلاف نرمالیزه شده (رابطه ۲) ترکیب و داده‌ها به صورت نرم جهانی^۱ استخراج شد (Babiker et al., 2007).

$$C = \bar{X} - X/\bar{X} + X \quad (2)$$

در این رابطه: X و $\bar{X}$ به ترتیب غلظت استاندارد سازمان بهداشت جهانی و غلظت اندازه‌گیری شده می‌باشد.

نقشه بدست آمده بیان‌گر فاکتورهای کیفی است که به عنوان نسبت بین غلظت اندازه‌گیری شده و حداکثر غلظت قابل پذیرش محاسبه شده است و محدوده‌ای بین ۱- تا ۱ را دارا است.

نقشه رتبه‌بندی

در این مرحله، غلظت شاخص‌ها به یک نقشه رتبه‌بندی با محدوده

بین ۱ تا ۱۰ تبدیل می‌شود. رتبه ۱ نشان‌دهنده کمترین مقدار و رتبه ۱۰ بیشینه می‌باشد. می‌توان از تابع چند جمله‌ای زیر (رابطه ۳) با محدوده تغییرات ۱ تا ۱۰ استفاده کرد. در این معادله، C مقدار شاخص‌های کیفی برای هر سلول و r مقدار رتبه مربوط به آن می‌باشد (Amiri kariz kohani et al., 2021).

$$r = 0.5 \times C^2 + 4.5 \times C + 5 \quad (3)$$

برای تعیین کلی کیفیت آب از طریق رابطه زیر، پهنه‌بندی GQI ترسیم می‌گردد.

$$GQI = 100 - \left[\frac{r_1 w_1 + r_2 w_2 + r_3 w_3 + \dots + r_6 w_6}{6} \right] \quad (4)$$

در رابطه فوق r رتبه و w وزن نسبی هر یک از پارامترها می‌باشد. وزن نسبی هر پارامتر از رابطه (۵) بدست می‌آید.

$$w = \text{mean } r + 2 \quad (5)$$

برای محاسبه GQI از پارامترهای مختلف میانگین وزنی گرفته می‌شود (Grzywna & Bronowicka-Mielniczuk, 2020). وزن مختص هر پارامتر، بیان‌کننده اهمیت نسبی آن پارامتر در آب زیرزمینی مربوط به مقدار رتبه‌بندی میانگین (نقشه رتبه‌بندی) آن است. پارامترهایی که تأثیر بیشتری بر کیفیت آب‌های زیرزمینی (میزان میانگین بالا) دارند، در ارزیابی کلی کیفیت آب زیرزمینی مهم‌تر هستند. در نهایت و با تقسیم حاصل ضرب رتبه هر پارامتر در وزن میانگین آن بر تعداد کل پارامترها، شاخص کیفیت آب زیرزمینی با محدوده مقدار شاخص بین ۱ تا ۱۰۰ بدست می‌آید. مقادیر نزدیک به عدد ۱۰۰ نشان‌دهنده کیفیت مطلوب و مقادیر نزدیک به یک بیان‌گر کیفیت نامطلوب است. بدین ترتیب تأثیر پارامترها به صورت انفرادی تا حد زیادی کاهش می‌یابد و محاسبه شاخص هرگز به تعداد معینی از پارامترهای شیمیایی محدود نمی‌گردد. جدول ۲ کلاس‌بندی مقادیر شاخص GQI را نشان می‌دهد.

به منظور تحلیل تغییرپذیری کیفیت آب زیرزمینی، در دوره زمانی ۱۳۸۱-۱۴۰۲ با توجه به نقشه‌های GQI ابتدا (GQIt) و انتهای دوره (GQIt+1) مطالعاتی از رابطه (۶) استفاده شد و تغییرات کیفیت آب زیرزمینی تعیین گردید (Smiraglia et al., 2016).

$$[(GQI_{t+1} - GQI_t)/GQI_t] \times 100 \quad (6)$$

نتایج و بحث

جدول ۳ آمار توصیفی پارامترهای بررسی شده در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد و غلظت‌های آستانه را برحسب استاندارد سازمان بهداشت جهانی بیان می‌دارد.

جدول ۲- طبقه‌بندی کیفیت آب بر اساس شاخص GQI (۴)

Table 2- Classification of water quality based on GQI

0-25	25-50	50-70	70-90	90-100	مقدار GQI
کاملاً نامطبوع	نامناسب	متوسط	قابل قبول	مناسب	کلاس کیفیت آب
Completely unsuitable	Unsuitable	Medium	Acceptable	Suitable	Water quality class

جدول ۳- مشخصه‌های آماری کیفیت آبخوان مورد مطالعه در دوره (۱۴۰۲-۱۳۸۱)

Table 3- Statistical characteristics of the aquifer water quality in the period of (2002-2023)

مشخصه	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	میانگین	استاندارد آشنامیدنی سازمان بهداشت جهانی
Characteristic	Minimum	Maximum	Standard deviation	Average	Drinking standard of the WHO
Ca ²⁺	3.03	25.54	6.5	9.19	300
Mg ²⁺	3.16	17.36	4.9	7.93	300
Na ⁺	33.29	67.35	11.4	50.37	200
Cl ⁻	2.26	47.94	13.7	14.61	200
So ₄ ²⁻	3.12	76.96	21.2	18.99	250
TDS	740	7629	2110	2399	600

جدول ۴- نتایج آزمون نرمالیت داده پارامترهای کیفی آب

Table 4- Results of normality test for water quality parameters

	کلموگروف-سمیرونوف			شاپیرو-ویلک		
	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	Statistic	Df	Sig.	Statistic	df	Sig.
So ₄	.429	9	.000	.575	9	.000
Cl	.206	9	.200*	.808	9	.025
TDS	.280	9	.041	.723	9	.003
Na	.134	9	.200*	.935	9	.529
Mg	.297	9	.022	.805	9	.024
Ca	.272	9	.053	.785	9	.014

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

تغییرات مکانی

پیش از آغاز فرآیند درون‌یابی، با استفاده از دو آزمون کلموگروف اسمیرونوف و شاپیرو ویک اقدام به بررسی توزیع نرمال پارامترهای کیفی مورد نظر گردید. جدول ۴ نتایج آزمون‌های مذکور را نشان می‌دهد. نتایج آزمون نرمال بودن نشان داد که به استثناء پارامتر سدیم در آزمون شاپیرو ویک و پارامترهای کلر و سدیم در آزمون کولموگروف اسمیرونوف، سایر پارامترها از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند. همچنین به دلیل تعداد کم چاه‌ها (۹ حلقه)، روش کریجینگ بیزین تجربی نیز با خطا مواجه شد.

به منظور سنجش آمادگی داده‌ها برای تحلیل‌های مکانی، مجموعه‌ای از ارزیابی‌های آماری و فضایی شامل تحلیل نیم‌تغییرنما، بررسی همسان‌گردی (Zenebe et al., 2025) و شناسایی روند مکانی انجام شد. این تحلیل‌ها با هدف اطمینان از صحت، کفایت و سازگاری داده‌ها جهت بهره‌گیری از روش‌های درون‌یابی مناسب صورت گرفتند. بررسی‌ها نشان داد در همه پارامترها روند مکانی ضعیفی وجود دارد. پارامترهای So₄، Cl، TDS و Ca همسان‌گرد و مابقی غیرهمسان‌گرد

(تغییر نیم تغییرنما در جهات مختلف) هستند. همچنین همبستگی مکانی در پارامترهای So₄، Cl و Na زیر ۵۰ درصد و Ca زیر ۲۵ است. شاخص Mg نیز دارای نیم‌تغییرنمای خطی می‌باشد.

بر این اساس، جدول ۵ مقادیر شاخص‌های RMSE و R² را برای روش‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج این جدول بیانگر پایین بودن ضریب تعیین (R²) در تمامی روش‌ها است که بر ضعف دقت پیش‌بینی تأکید دارد. بر همین اساس، فرایند نرمال‌سازی داده‌ها به منظور ارتقای کیفیت تحلیل و افزایش دقت مدل‌های درون‌یابی اجرا گردید (Zenebe et al., 2025).

برای نرمال‌سازی داده‌ها مشابه رویکردی که توسط کراوچنکو و بولاک (Kravchenko & Bullock, 1999) انجام شد از تبدیل لگاریتمی طبیعی (Ln) استفاده گردید. جدول ۶ نتیجه تست انجام شده بر روی داده‌های نرمال شده را نشان می‌دهد.

جدول ۵- مقایسه روش‌های درون‌یابی با توجه به دقت برآورد در پارامترهای کیفی منابع آب

Table 5- Comparison of interpolation methods based on estimation accuracy of water quality parameters

	کریجینگ		کریجینگ بیزین تجربی		عکس فاصله		تخمین گر موضعی		تخمین گر عام		توابع شعاعی	
	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE
So4	0.13	4.85			0	23.84	0	45.72	0	24.2	0.02	23.24
Cl	•	3.78	خطا به علت کوچک		0.03	14.5	0	29.47	0.42	10.7	0	14.06
TDS	•	46.19	بودن اندازه نمونه		0.01	2187	0	4708	0.23	1805	0	2123
Na_	•	3.44	Error due to small		0.12	10.83	0.12	11.45	0.12	10.9	0.44	8.57
Mg	0.5	2.32	sample size		0.02	5.75	0	8.36	0.4	5.4	0.03	5.41
Ca	0.27	2.72			0.03	7.97	0.03	7.97	0	4.6	0.07	7.44

جدول ۶- نتایج آزمون نرمالیت داده پارامترهای کیفی آب (نرمال شده)

Table 6- Results of Normality Test for Water Quality Parameters (Normalized)

	کلموگروف-سمیروونوف			شاپیرو-ویلک		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
NORMAL_So4	.276	9	.046	.883	9	.170
NORMAL_Cl	.139	9	.200*	.989	9	.994
NORMAL_TDS	.145	9	.200*	.950	9	.694
NORMAL_Na	.175	9	.200*	.919	9	.383
NORMAL_Mg	.189	9	.200*	.924	9	.431
NORMAL_Ca	.159	9	.200*	.965	9	.853

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

محدودیت باشد اما با توجه به بهبود ضریب تعیین از روش کریجینگ داده‌های نرمال شده برای درون‌یابی این شاخص استفاده شد. حال با استفاده از این داده‌ها اقدام به بررسی روش‌های مختلف درون‌یابی و انتخاب بهترین روش شد (جدول ۷). همچنین به دلیل اهمیت استفاده از داده‌های اصلی در محاسبه شاخص‌های کیفی پس از بررسی اقدام به ضدلگاریتم کردن (WHO, 2004) نقشه رستری با استفاده از نرم‌افزار ARC GIS شد.

نتایج درون‌یابی پارامترهای مختلف پس از نرمال‌سازی نشان داد، نرمال‌سازی می‌تواند بر روی همسان‌گردی تأثیر بگذارد به طوری که پارامتر SO_4 پس از نرمال‌سازی غیرهمسان‌گرد شده و پارامترهای TDS و Mg پس از نرمال‌سازی همسان‌گرد شدند. همچنین نتایج نشان داد علی‌رغم این که نرمال‌سازی هیچ تأثیری بر روی روند ندارد، می‌تواند وضعیت همبستگی مکانی را ارتقا دهد. به طوری که پس از نرمال‌سازی همبستگی مکانی (نسبت اثر قطعه‌ای به سقف) در پارامترهای مختلف مثل SO_4 ، Cl و TDS زیر ۱۰ درصد رسیده است. همبستگی مکانی در پارامترهای Na و Ca به ترتیب حدود ۶۰ و ۳۰ درصد می‌باشد. بر این اساس، برای پارامترهای Cl و Ca از روش RBF ثانویه،

بررسی آزمون‌های تست توزیع نرمال نشان داد پارامتر Na دارای توزیع نرمال است اما به همراه سایر پارامترها عملیات نرمال‌سازی بر روی این پارامتر نیز انجام شد، اما نتایج نشان داد ضریب تعیین روش RBF برای داده اولیه بسیار بیشتر از داده ثانویه بوده است. این مسئله مبین این است در صورت نرمال بودن داده‌ها، نرمال‌سازی اضافی ممکن است ساختار فضایی طبیعی داده‌ها را مختل کرده و دقت روش‌های درون‌یابی مانند RBF را کاهش دهد، بویژه زمانی که همبستگی مکانی یا توزیع اولیه به طور ذاتی با مدل سازگار باشد. از این رو از داده‌های ابتدایی برای درون‌یابی با روش منتخب استفاده شد. در مورد پارامتر Mg، نتایج نشان می‌دهد که نرمال‌سازی توانسته ضریب تعیین را بهبود بخشد و داده‌ها را به حالت همسان‌گردی تبدیل کند، هرچند در هر دو حالت (داده‌های اولیه و نرمال شده) نیم‌تغییرنا خطی باقی مانده و ضریب تعیین نسبتاً قابل قبولی بدست آمده است. با وجود این که همبستگی مکانی مناسب نیست، استفاده از داده‌های نرمال شده ترجیح داده شد زیرا نرمال‌سازی نه تنها توزیع داده‌ها را بهبود داده، بلکه با کاهش پراکندگی، دقت مدل کریجینگ را افزایش داده است. از این علی‌رغم همبستگی مکانی ضعیف که ممکن است همچنان یک

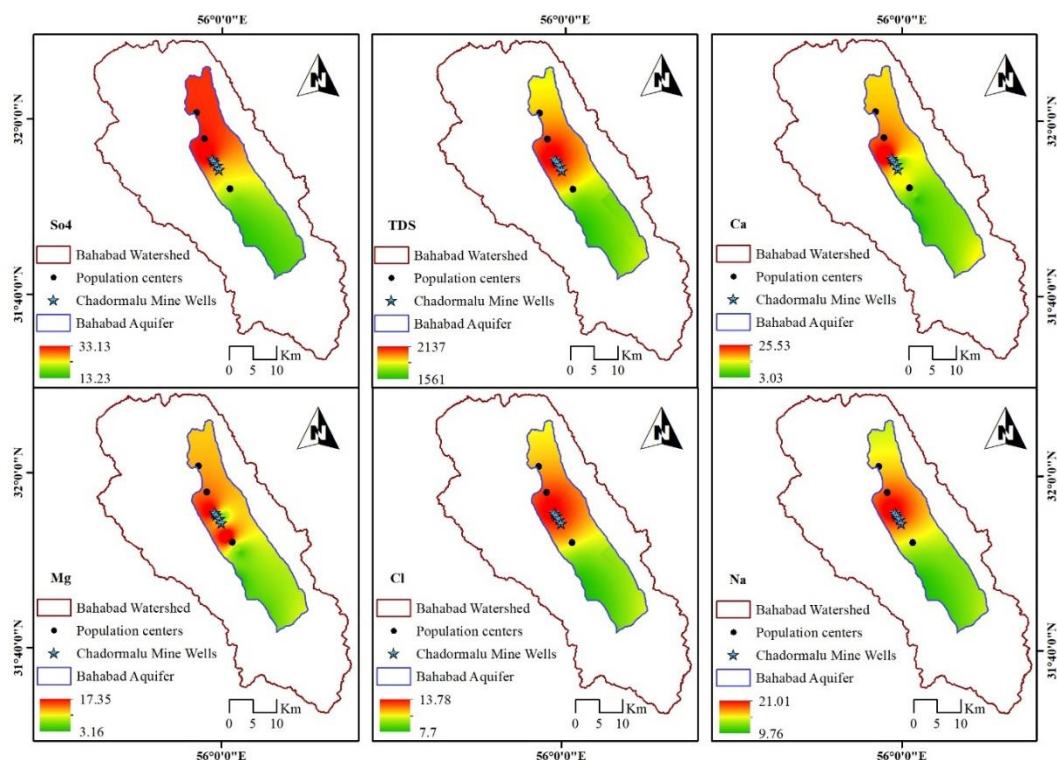
رنگ سبز و بیشترین مقدار با رنگ قرمز مشخص شده است.

TDS از روش LPI ثانویه، SO_4 از روش IDW ثانویه، Na از روش RBF اولیه و منیزیم از روش کریجینگ ثانویه استفاده شد. شکل‌های ۲ و ۳ توزیع مکانی مشخصات کیفی آبخوان مورد مطالعه برای سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۴۰۲ را نشان می‌دهد. به‌طوری‌که کمترین مقدار با

جدول ۷- مقایسه روش‌های درون‌یابی با توجه به دقت برآورد در پارامترهای کیفی منابع آب (داده نرمال)

Table 7- Comparison of interpolation methods based on estimation accuracy of water quality parameter (Normalized)

	کریجینگ		کریجینگ بیزین تجربی		عکس فاصله		تخمین گر موضعی		تخمین گر عام		توابع شعاعی	
	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE
So4	0	0.67			0.05	0.63	0.02	1.37	0.01	1.07	0	0.65
Cl	0.17	0.68	خطا به علت کوچک بودن اندازه نمونه		0.11	0.74	0.03	1.48	0.28	0.68	0.42	0.50
TDS	0.09	0.41	Error due to small sample size		0.12	0.41	0.02	1.58	0.25	0.37	0.06	0.41
Na	0.05	0.06			0.04	0.06	0.08	0.06	0.04	0.06	0.24	0.04
Mg	0.62	0.40			0.01	0.42	0	0.74	0	0.47	0.02	0.37
Ca	0.35	0.50			0.02	0.53	0.18	1.39	0	0.56	0.44	0.46

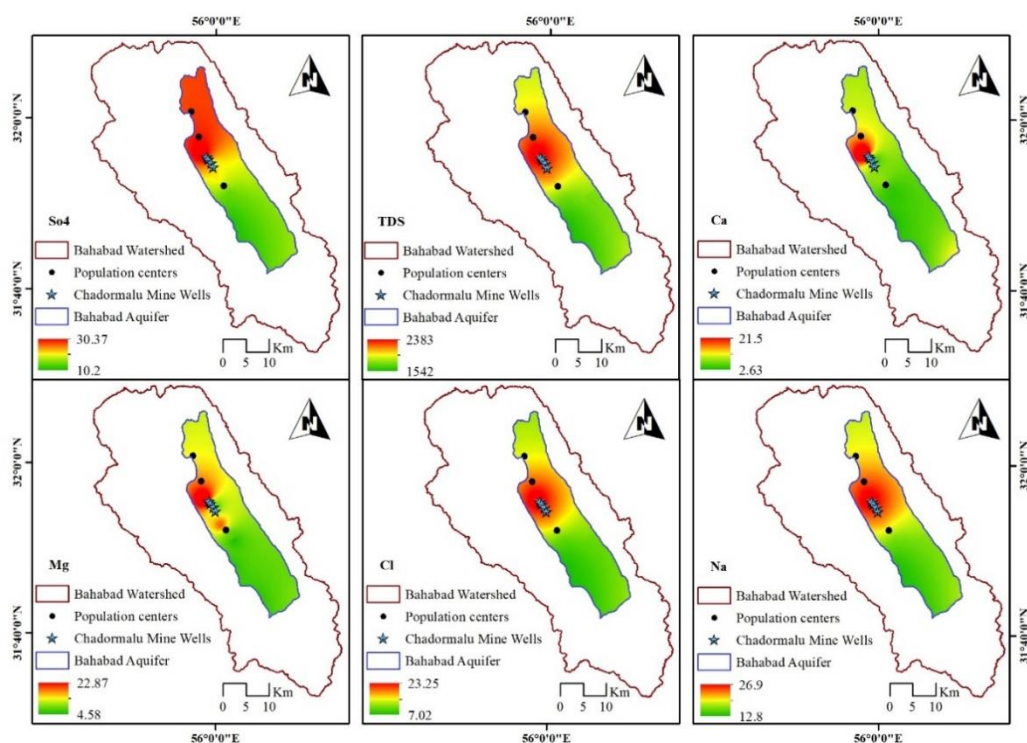


شکل ۲- توزیع مکانی مشخصات کیفی آبخوان مورد مطالعه در سال ۱۳۸۱

Figure 2- Spatial distribution of water quality characteristics in the study area Aquifer in 2002

دارد. بیشینه مقادیر پارامترهایی نظیر TDS، Na، Cl و SO_4 عمدتاً در بخش‌های مرکزی آبخوان و در محدوده‌هایی مشاهده می‌شود که تراکم چاه‌های بهره‌برداری و مراکز جمعیتی در آن‌ها بالاتر است.

بررسی نقشه‌های توزیع مکانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی در دشت بهاباد نشان می‌دهد که الگوی تغییرات کیفیت آب، بیش از آن‌که متأثر از تأثیرات زمین‌شناسی باشد، تحت تأثیر فشارهای انسانی، الگوی بهره‌برداری و مجاورت با مراکز جمعیتی و چاه‌های برداشت متمرکز قرار



شکل ۳- توزیع مکانی مشخصات کیفی آبخوان مورد مطالعه در سال ۱۴۰۲

Figure 3- Spatial distribution of water quality characteristics in the study area Aquifer in 2023

آب و تمرکز فعالیت‌های انسانی نقش تعیین‌کننده‌ای در توزیع مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت بهاباد ایفا می‌کند. این یافته‌ها بر ضرورت بازنگری در مدیریت برداشت‌های صنعتی و معدنی، کنترل توسعه چاه‌های بهره‌برداری و تقویت برنامه‌های پایش کیفی آب زیرزمینی، بویژه در نواحی مجاور مراکز جمعیتی و چاه‌های پر بارزده، تأکید می‌کند. مقایسه نقشه‌های توزیع مکانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی در سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۴۰۲ نشان‌دهنده تشدید و گسترش نواحی با کیفیت نامطلوب آب در دشت بهاباد است. در سال ۱۴۰۲، محدوده‌های با مقادیر بالاتر TDS، Na، Cl و SO_4 نسبت به سال ۱۳۸۱ از تمرکز موضعی فراتر رفته و به صورت گسترده‌تری در بخش‌های مرکزی آبخوان توسعه یافته‌اند. این روند افزایشی بویژه در مجاورت مراکز جمعیتی و چاه‌های بهره‌برداری برجسته‌تر است. افزایش تدریجی غلظت این پارامترها را می‌توان نتیجه برداشت مداوم و فزاینده از آبخوان، افت سطح آب زیرزمینی، کاهش تغذیه طبیعی و انتقال بخشی از آب به خارج از حوضه دانست. به طور کلی، سیر تحول کیفی آب زیرزمینی طی دوره مورد بررسی بیانگر غلبه فشارهای انسانی بر سیستم آبخوان بوده و نشان می‌دهد که تداوم الگوی فعلی بهره‌برداری، می‌تواند منجر به افت بیشتر کیفیت آب و محدود شدن قابلیت استفاده از منابع آب زیرزمینی در آینده شود.

افزایش غلظت املاح محلول و یون‌های غالب در این نواحی می‌تواند ناشی از برداشت بی‌رویه و مداوم از آبخوان باشد که منجر به افت سطح آب زیرزمینی، کاهش تغذیه طبیعی و در نتیجه تمرکز بیشتر املاح در آب می‌شود. این شرایط بویژه در مجاورت چاه‌های تولیدی وابسته به فعالیت‌های صنعتی و معدنی، از جمله چاه‌های معدن چادرملو، بارزتر است؛ به طوری که برداشت متمرکز آب و انتقال بخشی از آن به خارج از حوضه، تعادل طبیعی آبخوان را بر هم زده و زمینه‌ساز افت کیفیت آب زیرزمینی در مقیاس مکانی شده است که با نتیجه پژوهش امیری کاریزکهنی و همکاران (Amiri kariz kohani *et al.*, 2021) و الفرح و والراونس (Alfarrah & Walraevens, 2018) مطابقت دارد.

همچنین، هم‌پوشانی نواحی با کیفیت پایین‌تر آب زیرزمینی با مراکز جمعیتی بیانگر نقش مؤثر فعالیت‌های انسانی نظیر افزایش مصرف آب، بازگشت جریان‌های آبی با کیفیت پایین و تغییر الگوی کاربری اراضی در تشدید آلودگی و شوری آب زیرزمینی است. در چنین شرایطی، کاهش توان خودپالایی آبخوان و افزایش زمان ماند آب در اثر افت سطح ایستابی، می‌تواند روند تجمع املاح را تسریع کند.

به طور کلی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که الگوی برداشت

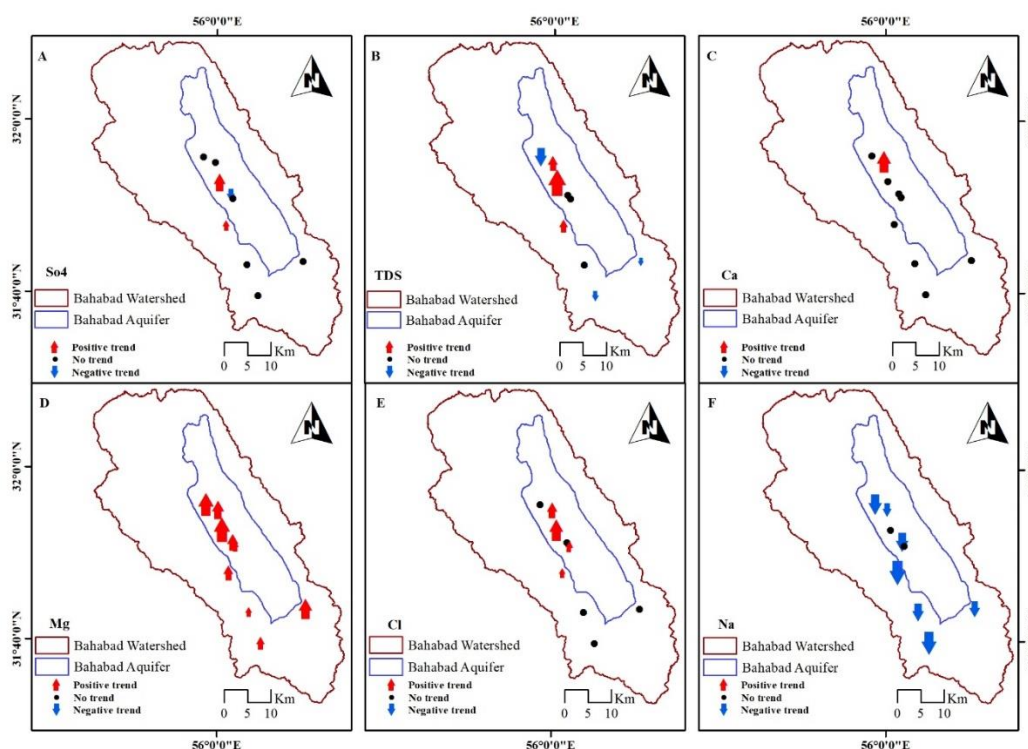
روند زمانی

شکل ۴ نشان‌دهنده وضعیت روند مشخصه‌های کیفی هر کدام از چاه‌هایی مورد بررسی است که از طریق روش‌های من‌کندال و شیب سن در سطح ۹۹ درصد انجام شد. نتایج نشان داد، در دوره آماری مورد بررسی الگوی تغییرات زمانی کیفیت آب، ناهمگن و وابسته به موقعیت مکانی چاه‌ها است. در اغلب ایستگاه‌ها، پارامتر Ca فاقد روند معنادار بوده و تنها در یک ایستگاه روند افزایشی ضعیف مشاهده شده است. در مقابل، پارامتر Cl در چندین ایستگاه دارای روند افزایشی معنادار با شیب مثبت بوده که بیانگر افزایش تدریجی شوری آب زیرزمینی در برخی نقاط دشت است.

پارامتر Mg در اکثر ایستگاه‌ها روند افزایشی معنادار نشان می‌دهد که می‌تواند به افزایش غلظت املاح محلول در اثر برداشت مداوم و افت سطح آب زیرزمینی مرتبط باشد. همچنین، Na در تعدادی از ایستگاه‌ها دارای روند کاهشی معنادار و در برخی دیگر فاقد روند مشخص است که نشان‌دهنده رفتار مکانی متفاوت این یون در آبخوان می‌باشد. پارامتر SO_4 عمدتاً فاقد روند معنادار است، هر چند در چند ایستگاه روند افزایشی یا کاهشی محدود مشاهده می‌شود.

از سوی دیگر، پارامتر TDS در بیشتر ایستگاه‌ها دارای روند معنادار (عمدتاً کاهشی و در یک ایستگاه افزایشی شدید) است که بیانگر تغییرات قابل‌توجه در میزان املاح محلول آب زیرزمینی طی دوره مطالعه می‌باشد. این تغییرات می‌تواند تحت تأثیر الگوی برداشت آب، تمرکز چاه‌های بهره‌برداری، تغییرات کاربری اراضی و انتقال بخشی از آب به خارج از حوضه قرار گرفته باشد. به‌طور کلی، نتایج آزمون روند نشان می‌دهد که کیفیت آب زیرزمینی دشت بهاباد در برخی پارامترهای کلیدی، به‌ویژه Mg، Cl و TDS، دچار تغییرات معنادار زمانی شده و این موضوع بر ضرورت پایش مستمر و مدیریت برداشت‌های انسانی تأکید می‌کند.

بر این اساس، در آبخوان بهاباد تغییرات سولفات و کلر تا حدودی الگوی مشابهی را نشان می‌دهد که این نتیجه با یافته‌های خسروی و همکاران (Khosravi et al., 2016)، دشتی برمکی و همکاران (DashtiBarmaki et al., 2014)، سبزواری و زینی‌وند (Sabzevari & Zeinivand, 2020) و سروی صدرآباد و زارع چاهوکی (Sarvi & Zare Chahouki, 2022) تا حدودی همخوانی دارد. این همخوانی به‌دلیل انجام مطالعات در مناطق خشک و نیمه‌خشک، استفاده مشترک از روش GQI و بررسی تغییرات زمانی کیفیت آب در پاسخ به برداشت از آبخوان می‌باشد.



شکل ۴- روند پارامترهای کیفی آب چاه‌های مورد بررسی در دشت بهاباد، (A): سولفات، (B): کل جامدات محلول، (C): کلسیم، (D): منیزیم، (E): کلر و (F): سدیم

Figure 4- The trend of the quality parameters of the study wells in the Bahabad Plain, (A): sulfate, (B): TDS, (C): calcium, (D): magnesium, (E): chloride (F): sodium

قرار دارد کیفیت پایین‌تر از سایر نواحی می‌باشد. دلیل این امر، وجود حداکثر غلظت پارامترهای کیفی در این نواحی از آبخوان می‌باشد. بیشترین کاهش کیفیت آب در محدوده شهر بهاباد، سایر مراکز جمعیتی و همچنین در مجاورت چاه‌های صنعتی که آب را به خارج از حوضه منتقل می‌کنند، مشاهده شد. این الگو بیانگر فشار بالای بهره‌برداری و مصرف قابل توجه آب زیرزمینی در این نواحی است. در مقابل، بیشترین بهبود کیفیت آب زیرزمینی مربوط به بخش جنوب‌غربی دشت بهاباد می‌باشد که از فشارهای انسانی کمتری برخوردار است.

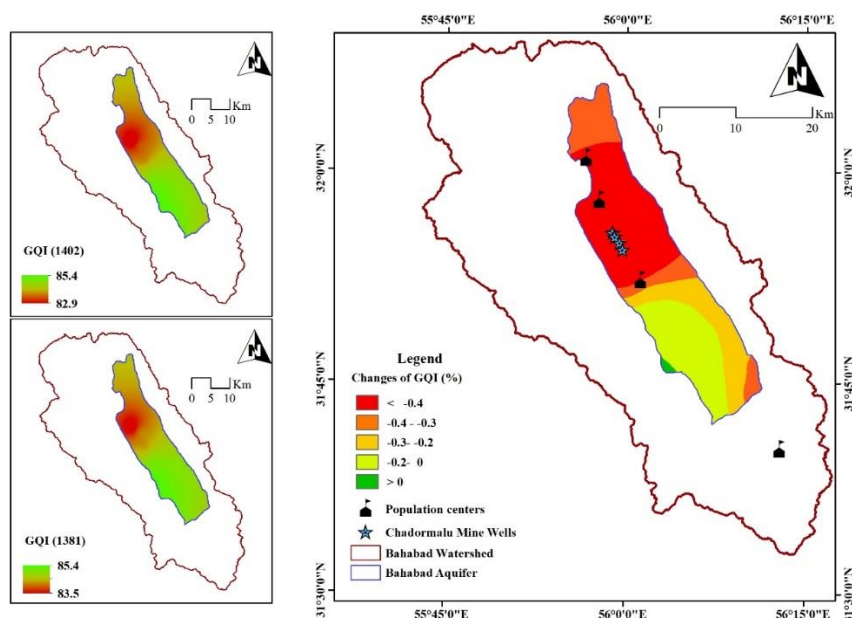
نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان بهاباد طی دوره زمانی ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۲ در طبقه قابل قبول قرار دارد، اما روند کاهشی اندک اما معناداری در کیفیت مشاهده شد. میانگین GQI در آغاز دوره حدود ۸۵ و در انتها حدود ۸۳-۸۴ بود که بیانگر کاهش جزئی کیفیت کلی است. این کاهش عمدتاً در نواحی مرکزی و شمالی آبخوان، به‌ویژه اطراف مراکز جمعیتی (مانند شهر بهاباد) و مجاورت چاه‌های برداشت متمرکز صنعتی (ازجمله چاه‌های معدن چادرملو)، برجسته‌تر بود.

در مقابل، دو پارامتر منیزیم و سدیم رفتار زمانی متفاوت و حتی متضادی را از خود نشان می‌دهند. بر اساس نتایج پژوهش‌های پیشین، پارامترهای سدیم، کلر و TDS بیشترین تأثیر را در تعیین کیفیت آب زیرزمینی داشته و معمولاً از الگوی تغییرات مشابهی تبعیت می‌کنند؛ با این حال، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که این هم‌رفتاری در آبخوان بهاباد به‌صورت یکنواخت مشاهده نمی‌شود. این تفاوت می‌تواند ناشی از غلبه عوامل انسانی، بویژه الگوی برداشت متمرکز، انتقال آب به خارج از حوضه و ناهمگنی مکانی فشار بهره‌برداری باشد که موجب تفکیک رفتار زمانی برخی پارامترهای کیفی نسبت به یکدیگر شده است.

پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی

شکل ۵، نقشه پهنه‌بندی شاخص GQI مربوط به ابتدا و انتهای دوره زمانی و تغییرپذیری آن در آبخوان بهاباد می‌باشد. بر اساس این نقشه و بازه تغییرات مقدار GQI، آبخوان در کلاس قابل قبول قرار دارد. نتایج نشان داد که تغییرات شاخص GQI در بازه‌ای بین ۰/۵- تا ۰/۱+ درصد متغیر است؛ به‌طوری‌که مقادیر منفی بیانگر کاهش و مقادیر مثبت نشان‌دهنده بهبود کیفیت منابع آب زیرزمینی می‌باشند. در نواحی شمال غرب آبخوان که مراکز جمعیتی بزرگ‌تر مانند شهر بهاباد



شکل ۵- پهنه‌بندی GQI و میزان تغییرات آن در دوره ۱۳۸۱-۱۴۰۲
Figure 5- GQI zoning and its changes in the period of 2002-2023

مقایسه روش‌های درون‌یابی نشان داد که در شرایط نمونه‌برداری محدود (۹ چاه) و همبستگی مکانی ضعیف، روش‌های قطعی اغلب دقت پیش‌بینی بالاتری نسبت به روش‌های زمین‌آماري (کریجینگ و کریجینگ بیزین تجربی) ارائه کردند. نرمال‌سازی لگاریتمی در برخی پارامترها دقت مدل را بهبود بخشید، اما در مواردی مانند Na^+ که توزیع اولیه نزدیک به نرمال بود، استفاده از داده‌های خام نتایج بهتری به همراه داشت.

در نهایت، با وجود کاهش اندک شاخص GQI، نقشه تغییرات آن نتوانست شدت محلی کاهش کیفیت به‌ویژه در پارامترهای تعیین‌کننده مانند TDS، Na^+ و SO_4^{2-} را به‌طور کامل منعکس کند. این یافته بیانگر آن است که شاخص‌های ترکیبی مانند GQI می‌توانند اثرات متضاد روندهای پارامتری را تا حدی خنثی کرده و تصویری متعادل‌تر و واقع‌بینانه‌تر از وضعیت کلی کیفیت ارائه دهند. نتایج پژوهش بر ضرورت بازنگری فوری در مدیریت برداشت‌های صنعتی و معدنی، کنترل توسعه چاه‌ها و اجرای برنامه‌های پایش مستمر کیفیت آب زیرزمینی در نواحی پر فشار تأکید دارد.

بررسی توزیع مکانی پارامترهای کیفی حاکی از آن است که الگوی شوری و غلظت یون‌ها بیش از عوامل زمین‌شناختی طبیعی، تحت تأثیر فشارهای انسانی از جمله برداشت بی‌رویه، افت سطح ایستابی، انتقال بین‌حوضه‌ای آب و تغییر کاربری اراضی قرار دارد. نواحی با بیشترین غلظت املاح محلول هم‌پوشانی قابل توجهی با تراکم چاه‌های بهره‌برداری و مراکز جمعیتی نشان می‌دهند که این امر زمینه‌ساز تمرکز املاح و کاهش توان خودپالایی آبخوان شده است. تحلیل روند زمانی با استفاده از آزمون‌های آماری، ناهمگنی مکانی قابل‌ملاحظه‌ای را آشکار ساخت. پارامترهای Mg^{2+} و Cl^- در اکثر ایستگاه‌ها روند افزایشی معنادار داشتند، در حالی که Na^+ و SO_4^{2-} در برخی چاه‌ها روند کاهشی یا بدون روند نشان دادند. TDS نیز عمدتاً روندهای متفاوتی (اغلب کاهشی اما در یک ایستگاه افزایشی شدید) از خود بروز داد. این رفتار متفاوت، به‌ویژه جدایی روند سدیم از کلر و TDS، با بسیاری از مطالعات پیشین در آبخوان‌های ایران همخوانی ندارد و می‌تواند ناشی از غلبه عوامل انسانی محلی مانند برداشت متمرکز و انتقال آب به خارج از حوضه باشد.

References

- Alfarrah, N., & Walraevens, K. (2018). Groundwater overexploitation and seawater intrusion in coastal areas of arid and semi-arid regions. *Water*, 10(2), 143. <https://doi.org/10.3390/w10020143>
- Alipour, A., Rahimi, J., & Azarnivand, A. (2017). Groundwater quality analysis for drinking and agricultural purposes a prerequisite for land use planning in the arid and semi-arid regions of Iran. *Journal of Range and Watershed Management*, 70(2), 423-434. (In Persian).
- Amiri kariz kohani, F.S., Khashe Siuki, A., Ahmadi Haji, A.H., & Kavusi, M. (2021). Investigating the effect of groundwater on aquifer water salinity change (Case study: Neyshabour plain). *Journal of Aquifer and Qanat*, 2(1), 92-101.
- Babiker, I.S., Mohamed, M.A.A., & Hiyama, T. (2007). Assessing groundwater quality using GIS. *Water Resources Management*, 21, 699-715. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9059-6>
- Chenini, I., & Khemiri, S. (2009). Evaluation of ground water quality using multiple linear regression and structural equation modeling. *International Journal of Environment Science and Technology*, 6(3), 509-519. <https://doi.org/10.1007/bf03326090>
- Cordoba, E., Martinez, A., & Ferrer, E. (2010). Water quality indicators: comparison of a probabilistic index and a general quality index, The case of the confederacion hidrografica del jucar (spain). *Ecological Indicators*, (10), 1049-1054. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.01.013>
- DashtiBarmaki, M., Rezaei, M., & Saberi Nasr, A. (2014). Assessment of groundwater quality index (GQI) for Lenjanat aquifer using GIS. *Journal of Engineering Geology*, 8(2), 2121-2138. (In Persian).
- Dustmohammadian, A.H., Mohammady, M., Amiri, M., & Kianian, M.K. (2021). Investigating temporal changes of groundwater quality in Semnan plain using geostatistical method, *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 14(51), 59-62. (In Persian).
- El Baba, M., Kayastha, P., Huysmans, M. & De Smedt, F. (2020). Evaluation of the groundwater quality using the water quality index and geostatistical analysis in the Dier al-Balah Governorate, Gaza Strip, Palestine. *Water*, 12(1), 262. <https://doi.org/10.3390/w12010262>
- Elamassi, K.S. (2012). Assessment of groundwater quality using multivariate and spatial analyses in Gaza governorate-Palestine. The Islamic University-Gaza., Faculty of Science, Master's Degree Program, Environmental science.
- Grzywna, A., & Bronowicka-Mielniczuk, U. (2020). Spatial and temporal variability of water quality in the Bystrzyca river basin, Poland. *Water*, 12(1), 190. (In Persian). <https://doi.org/10.3390/w12010190>
- Hirsch Robert, M., Slack James, R., & Smith Richard, A. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research*, 18(1). <https://doi.org/10.1029/wr018i001p00107>
- Ibrahim, M.N. (2019). Assessing groundwater quality for drinking purpose in Jordan: Application of water quality

- index. *Journal of Ecological Engineering*, 20(3). <https://doi.org/10.12911/22998993/99740>
14. Kendall, M.G. (1975). Rank Correlation Measures, Charles Griffin Inc. London.
 15. Khosravi, H., Heydari, E., Zehtabian, G., & Bazrafshan, J. (2016). Analysis of spatial and temporal trends of groundwater index (GRI) (Case study: Yazd-Ardakan plain). 22(4), 711-720. (In Persian)
 16. Kravchenko, A., & Bullock, D.G. (1999). A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. *Agronomy Journal*, 91(3), 393-400. <https://doi.org/10.2134/agronj1999.00021962009100030007x>
 17. Kundzewicz, Z.W. (1997). Water resources for sustainable development. *Hydrological Sciences Journal*, 42(4), 467-480. <https://doi.org/10.1080/02626669709492047>
 18. Mann, H.B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
 19. Nasser, M., Monem, M.J., Shahverdi, K., & Afsous, M. (2021). Zoning of Bamdej wetland water quality based on the spatio-temporal Kriging. *Wetland Ecobiology*, 12(2). (In Persian)
 20. Nouraki, A., & Hooshmand, A. (2021). Evaluation of trend and spatial distribution pattern of groundwater quality using water quality indices (Case study: Hamedan-Bahar plain). *Journal of Environmental Science and Technology*. (In Persian)
 21. Parsaie, F., Mahmoodi, M.A., & Egdernezhad, A. (2020). Assessment of groundwater quality for drinking and agriculture in Qorveh plain. *Wetland Ecobiology*, 12(1). (In Persian)
 22. Sabzevari, Y., & Zeinivand, H. (2020). Assessing the trend and quality classification of groundwater resources in Boroujerd – Dorod plain. *Wetland Ecobiology*, 12(3), 101-116. (In Persian)
 23. Sabzevari, Y., Nasrolahi, A., & Yonesi, H. (2020). Investigation of temporal-spatial variations of groundwater resources quality in Borujerd-Dorood Plain. *Irrigation and Water Engineering*, 11(1), 150-167. (In Persian)
 24. Sarvi Sadraabad, H., & Zare Chahouki, A. (2022). Study of the efficiency of groundwater quality index to evaluate the long-term effects of inter-basin water transfer using non-parametric methods and GIS (Case study Yazd-Ardakan aquifer). *Water and Soil*, 35(6), 804-791. (In Persian)
 25. Sen, Paranab Kumar. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
 26. Smiraglia, D.T., Ceccarelli, S., Bajocco, L., & Perini, L. (2016). Linking trajectories of land change, land degradation processes and ecosystem services. *Environmental Research*, 147, 590-600. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.11.030>
 27. Sun, X., Zhang, H., Zhong, M., Wang, Z., Liang, X., Huang, T., & Huang, H. (2019). Analyses on the temporal and spatial characteristics of water quality in a seagoing river using multivariate statistical techniques: A case study in the Duliujian River, China. *International Journal of Environment and Research Public Health*, 16, 1020. <https://doi.org/10.3390/ijerph16061020>
 28. Torabipoudeh, H., Yonesi, H., & Arshia, A. (2020). Evaluation of quality changes in the groundwater resources and IRWQIGC upstream of Zayandehrood Dam. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 24(2), 27-40. (In Persian). <https://doi.org/10.47176/jwss.24.2.41431>
 29. Wang, J., Xiao, W., Wang, H., Chai, Z., Niu, C., & Li, W. (2013). Integrated simulation and assessment of water quantity and quality for a river under changing environmental conditions. *Chinese Science Bulletin*, 58(27), 3340-3347. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5622-0>
 30. WHO, World Health Organization. (2004). Guidelines for drinking-water quality, 1, 3rdedn, recommendations.WHO, Geneva, Switzerland.
 31. WHO. (2017). *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum*. World Health Organization, Geneva.
 32. Zenebe, G.B., Hailu, G., & Girmay, A. (2025). Evaluation of geostatistical interpolation methods on spatial representation of groundwater depth and nitrate concentration of Elalla-Aynalem wellfield, Northern Ethiopia. *Discov Water*, 5, 9. <https://doi.org/10.1007/s43832-025-00189-y>

Comparison of Parametric and Empirical Approaches for Assessing Tunnel Excavation Impacts on Spring Discharge: A Case Study of the Hezarmasjed Water Conveyance Tunnel

A. Saberinasr^{1*}, F. Ghatrani-nejad¹, M. Dashti Barmaki²

1- Geology Group, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

(*- Corresponding Author Email: a.saberinasr@scu.ac.ir)

2- Tehran Regional Water Authority, Tehran, Iran

Received: 28 February 2026

Revised: 12 July 2026

Accepted: 22 July 2026

Available Online: 22 July 2026

How to cite this article:

Saberinasr, A., Ghatrani-nejad, F., & Dashti Barmaki, M. (2026). Comparison of parametric and empirical approaches for assessing tunnel excavation impacts on spring discharge: A case study of the Hezarmasjed water conveyance tunnel. *Journal of Soil and Water*, 40(2), 127-151. (In Persian).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.98028.1530>

Introduction

Water conveyance tunnels are critical infrastructures for sustainable water supply, particularly in arid and semi-arid regions. However, tunnel excavation can significantly alter groundwater systems, resulting in potential hazards such as sudden groundwater inflow, reduction in aquifer storage, and deterioration of groundwater quantity and quality. In fractured and karstic environments, these impacts may extend over considerable distances and potentially modify regional hydrogeological regimes.

To address these challenges, various predictive approaches have been developed, including numerical modeling, parametric methods, hybrid techniques, and empirical models. Although numerical models can provide detailed insights into groundwater responses to tunnel excavation, their application generally requires extensive datasets and complex calibration procedures, which may limit their applicability in heterogeneous geological settings. Consequently, parametric and empirical approaches, such as the Drawdown Hazard Index (DHI) and Tunnel Impact Score (TIS), have received increasing attention because of their flexibility, simplicity, and suitability for preliminary assessments and real-time decision-making.

The Hezarmasjed water conveyance tunnel, located in northeastern Iran within the Kopet-Dagh tectonic zone, traverses a highly fractured carbonate system hosting numerous springs. Given the dependence of local communities on these springs, assessing the potential impacts of tunnel excavation is essential. This study aims to identify the main controlling factors governing variations in spring discharge and to evaluate spring vulnerability using both the DHI and TIS approaches.

Materials and Methods

The study area is situated in a structurally complex mountainous region characterized by active tectonics, heterogeneous lithology, and significant hydrogeological sensitivity. The tunnel, approximately 8.8 km in length, intersects several geological formations, including carbonate units (Mozduran and Tigran) acting as primary aquifers, and shale-dominated formations with low permeability. Groundwater flow is predominantly controlled by fracture networks and karstification processes, resulting in rapid hydrological responses to precipitation events.

A total of 45 springs were investigated at varying distances from the tunnel axis. Field data included hydrogeological observations, Lugeon permeability tests, and structural analyses. Permeability values generally ranged from $1\text{E-}7$ to $2.5\text{E-}6$ m/s, indicating low to moderate hydraulic conductivity, with higher values in fractured and karstified zones.

Two complementary methods were employed for impact assessment. The DHI method (Dematteis et al., 2001) is a semi-quantitative parametric approach based on seven key parameters, including fracture frequency, rock mass



Authors retain the copyright. 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.2026.98028.1530>

permeability, overburden thickness, plastic zone radius, fault–spring interaction, spring type, and distance from the tunnel. These parameters were normalized and combined to calculate a continuous index representing the risk of spring discharge reduction.

The TIS method (Hassanpour et al., 2021) is an empirical approach that evaluates spring vulnerability based on four main factors: tunnel water inflow (40% weight), hydraulic connectivity (40%), distance from the tunnel (15%), and aquifer recharge capacity (5%). The method provides a classification of impact severity, ranging from negligible to significant discharge reduction.

Results and Discussion

The DHI results indicate that spring vulnerability is primarily controlled by structural and hydrogeological parameters, particularly fracture density and permeability. Calculated DHI values range from 0.1 to 1.5, demonstrating a wide spectrum of potential impacts. Approximately 11% of springs are classified as highly to critically affected ($DHI \geq 0.6$), while the majority (about 89%) are expected to experience minor to moderate discharge reductions. Springs with high DHI values are typically located in highly fractured carbonate formations with strong hydraulic connectivity, where tunnel excavation acts as a drainage boundary, intercepting groundwater flow paths (Vincenzi et al., 2022; Saberinasr & Dashti Barmaki, 2023).

In contrast, springs located in low-permeability formations or at greater distances from the tunnel exhibit minimal sensitivity, with DHI values below 0.2. More than 70% of springs fall within an intermediate range, indicating moderate but persistent reductions due to partial hydraulic connectivity.

The TIS results highlight the importance of dynamic hydrogeological parameters, particularly tunnel water inflow and hydraulic connectivity. TIS values range from 1.6 to 6.9, reflecting significant variability in system response. Approximately 44% of springs are classified as unaffected, 44% experience moderate discharge reduction, and around 12% are subject to significant decline.

High-risk springs, such as Sirzar and Bamchenar, exhibit strong hydraulic connectivity and are located within sensitive recharge zones. Notably, the results indicate that hydraulic connectivity can dominate system behavior even at distances exceeding 1000 m, confirming previous findings that connectivity is more influential than geometric proximity (Hassanpour et al., 2021). Conversely, springs located in areas with higher recharge capacity and weaker hydraulic connectivity show minimal impact, even when tunnel inflow is relatively high. This behavior reflects the buffering capacity of aquifer systems, which can partially compensate for tunnel-induced drainage.

A comparative analysis of the two methods demonstrates that the DHI approach emphasizes intrinsic geological and structural conditions, providing a continuous representation of vulnerability, whereas the TIS method focuses on functional aquifer responses and offers a more practical classification of impact severity. The consistency between both methods in identifying high-risk springs supports the reliability of the integrated approach.

Conclusion

This study demonstrates that tunnel excavation can significantly affect groundwater systems, particularly in fractured and karstic aquifers. The integrated application of DHI and TIS methods provides a comprehensive framework for assessing these impacts.

The DHI method is effective for identifying intrinsic vulnerability and worst-case scenarios, highlighting the role of geological structures, permeability, and fracture density. Approximately 11% of springs are at high to critical risk, while most are expected to experience moderate impacts.

In contrast, the TIS method offers a more operational perspective by incorporating dynamic hydrogeological parameters, classifying springs into significant, moderate, and negligible impact categories. The results emphasize the dominant role of hydraulic connectivity and aquifer recharge capacity in controlling system response.

Overall, the combined use of parametric and empirical approaches enhances the reliability of impact assessments and provides a robust basis for groundwater management in tunnel projects. This integrated methodology is particularly suitable for complex hydrogeological environments where data limitations restrict the application of numerical models.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the Fanavaran Tarh Jame Consulting Engineers Company for providing essential datasets, technical documentation, and field measurements that enabled a comprehensive and reliable analysis of the hydrogeological system. Their professional support played a crucial role in the successful completion of this study.

Keywords: Drawdown Hazard Index (DHI), Drying, Groundwater inflow, Hydraulic connectivity, Tunneling Impact on Springs discharge (TIS)

مقاله پژوهشی

جلد ۴۰، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، ص. ۱۵۱-۱۲۷

مقایسه روش‌های پارامتریک و تجربی در ارزیابی اثرات حفاری تونل بر آبدهی چشمه‌ها: مطالعه موردی تونل انتقال آب هزارمسجد

امیر صابری نصر^{۱*} - فاطمه قطرانی نژاد^۱ - مجید دشتی برمکی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۳۱

چکیده

حفار تونل‌های انتقال آب، اگرچه نقش مهمی در تأمین منابع آبی ایفا می‌کند، اما می‌تواند موجب اختلالات جدی در رژیم هیدروژئولوژیکی و آبدهی چشمه‌ها شود. در این پژوهش، اثرات احتمالی حفاری تونل انتقال آب هزارمسجد در شمال شرق ایران بر ۴۵ چشمه پیرامونی، با استفاده از دو رویکرد شاخص خطر افت (DHI) و شاخص اثر تونل بر آبدهی چشمه (TIS) مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. منطقه مورد مطالعه در زون ساختاری کپه‌داغ واقع شده و با گسترش سازندهای آهکی مزدوران و تیرگان، شکستگی‌های تکنیکی فعال و تراکم بالای چشمه‌ها شناخته می‌شود. در روش DHI، هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی و هندسی شامل نفوذپذیری، فراوانی شکستگی، ضخامت روباره، زون پلاستیک، ارتباط با گسل، نوع چشمه و فاصله از تونل لحاظ شد. در مقابل، روش TIS بر چهار عامل عملکردی شامل شدت آب ورودی به تونل، فاصله چشمه-تونل، ارتباط هیدرولیکی و قابلیت تغذیه مجدد آبخوان متمرکز است. نتایج DHI نشان می‌دهد که حدود ۱۱ درصد از چشمه‌ها در معرض کاهش شدید آبدهی تا خشکیدگی کامل قرار دارند، در حالی که اکثریت چشمه‌ها کاهش بخشی یا ناچیز را تجربه خواهند کرد. طبقه‌بندی TIS نیز نشان داد که ۵ چشمه در کلاس افت قابل توجه، ۲۰ چشمه در کلاس افت متوسط و ۲۰ چشمه در کلاس بدون تأثیر قرار می‌گیرند. مقایسه نتایج حاکی از آن است که DHI در تبیین مکانیزم‌های ساختاری نیست و TIS در اولویت‌بندی مدیریتی و پیامدمحور چشمه‌ها کارآمدتر است. استفاده توأمان از این دو روش، چارچوبی قابل اعتماد برای مدیریت مخاطرات هیدروژئولوژیکی پروژه‌های تونل‌سازی فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آب ورودی به تونل، ارتباط هیدرولیکی، خشکیدگی، شاخص خطر افت (DHI)، شاخص اثر تونل بر آبدهی چشمه (TIS)

مقدمه

کیفیت و کمیت منابع آب زیرزمینی می‌شود (Zheng et al., 2021; Li et al., 2024). در برخی موارد، این تغییرات می‌تواند خسارات قابل توجهی به رژیم هیدروژئولوژیکی منطقه وارد کند (Chen, 2021; Sadique et al., 2025). بر این اساس، پیش‌بینی و ارزیابی مخاطرات در مراحل مختلف طراحی و اجرای تونل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و روش‌های متعددی برای این هدف توسعه یافته‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های پارامتریک مانند ارزیابی اثرات زیست محیطی^۱ (Samimi-Namin et al., 2014; Sun et al., 2025)، روش DHI (Vincenzi et al., 2022; Dematteis et al., 2001)،

حفاری تونل‌های انتقال آب می‌تواند با ایجاد زهکشی آب زیرزمینی پیامدهای مخرب هیدروژئولوژیکی و زیست‌محیطی به همراه داشته باشد که پایداری آبخوان‌ها و معیشت جوامع محلی را با مخاطرات جدی مواجه می‌سازد. از جمله این مخاطرات می‌توان به وقوع هجوم ناگهانی آب زیرزمینی به درون تونل در طول فرآیند حفاری اشاره کرد که علاوه بر ایجاد خسارت به تجهیزات و تأخیر در پیشرفت پروژه، موجب تغییر در تراز آب زیرزمینی، کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی آبخوان و تغییر در

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

(*) نویسنده مسئول: (Email: a.saberinasr@scu.ac.ir)

۲- شرکت آب منطقه‌ای تهران، تهران، ایران

زیرزمینی در شبکه درزه و شکاف‌های نفوذپذیر گردد. با توجه به وابستگی معیشت ساکنین منطقه به چشمه‌ها برای مصارف شرب، کشاورزی و دامداری، و همچنین اهمیت زیست‌محیطی این منابع آبی، شناسایی و مدیریت مخاطرات احتمالی، از اهمیت بالایی برخوردار است. در نتیجه هدف اصلی این مطالعه، شناسایی عوامل کلیدی مؤثر بر تغییرات آبدی منابع آبی در محدود مطالعاتی و تعیین چشمه‌های در معرض خطر کاهش آبدی است. برای دستیابی به این اهداف و ارزیابی اثرات، از دو روش پارامتریک DHI (Dematteis et al., 2001) و روش تجربی TIS (Hassanpour et al., 2021) استفاده خواهد شد.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

تونل انتقال آب هزارمسجد به‌عنوان بخشی از یک پروژه زیرساختی حیاتی، با هدف پایدارسازی تأمین آب شرب کلان‌شهر مشهد و با بهره‌گیری از پتانسیل منابع آب‌های مرزی در شمال شرق کشور طراحی و اجرا گردیده است. این تونل با طول تقریبی ۸۸۰۰ متر، در محدوده استان خراسان رضوی و در فاصله تقریبی ۶۰ کیلومتری شمال شرق مشهد بین شمال شهرستان میامی در روستای نئی تا جنوب سیرزار واقع شده است. پرتال خروجی این تونل در فاصله ۱۳ کیلومتری شمال شهرستان میامی قرار دارد.

زمین‌شناسی منطقه

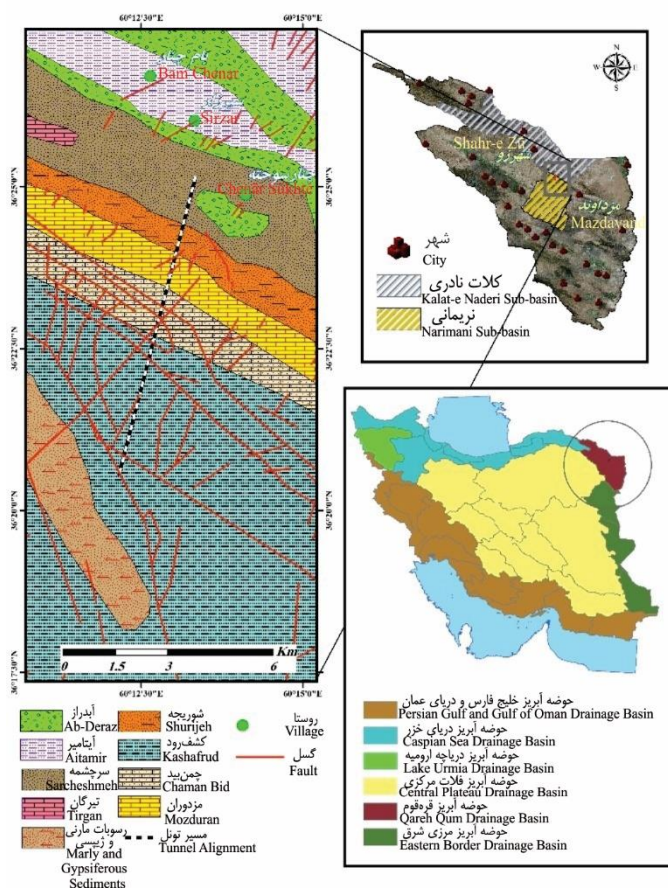
منطقه مورد مطالعه جزئی از حوضه رسوبی کپه‌داغ است که به صورت یک کمربند طویل در شمال خراسان رضوی واقع شده و در ادامه به بخش‌های شمالی ترکمنستان امتداد می‌یابد. این زون از جنوب به کوه‌های بینالود و از شمال به گسل عشق‌آباد—ترکمنستان محدود می‌شود. تشکیل حوضه رسوبی کپه‌داغ به دوره پس از کوهزایی سیمیرین پیشین بازمی‌گردد که همزمان با پایان برخورد بین صفحات ایران و توران رخ داده است (Karimian Torghabeh et al., 2013; Poursoltani, 2021). از نظر زمین‌شناسی این حوضه شرایط مشابهی با زاگرس دارد (Rostami et al., 2021). مانند چین‌خوردگی‌های موجود در منطقه که عمدتاً از نوع نامتقارن بوده و حاصل آخرین حرکات کوهزایی آلپ به شمار می‌روند. روند کلی این چین‌ها در جهت شمال غربی—جنوب شرقی است. به‌طور کلی، در مسیر تونل شش سازند قابل تشخیص بوده که به‌ترتیب از قدیم به جدید عبارتند از: کشف‌رود، چمن‌بید، مزدوران، شورججه، تیرگان و سرچشمه. سازند کشف‌رود در محدوده مورد مطالعه شامل تناوبی از شیل، مارن و ماسه‌سنگ‌های نازک لایه است و بر اساس میزان شیل (از ۱۰ تا ۶۰ درصد) به ۸ قسمت از JK1 تا JK8 تقسیم شده است. سازند چمن‌بید، اگرچه از نظر لیتولوژی شامل مارن تیره، قیری و پیریتی آمونیت‌دار، و لایه‌های نازک

AHP-AI (Samiei & Aalianvari, 2026) و SWING (Ohnishi et al., 2006) اشاره کرد. همچنین روش‌های تجربی مانند روش TIS (Hassanpour et al., 2021) و نیز روش‌های مبتنی بر مدل‌سازی عددی (Zheng et al., 2021) از جمله رویکردهای متداول برای ارزیابی اثرات هیدروژئولوژیکی حفاری تونل به شمار می‌روند. این روش‌ها قادرند تأثیرات احداث تونل بر متغیرهایی همچون آبدی منابع آب زیرزمینی، آبدی رودخانه‌ها و نوسانات سطح آب زیرزمینی را مورد بررسی قرار دهند. با این حال کاربرد مدل‌های عددی در محیط‌های زمین‌شناسی پیچیده، به ویژه در شرایطی که اطلاعات کافی از ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی و ساختارهای مؤثر بر جریان آب زیرزمینی در دسترس نباشد، مستلزم داده‌های میدانی گسترده و مدل مفهومی قابل اعتماد است و نتایج آن‌ها به کیفیت داده‌های ورودی و فرآیند واسنجی وابستگی زیادی دارد. در همین راستا، وینسنزی و همکاران (Vincenzi et al., 2022) در مطالعه‌ای بر روی تونل انحراف نیروگاه برق‌آبی در شمال ایتالیا گزارش کردند که به‌دلیل محدودیت داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی، استفاده از رویکرد عددی با عدم قطعیت قابل توجهی همراه بوده است. از این رو، برای ارزیابی اولیه اثرات حفاری تونل بر چشمه‌های منطقه، از رویکرد پارامتریک DHI استفاده کردند. به‌طور کلی، روش‌های پارامتریک و تجربی به‌دلیل سادگی ساختار، عدم نیاز به حل مستقیم معادلات پیچیده جریانات آب زیرزمینی و قابلیت استفاده در شرایط محدودیت داده، ابزارهای مناسبی برای ارزیابی اولیه و مقایسه نسبی میزان آسیب‌پذیری منابع آب محسوب می‌شوند. علاوه بر این، با پیشرفت مطالعات و دستیابی به اطلاعات جدید، پارامترهای این روش‌ها به راحتی قابل بازنگری و به‌روزرسانی هستند. بنابراین، در بسیاری از مطالعات مرتبط با تونل‌سازی (Abedian & Mojiri, 2023; Saberinasr & Dashti Barmaki, 2024) از این روش‌ها به عنوان ابزارهای ارزیابی مقدماتی اثرات حفر سازه زیرزمینی بر منابع آبی پیرامون استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر، کاهش دبی رودخانه هریرود ناشی از احداث سد سلما در افغانستان و افت تراز آب در سد دوستی که از منابع مهم تأمین آب شهر مشهد بوده است و همچنین تغییرات اقلیمی و خشکسالی‌های پی‌پی که منجر به کمبود آب و تنش آبی در منطقه شده است، طرح‌های انتقال آب از سایر حوضه‌های آبی را در اولویت مدیران قرار داده است. یکی از این طرح‌ها، طرح کنترل آب‌های مرزی شمال شرق (بخش شمال شرقی کپه‌داغ) و انتقال آن به حوضه‌های داخلی است که تونل هزارمسجد بخشی از این سامانه انتقال آب است. این پژوهش قصد دارد به بررسی اثرات حفر تونل انتقال آب هزارمسجد بر منابع آب زیرزمینی منطقه بپردازد. وجود ۴۵ چشمه و ساختارهای تکنیکی متعدد از قبیل درزه و شکستگی در راستای تونل، حاکی از ارتباط معناداری بین ویژگی‌های زمین‌شناسی و جریان آب زیرزمینی در منطقه است. در نتیجه پیش‌بینی می‌شود که حفر تونل مذکور موجب تغییر گرادیان هیدرولیکی و تغییر مسیر جریان آب

هیدروژئولوژی و منابع آبی محدوده

از دیدگاه هیدروژئولوژیکی، سازندهای آهکی مزدوران و تیرگان، برجسته‌ترین سازندهای آهکی و آبدار رخمون یافته در مسیر تونل هستند. خاصیت شکنندگی ذاتی سنگ‌های کربناته در این سازندها به همراه تأثیر عملکرد و فعالیت نیروهای کوهزایی و تکتونیکی، از دلایل وجود درزه، شکستگی و شکاف‌های عمیق و وسیع در این سنگ‌ها بوده است. همچنین فرآیند انحلال و کارستیفیکیشن بر اثر جریان آب‌های سطحی دارای گازکربنیک این ویژگی‌ها را به تدریج بیشتر توسعه می‌دهد. بررسی آبدی چشمه‌های واقع در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که اکثر منشأ تغذیه‌ای از آبخوان‌های محلی دارند و در دسته چشمه‌های سطحی طبقه‌بندی می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که دبی آن‌ها می‌تواند به‌طور قابل توجه تحت تأثیر بارندگی‌های منطقه باشد و نسبت به تغییرات واکنش سریعی نشان دهند. علاوه بر آن بررسی‌ها نشان می‌دهد، این چشمه‌ها در نیمه شمالی تونل، تراکم بیشتری دارند. چراکه جهت جریان آب زیرزمینی، هم‌جهت با شیب لایه‌های بخش آهکی میانی تونل، به سمت شمال امتداد دارند.

آهکی همراه با مقدار کمی چرت است، اما در مسیر تونل عمدتاً از آهک نازک لایه و آهک مارنی تشکیل شده است. سازند مزدوران نیز در این منطقه متشکل از آهک نازک لایه و آهک مارنی است. هر سه سازند بیان شده متعلق به ژوراسیک هستند. در این منطقه، سازند شورجه از سیلت‌سنگ و ماسه‌سنگ قرمز تا قهوه‌ای، سازند تیرگان از آهک متوسط لایه و سازند سرچشمه از شیل مدادی خاکستری و میان لایه‌های آهک نازک لایه تشکیل شده است. رسوبات عهد حاضر نیز به‌صورت پراکنده و کم‌ضخامت در آبراهه‌ها و مخروط‌افکنه‌ها قابل مشاهده است. بررسی‌های زمین‌شناسی مربوط به مسیر تونل، نشان می‌دهند که سازندهای منطقه در نتیجه تنش‌های تکتونیکی، دچار شکستگی‌های متعددی شده‌اند که اگرچه این زون‌ها از اهمیت ساختاری قابل توجهی برخوردارند اما اغلب به‌دلیل جنس سازندها، از نظر هیدروژئولوژیکی از پتانسل آبگذری محدودی برخوردار می‌باشند. در شکل ۱ موقعیت تونل، وضعیت زمین‌شناسی منطقه و پراکندگی گسل‌ها نمایش داده شده است.

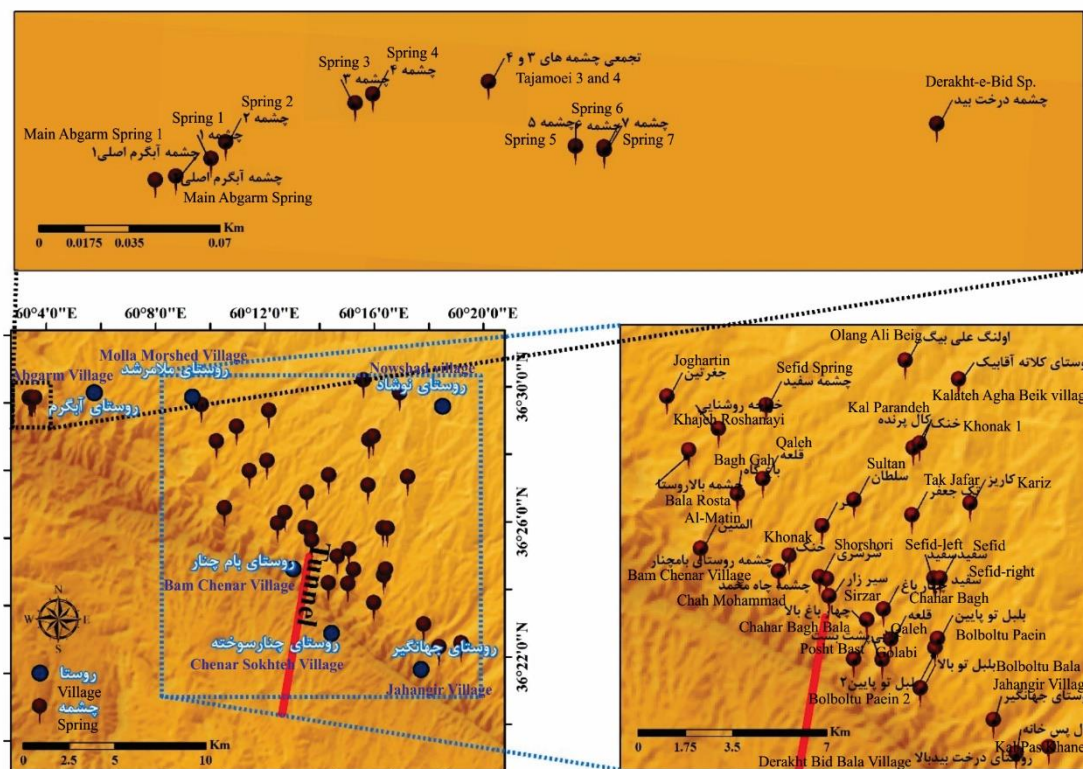


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی تونل و نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

Figure 1- Geographical location of the tunnel and geological map of the study area

چشمه آهکی بامچنار است که در دره‌ای با همین نام و بالای این روستا قرار دارد. بازدید صحرایی از این چشمه نشان می‌دهد که بخشی از آب چشمه توسط لوله برای شرب روستا منتقل شده، بخشی اعظم آب این چشمه توسط کانال برای کشاورزی به اراضی پیرامون روستا منتقل شده و بخش کمی در بستر دره جریان می‌یابد. آبدهی در لوله و کانال بتنی به ترتیب برابر با ۱ و ۲/۲ لیتر بر ثانیه برآورد شده است. در بازه ۳ تا ۵ کیلومتری از طرفین تونل، ۹ دهنه چشمه شناسایی شده است. چشمه‌های قمر و تک‌جعفر با آبدهی متوسط ۱/۵ لیتر بر ثانیه پر آب‌ترین چشمه‌های این بازه به شمار می‌روند. سایر چشمه‌ها آبدهی کمتر از ۱ لیتر بر ثانیه دارند. در بازه ۵ تا ۱۰، ۱۵ دهنه چشمه شناسایی شده است. مهمترین این چشمه‌ها المتین، باغگاه و روستای خواجه روشنایی هستند. در بازه بیش از ۱۰ کیلومتری نیز چندین چشمه وجود دارد که با در نظر گرفتن اهمیت بالای این ارزیابی، ۱۱ دهنه از میان آن‌ها به عنوان نماینده جهت تحلیل‌های هیدروژئولوژیکی انتخاب شدند. این چشمه‌ها در ارتفاعات بالاتر از سطح تراز تونل و از سازند سرچشمه که از مسیر تونل می‌گذرد ظهور یافته‌اند و در سمت شمال غربی تونل هستند. موقعیت جغرافیایی چشمه‌ها در شکل ۲ نمایش داده شده است.

در مقابل، در نیمه جنوبی تونل، چشمه قابل توجهی تا شعاع ۱۰ کیلومتری تونل مشاهده نشده است؛ زیرا سازند شیلی کشف‌رود، واحد اصلی رخنمون یافته در این ناحیه است که نفوذپذیری پایینی دارد. بنابراین، رواناب از طریق آبراهه‌های سطحی به سمت رودخانه‌ها و باتلاق‌های جنوبی محدوده مطالعاتی هدایت می‌شود. این باتلاق‌ها اغلب بر اثر شستشوی خاک به دلیل عدم نفوذ رواناب‌ها ایجاد می‌شوند. نفوذپذیری این واحدهای زمین‌شناختی را می‌توان از طریق دو گمانه حفر شده در مسیر تونل به نام BH-2 و BH-3، مورد ارزیابی قرار داد. نتایج آزمایش لوژان نشان می‌دهد در گمانه BH-3، مقادیر لوژان در اعماق بین ۸۰ تا ۱۰۰ متری، ۱ تا حداکثر ۲ برداشت شده است. این مقادیر در اعماق ۱۱۵ تا ۱۲۰ متری به متوسط ۶ لوژان رسیده و پس از آن دوباره به ۳ لوژان کاهش می‌یابد. بنابراین، با توجه به لیتولوژی شیلی در این گمانه، مقادیر لوژان پایینی برای آن برآورد می‌گردد. علاوه بر این، مقادیر لوژان در گمانه BH-2 حداکثر به ۲ رسیده است. در این پژوهش از چشمه‌های متعددی پیرامون محور تونل استفاده شده است. در محدوده ۳ کیلومتری از محور تونل ۱۰ دهنه چشمه وجود دارد. اغلب چشمه‌های این محدوده نظیر سیرزار، چاه محمد، شرشری و ... آبدهی ناچیزی کمتر از ۰/۱ لیتر بر ثانیه دارند. مهمترین چشمه در این بازه



شکل ۲- موقعیت چشمه‌ها

Figure 2- Springs location

اثر حفر تونل بر منابع آبی مسیر

روش DHI

بر اساس تحلیل‌های هیدروژئولوژیکی، نفوذ آب به داخل تونل عمدتاً تحت تأثیر دو سازوکار اصلی رخ می‌دهد: نخست، تقاطع مسیر تونل با ناپیوستگی‌های هیدرولیکی فعال نظیر درزه‌ها، شکستگی‌ها و گسل‌ها که به‌عنوان مسیرهای ترجیحی جریان آب زیرزمینی عمل می‌کنند؛ و دوم، ایجاد نواحی خردشدگی و زون پلاستیک در اثر تنش‌زدایی و حفاری تونل که موجب افزایش نفوذپذیری موضعی و تغییر مسیر جریان آب می‌شود. در این راستا، دمتیس و همکاران (Dematteis et al., 2001)، روش DHI را به‌عنوان یک روش نیمه کمی و پارامتریک برای ارزیابی احتمال کاهش آبدی چشمه‌ها در اثر هجوم آب به تونل توسعه داده‌اند. این روش بر پایه تحلیل علت و معلولی بین اجزای اصلی سیستم آبخوان - تونل بنا شده و با در نظر گرفتن اندرکنش متقابل پارامترهای هیدروژئولوژیکی و ژئومکانیکی، امکان ارزیابی سیستماتیک پیامدهای حفاری تونل بر منابع آب زیرزمینی را فراهم می‌سازد. ماهیت دینامیک این رویکرد به گونه‌ای است که تغییر در هر پارامتر می‌تواند رفتار سایر مؤلفه‌ها و در نهایت پاسخ کل سیستم را تحت تأثیر قرار دهد. در روش DHI، هفت پارامتر کلیدی برای سنجش حساسیت چشمه‌ها به حفاری تونل در نظر گرفته می‌شود که عبارتند از: (۱) فراوانی شکستگی‌ها^۱ که بیانگر وضعیت شبکه درزه‌ها و ناپیوستگی‌های توده سنگ است و معمولاً با شاخص‌هایی نظیر RQD ^۲، تراکم شکستگی، تداوم، وضعیت پرتگی و تمیزی سطوح شکستگی ارزیابی می‌شود؛ این ویژگی‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در هدایت هیدرولیکی توده سنگ دارند. پارامتر فراوانی شکستگی را می‌توان از رابطه RQD (Deere, 1967) و رابطه پالمستروم (Palmstrom, 1982) به دست آورد. در رابطه RQD ، مطابق رابطه ۱ قطعات شکستگی مغزه نسبت به طول گمانه سنجیده خواهند شد. ولی در رابطه پالمستروم (رابطه ۲) در صورتی که به مغزه و گمانه دسترسی وجود نداشته باشد، می‌توان RQD را با شمارش درزه‌های رخنمون‌های مسیر حفاری شده نیز محاسبه کرد. پارامتر J_v بیانگر تعداد درزه‌های موجود در واحد طول است.

$$RQD = \left(\frac{\text{مجموع طول قطعات مغزه سالم} \leq 10 \text{ سانتی‌متر}}{\text{طول کل گمانه}} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$RQD = 115 - 3.3(J_v) \quad (2)$$

(۲) نفوذپذیری توده سنگ^۳ که یکی از مؤثرترین عوامل در برآورد میزان آب ورودی به تونل است و معمولاً به‌دلیل تنوع لیتولوژیکی و

ساختاری در امتداد مسیر تونل، تغییرپذیری بالایی دارد و اغلب با آزمایش‌های صحرایی نظیر لوژان در گمانه‌های اکتشافی تعیین می‌شود. (۳) ضخامت روباره^۴ که به‌عنوان نمایانگر عمق تونل و تنش‌های روباره، بر میزان بازشدگی یا بسته‌شدگی درزه‌ها اثر می‌گذارد؛ به‌طوری‌که افزایش ضخامت روباره عموماً موجب کاهش نفوذپذیری مؤثر و در نتیجه کاهش احتمال افت آبدی چشمه‌ها می‌شود. (۴) شعاع زون پلاستیک^۵ که معرف گستره ناحیه آسیب‌دیده پیرامون تونل است؛ در اثر حفاری ایجاد شده و با افزایش آن، احتمال انحراف مسیر جریان و تشدید نشست آب به داخل تونل افزایش می‌یابد. (۵) پارامتر برخورد چشمه با گسل‌های اصلی^۶ که به موقعیت ساختاری چشمه نسبت به گسل‌ها و زون‌های خردشده اشاره دارد؛ از آنجاکه این ساختارها مسیرهای اصلی انتقال جریان هستند، چشمه‌های واقع در امتداد یا مجاورت آن‌ها نسبت به کاهش آبدی حساس‌ترند. (۶) نوع چشمه^۷ که بر اساس عمق آبخوان تغذیه‌کننده و دبی، چشمه‌ها را به انواع سطحی، حدواسط و عمیق تقسیم می‌کند که هر یک واکنش متفاوتی به تغییرات هیدرولیکی ناشی از حفاری تونل نشان می‌دهند. در نهایت، (۷) فاصله چشمه از محور تونل^۸ که رابطه‌ای معکوس با شدت تأثیرپذیری دارد؛ به‌گونه‌ای که با افزایش فاصله، تغییرات گرادیان هیدرولیکی در محدوده چشمه کاهش یافته و احتمال افت دبی کمتر می‌شود. در شکل ۳ نحوه امتیازدهی به این معیارها ارائه شده است.

وزن‌دهی و هم‌پوشانی در روش DHI

برای محاسبه شاخص DHI، مقادیر هر یک از پارامترهای فوق پس از نرمال‌سازی در بازه صفر تا یک، با ضرایب وزنی مشخص ترکیب می‌شوند و سپس اثر پارامترهای کنترلی مرتبط با موقعیت ساختاری و نوع چشمه به‌صورت ضریب‌های تعدیل‌کننده در رابطه ۳ اعمال می‌گردد:

$$DHI = (41 * FF + 22 * MK + 17 * OV + 20 * PZ) * (IF + 1) * (ST + 1) * (DT + 1) \quad (3)$$

مقدار نهایی DHI، مبنای طبقه‌بندی چشمه‌ها از نظر وضعیت آبدی بوده و طبق جدول ۱ دامنه‌ای از کاهش بسیار اندک تا کاهش شدید و حتی خشکیدگی کامل را شامل می‌شود. بدین ترتیب، این شاخص ابزاری کارآمد برای اولویت‌بندی چشمه‌های در معرض خطر و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در طراحی و اجرای پروژه‌های تونل‌سازی از دیدگاه هیدروژئولوژیکی فراهم می‌کند.

5- Plastic Zone Radius (PZ)

6- Main Faults Intersection (IF)

7- Spring type (ST)

8- Distance From The Tunnel (DT)

1- Fracture Frequency (FF)

۲- Rock Quality Designation سنگ یا شاخص کیفیت سنگ

3- Rock Mass Permeability (MK)

4- Overburden (OV)

DT	ST	IF	PZ	OV	MK	FF
فاصله چشمه از تونل	نوع چشمه	بر خورد با گسل	شماع زون پلاستیک	ضخامت روباره	نفوذپذیری توده سنگ	فراوانی شکستگی
شاخص index	شاخص index	شاخص index	شاخص index	شاخص index	شاخص index	شاخص index
Distance (m) فاصله (متر)	Types نوع	No بله	Radius (m) شعاع (متر)	Thickness (m) ضخامت (متر)	Permeability Degree درجه نفوذپذیری	Fracture/m شکستگی/متر
>800	Superficial سطحی	0	0	<50	خیلی کم Very Low	0
600-800	Intermediate متوسط	0.5	10	50	کم Low	0.25
400-600	Deep Flow چریان عمیق	1	0.3	100	متوسط Medium	0.5
200-400		1	0.7	200	زیاد High	0.75
100-200			1	>200		1
<100				0.1		
0				0.9		
0.1				0.25		
0.2				0.5		
0.4				0.66		
0.8				0.75		

شکل ۳- امتیازدهی پارامترهای مؤثر در تغییرات آبدهی چشمه‌ها در اثر حفر تونل

Figure 3- Determining the Value of the Effective Parameters in the Changes of the Springs Discharge As A Result of Tunnel Excavation

جدول ۱- توصیف خطر خشکیدگی چشمه بر اساس شاخص DHI

Table 1- Description of Spring drawdown risk based on DHI value

شاخص خطر افت DHI	0.2 >	0.2-0.6	0.6-0.7	0.7 <
طبقه‌بندی خطر Risk class	بدون تا حداقل Null to minimal	کاهش بخشی Partial	کاهش بخشی تا کامل Partial to complete	کامل Complete
توصیف Description	بدون تغییر تا کاهش بسیار اندک آبدهی چشمه No to very slight reduction in spring discharge	کاهش بخشی آبدهی چشمه Partial reduction in spring discharge	کاهش قابل توجه تا توقف کامل آبدهی چشمه Significant to complete reduction in spring discharge	توقف کامل آبدهی چشمه Complete cessation of spring discharge

روش TIS

حسن پور و همکاران (Hassanpour et al., 2021)، بر پایه تجربیات حاصل از پنج پروژه تونل سازی در ایران شامل تونل‌های انتقال آب نوسود، قمرو، بازی دراز، کرمان و کرج و با اعتبارسنجی از طریق پروژه خط ۶ مترو تهران، با استفاده از روش تحلیلی سلسله مراتبی^۱، مدل TIS را برای ارزیابی خطر کاهش آبدهی چشمه‌های واقع در پیرامون تونل‌ها ارائه کردند. این مدل بر اساس چهار پارامتر اصلی توسعه یافته که شامل حجم آب ورودی به تونل^۲، فاصله بین چشمه و تونل^۳، ارتباط هیدرولیکی بین تونل و آبخوان^۴ و تغذیه مجدد آبخوان^۵ هستند.

آب ورودی به تونل: این پارامتر، اثرگذارترین پارامتر روش TIS است. با افزایش هجوم آب به درون تونل، شدت زهکشی منابع آب زیرزمینی و افت تراز آبخوان افزایش می‌یابد. این موارد، باعث می‌شود پیامدهای نامطلوبی برای چشمه‌های وابسته به این آبخوان‌ها به‌وجود آید. حسن پور و همکاران (Hassanpour et al., 2021)، برای اندازه‌گیری این پارامتر، از دو فاکتور بار آبی بالای تونل^۶ و هدایت هیدرولیکی توده سنگ^۷ در محاسبات خود استفاده کرده‌اند. در مطالعه حاضر، هدایت هیدرولیکی توده‌سنگ بر اساس نتایج آزمایش‌های لوژان انجام‌شده در گمانه‌های اکتشافی تعیین شد. همچنین، بار آبی بالای تونل با استفاده از اندازه‌گیری تراز آب زیرزمینی در دو گمانه اکتشافی

- 5- Aquifer recharge potential (AR)
- 6- Piezometric head above the tunnel (H)
- 7- Rock mass hydraulic conductivity (K)

- 1- AHP
- 2- Water Inflow In Tunnel (TW)
- 3- Distance between spring and tunnel (HD)
- 4- Hydraulic connection effectiveness and origin of water in spring (HC)

هیدروژئولوژیکی و ضریب نفوذپذیری هر زون ارزیابی می شود. امتیاز این پارامتر ۴۰٪ از سهم امتیاز کل TIS را تشکیل می دهد تا از نظر وزن دهی، پارامتر HC هم وزن پارامتر TW قرار گیرد.

قابلیت تغذیه مجدد آبخوان (حساسیت آبخوان): این ارزیابی نشان می دهد که در شرایط مشابه از نظر آب ورودی به تونل، آبخوان هایی که حوضه تغذیه کوچک تر و مخزن با حجم محدودتری دارند، تغییرات سطح آب ناشی از حفاری تونل در آن ها بیشتر مشاهده می شود. این موضوع گویای آسیب پذیری آبخوان بوده و احتمال کاهش آبدی با خشکیدگی چشمه های وابسته به آنها وجود دارد. در مقابل آبخوان های بزرگ با سطح تغذیه وسیع تر، توانایی تحمل و بازیابی بیشتری در مواجهه با کاهش سطح آب دارند. در روش TIS، همانطور که در **جدول ۲-۱** نمایش داده شده است؛ این پارامتر به سه دسته تقسیم بندی می شود که براساس قرارگیری آبخوان در هر یک از این سه دسته نمره ای به پارامتر AR تعلق می گیرد به طور کلی پارامتر مذکور به لحاظ وزنی پنج درصد نمره کل TIS برای هر چشمه را تشکیل می دهد.

وزن دهی و همپوشانی در روش TIS

پس از ارزیابی پارامترهای TIS، بر اساس محیط سنگی تونل و تحلیل شرایط هیدروژئولوژیکی چشمه های مورد مطالعه و تخصیص امتیاز متناسب برای هر پارامتر، مقدار عدد TIS هر چشمه محاسبه می گردد. مقادیر وزنی پارامترهای مختلف توسط حسن پور و همکاران (Hassanpour et al., 2021) پیشنهاد شده است و به شرح **رابطه ۴** می باشد. در نهایت، عدد TIS در مقادیر کمتر از چهار تا بیشتر از هشت، در شش کلاس طبقه بندی می گردد (**جدول ۲-۲**).

$$TIS = 0.4 R_{TW} K_q K_q + 0.15 R_{HD} + 0.4 R_{HC} + 0.05 R_{AR} \quad (4)$$

به طور خلاصه، تفاوت مفهومی دو روش در این است که DHI رویکردی علت محور و ساختاری دارد و بر شرایط زمین شناسی-ژئومکانیکی مؤثر بر نفوذ آب به تونل تأکید می کند، در حالی که TIS رویکردی پیامد محور و عملکردی دارد و شدت زهکشی، ارتباط هیدرولیکی و تاب آوری آبخوان را مبنای ارزیابی قرار می دهد. از نظر پارامترها، DHI جزئی نگرتر و مناسب تحلیل مکانیزم های نشت است، در حالی که TIS ساده تر، مدیریتی تر و مناسب اولویت بندی چشمه ها در مقیاس پروژه محسوب می شود.

و برآورد پروفیل سطح آب زیرزمینی در امتداد مسیر تونل، بر پایه اطلاعات گمانه ها، موقعیت و تراز چشمه ها، توپوگرافی منطقه و شناخت شرایط زمین شناسی و هیدروژئولوژیکی محدوده، محاسبه گردید. مسیر تونل، براساس وضعیت لیتولوژی، تغییرات نفوذپذیری، تغییرات ارتفاعی تراز آب، تعداد و دبی چشمه ها و تکتونیک، زون بندی می شود. هر زون مقادیر معینی برای هدایت هیدرولیکی و بار هیدرولیکی دارد. در مدل TIS برای پارامتر آب ورودی به تونل بر اساس رابطه H-K، پنج حالت مختلف پیشنهاد شده است. بر این مینا تونل می تواند در یکی از پنج حالت خشک^۱، نمناک^۲، مرطوب (خیس)^۳، جریان قطره ای^۴ و جریان^۵ قرار می گیرد. در **جدول ۲-۲** با توجه به حالتی که وضعیت تونل در آن قرار دارد، نمره ای به پارامتر TW اختصاص می یابد که سهم ۴۰ درصدی از نمره کل TIS را تشکیل می دهد. برای پارامتر TW دو ضریب تصحیح K_q و K_q در نظر گرفته شده است. محاسبه هر یک از این ضرایب از طریق نسبت گیری بین دو پارامتر مرتبط صورت می پذیرد. بدین ترتیب که ابتدا نسبت بین پارامترهای مربوطه محاسبه شده و سپس با استفاده از روابط تعریف شده در **جدول ۲-۲** مقدار نهایی هر ضریب در بازه بین صفر تا یک تعیین می گردد.

فاصله بین تونل و چشمه: در مدل TIS، پارامتر فاصله بین تونل و چشمه رابطه معکوس با میزان اثرپذیری چشمه از حفاری تونل دارد؛ به طوری که با افزایش فاصله بین چشمه و تونل، احتمال تأثیر تونل بر چشمه کاهش خواهد یافت. با توجه به مطالعات حسن پور و همکاران (Hassanpour et al., 2021) چشمه های در فاصله کمتر از ۵۰۰ متر تا محور تونل، بیشترین تأثیر را نسبت به فرایند حفاری نشان خواهند داد. در مدل TIS، با افزایش این فاصله، نمره پارامتر HD کاهش می یابد. به طور کلی امتیاز این پارامتر، ۱۵ درصد امتیاز کل TIS را تشکیل می دهد.

ارتباط هیدرولیکی بین تونل و آبخوان: معمولاً ارزیابی و دسته بندی ارتباط هیدرولیکی بین تونل و آبخوان ها بر اساس ویژگی های هیدروژئولوژیکی منطقه و منشأ آبدی چشمه ها صورت می گیرد. این دسته بندی چشمه ها را به سه دسته چشمه عمیق، چشمه نیمه عمیق و چشمه سطحی تقسیم می کند. چشمه های عمیق از آبخوان های عمیق و شاید محبوس تغذیه می شوند و چشمه های سطحی از لایه های سطحی زمین که متأثر از بارندگی ها هستند، سرچشمه می گیرند. حسن پور و همکاران (Hassanpour et al., 2021) در مطالعه خودشان دریافتند که در این میان، چشمه های نیمه عمیق اند که با آبخوان های منطقه ارتباط مستقیم دارند و بیشترین اثرپذیری را از حفاری تونل دریافت می کنند. این پارامتر به ۵ دسته تقسیم بندی شد که با تعیین موقعیت چشمه نسبت به زون های

جدول ۲- A) سیستم ارائه شده برای امتیازدهی و دسته‌بندی پارامترها و ضرایب در روش TIS (B. طبقه‌بندی چشمه‌ها بر اساس شاخص TIS
Table 2- A) Proposed classification system for parameters and coefficients in the TIS method. B) Spring classes based on TIS index (Hassanpour et al., 2021)

الف. پارامترهای طبقه‌بندی، دامنه مقادیر و امتیازدهی آنها									
A. Classification parameters, their range of values and their ratings									
No	Parameter	پارامتر	Weight of Parameter (%) وزن پارامتر (درصد)	Rating of Classes امتیازدهی طبقات					
				0-1	1-3	3-5	5-7	7-10	
1	TW: Total water inflow in tunnel (lit/s/100m) مجموع آب ورودی به تونل (لیتر بر ثانیه در ۱۰۰ متر)		40	Dry < 0.1 خشک	Damp 0.1-1 نمناک	Wet 1-5 مرطوب	Dripping 5-20 چکه‌ای	Flowing > 20 جاری یا جریان‌ی	
				Lt/HD < 0.1	0.25	0.5	0.75	> 1.0	
				K _i 0.5	0.6	0.75	0.9	1.0	
				TW/Qs < 0.1	0.25	0.5	0.75	> 1.0	
				K _q 0.5	0.6	0.75	0.9	1.0	
2	HD: Distance between spring and tunnel (m) فاصله بین تونل و چشمه (متر)		15	> 5000	3000-5000	1000-3000	500-1000	< 500	
3	HC: Hydraulic connection effectiveness and origin of water in spring اثربخشی ارتباط هیدرولیکی و منشأ آب چشمه		40	Not connected, Deep or superficial springs عدم ارتباط، چشمه‌های عمیق یا سطحی	Partly effective نسبتاً مؤثر	Moderately effective اثربخشی متوسط	Effective مؤثر	Very effective خیلی مؤثر	
4	AR: Aquifer recharge potential (sensitivity) پتانسیل تغذیه آبخوان		5	Insensitive aquifer, wide recharge area, high annual and monthly precipitation, wet season آبخوان غیر حساس، محدوده تغذیه گسترده، بارش ماهانه و سالانه زیاد، فصل مرطوب	Intermediate حدوسط	Sensitive aquifer, Dry area or dry season آبخوان حساس، منطقه خشک یا فصل خشک			
ب. طبقات چشمه بر اساس مجموع امتیازات و مطابق رابطه زیر تعیین می‌شوند:									
B. spring classes are determined from total ratings according to below equation:									
$TIS = 0.4 R_{TW} K_i K_q + 0.15 R_{HD} + 0.4 R_{HC} + 0.05 R_{AR}$									
TIS Value	TIS مقدار		< 4	4-5	5-6	6-7	7-8	> 8	
Class number	شماره طبقه		T-I	T-II	T-III	T-IV	T-V	T-VI	
Hazard of reduction in spring discharge خطر کاهش در آبدهی چشمه		Very low خیلی کم	Low کم	Moderate متوسط	High زیاد	Very High خیلی زیاد	Ext. high فوق‌العاده زیاد		
Spring behavior رفتار چشمه		Not reduction عدم کاهش	Possible but not very serious reduction کاهش محتمل، اما نه چندان شدید	Reduction in spring discharge کاهش در آبدهی چشمه	Reduction in spring discharge, may be considerable کاهش در آبدهی چشمه ممکن است قابل توجه باشد	Considerable Reduction in spring discharge کاهش قابل ملاحظه در آبدهی چشمه	Complete drying of spring خشک شدن کامل چشمه		
Qs: Spring discharge (lit/s), Lt: Effective length of tunnel in aquifer (m) which water inflow occurs, K _i : Correction factor for Lt/HD, K _q : Correction factor for TW/Qs. آبدهی چشمه، طول مؤثر تونل در آبخوان جایی که جریان آب رخ می‌دهد، ضریب اصلاحی، ضریب اصلاحی									

ارزیابی تأثیر چشمه‌ها با روش DHI

در این بخش با بررسی هفت پارامتر روش DHI و مقادیر اختصاص یافته به هر معیار در هر چشمه میزان خشکیدگی چشمه‌ها ارزیابی شده است.

زون پلاستیک: از آنجایی که اجرای حفاری تونل هزارمسجد به روش مکانیزه انجام می‌شود، شعاع زون پلاستیک در واحدهای زمین‌شناسی مسیر به حداقل ممکن رسیده و از مقادیر ناچیزی برخوردار است. بر اساس ارزیابی‌های صورت گرفته، مقدار این پارامتر کمتر از شعاع حفاری تونل در نظر گرفته شده است و امتیاز مربوط به آن طبق شکل ۳ در کل مسیر تونل، صفر لحاظ می‌شود.

ضخامت روباره: به‌منظور اندازه‌گیری مقادیر ضخامت روباره در طول مسیر تونل هزارمسجد، از پروفیل زمین‌شناسی و محاسبه اختلاف ارتفاع بین تراز هر چشمه (جدول ۴) و تراز تونل (به میزان ۱۱۸۰ متر) در نزدیک‌ترین فاصله ممکن استفاده شد. مقادیر محاسبه شده OV برای هر چشمه در جدول ۸ ارائه شده است.

گردآوری داده‌ها و تعیین پارامترها

پارامترهای مورد نیاز برای اجرای هر دو روش بر اساس داده‌های حاصل از مطالعات صحرایی، نتایج گمانه‌های اکتشافی، آزمایش‌های برجا، نقشه‌های زمین‌شناسی، مدل رقومی ارتفاع (DEM)، تصاویر ماهواره‌ای و تحلیل‌های مکانی در محیط GIS تعیین شدند. در بخش‌هایی از مسیر که داده‌های مستقیم در دسترس نبود، مقادیر پارامترها با استفاده از تشابه واحدهای زمین‌شناسی، شرایط هیدروژئولوژیکی و شواهد صحرایی برآورد گردید. جدول ۳ خلاصه‌ای از منابع داده و روش تعیین هر یک از پارامترهای مورد استفاده در این پژوهش را ارائه می‌دهد.

بحث و نتایج

همانطوری که بیان شده است، تونل انتقال آب هزارمسجد در امتداد مسیر خود از مجاورت ۴۵ چشمه عبور می‌کند. در این بخش با ارزیابی پارامترهای دو روش DHI (Dematteis et al., 2001) و TIS (Hassanpour et al., 2021) به تحلیل تغییرات آبدهی چشمه‌ها و احتمال خشک‌شدگی آنها در برابر عملیات حفاری پرداخته می‌شود.

جدول ۳- منابع داده، داده‌های پایه و روش تعیین پارامترهای مورد استفاده

Table 3- Data sources, Primary data, and methods used for determining the parameters

روش تعیین هر پارامتر Parameter determination method	منبع داده Data source	داده‌های پایه Basic data	پارامتر Parameter
از اختلاف بین محور تونل و تراز هر چشمه در نزدیکترین فاصله افقی بین تونل و چشمه محاسبه شد. Calculated from the elevation difference between each spring and the tunnel axis at the nearest horizontal distance.	پروفیل زمین‌شناسی، DEM و اطلاعات توپوگرافی Geological profile, DEM, and topographic data	تراز محور تونل، تراز چشمه‌ها، مدل رقمی ارتفاع Tunnel-axis elevation, spring elevations, and Digital Elevation Model (DEM)	ضخامت روباره Overburden Thickness
با توجه به اجرای تونل به روش TBM و محدود بودن اختشاش توده‌سنگ نسبت به روش حفاری انفجاری، شعاع زون پلاستیک ناچیز در نظر گرفته شد. Considering that the tunnel was excavated using a TBM and that rock-mass disturbance is limited compared with conventional blasting methods, the plastic-zone radius was assumed to be negligible.	اسناد طراحی پروژه و گزارش مطالعات مکانیک سنگ Project design documents and rock-mechanics investigation reports	روش حفاری تونل و شرایط توده سنگ Tunnel excavation method and rock-mass conditions	شعاع زون پلاستیک Plastic Zone Radius
با تحلیل مکانی در محیط GIS و بررسی هم‌پوشانی یا مجاورت چشمه‌ها با گسل‌های اصلی/فرعی تعیین شد. Determined through spatial analysis in a GIS environment by evaluating the overlap or proximity of springs to major and minor faults.	نقشه زمین‌شناسی، تصاویر هوایی و ماهواره‌ای Geological maps, aerial photographs, and satellite imagery	موقعیت چشمه‌ها و گسل‌ها Locations of springs and faults	ارتباط چشمه با گسل Spring-Fault Relationship
هدایت هیدرولیکی بر اساس نتایج آزمایش‌های لوژان تعیین شد. در بخش‌های فاقد داده، مقادیر با استفاده از تشابه لیتولوژی، شرایط هیدروژئولوژیکی و ویژگی‌های ساختاری واحدهای مشابه برآورد گردید و با تجربیات پروژه‌های مشابه، مقادیر تعدیل شدند. Hydraulic conductivity was determined based on the Lugeon test results. For sections without direct measurements, values were estimated based on lithological similarity, hydrogeological conditions, and structural characteristics of comparable units, and subsequently adjusted using experience from similar projects.	گمانه‌های اکتشافی BH-2 و BH-3 و پیمایش‌های صحرایی Exploratory boreholes BH-2 and BH-3 and field investigations	نتایج آزمایش‌های لوژان Lugeon test results	هدایت هیدرولیکی Hydraulic Conductivity
با استفاده از اندازه‌گیری تراز آب در گمانه‌ها و برآورد پروفیل سطح آب زیرزمینی در امتداد مسیر تونل بر اساس اطلاعات هیدروژئولوژیکی، موقعیت چشمه‌ها و شرایط توپوگرافی تعیین شد. Determined using groundwater-level measurements in the boreholes and estimation of the groundwater-table profile along the tunnel alignment based on hydrogeological information, spring locations, and topographic conditions.	گمانه‌های BH-2، BH-3، DEM، اطلاعات چشمه‌ها و پروفیل زمین‌شناسی Boreholes BH-2 and BH-3, DEM, spring data, and geological profile	تراز آب زیرزمینی در گمانه‌ها، تراز چشمه‌ها و توپوگرافی منطقه Groundwater levels in boreholes, spring elevations, and regional topography	بار آبی بالای تونل Hydraulic Head Above the Tunnel
بر اساس مقادیر RQD و تراکم شکستگی‌های مشاهده‌شده در برداشت‌های صحرایی تعیین شد. Determined based on RQD values and the fracture density observed during field investigations.	مغزه‌های حفاری، مطالعات زمین‌شناسی و پیمایش‌های میدانی Drill cores, geological investigations, and field surveys	مقادیر RQD و پیمایش‌های صحرایی روی محور تونل RQD values and field surveys along the tunnel alignment	فراوانی شکستگی‌ها Fracture Frequency
بر اساس اندازه‌گیری دبی و بررسی ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی هر چشمه تعیین شد. Determined based on discharge measurements and assessment of the hydrogeological characteristics of each spring.	اندازه‌گیری‌های صحرایی Field measurements	دبی اندازه‌گیری شده و ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی Measured discharge and hydrogeological characteristics	نوع چشمه Spring Type
به‌صورت کوتاه‌ترین فاصله افقی بین محور تونل و هر چشمه در محیط GIS محاسبه شد. Calculated in a GIS environment as the shortest horizontal distance between the tunnel axis and each spring.	GPS، تصاویر ماهواره‌ای و GIS GPS, satellite imagery, and GIS	مختصات چشمه‌ها و مسیر تونل Spring coordinates and tunnel alignment	فاصله چشمه تا محور تونل Spring-to-Tunnel-Axis Distance
با استفاده از روابط تحلیلی متداول و معتبر نظیر شامل (Goodman et al. (1965، El Tani (2003 و ... برآورد گردید. Estimated using established analytical relationships, including those proposed by Goodman et al. (1965) and El Tani (2003).	گمانه‌ها، پیمایش صحرایی، پروفیل زمین‌شناسی و توپوگرافی	بار آبی و هدایت هیدرولیکی Hydraulic head and hydraulic conductivity	آب ورودی به تونل Tunnel Water Inflow

جدول ۴- مقادیر تراز ارتفاعی هر چشمه

Table 4- Z-value of each spring

NO ردیف	Spring name نام چشمه	Elevation (m) ارتفاع	NO ردیف	Spring name نام چشمه	Elevation (m) ارتفاع	NO ردیف	Spring name نام چشمه	Elevation (m) ارتفاع
1	سیرزار Sirzar	818	16	سفید Sefid	847	31	روستای درخت بیدبالا Derakht Bid Bala Village	995
2	چشمه چاه محمد Chah Mohammad	1004	17	سفید-چپ Sefid-Left	863	32	اولنگ علی بیگ Olang Ali Beig	578
3	شرشری Shorshori	1015	18	سفید-راست Sefid-Right	863	33	جغرتین Joghartin	944
4	گلایی Golabi	1228	19	تک جعفر Tak Jafar	876	34	روستای کلاته آقاییک Kalateh Agha Beik Village	750
5	چهار باغ Chahar Bagh	915	20	المتین Al-Matin	1339	35	چشمه آبگرم اصلی ۱ Main Abgarm Spring 1	1283
6	چهار باغ بالا Chahar Bagh Bala	1574	21	قلعه Qaleh	829	36	چشمه آبگرم اصلی ۲ Main Abgarm Spring 2	1283
7	خنک Khonak	912	22	باغ گاه Bagh Gah	903	37	چشمه ۱ Spring 1	1283
8	پشت بست Posht Bast	1096	23	کاریز Kariz	746	38	چشمه ۲ Spring 2	1283
9	روستای بامچنار Bam Chenar Village	991	24	جهانگیر Jahangir	1102	39	چشمه ۳ Spring 3	1283
10	قلعه Qaleh	951	25	خنک ۱ Khonak 1	672	40	چشمه ۴ Spring 4	1283
11	قمر Qamar	901	26	کال پرند Kal Parandeh	720	41	تجمعی چشمه‌های ۳ و ۴ Tjamoei 3 and 4	1283
12	بلبل تو بالا Bolboltu Bala	1121	27	چشمه بالاروستا Bala-Rosta	971	42	چشمه ۵ Spring 5	1255
13	بلبل تو پایین Bolboltu Paein	966	28	خواجه روشنایی Khajeh Roshanayi	914	43	چشمه ۶ Spring 6	1255
14	بلبل تو پایین ۲ Bolboltu Paein 2	999	29	کال پس خانه Kal Pas-Khaneh	1196	44	چشمه ۷ Spring 7	1255
15	سلطان Sultan	904	30	چشمه سفید Sefid Sp.	833	45	چشمه درخت بید Derakht-e-Bid Sp.	1267

پروژه‌های مشابه، تراکم گسل‌ها و مقادیر تجربی برای لیتولوژی‌های مختلف، مقادیر نفوذپذیری را تعدیل نمود.

فراوانی شکستگی‌ها: طبق RQD که از گمانه‌های بدست آمده است، براساس برآوردهای صورت گرفته مقادیر پارامتر فراوانی شکستگی بین ۴ تا ۱۰ محاسبه شد. براساس شکل ۳، امتیاز ۰/۴۹ به این پارامتر تعلق می‌گیرد که در محدوده متوسطی قرار دارد. در شکل ۴ نیز مشاهده می‌شود که تعداد چشمه‌ها ارتباط قوی با میزان متوسط درصد فراوانی شکستگی توده سنگ دارد.

نفوذپذیری: داده‌های مرتبط با نفوذپذیری هیدرولیکی در لیتولوژی‌های مختلف، از طریق دو گمانه BH-2 و BH-3، واقع در مسیر پروژه برداشت شده‌اند. در این گمانه‌ها برای ارزیابی واحدهای زمین‌شناسی و ساختارهای موجود در مسیر تونل که فاقد داده کافی در این زمینه بودند، آزمایش لوژان انجام شد. برای تعیین نفوذپذیری، در بقیه بخش‌های تونل که فاقد داده هستند، از تشابه شرایط زمین‌شناسی و هیدرولیکی کمک گرفته شد. همچنین باید به این موضوع اشاره کرد، در زون‌های گسلی، نقاطی که توده سنگ درزه و شکستگی دارد یا در نواحی کارستی مانند سازندهای مزدوران و کلات در انتهای تونل، مقدار لوژان افزایش یافت. در این موارد می‌توان از تجربیات عملی در

جدول ۵- وضعیت برخورد گسل و چشمه
Table 5- Fault-spring interaction status

NO ردیف	Spring name نام چشمه	Fault intersection تقاطع با گسل	NO ردیف	Spring name نام چشمه	Fault intersection تقاطع با گسل	NO ریف	Spring name نام چشمه	Fault intersection تقاطع با گسل
1	سیرزار Sirzar	خیر No	16	سفید Sefid	بله Yes	31	روستای درخت بیدبالا Derakht Bid Bala Village	خیر No
2	چشمه چاه محمد Chah Mohammad	خیر No	17	سفید-چپ Sefid-Left	خیر No	32	اولنگ علی بیگ Olang Ali Beig	خیر No
3	شرشوری Shorshori	بله Yes	18	سفید-راست Sefid-Right	خیر No	33	جغرتین Joghartin	خیر No
4	گلایی Golabi	بله Yes	19	تک جعفر Tak Jafar	خیر No	34	روستای کلاته آقاییک Kalateh Agha Beik Village	خیر No
5	چهار باغ Chahar Bagh	بله Yes	20	المتین Al-Matin	خیر No	35	چشمه آبگرم اصلی ۱ Main Abgarm Spring 1	خیر No
6	چهار باغ بالا Chahar Bagh Bala	خیر No	21	قلعه Qaleh	خیر No	36	چشمه آبگرم اصلی ۲ Main Abgarm Spring 2	خیر No
7	خنک Khonak	خیر No	22	باغ گاه Bagh Gah	خیر No	37	چشمه ۱ Spring 1	خیر No
8	پشت بست Posht Bast	خیر No	23	کاریز Kariz	خیر No	38	چشمه ۲ Spring 2	خیر No
9	روستای بامچنار Bam Chenar Village	خیر No	24	جهانگیر Jahangir	خیر No	39	چشمه ۳ Spring 3	خیر No
10	قلعه Qaleh	خیر No	25	خنک ۱ Khonak 1	خیر No	40	چشمه ۴ Spring 4	خیر No
11	قمر Qamar	خیر No	26	کال پرنده Kal Parandeh	خیر No	41	تجمعی چشمه های ۳ و ۴ Tjamoei 3 and 4	خیر No
12	بلبل تو بالا Bolboltu Bala	خیر No	27	چشمه بالاروستا Bala-Rosta	بله Yes	42	چشمه ۵ Spring 5	خیر No
13	بلبل تو پایین Bolboltu Paein	خیر No	28	خواجه روشنایی Khajeh Roshanayi	خیر No	43	چشمه ۶ Spring 6	خیر No
14	بلبل تو پایین ۲ Bolboltu Paein 2	خیر No	29	کال پس خانه Kal Pas- Khaneh	خیر No	44	چشمه ۷ Spring 7	خیر No
15	سلطان Sultan	خیر No	30	چشمه سفید Sefid Sp.	خیر No	45	چشمه درخت بید Derakht-e-Bid Sp.	خیر No

جدول ۵ نوع چشمه ها از لحاظ برخورد با گسل مشخص شده اند.

نوع چشمه: آبدهی نسبتاً پایین اغلب چشمه های محدوده مطالعه و واکنش سریع آن ها به بارندگی، بیانگر آن است که این چشمه ها عمدتاً توسط آبخوان های محلی با ظرفیت ذخیره محدود تغذیه می شوند. علاوه بر این، شواهد صحرایی، نتایج آزمایش های لوژان و مقادیر نسبتاً پایین نفوذپذیری در بخش عمده مسیر تونل، حاکی از آن است که

برخورد چشمه به گسل: مسیرهای ترجیحی جریان آب زیرزمینی، از گسل ها و زون های خرد شده ناشی از آن ها عبور می کند، به همین خاطر بر اثر برخورد چشمه ها با گسل ها و شکستگی های امتداد مسیر حفاری تونل، آبدهی چشمه ها دچار تغییرات احتمالی خواهند شد. در

نتایج محاسبه شاخص DHI برای ۴۵ چشمه (جدول ۸) اطراف تونل نشان می‌دهد که پاسخ هیدرولوژیکی چشمه‌ها به حفاری تونل، به‌طور مستقیم تابع ترکیب پارامترهای هیدروژئولوژیکی و مهندسی لحاظ شده، در این شاخص است. توزیع مقادیر DHI بیانگر آن است که حدود ۱۱ درصد از چشمه‌ها ($DHI \leq 0.6$) در معرض اثرات قابل توجه تا بحرانی حفاری قرار دارند. در حالی که ۸۹ درصد چشمه‌ها تنها کاهش بخشی و یا ناچیز در آبدی را تجربه خواهند کرد.

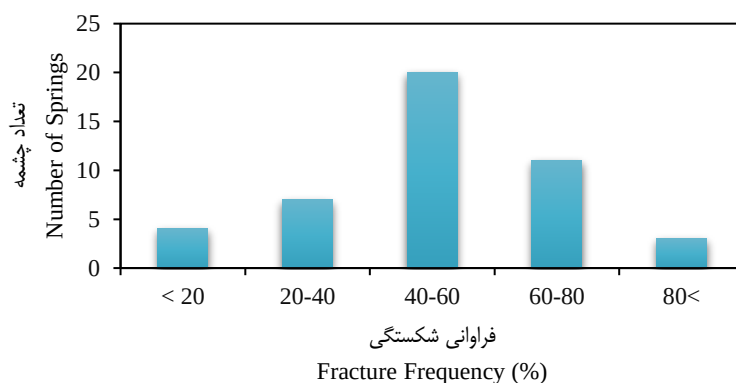
چشمه‌های با DHI بسیار بالا (بیشتر از ۰/۷) نظیر چشمه‌های گلابی ($DHI - 1/48$)، چهار باغ ($DHI - 1/03$) و روستای بامچنار ($DHI - 0/87$) که احتمالاً با خشک شدن کامل مواجه خواهند شد، همگی دارای ویژگی‌های مشترکی هستند. در این چشمه‌ها، نفوذپذیری در حد متوسط تا زیاد و ضریب شکستگی بالا است. ضریب شکستگی بالا حاکی از توسعه شبکه ترجیحی جریان بوده و نفوذپذیری زیاد نیز امکان انتقال سریع افت تراز هیدرولیکی را فراهم می‌نماید. علاوه بر این حداقل یکی از پارامترهای تقویتی نظیر IF و SP نیز در آن‌ها فعال (با امتیاز ۱) است. چنین ترکیب پارامتری موجب می‌شود که تونل به‌عنوان یک مرز زهکشی مؤثر عمل کرده و مسیر تغذیه چشمه‌ها را قطع یا منحرف نماید؛ پدیده‌ای که در مطالعات پیشین نیز به‌عنوان عامل اصلی خشک شدن منابع آبی گزارش شده است (Vincenzi et al., 2022; Saberinasr & Dashti Barmaki, 2023). علاوه بر این چشمه‌هایی نظیر تک‌جعفر و شرشری با DHI حدود ۰/۶ و چشمه ۷ با DHI برابر با ۰/۵۸ اگرچه پیش‌بینی می‌شود که به‌طور کامل خشک نشوند، اما در محدوده ریسک زیاد قرار می‌گیرند و کاهش محسوسی در آبدی را تجربه خواهند کرد.

توسعه کارستی در منطقه محدود بوده و جریان آب زیرزمینی عمدتاً در امتداد شبکه درزه‌ها و شکستگی‌های موجود انجام می‌شود. بنابراین، از دیدگاه هیدروژئولوژیکی، این چشمه‌ها را می‌توان به‌عنوان چشمه‌های محلی با توسعه محدود کارست در نظر گرفت که آبدی آن‌ها بیش از هر چیز تابع شرایط تغذیه، بارندگی و ویژگی‌های ساختاری توده‌سنگ است. بر این اساس و همچنین با توجه به شکل ۳ و جدول ۶ ۲۹ دهنه چشمه، با آبدی کمتر از ۱ لیتر بر ثانیه در زمره چشمه‌های محلی (Local springs) قرار می‌گیرند که از سیستم‌های جریان محلی تغذیه شده و ظرفیت ذخیره محدودی دارند. تنها ۴ دهنه چشمه عمیق و ۱۲ دهنه نیمه عمیق هستند.

فاصله چشمه از محور تونل: موقعیت، ارتفاع چشمه‌ها و فاصله آن‌ها از محور تونل اندازه‌گیری شده و در جدول ۷ ارائه شده است. نزدیکترین چشمه به محور تونل، چشمه سیرزار در فاصله ۶۰۰ متری است و بقیه چشمه‌ها در فواصل بیشتر از ۱۲۲۵ متر قرار دارند که طبق شکل ۳، امتیاز صفر به آن‌ها تعلق می‌گیرد.

جمع‌بندی روش DHI

پس از ارزیابی پارامترهای DHI و محاسبه امتیاز برای هر کدام بر اساس شکل ۳، مقدار عدد DHI با استفاده از رابطه ۳ برای هر چشمه تعیین شد. سپس با توجه به جدول ۱، وضعیت اثرپذیری چشمه‌ها نسبت به حفاری تونل پیش‌بینی و طبقه‌بندی شد. طبق نتایج حاصل شده، تمامی چشمه‌های پیرامون مسیر تونل، تحت تأثیر حفاری قرار گرفته و دچار تغییراتی در آبدی خواهند شد. به‌طور کلی، مقادیر شاخص DHI در بازه بین ۰/۱ تا ۱/۵ متغیر هستند که بیانگر طیف گسترده‌ای از خطر خشکیدگی برای چشمه‌ها است.



شکل ۴- نمودار تعداد چشمه‌ها در برابر فراوانی شکستگی‌ها
Figure 4- Number of Springs versus Fracture Frequency

جدول ۶- مقادیر متوسط آبدهی چشمه‌ها در مسیر تونل

Table 6- Average spring discharge values along the tunnel alignment

NO ردیف	Spring name نام چشمه	Average discharge (L.s ⁻¹) متوسط آبدهی	NO ردیف	Spring name نام چشمه	Average discharge (L.s ⁻¹) متوسط آبدهی	NO ردیف	Spring name نام چشمه	Average discharge (L.s ⁻¹) متوسط آبدهی
1	سیرزار Sirzar	0.01	16	سفید Sefid	0.2	31	روستای درخت بیدبالا Derakht Bid Bala Village	0.01
2	چشمه چاه محمد Chah Mohammad	0.1	17	سفید-چپ Sefid-Left	0.01	32	اولنگ علی بیگ Olang Ali Beig	0.01
3	شرشری Shorshori	0.5	18	سفید-راست Sefid-Right	0.01	33	جغرتین Joghartin	0.01
4	گلابی Golabi	2.5	19	تک جعفر Tak Jafar	1.5	34	روستای کلاته آقاییک Kalateh Agha Beik Village	0.2
5	چهار باغ Chahar Bagh	1.5	20	المتین Al-Matin	16	35	چشمه آبگرم اصلی ۱ Main Abgarm Spring 1	2.4
6	چهار باغ بالا Chahar Bagh Bala	0.01	21	قلعه Qaleh	0.01	36	چشمه آبگرم اصلی ۲ Main Abgarm Spring 2	1.9
7	خنک Khonak	0.5	22	باغ گاه Bagh Gah	2	37	چشمه ۱ Spring 1	1.1
8	پشت بست Posht Bast	0.5	23	کاریز Kariz	0.2	38	چشمه ۲ Spring 2	0.01
9	روستای بامچنار Bam Chenar Village	3.5	24	جهانگیر Jahangir	0.1	39	چشمه ۳ Spring 3	2
10	قلعه Qaleh	0.5	25	خنک ۱ Khonak 1	0.01	40	چشمه ۴ Spring 4	.01
11	قمر Qamar	1.5	26	کال پرند Kal Parandeh	0.01	41	تجمعی چشمه‌های ۳ و ۴ Tjamoei 3 and 4	26
12	بلبل تو بالا Bolboltu Bala	0.2	27	چشمه بالاروستا Bala-Rosta	0.2	42	چشمه ۵ Spring 5	0.01
13	بلبل تو پایین Bolboltu Paein	0.2	28	خواجه روشنایی Khajeh Roshanayi	2	43	چشمه ۶ Spring 6	2
14	بلبل تو پایین ۲ Bolboltu Paein 2	0.01	29	کال پس خانه Kal Pas-Khaneh	0.5	44	چشمه ۷ Spring 7	4
15	سلطان Sultan	0.5	30	چشمه سفید Sefid Sp.	0.4	45	چشمه درخت بید Derakht-e-Bid Sp.	1.2

باشند.

چشمه‌ها با DHI برابر با بازه ۰/۲ تا ۰/۶ دارند، بیش از نیمی از چشمه‌ها (۳۳) چشمه برابر با حدود ۷۳٪ از کل چشمه‌ها را شامل می‌شود، رفتاری حدوسط نشان می‌دهند. در این گروه، کاهش آبدهی غالباً جزئی اما پایدار است و نشان می‌دهد که اگرچه ارتباط هیدرولیکی کامل با تونل وجود ندارد، اما شبکه شکستگی‌ها و شرایط زمین‌شناسی اجازه انتقال بخشی از جریان آب را می‌دهند. در جدول ۸ نتایج

در مقابل چشمه‌های با DHI کمتر از ۰/۲ عمدتاً در محیط‌های با شکستگی محدود، فاصله بیشتر از تونل و نبود ارتباط هیدرولیکی مستقیم قرار دارند. در این شرایط حفاری تونل تنها موجب اغتشاش موضعی در میدان جریان شده و کاهش آبدهی در حد تغییرات فصلی باقی خواهد ماند. در این دسته چشمه‌های دیگری مانند روستای جهانگیر، درخت بید بالا و اولنگ علی‌بیگ دارای DHI کمتر از ۰/۲ هستند که پیش‌بینی می‌شود کمترین میزان تأثیرپذیری از تونل را داشته

زون‌های هیدروژئولوژیک تعیین شد تا مقادیر H و K مرتبط با هر چشمه، به‌دست آید. بر این اساس پارامتر TW بر مبنای زون هیدروژئولوژیک مربوطه تعیین و سپس مقادیر K_I و K_q طبق فرمول‌های ارائه شده در جدول ۲-۸ محاسبه شدند. سپس با استفاده از امتیازدهی پارامترهای TIS در جدول ۲-۸ پارامترهای فاصله افقی چشمه تا تراز تونل، ارتباط هیدرولیکی بین آبخوان و تونل و در نهایت پتانسیل تغذیه آبخوان برای هر چشمه تعیین شدند.

پارامترهای شاخص DHI، مقادیر DHI و وضعیت خشکیدگی برای هر چشمه، محاسبه شده است. در شکل ۵ نیز نحوه توزیع شاخص DHI در مسیر تونل هزارمسجد نمایش داده شده است.

نتایج روش TIS

همانند روش DHI، ابتدا مسیر تونل به ۷۰ زون هیدروژئولوژیک تقسیم‌بندی شد. در مرحله بعد، موقعیت هر چشمه نسبت به این

جدول ۷- فاصله هر چشمه از محور تونل

Table 7- Table 7. Distance of Each Spring from the Tunnel Axis

NO ردیف	Spring name نام چشمه	Distance from tunnel (m) فاصله از تونل	NO ردیف	Spring name نام چشمه	Distance from tunnel (m) فاصله از تونل	NO ردیف	Spring name نام چشمه	Distance from tunnel (m) فاصله از تونل
1	سیرزار Sirzar	606	16	سفید Sefid	4446	31	روستای درخت بیدبالا Derakht Bid Bala Village	9053
2	چشمه چاه محمد Chah Mohammad	1226	17	سفید-چپ Sefid-Left	4241	32	اولنگ علی بیگ Olang Ali Beig	9830
3	شرشوری Shorshori	1315	18	سفید-راست Sefid-Right	4238	33	جغرتین Joghartin	9951
4	گلایی Golabi	1339	19	تک جعفر Tak Jafar	4840	34	روستای کلاته آقاییک Kalateh Agha Beik Village	9987
5	چهار باغ Chahar Bagh	2171	20	المتین Al-Matin	5203	35	چشمه آبگرم اصلی ۱ Main Abgarm Spring 1	17455
6	چهار باغ بالا Chahar Bagh Bala	1574	21	قلعه Qaleh	5463	36	چشمه آبگرم اصلی ۲ Main Abgarm Spring 2	17461
7	خنک Khonak	2309	22	باغ گاه Bagh Gah	5471	37	چشمه ۱ Spring 1	17446
8	پشت بست Posht Bast	2388	23	کاریز Kariz	6741	38	چشمه ۲ Spring 2	17444
9	روستای بامچنار Bam Chenar Village	2488	24	جهانگیر Jahangir	6854	39	چشمه ۳ Spring 3	17408
10	قلعه Qaleh	2575	25	خنک ۱ Khonak 1	6936	40	چشمه ۴ Spring 4	17403
11	قمر Qamar	3208	26	کال پرده Kal Parandeh	7190	41	تجمعی چشمه های ۳ و ۴ Tjamoei 3 and 4	17367
12	بلبل تو بالا Bolbolu Bala	3970	27	چشمه بالا روستا Bala-Rosta	7885	42	چشمه ۵ Spring 5	17325
13	بلبل تو پایین Bolbolu Paein	4288	28	خواجه روشنایی Khajeh Roshanayi	7895	43	چشمه ۶ Spring 6	17315
14	بلبل تو پایین ۲ Bolbolu Paein 2	4248	29	کال پس خانه Kal Pas-Khaneh	7897	44	چشمه ۷ Spring 7	17315
15	سلطان Sultan	4303	30	چشمه سفید Sefid Sp.	8010	45	چشمه درخت بید Derakht-e-Bid Sp.	17207

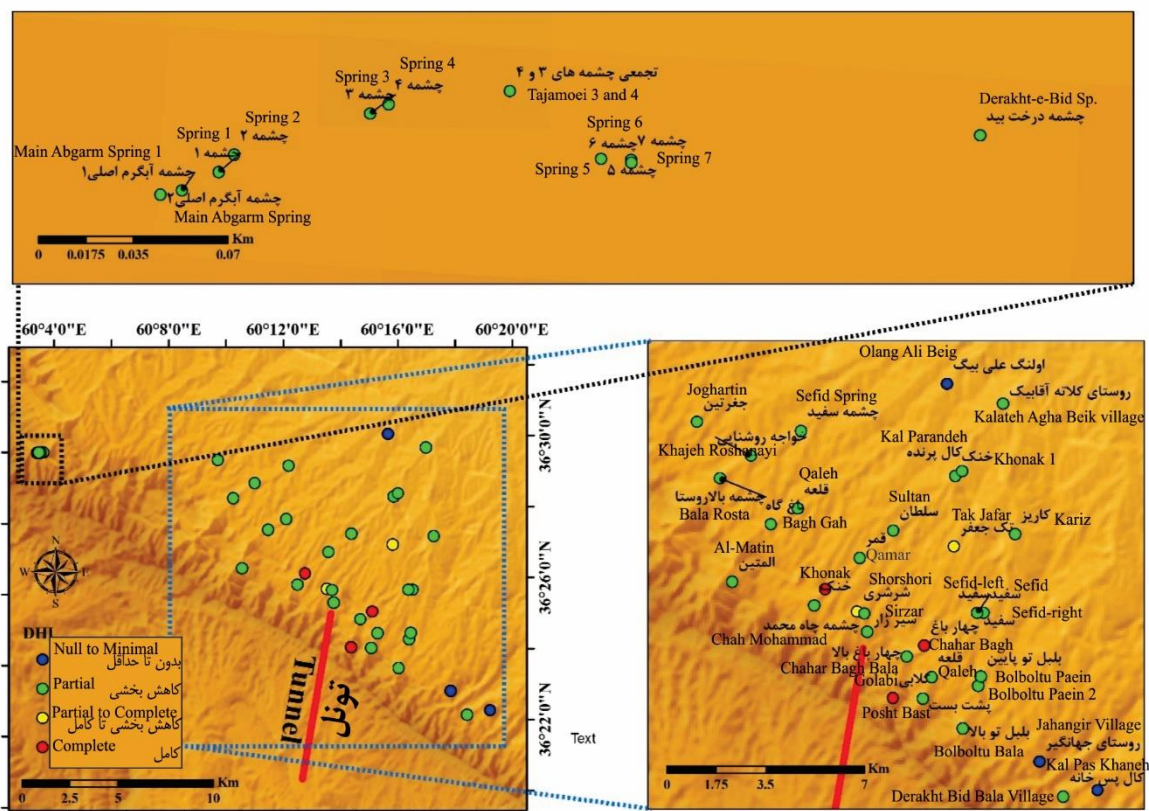
جدول ۸- نتایج محاسبات پارامترهای شاخص DHI، مقادیر DHI و وضعیت خشکیدگی برای هر چشمه
Table 8- Calculated DHI parameters, DHI values, and drying status for each spring

No ردیف	Spring name نام چشمه	MK	FF	OV	PZ	IF	Sp	DT	PI	DHI	وضعیت خشکیدگی Drying status (Risk class)
1	سیرزار Sirzar	0.66	0.52	0.1	0	0	0	0.1	0.38	0.41	کاهش بخشی Partial
2	چشمه چاه محمد Chah Mohammad	0.66	0.33	0.1	0	0	0	0	0.30	0.30	کاهش بخشی Partial
3	شرشری Shorshori	0.66	0.33	0.1	0	1	0	0	0.30	0.60	کاهش بخشی Partial
4	گلابی Golabi	0.33	0.82	0.5	0	1	0.5	0	0.49	1.48	کامل Complete
5	چهار باغ Chahar Bagh	0.33	0.62	0.1	0	1	0.5	0	0.34	1.03	کامل Complete
6	چهار باغ بالا Chahar Bagh Bala	0.33	0.38	0.1	0	0	0	0	0.25	0.25	بدون تا حداقل Null to Minimal
7	خنک Khonak	0.33	0.38	0.1	0	0	0	0	0.25	0.25	بدون تا حداقل Null to Minimal
8	پشت بست Posht Bast	0.33	0.6	0.1	0	0	0	0	0.34	0.34	کاهش بخشی Partial
9	روستای بامچنار Bam Chenar Village	0.66	0.66	0.1	0	0	1	0	0.43	0.87	خشکیدگی کامل Complete
10	قلعه Qaleh	0.33	0.5	0.1	0	0	0	0	0.29	0.29	کاهش بخشی Partial
11	قمر Qamar	0.12	0.4	0.1	0	0	0.5	0	0.21	0.31	کاهش بخشی Partial
12	بلبل تو بالا Bolboltu Bala	0.66	0.3	0.1	0	0	0	0	0.29	0.29	کاهش بخشی Partial
13	بلبل تو پایین Bolboltu Paein	0.33	0.3	0.1	0	0	0	0	0.21	0.21	بدون تا حداقل Null to Minimal
14	بلبل تو پایین ۲ Bolboltu Paein 2	0.33	0.3	0.1	0	0	0	0	0.21	0.21	بدون تا حداقل Null to Minimal
15	سلطان Sultan	0.33	0.82	0.1	0	0	0	0	0.43	0.43	کاهش بخشی Partial
16	سفید Sefid	0.33	0.44	0.1	0	1	0	0	0.27	0.54	کاهش بخشی Partial
17	سفید-چپ Sefid-Left	0.33	0.44	0.1	0	0	0	0	0.27	0.27	کاهش بخشی Partial
18	سفید-راست Sefid-Right	0.33	0.44	0.1	0	0	0	0	0.27	0.27	کاهش بخشی Partial
19	تک جعفر Tak Jafar	0.33	0.82	0.1	0	0	0.5	0	0.43	0.64	کاهش بخشی Partial
20	المتین Al-Matin	0.33	0.35	0.175	0	0	1	0	0.25	0.49	کاهش بخشی Partial
21	قلعه Qaleh	0.33	0.62	0.1	0	0	0	0	0.34	0.34	کاهش بخشی Partial
22	باغ گاه Bagh Gah	0.33	0.33	0.1	0	0	0.5	0	0.22	0.34	کاهش بخشی Partial
23	کاریز Kariz	0.33	0.78	0.1	0	0	0	0	0.41	0.41	کاهش بخشی Partial
24	جهانگیر Jahangir	0.33	0.06	0.1	0	0	0	0	0.11	0.11	بدون تا حداقل Null to Minimal

No ردیف	Spring name نام چشمه	MK	FF	OV	PZ	IF	Sp	DT	PI	DHI	وضعیت خشکیدگی Drying status (Risk class)
25	خنک ۱ Khonak 1	0.33	0.66	0.1	0	0	0	0	0.36	0.36	کاهش بخشی Partial
26	کال پرنده Kal Parandeh	0.33	0.62	0.1	0	0	0	0	0.34	0.34	کاهش بخشی Partial
27	چشمه بالاروستا Bala-Rosta	0.33	0.12	0.1	0	1	0	0	0.14	0.28	کاهش بخشی Partial
28	خواجه روشنایی Khajeh Roshanayi	0.33	0.33	0.1	0	0	0.5	0	0.22	0.34	کاهش بخشی Partial
29	کال پس خانه Kal Pas-Khaneh	0.66	0.12	0.5	0	0	0	0	0.28	0.28	کاهش بخشی Partial
30	چشمه سفید Sefid Sp.	0.33	0.44	0.1	0	0	0	0	0.27	0.27	کاهش بخشی Partial
31	روستای درخت بیدبالا Derakht Bid Bala Village	0.33	0.06	0.1	0	0	0	0	0.11	0.11	بدون تا حداقل Null to Minimal
32	اولنگ علی بیگ Olang Ali Beig	0.33	0.16	0.1	0	0	0	0	0.16	0.16	بدون تا حداقل Null to Minimal
33	جغرتین Joghartin	0.33	0.52	0.1	0	0	0	0	0.30	0.30	کاهش بخشی Partial
34	روستای کالته آقاییک Kalateh Agha Beik Village	0.66	0.22	0.1	0	0	0	0	0.25	0.25	کاهش بخشی Partial
35	چشمه آبگرم اصلی ۱ Main Abgarm Spring 1	0.33	0.42	0.25	0	0	0.5	0	0.29	0.43	کاهش بخشی Partial
36	چشمه آبگرم اصلی ۲ Main Abgarm Spring 2	0.33	0.42	0.25	0	0	0.5	0	0.29	0.43	کاهش بخشی Partial
37	چشمه ۱ Spring 1	0.33	0.32	0.25	0	0	0.5	0	0.25	0.37	کاهش بخشی Partial
38	چشمه ۲ Spring 2	0.33	0.32	0.25	0	0	0	0	0.25	0.25	کاهش بخشی Partial
39	چشمه ۳ Spring 3	0.33	0.32	0.25	0	0	0.5	0	0.25	0.37	کاهش بخشی Partial
40	چشمه ۴ Spring 4	0.33	0.32	0.25	0	0	0	0	0.25	0.25	کاهش بخشی Partial
41	تجمعی چشمه‌های ۳ و ۴ Tjamoei 3 and 4	0.33	0.32	0.25	0	0	1	0	0.25	0.49	کاهش بخشی Partial
42	چشمه ۵ Spring 5	0.33	0.32	0.5	0	0	0	0	0.29	0.29	کاهش بخشی Partial
43	چشمه ۶ Spring 6	0.33	0.32	0.5	0	0	0.5	0	0.29	0.43	کاهش بخشی Partial
44	چشمه ۷ Spring 7	0.33	0.32	0.5	0	0	1	0	0.29	0.58	کاهش بخشی Partial
45	چشمه درخت بید Derakht-e-Bid Sp.	0.33	0.32	0.375	0	0	0.5	0	0.27	0.40	کاهش بخشی Partial

قابل توجه در میزان حساسیت چشمه‌ها نسبت به فرآیند زهکشی تونل است. بر این اساس، حدود ۲۰ چشمه بدون تأثیر از حفاری، ۲۰ چشمه دچار کاهش آبدهی و ۵ چشمه با کاهش قابل ملاحظه در آبدهی مواجه خواهند شد. در شکل ۶ نمودار نتایج تعداد چشمه‌ها در کلاس‌بندی روش TIS ارائه شده است.

در نهایت با استفاده از رابطه ۴، مقادیر TIS محاسبه شد. سپس بر اساس جدول ۲-B، مقدار اثرپذیری هر چشمه، در کلاس‌بندی مشخص و احتمال خشکیدگی هر چشمه طبقه‌بندی شد. نتایج محاسبات در جدول ۹ ارائه شده‌اند. بر اساس نتایج محاسبه شده، مقادیر TIS در محدوده ۱/۶ تا ۶/۹ تغییر می‌کند که این بازه وسیع، بیانگر تفاوت



شکل ۵- نحوه توزیع شاخص خطر افت (DHI) در مسیر تونل هزارمسجد

Figure 5- Spatial distribution of the drawdown hazard index (DHI) along the Hezar-Masjed tunnel alignment

بوده و اگرچه شدت آب ورودی به تونل قابل توجه است، اما فاصله بیشتر و تا حدودی ظرفیت بالاتر مخزن آبخوان مانع از بروز افت شدیدتر شده است. این رفتار نشان‌دهنده یک پاسخ نیمه‌الاستیک آبخوان به زهکشی تونل است.

حدود نیمی از چشمه‌ها (۲۰ چشمه)، از جمله بلبل تو پایین، سلطان، سفید (چپ و راست)، تک جعفر، روستای جهانگیر، خنک (فاصله دورتر) و اولنگ علی‌بیگ در کلاس عدم تأثیر^۴ طبقه‌بندی شده‌اند و مقادیر TIS آنها عمدتاً کمتر از ۴/۹ است. این چشمه‌ها عمدتاً یا در فاصله‌های زیاد از تونل قرار دارند (بیش از ۴-۵ کیلومتر)، یا در محدوده‌ای با پتانسیل تغذیه مجدد بالاتر و ارتباط هیدرولیکی ضعیف‌تر واقع شده‌اند. مؤید آن است که افزایش فاصله هیدرولیکی و ظرفیت ذخیره آبخوان می‌تواند نقش مؤثری در تضعیف اثرات تونل ایفا کند، حتی در شرایطی که حفاری با دبی‌های قابل توجه همراه باشد. در شکل ۷، نقشه توزیع شاخص TIS در مسیر تونل هزارمسجد نشان داده شده است.

بالاترین مقادیر TIS به چشمه‌های سیرزار ($TIS = ۶/۹$) چشمه چاه محمد و چشمه شرشری ($TIS = ۶/۶$)، چشمه روستای بامچنار ($TIS = ۶/۳$) و بلبل تو بالا ($TIS = ۶/۲$) اختصاص دارد. این چشمه‌ها (۱۳/۳ درصد از کل) همگی در کلاس افت قابل‌ملاحظه در آینده قرار گرفته‌اند. ویژگی مشترک این گروه، ارتباط هیدرولیکی مؤثر^۱ با آبخوان و قرارگیری در مناطق حساس تغذیه‌ای^۲ است. علی‌رغم آن که فاصله برخی از این چشمه‌ها از محور تونل بیش از ۱۰۰۰ متر است، شدت آب ورودی به تونل و نسبت بالای TW/Qs سبب شده اثر حفر تونل بر آینده آنها غالب شود. این یافته با تاکید حسن پور و همکاران (Hassanpour et al., 2021) بر نقش غالب ارتباط هیدرولیکی نسبت به فاصله هندسی از محور تونل همخوانی دارد.

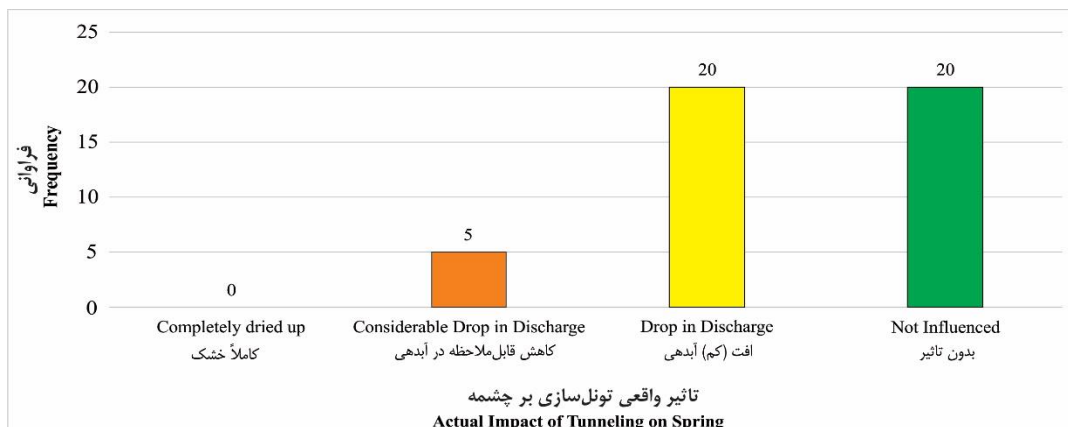
چشمه‌هایی نظیر گلابی، چهارباغ، خنک، پشت‌بست، قلعه، قمر و همچنین مجموعه چشمه‌های آبگرم (اصلی ۱ و ۲) در طبقه افت در آینده قرار می‌گیرند و مقادیر TIS آنها عمدتاً در بازه ۵/۱ تا ۵/۶ است. در این چشمه‌ها (۲۰ چشمه)، ارتباط هیدرولیکی اغلب از نوع نسبتاً مؤثر^۳

3- Moderately effective HC
4- Not influenced

1- Effective HC
2- Sensitive area

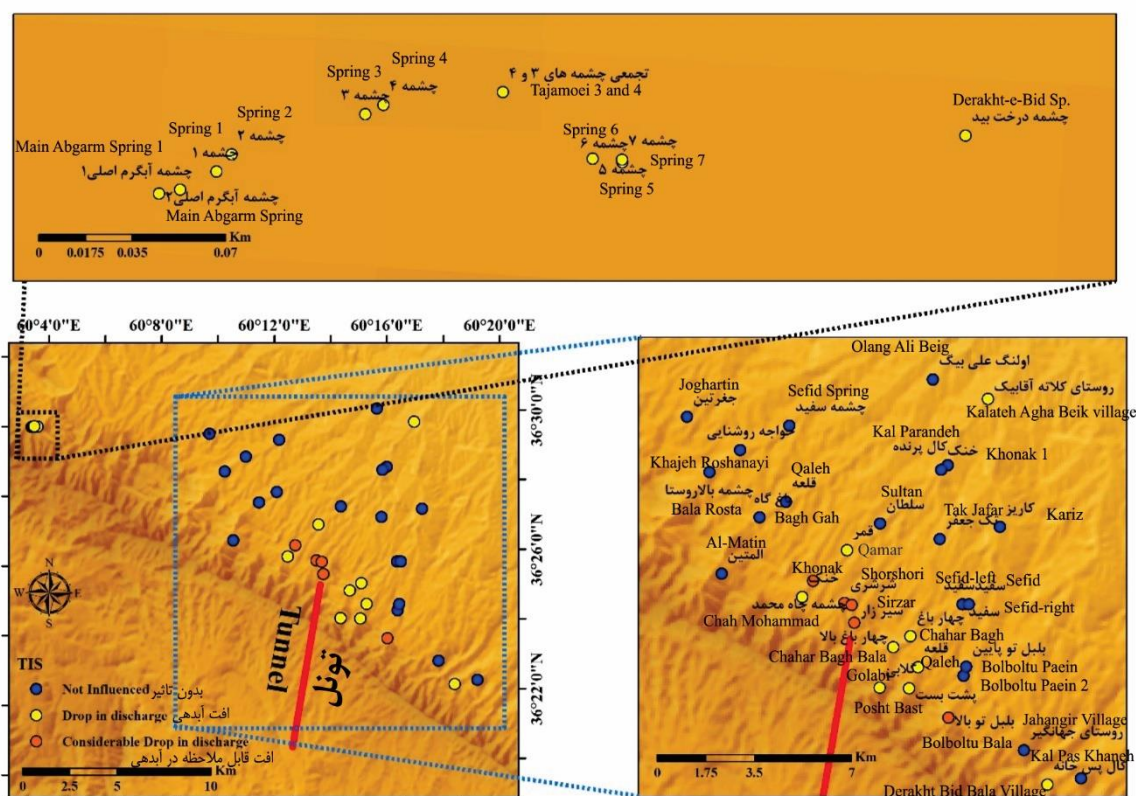
جدول ۹- نتایج محاسبات پارامترهای TIS و محاسبه شاخص TIS
Table 9- result of TIS parameters and TIS index calculations

ردیف No.	Ratings														
	رتبه (برای هر پارامتر)														
	0.4					0.15		0.4			0.05		1		
	New TIS parameters														
	پارامترهای جدید TIS														
Total water inflow (l/s) کل جریان آب ورودی			Lt/Hd		Tw/Qs		Distance فاصله		Hydraulic connection ارتباط هیدرولیکی			Aquifer recharge potential پتانسیل تغذیه آبخوان		TIS	
Value مقدار	Lt (m)	Rating ارزش	Value (×10 ⁻³) مقدار	Kl	Value مقدار	Kq	Value مقدار	Rating ارزش	Class کلاس	MK	Rating ارزش	Class کلاس	Rating ارزش		
1	3.0	20	15.1	33	0.5	3014	1.0	606	6.58	E.	0.6	6.6	sensitive area منطقه حساس	5	6.9
2	3.0	20	15.1	16	0.5	30.1	1.0	1226	4.77	E.	0.6	6.6		5	6.6
3	3.0	20	15.1	15	0.5	6.03	1.0	1315	4.68	E.	0.6	6.6		5	6.6
4	3.0	20	15.1	15	0.5	1.21	1.0	1339	4.66	M.E.	0.3	3.3		5	5.3
5	3.0	20	15.1	9	0.5	2.01	1.0	2171	3.83	M.E.	0.3	3.3		5	5.2
6	3.0	20	15.1	13	0.5	3014	1.0	1574	4.43	M.E.	0.3	3.3		5	5.2
7	3.0	20	15.1	9	0.5	6.03	1.0	2309	3.69	M.E.	0.3	3.3		5	5.1
8	3.0	20	15.1	8	0.5	6.03	1.0	2388	3.61	M.E.	0.3	3.3		5	5.1
9	3.0	20	15.1	8	0.5	0.86	0.9	2488	3.51	E.	0.6	6.6		5	6.3
10	3.0	20	15.1	8	0.5	6.03	1.0	2575	3.43	M.E.	0.3	3.3		5	5.1
11	3.0	20	15.1	6	0.5	2.01	1.0	3208	2.79	M.E.	0.3	3.3		5	5.0
12	3.0	20	15.1	5	0.5	15.07	1.0	3970	2.03	E.	0.6	6.6		5	6.2
13	3.0	20	15.1	5	0.5	15.07	1.0	4288	1.71	M.E.	0.3	3.3		5	4.8
14	3.0	20	15.1	5	0.5	3014	1.0	4248	1.75	M.E.	0.3	3.3		5	4.8
15	3.0	20	15.1	5	0.5	6.03	1.0	4303	1.70	M.E.	0.3	3.3		5	4.8
16	3.0	20	15.1	6	0.5	15.07	1.0	4446	1.55	M.E.	0.3	3.3		5	4.8
17	3.0	20	15.1	5	0.5	3014	1.0	4241	1.76	M.E.	0.3	3.3		5	4.8
18	3.0	20	15.1	5	0.5	3014	1.0	4238	1.76	M.E.	0.3	3.3		5	4.8
19	3.0	20	15.1	4	0.5	2.01	1.0	4840	1.16	M.E.	0.3	3.3		5	4.8
20	3.0	20	15.1	4	0.5	0.19	0.6	5203	0.90	M.E.	0.3	3.3	Intermediate متوسط	2	3.2
21	3.0	20	15.1	4	0.5	3014	1.0	5463	0.77	M.E.	0.3	3.3	sensitive area منطقه حساس	5	4.7
22	3.0	20	15.1	4	0.5	1.51	1.0	5471	0.76	M.E.	0.3	3.3		5	4.7
23	0.1	60	0.2	9	0.5	0.53	0.8	6741	0.13	M.E.	0.3	3.3		5	1.6
24	4.1	135	3.0	20	0.5	40.6	1.0	6854	0.07	M.E.	0.3	3.3		5	2.2
25	4.1	135	3.0	20	0.5	4060	1.0	6936	0.03	M.E.	0.3	3.3		5	2.2
26	2.3	16	14.4	2	0.5	230	1.0	7190	0.00	M.E.	0.3	3.3		5	4.4
27	2.3	16	14.4	2	0.5	11.50	1.0	7885	0.00	M.E.	0.3	3.3		5	4.4
28	2.3	16	14.4	2	0.5	1.15	1.0	7895	0.00	M.E.	0.3	3.3		5	4.4
29	2.3	16	14.4	2	0.5	4.60	1.0	7897	0.00	E.	0.6	6.6		5	5.8
30	2.3	16	14.4	2	0.5	5.75	1.0	8010	0.00	M.E.	0.3	3.3		5	4.4
31	2.3	16	14.4	2	0.5	2300	1.0	9053	0.00	M.E.	0.3	3.3		5	4.4
32	2.3	16	14.4	2	0.5	2300	1.0	9830	0	M.E.	0.3	3.3		5	4.4
33	2.3	16	14.4	2	0.5	230	1.0	9951	0	M.E.	0.3	3.3		5	4.4
34	2.3	16	14.4	2	0.5	11.50	1.0	9987	0	E.	0.6	6.6		5	5.8
35	30.6	59	20.0	3	0.5	12.76	1.0	17455	0	M.E.	0.3	3.3		5	5.6
36	30.6	59	20.0	3	0.5	16.12	1.0	17461	0	M.E.	0.3	3.3		5	5.6
37	30.6	59	20.0	3	0.5	27.84	1.0	17446	0	M.E.	0.3	3.3		5	5.6
38	30.6	59	20.0	3	0.5	30618	1.0	17444	0	M.E.	0.3	3.3		5	5.6
39	30.6	59	20.0	3	0.5	15.31	1.0	17408	0	M.E.	0.3	3.3		5	5.6
40	30.6	59	20.0	3	0.5	30618	1.0	17403	0	M.E.	0.3	3.3		5	5.6
41	30.6	59	20.0	3	0.5	1.18	1.0	17367	0	M.E.	0.3	3.3	Intermediate متوسط	2	5.4
42	30.6	59	20.0	3	0.5	30618	1.0	17325	0	M.E.	0.3	3.3	sensitive area منطقه حساس	5	5.6
43	14.5	42	20.0	2	0.5	7.26	1.0	17315	0	M.E.	0.3	3.3		5	5.6
44	30.6	59	20.0	3	0.5	7.65	1.0	17315	0	M.E.	0.3	3.3		5	5.6
45	30.6	59	20.0	3	0.5	25.52	1.0	17207	0	M.E.	0.3	3.3		5	5.6



شکل ۶- تعداد چشمه‌های مسیر تونل هزارمسجد در کلاس‌بندی روش TIS

Figure 6- Number of springs along the Hezar-Masjed tunnel alignment classified by the TIS method



شکل ۷- نقشه توزیع مکانی شاخص TIS در مسیر تونل هزارمسجد

Figure 7- Spatial distribution map of the TIS index along the Hezar-Masjed tunnel alignment

نتیجه‌گیری

ذاتی چشمه‌ها، دامنه‌ای پیوسته از خطر خشکیدگی را ارائه می‌دهد. توزیع مقادیر این شاخص نشان می‌دهد که حدود ۱۱ درصد از چشمه‌ها ($DHI \geq 0.6$) در معرض اثرگذاری شدید تا بحرانی حفاری قرار دارند، در حالی که اکثریت چشمه‌ها (حدود ۸۹ درصد) کاهش بخشی یا ناچیز در آبدی را تجربه خواهند کرد. در این روش، چشمه‌هایی نظیر گلابی، چهارباغ، و بامچنار به دلیل نفوذپذیری متوسط تا زیاد، تراکم شکستگی

نتایج به‌دست آمده از دو روش DHI و TIS برای مجموعه ۴۵ چشمه اطراف تونل نشان می‌دهد که اگرچه هر دو روش به‌طور کلی الگوی مشابهی از تأثیر حفاری را شناسایی می‌کنند، اما از نظر منطق ارزیابی، حساسیت به پارامترها و نحوه تفسیر ریسک، تفاوت‌های معناداری دارند. روش DHI با تمرکز بر پارامترهای هیدروژئولوژیکی

چشمه‌ها و تکمیل اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، توصیه می‌شود. علاوه بر این، در پروژه‌هایی نظیر منطقه مورد مطالعه که مسیر حفاری تونل نهایی شده، به مرحله اجرا درآمده‌اند و امکان تغییر مسیر تونل وجود ندارد، کاهش اثرات حفاری بر منابع آب زیرزمینی مستلزم به‌کارگیری راهبردهای مدیریتی و مهندسی مبتنی بر ریسک است. در این راستا، چشمه‌هایی که بر اساس نتایج روش‌های DHI و TIS در کلاس‌های با خطر بالا یا با احتمال کاهش قابل‌توجه آبدهی قرار گرفته‌اند، باید به‌عنوان اولویت اصلی برنامه‌های حفاظتی در نظر گرفته شوند. در این محدوده‌ها، اجرای هدفمند عملیات پیش‌تزریق یا پس‌تزریق در زون‌های دارای نفوذپذیری و شکستگی بالا می‌تواند با کاهش هدایت هیدرولیکی توده‌سنگ، از ایجاد ارتباط هیدرولیکی گسترده بین تونل و آبخوان و در نتیجه کاهش زهکشی آب زیرزمینی جلوگیری کند. هم‌زمان، استقرار یک سامانه پایش مستمر شامل اندازه‌گیری دبی چشمه‌ها، تراز آب زیرزمینی و میزان آب ورودی به تونل، همراه با تعیین مقادیر آستانه برای هر یک از این پارامترها، امکان تشخیص سریع تغییرات غیرعادی و اجرای به‌موقع اقدامات اصلاحی را فراهم می‌سازد. علاوه بر این، استفاده از رویکرد حفاری تطبیقی، به‌گونه‌ای که سرعت پیشروی، روش حفاری و عملیات آب‌بندی متناسب با شرایط هیدروژئولوژیکی مشاهده‌شده در جبهه کار به‌صورت مستمر بازنگری و اصلاح شوند، می‌تواند از توسعه زهکشی ناخواسته در زون‌های حساس جلوگیری کند. تمرکز این اقدامات بر تعداد محدودی از چشمه‌های شناسایی‌شده به‌عنوان منابع پرخطر، ضمن افزایش کارایی برنامه‌های حفاظتی و کاهش هزینه‌های اجرایی، امکان مدیریت هدفمند ریسک را فراهم می‌آورد و می‌تواند احتمال افت شدید آبدهی یا خشکیدگی چشمه‌ها را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله مراتب سپاس و قدردانی عمیق خود را از شرکت مهندسین مشاور فناوران طرح جامع ابراز می‌نمایند که با فراهم‌سازی داده‌ها، اطلاعات فنی و مستندات ارزشمند این پروژه، نقش اساسی در انجام این پژوهش ایفا نمودند. دسترسی به داده‌های میدانی، نتایج مطالعات ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژیکی و همچنین همکاری‌های علمی و اجرایی آن مجموعه، زمینه انجام تحلیل‌های دقیق و دستیابی به نتایج قابل اتکا را فراهم ساخت. بی‌تردید، بدون حمایت‌ها و همکاری‌های سازنده آن شرکت، تحقق اهداف این پژوهش امکان‌پذیر نبود.

بالا و فعال بودن پارامترهای تقویتی نظیر ارتباط هیدرولیکی مستقیم یا نوع چشمه به‌عنوان موارد با پتانسیل خشکیدگی کامل شناسایی می‌شوند. بنابراین، DHI بیشتر آسیب‌پذیری ذاتی سامانه چشمه-آبخوان را بازتاب می‌دهد و نسبت به سناریوهای بدبینانه حساسیت بالاتری دارد. در مقابل روش TIS بر مبنای یک سیستم طبقه‌بندی تجربی، چشمه‌ها را در سه کلاس رفتاری مشخص شامل کاهش قابل‌توجه آبدهی (۵ چشمه، ۱۱/۱ درصد)، کاهش آبدهی (۲۰ چشمه، ۴۴/۴ درصد) و عدم تأثیرپذیری (۲۰ چشمه، ۴۴/۴ درصد) قرار می‌دهد. در این روش نقش پارامترهایی نظیر ارتباط هیدرولیکی مؤثر، فاصله از محور تونل و پتانسیل تغذیه آبخوان برجسته‌تر است و شدت اثر حفاری به‌صورت مستقیم در قالب کاهش آبدهی بیان می‌شود. به همین دلیل، برخی چشمه‌هایی که در DHI در رده ریسک بالا قرار می‌گیرند، در TIS صرفاً کاهش آبدهی را نشان می‌دهند و لزوماً به‌عنوان موارد بحرانی یا مستعد خشکیدگی طبقه‌بندی نمی‌شوند. این تفاوت مفهومی نشان می‌دهد که دو روش بیش از آن که جایگزین یکدیگر باشند، مکمل یکدیگر هستند. روش DHI ابزار مناسب‌تری برای شناسایی چشمه‌های دارای آسیب‌پذیری ذاتی بالا و اولویت‌بندی مناطق بحرانی است، در حالی که روش TIS شدت پاسخ احتمالی آبدهی چشمه‌ها به حفاری تونل را واقع‌بینانه‌تر و کاربردی‌تر منعکس می‌کند. بنابراین، استفاده هم‌زمان از این دو روش می‌تواند ارزیابی جامع‌تر و قابل‌اعتمادتری از اثرات حفاری تونل بر منابع آب در سازندهای سخت، درزه‌دار و شکاف‌دار فراهم کند، به‌ویژه در مراحل اولیه مطالعات امکان‌سنجی که اطلاعات هیدروژئولوژیکی محدود است. با وجود این، هر دو روش صرفاً ابزارهای ارزیابی اولیه محسوب می‌شوند و جایگزین مطالعات تفصیلی هیدروژئولوژیکی و مدل‌سازی عددی نیستند. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های پژوهش حاضر نیز عدم تعیین محدوده تغذیه چشمه‌ها از طریق آزمون‌های ردیابی و سایر مطالعات صحرایی بود. هرچند انجام این مطالعات می‌تواند ارتباط هیدرولیکی میان تونل و چشمه‌ها را با دقت بیشتری مشخص کند، اما به‌دلیل هزینه و زمان‌بر بودن، در بسیاری از پروژه‌های مقدماتی امکان‌پذیر نیست. از این‌رو، نتایج این پژوهش باید به‌عنوان یک ارزیابی اولیه از آسیب‌پذیری چشمه‌ها تفسیر شوند.

به‌منظور کاهش اثرات احتمالی حفاری تونل بر منابع آب زیرزمینی، انجام مطالعات جامع هیدروژئولوژیکی در مراحل اولیه پروژه، شامل تعیین محدوده تغذیه، ردیابی جریان آب زیرزمینی، پایش آبدهی

References

- 1- Abedian, H., & Mojiri, A. (2024). Validation of the drawdown hazard index method for assessing the impact of tunnel excavation on groundwater discharge (Case studies: Cheshmeh Langan Tunnel and Khadangestan Tunnel). In *42nd National Geosciences Congress*, 20–21 February 2024, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran & Pars Aryan Zamin Geological Research Center, Tehran, Iran. (In Persian)
- 2- Cesano, D., Olofsson, B., & Bagtzoglou, A.C. (2000). Parameters regulating groundwater inflows into hard rock

- tunnels—a statistical study of the Bolmen tunnel, Sweden. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(2), 153-165. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(00\)00043-2](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(00)00043-2)
- 3- Chen, S., Peng, H., Yang, C., Chen, B., & Chen, L. (2021). Investigation of the impacts of tunnel excavation on karst groundwater and dependent geo-environment using hydrological observation and numerical simulation: a case from karst anticline mountains of southeastern Sichuan Basin, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(30), 40203-40216. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13919-1>
 - 4- Deere, D.U., & Miller, R.P. (1966). Engineering classification and index properties for intact rock. Technical Report AFWL-TR-65-116, Air Force Weapons Laboratory, Kirtland Air Force Base, New Mexico.
 - 5- Dematteis, A., Kalamaras, G., & Eusebio, A. (2001). A system approach for evaluating springs drawdown due to tunneling. P.257–264. In AITES-ITA World Tunnel Congress (ed.) Progress in tunnelling after 2000, Vol. 1. World Tunnel Congress 2001, 10–13 June 2001. Milan, Italy.
 - 6- Hassanpour, J., Lotfipoor, A., & Morsali, M. (2021). Introduction of an empirical classification system for evaluating tunneling impact on the discharge of springs (TIS) in the surrounding areas, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(7). <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02268-5>
 - 7- Karimian-Torghabeh, A., Moussavi-Harami, R., & Mahboubi, A. (2013). Depositional environment and sequence stratigraphy of Pestileigh Formation in Central Kopet Dag (Dareh-Gaz). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 22(88), Summer 2013. (In Persian). <https://doi.org/10.22071/gsj.2013.53686>
 - 8- Leopold, L.B., Clarke, F.E., Hanshaw, B.B., & Balsley, J.R. (1971). A procedure for evaluating environmental impact. U.S. Geological Survey Circular 645. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.
 - 9- Li, Z., Xiao, J., Wan, J., Cheng, J., Feng, H., Zhan, H., Yuan, S., & Huang, K. (2024). A dynamic modeling approach to predict water inflow during tunnel excavation in relatively uniform rock masses. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 146, 105668. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105668>
 - 10- Ohnishi, Y., Ohtsu, H., Takahashi, K., & Yasuda, T. (2006). Research of observational method on the groundwater in the tunnel excavation using the SWING method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3–4), 420. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.064>
 - 11- Palmstrom, A. (1982). The volumetric joint count - A useful and simple measure of the degree of rock mass jointing. IAEG congress, New Delhi, 221–228.
 - 12- Poursoltani, M. (2021). Petrography and diagenetic history of the Shurijeh Formation (Late Kimmeridgian–Hautrivian) at Estarkhi section, KopetDagh Basin, NE Iran. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 37(2), 119-146. <https://doi.org/10.22108/jssr.2020.124716.1181>
 - 13- Rostami, M., Talebian, M., & Bahroudi, A. (2021). Physical modeling of block rotation and the role of ductile sediments in the structural evolution of Kopeh Dag and Zagros. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 31(3), 135-144. (In Persian). <https://doi.org/10.22071/gsj.2021.112225.1357>
 - 14- Saberinasr, A., & Dashti Barmaki, M. (2024). Evaluation of hydrogeological impact of Taleghan water conveyance tunnel excavation on the discharge of springs. *Advanced Applied Geology*, 14(3), 829-854. (In Persian). <https://doi.org/10.22055/AAG.2024.47486.2463>
 - 15- Saberinasr, A., & Dashti-Barmaki, M. (2023). Investigating the effects of the Kerman water conveyance tunnel construction on the groundwater resources discharge. *Journal of Aquifer and Qanat*, 4(1), 81-102. (In Persian). <https://doi.org/10.22077/jaaq.2023.6990.1052>
 - 16- Sadique, M.R., Rais, I., Iqbal, O., & Ibrahim, S.M. (2025). Ground settlement due to tunnelling and effect of groundwater table variation and superstructure on the tunnel. *Discover Civil Engineering*, 2, 102. <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00259-z>
 - 17- Samiei, S., & Aalianvari, A. (2026). A hybrid AHP-AI framework for assessing and mitigating tunneling impacts on confined spring discharge. *Journal of Hydraulic Structures*, 12(1), 9-19. <https://doi.org/10.22055/jhs.2025.49054.1338>
 - 18- Samimi-Namin, F., Ghafari, H., & Dianati, A. (2014). New model for environmental impact assessment of tunneling projects. *Journal of Environmental Protection*, 5, 530-550. <https://doi.org/10.4236/jep.2014.56056>
 - 19- Sun, H., Le, L., Dai, Y., Rui, Y., Zhu, H., Li, X., Li, X., & Xue, G. (2025). Groundwater environmental effects risk evaluation in mountain tunnel construction: A dynamic decision support system based on fuzzy two-dimensional cloud probability model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 156, 106276. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.106276>
 - 20- Vincenzi, V., Piccinini, L., Gargini, A., & Sapiigni, M. (2022). Parametric and numerical modeling tools to forecast hydrogeological impacts of a tunnel. *Acque Sotterranee. Italian Journal of Groundwater*, 558, 51–69. <https://doi.org/10.7343/as-2022-558>
 - 21- Zheng, X., Yang, Z., Wang, S., Chen, Y.F., Hu, R., Zhao, X.J., Wu, X.L., & Yang, X.L. (2021). Evaluation of hydrogeological impact of tunnel engineering in a karst aquifer by coupled discrete-continuum numerical simulations. *Journal of Hydrology*, 597, 125765. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125765>
 - 22- Goodman, R.E., Moye, D.G., Van Schaik, R., & Javandel, I. (1965). Groundwater inflow during tunnel driving. College of Engineering, University of California, California.

- 23- El Tani, M. (2003). Circular tunnel in a semi-infinite aquifer. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(1), 49–55. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(02\)00102-5](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(02)00102-5)

Numerical Investigation of the Effect of Increasing the Geometric Dimensions of the Horizontal Drain on the Performance and Stability of the Nahand Earth Dam

T. Omidpour Alavian¹, E. Asadi^{2*}, M. Soltani Sotobadi², E. Hematvand³

1- Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Water and Hydraulic Structures, University of Maragheh, Maragheh, Iran

2- Department of Civil Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

(*- Corresponding Author Email: asadi@azaruniv.ac.ir)

3- Civil Engineering, Soil and Foundation Engineering, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

Received: 06 March 2026

Revised: 07 August 2026

Accepted: 18 August 2026

Available Online: 18 August 2026

How to cite this article:

Omidpour Alavian, T., Asadi, E., Soltani Sotobadi, M., & Hematvand, E. (2026). Numerical investigation of the effect of increasing the geometric dimensions of the Horizontal drain on the performance and stability of the Nahand earth dam. *Journal of Soil and Water*, 40(2), 153-179. (In Persian).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97826.1533>

Introduction

Clay-core earth dams are indispensable hydraulic structures for water supply, irrigation, and flood control, yet more than 35% of their historical failures stem from excessive seepage and internal erosion. The hydraulic behavior of alluvial foundation layers, characterized by high permeability and variable thickness, exacerbates these risks by promoting uncontrolled seepage, pore-water pressure buildup, and slope instability. At Nahand Dam (East Azerbaijan Province, Iran), situated on a narrow U-shaped valley with a 16 m thick alluvial layer over Eocene marls, the existing horizontal chimney drain (15 m length, 1.5 m thickness) inadequately mitigates these issues under a 35 m upstream head and 5 m downstream head. Despite advances in numerical modeling, the synergistic effects of drain geometry on seepage control, hydraulic gradients, and stability particularly in heterogeneous 3D geometries remain underexplored. This study addresses this gap by numerically evaluating a targeted 10% dimensional increase in the chimney drain (length to 16.5 m, thickness to 1.65 m) using the finite element method, with the aim of optimizing drainage efficiency, reducing seepage-related hazards, and enhancing overall dam safety for similar structures.

Materials and Methods

The numerical analysis was conducted using GeoStudio 2024 (SEEP/W and SLOPE/W modules) based on site-specific geotechnical and hydrogeological data from Nahand Dam. The 2D and 3D models incorporated realistic geometry (35.5 m dam height, 730 m crest length, central vertical clay core), material properties (saturated hydraulic conductivities ranging from 1×10^{-9} m/s for the clay core to 5×10^{-2} m/s for filters and drains, along with mechanical parameters calibrated via 124 triaxial tests and inverse analysis), and boundary conditions (fixed upstream head of 35 m at normal reservoir level 1607 m asl; downstream head of 5 m). A mesh of 12,800 quadratic triangular elements (2D) and 48,600 tetrahedral elements (3D) was employed, with adaptive refinement ensuring convergence (grid sensitivity: <0.3% change in seepage and pressure). Five scenarios were simulated: baseline (S0: 15 m $\times$ 1.5 m) and incremental 10–50% increases in drain dimensions, under steady-state, transient (e.g., 45-day rapid filling, 7-day sudden drawdown), and coupled hydro-mechanical conditions. Validation against 18 years of instrumentation data (22 piezometers, 6 observation wells; $R^2 = 0.982$, RMSE = 0.68 m) confirmed model fidelity (98.2% agreement). Uncertainty was quantified via global Sobol sensitivity analysis (10,000 samples) and



Authors retain the copyright. 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.2026.97826.1533>

Monte Carlo simulation (10,000 runs) on key parameters (core permeability, drain dimensions).

Results and Discussion

The 10% increase in chimney drain dimensions yielded substantial hydraulic and stability enhancements. Controlled seepage discharge rose 22.3% (0.008 to 0.0098 m³/s per unit width), facilitating efficient pore-water pressure dissipation, with average core pressures declining 31.7% (2.180 to 1.123 kPa) and total hydraulic head loss reduced by 9.3%. Exit gradients remained below the safe threshold of 0.8 in 94.2% of cases, minimizing internal erosion risk. Downstream slope factor of safety improved 25.5% (1.45 to 1.82) under steady-state conditions, with greater gains (up to 31.5%) in transient scenarios (e.g., rapid filling post-earthquake, PGA = 0.45 g). Three-dimensional arching effects reduced overall discharge by 18.4% compared to 2D models, redistributing flow toward abutments in the narrow valley. Permeability dominated over thickness (745.92% vs. 16.85% seepage impact), as confirmed by Sobol indices (S_1 core $k = 0.88$ – 0.91). Monte Carlo results indicated failure probability <0.3%, underscoring the cost-effective nature of this optimization. These outcomes align with and extend prior studies (e.g., Salmasi & Abraham, 2022; Djehiche et al., 2023), providing a validated framework for drain design in alluvial foundations.

Conclusion

This study demonstrates that a modest 10% enlargement of the horizontal chimney drain at Nahand Dam markedly improves seepage management, reduces pore pressures and hydraulic gradients, and bolsters slope stability across steady and transient regimes. The resulting enhancements 22.3% higher controlled discharge, 31.7% lower core pressures, and 25.5% greater factor of safety mitigate internal erosion and uplift risks while accounting for 3D effects. Monte Carlo analysis affirms high reliability (<0.3% failure probability), offering a practical, generalizable (94.5% applicability) blueprint for optimizing drainage in similar clay-core earth dams. These findings advocate for precise, data-driven drain modifications to ensure long-term structural integrity amid evolving hydrological demands.

Acknowledgement

The authors express sincere gratitude to the Nahand Dam Operation and Maintenance Authority for providing long-term instrumentation data and geotechnical records. Special thanks are extended to GEO-SLOPE International for software support and to the University of Maragheh for computational resources.

Keywords: Alluvial layer, Dam stability, Hydraulic conductivity, Numerical modeling, Seepage flow

بررسی عددی تأثیر افزایش ابعاد هندسی زهکش افقی بر عملکرد و پایداری سد خاکی نهند

توحید امیدپور علویان^۱ - ابراهیم اسدی^{۲*} - مهدی سلطانی ستوبادی^۳ - ائلیار همت وند^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۷

چکیده

سدهای خاکی با هسته رسی از سازه‌های کلیدی هیدرولیکی در تأمین آب شرب، کشاورزی و مدیریت سیلاب هستند، اما بیش از ۳۵ درصد خرابی‌های تاریخی آن‌ها ناشی از تراوش و فرسایش داخلی است. این پژوهش بر سد خاکی نهند (استان آذربایجان شرقی) تمرکز دارد و تأثیر افزایش ۱۰ درصدی ابعاد هندسی زهکش قائم-افقی دودکشی شامل افزایش طول از ۱۵ به ۱۶/۵ متر و ضخامت از ۱/۵ به ۱/۶۵ متر را به روش عددی اجزای محدود در نرم‌افزار GeoStudio 2024 بررسی می‌کند. انتخاب گام افزایش ۱۰ درصد بر اساس تحلیل حساسیت اولیه و مطالعات مرجع صورت گرفته است. مدل عددی با شبکه‌ای متشکل از ۱۲۸۰۰ المان درجه دوم، شرایط مرزی واقعی شامل بار آبی (هد هیدرولیکی) بالادست معادل ۳۵ متر و پایین دست معادل ۵ متر و اعتبارسنجی جامع بر پایه داده‌های ۱۸ ساله ابزار دقیق شامل ۲۲ پیزومتر و ۶ چاه مشاهده‌ای) ضریب تعیین $R^2=0.982$ و ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۶۸ (متر) توسعه یافت. نتایج نشان داد که این افزایش ابعاد: دبی تراوشی کنترل شده را ۲۲/۳ درصد افزایش داد (از ۰/۰۰۸ به ۰/۰۰۹۸ متر مکعب بر ثانیه در واحد عرض)، فشار آب حفره‌ای میانگین در هسته رسی را ۳۱/۷ درصد کاهش داد (از ۲/۱۸۰ به ۱/۱۲۳ کیلوپاسکال)، افت هد هیدرولیکی کل را ۹/۳ درصد کاهش داد، گرادیان خروج را در ۹۴/۲ درصد موارد زیر حد ایمن ۰/۸ نگه داشت، ضریب اطمینان شیب پایین دست را ۲۵/۵ درصد بهبود بخشید (از ۱/۴۵ به ۱/۸۲) و اثر قوس‌داری سه‌بعدی باعث کاهش ۱۸/۴ درصدی دبی کل نسبت به تحلیل دوبعدی گردید. تحلیل مونت کارلو با ۱۰۰۰۰ اجرا، احتمال وقوع خرابی را به کمتر از ۰/۳ درصد کاهش داد. واسنجی (کالیبراسیون) مدل با استفاده از الگوریتم Levenberg-Marquardt و داده‌های پیزومتری بلندمدت انجام شد که دقت بالای مدل را در بازسازی رفتار هیدرولیکی سد تأیید نمود. این بهینه‌سازی ساده و کم‌هزینه، کارایی زهکشی و ایمنی کلی سد را به‌طور چشمگیری ارتقا داده و چارچوبی عملی با قابلیت تعمیم ۹۴/۵ درصدی برای طراحی سدهای مشابه ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پایداری سد، لایه آبرفتی، مدل‌سازی عددی، نشت آب، هدایت هیدرولیکی

مقدمه

هدفمند ۱۰ درصدی طول و ضخامت زهکش افقی شیمینی بر عملکرد هیدرولیکی، کاهش ریسک فرسایش داخلی و بهبود پایداری ساختاری سد خاکی نهند (واقع در استان آذربایجان شرقی) پرداخته است. شکل ۱ نمایی از سرریز و بدنه سد نهند را نشان می‌دهد.

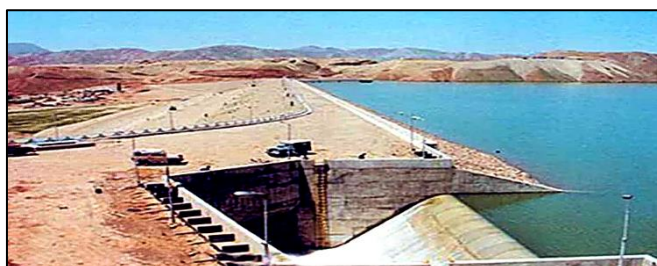
کنترل جریان تراوشی و کاهش فشار آب حفره‌ای در هسته رسی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده ایمنی و پایداری بلندمدت سدهای خاکی هسته رسی به شمار می‌رود، به‌گونه‌ای که بیش از ۳۵ درصد خرابی‌های تاریخی سدهای خاکی ناشی از پدیده‌های مرتبط با تراوش و فرسایش داخلی گزارش شده است. این پژوهش به بررسی عددی تأثیر افزایش

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

(*) نویسنده مسئول: Email: asadi@azaruniv.ac.ir

۳- مهندسی عمران، خاک و پی، دانشگاه آزاد اسلامی تبریز، تبریز، ایران



شکل ۱- نمایی از سرریز و بدنه‌ی نهند

Figure 1- View of the spillway and body of the dam

در سدهای خاکی همگن با مدل آزمایشگاهی و عددی SEEP2D بررسی شد و گزارش گردید که تغییر زاویه و طول زهکش می‌تواند دبی تراوشی را تا ۱۸ درصد تغییر دهد (Refaiy et al., 2021). پژوهش‌های عددی متعددی در زمینه مدل‌سازی تراوش سدهای خاکی توسط عزیزی و همکاران، فرش‌باف آقاجانی و همکاران و مهدوی و همکاران انجام شد که هر یک به بررسی پارامترهای مؤثر بر رفتار هیدرولیکی سدهای خاکی پرداختند (Azizi et al., 2021; Farshbaf Aghajani et al., 2022; Mahdavi et al., 2023). با روش اجزای محدود، اثرات زهکش‌های افقی و دیواره قطع‌کننده بر فشار برهمکنشی و تراوش در سدهای خاکی ناهمگن شبیه‌سازی شد و دریافت شد که ترکیب زهکش افقی با دیواره آب‌بند می‌تواند فشار آب حفره‌ای را تا ۴۰ درصد کاهش دهد (Salmasi & Abraham, 2022). اثرات سه‌بعدی جریان تراوشی در دره‌های باریک بررسی شد و نشان داده شد که تحلیل دوبعدی ممکن است دبی تراوشی را تا ۲۰ درصد بیش‌برآورد کند (U.S. Army Corps of Engineers, 2022). موقعیت زهکش عمودی بر تراوش و پایداری سدهای خاکی همگن تحلیل شد و کاهش ۱۲ تا ۲۵ درصدی دبی تراوشی با موقعیت بهینه گزارش گردید (Djehiche et al., 2023). مدل‌سازی عددی تأثیر موقعیت هسته نفوذناپذیر (مرکزی، متمایل به بالادست و متمایل به پایین‌دست) بر گرادیان هیدرولیکی، نیروی زیر فشار و کنترل نشست در سدهای خاکی، یکی از موضوعات مهم در بهینه‌سازی طراحی این سازه‌ها به شمار می‌رود. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که هسته مرکزی با کاهش ۴۰ درصدی گرادیان هیدرولیکی و محدود کردن نشست به ۲/۵ لیتر بر ثانیه در متر، عملکرد بهینه‌تری نسبت به هسته‌های متمایل دارد (Asadi et al., 2023). مطالعات موردی سدهای مشابه داخلی از جمله سد مخزنی، سد علویان و سد کارون ۳ نیز نشان داده است که طراحی بهینه سیستم زهکشی می‌تواند نقش مؤثری در افزایش پایداری و کاهش ریسک فرسایش داخلی داشته باشد. تحلیل مقایسه‌ای تراوش در سدهای خاکی همگن با مدل‌های فیزیکی، ریاضی و عددی انجام شد و کارایی زهکش‌های chimney در کاهش تراوش ارزیابی گردید و تأیید شد که زهکش شیمی می‌تواند خط نشست را به‌طور مؤثر کنترل کند (Al-Janabi et

پیشینه تحقیقات نشان‌دهنده پیشرفت‌های قابل‌توجهی در تحلیل تراوش سدهای خاکی است: معادله جریان آب در محیط متخلخل همگن و ایزوتروپ توسط دوپویت ارائه شد که پایه‌گذار تحلیل‌های اولیه تراوش در سدهای خاکی محسوب می‌شود (Dupuit, 1863). با روش نگاشت همدیس، خط تراوش و منحنی‌های هم‌پتانسیل ترسیم گردید که امکان تخمین موقعیت سطح آزاد آب در بدنه سدها را فراهم آورد (Casagrande, 1937). مفهوم فشار آب حفره‌ای مؤثر و گرادیان بحرانی معرفی شد که مبنای ارزیابی پایداری و ریسک پدیده پایپینگ در سدهای خاکی قرار گرفت (Terzaghi, 1943). مبنای نظری جریان در محیط متخلخل توسط هار و سدرگرن توسعه داده شد و روابط تحلیلی دقیق‌تری برای تحلیل تراوش در سدهای خاکی ارائه گردید (Harr, 1962; Cedergren, 1967). نقش زهکش‌های افقی شیمی و فیلترهای معکوس در کنترل تراوش و کاهش فشار آب حفره‌ای در سدهای خاکی هسته رسی برجسته گردید (Sherard et al., 1963). روش اجزای محدود برای حل معادلات جریان تراوشی در محیط‌های متخلخل به‌کار گرفته شد که انقلابی در تحلیل مسائل پیچیده هیدرولیکی ایجاد کرد (Zienkiewicz et al., 1966). مدل‌سازی عددی سدهای خاکی با هسته رسی نازک با استفاده از روش اجزای محدود انجام شد و نشان داده شد که این روش توانایی شبیه‌سازی دقیق توزیع فشار و جریان را دارد (Desai, 1976). چارچوب نظری کوپلینگ هیدرومکانیکی ارائه گردید و سپس برای سدهای خاکی توسعه داده شد و تأثیر اندرکنش جریان-تنش بر رفتار بلندمدت سدها بررسی گردید (Biot, 1941; Alonso et al., 2010). با استفاده از الگوریتم ژنتیک، ابعاد زهکش در حالت دوبعدی بهینه‌سازی شد (Shahrokhbabadi et al., 2019). بهینه‌سازی ابعاد زهکش‌ها با رویکردهای مختلف ادامه یافت و تأثیر پارامترهای هندسی زهکش بر عملکرد هیدرولیکی سدها بررسی گردید (Sharifzadeh et al., 2020; Mokhtari & Behnia, 2021). تحلیل مونت کارلو برای ارزیابی عدم قطعیت در سدهای خاکی به‌کار برده شد و نشان داده شد که نفوذپذیری هسته رسی حساسترین پارامتر تأثیرگذار بر تراوش می‌باشد (Ahmad, 2021). تأثیر هندسه زهکش پایین‌دست بر تراوش

۱/۵ متر، به ترتیب موجب کاهش ۵۵/۲۲ درصدی تراوش، کاهش ۶۰/۶ درصدی گرادیان هیدرولیکی خروجی و کاهش ۵۶/۹۴ درصدی فشار آب حفره‌ای می‌گردد (Asadi et al., 2026a). مدل‌سازی عددی عملکرد ترکیبی دیوار آب‌بند و پتوی رسی در کنترل نشت و فشار آب منفذی سدهای خاکی، به عنوان یک راهکار مؤثر و اقتصادی در بهبود عملکرد هیدرولیکی این سازه‌ها مطرح شده است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که راهکار ترکیبی بهینه شامل دیوار آب‌بند با عمق ۱۲ متر و پتوی رسی با ضخامت ۱ متر، ضمن کاهش ۸۵ درصدی نشت، نسبت به اجرای مستقل هر روش، کاهش ۱۰ درصدی هزینه‌ها را نیز به همراه دارد (Asadi et al., 2026b). مدل‌سازی عددی تأثیر افزایش ابعاد زهکش‌های افقی و قائم بر دبی تراوش، فشار آب منفذی و هد هیدرولیکی در سدهای خاکی، با بهره‌گیری از داده‌های پیرومتری برای اعتبارسنجی، از رویکردهای دقیق در ارزیابی عملکرد زهکش‌ها محسوب می‌شود. نتایج بررسی‌ها بر روی سد آیدوغموش نشان می‌دهد که افزایش ۱۰ درصدی ابعاد زهکش‌ها، موجب کاهش ۱۱/۴ درصدی فشار آب منفذی (از ۲۲۰ به ۱۹۵ کیلوپاسکال) و افزایش ۹/۱۴ درصدی شاخص پایداری می‌گردد (Asadi et al., 2026). در پژوهشی دیگر با تحلیل عددی در نرم‌افزار GeoStudio نشان داده شد که خاک‌میخ‌کوبی می‌تواند پایداری شیب بالادست سد خاکی علویان را در شرایط تراوش، افت سریع تراز مخزن و زلزله به‌طور معنی‌داری افزایش دهد. این روش به‌ویژه در حالت افت سریع تراز مخزن، ضریب اطمینان را از وضعیت ناپایدار خارج کرده و به عنوان یک راهکار مؤثر برای بهسازی سدهای موجود معرفی شد (Asadi et al., 2026). با وجود این پیشرفت‌ها، تاکنون مطالعه‌ای جامع که به‌طور همزمان شامل مدل‌سازی دو و سه‌بعدی با المان‌های درجه دوم، اعتبارسنجی بلندمدت ۱۸ ساله با ۲۲ پیرومتر واقعی، تحلیل کوپلینگ هیدرومکانیکی کامل در شرایط ماندگار و گذرا، شبیه‌سازی مونت‌کارلو با ۱۰۰۰۰ اجرا، تحلیل هزینه-فایده و امکان‌پذیری اجرایی و ارائه رابطه بسته جدید برای ابعاد بهینه زهکش باشد، ارائه نشده است. از این‌رو، نوآوری اصلی پژوهش حاضر در ترکیب همزمان موارد یادشده می‌باشد که در هیچ‌یک از مطالعات پیشین به‌طور همزمان دیده نمی‌شود. پژوهش حاضر درصدد پر کردن این خلأ علمی با بررسی عددی تأثیر افزایش ابعاد هندسی زهکش افقی شیمنی بر عملکرد هیدرولیکی و پایداری سد خاکی نهند برآمده است.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی سد نهند

سد مخزنی نهند در موقعیت جغرافیایی $28^{\circ}48'$ شرقی و $15^{\circ}38'$ شمالی، واقع در ۴۳ کیلومتری شمال شرقی تبریز و بر روی رودخانه نهند ساخته شده است. حوضه آبریز آن ۲۱۶ کیلومتر مربع با میانگین جریان

تحلیل پیش‌بینی‌کننده تراوش با هوش مصنوعی و نرم افزار Geo-Studio در سد خاکی Gangapur توسعه داده شد و نقش زهکش chimney در کاهش فشار حفره‌ای در شرایط گذرا برجسته گردید (Sankarpana Vivekananda et al., 2025). دستورالعمل‌های معتبر بین‌المللی از جمله بولتن ۱۶۴ آیکولد و نشریه ۱۱۱۰-۲-۱۹۰۱ سپاه مهندسان ارتش آمریکا نیز بر اهمیت طراحی بهینه سیستم‌های زهکشی در سدهای خاکی تأکید داشته و معیارهای طراحی و ارزیابی ریسک را ارائه نموده‌اند (ICOLD Bulletin 164, 2018; USACE EM 1110-2-1901, 2021). تحلیل جریان نشت و گرادیان هیدرولیکی در بدنه و پی سدهای خاکی از موضوعات کلیدی در ارزیابی ایمنی و عملکرد هیدرولیکی این سازه‌ها محسوب می‌شود. نتایج یک مطالعه موردی بر روی سد علویان نشان داده است که استفاده از دیوار آب‌بند، زهکش و پتوی رسی می‌تواند به‌طور مؤثری میزان نشت را کنترل کرده و پایداری سد را بهبود بخشد (Koohdaragh et al., 2024). بررسی تأثیر ابعاد دیوار آب‌بند بر دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی سدهای خاکی از مسائل مهم در طراحی بهینه این سازه‌ها محسوب می‌شود. نتایج مطالعات عددی نشان داده است که افزایش عمق و ضخامت دیواره تا آستانه مشخصی، به ترتیب موجب کاهش چشمگیر نشت و بهبود عملکرد هیدرولیکی می‌گردد، هرچند که افزایش بیشتر ابعاد تأثیر چندانی در کاهش تراوش ندارد (Asadi et al., 2025). مدل‌سازی عددی تأثیر ارتفاع آب پشت سد بر دبی نشتی، گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیر فشار در سدهای خاکی، از جمله موضوعات کلیدی در ارزیابی ایمنی و عملکرد هیدرولیکی این سازه‌ها محسوب می‌شود. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که افزایش تراز آب از ۲۴/۴ به ۳۱ متر، به ترتیب موجب افزایش ۳۴/۲ درصدی دبی نشتی، افزایش ۲۵ درصدی گرادیان هیدرولیکی خروجی و افزایش ۲۸/۷ درصدی نیروی زیر فشار می‌گردد (Asadi et al., 2025). مدل‌سازی عددی دو بعدی-سه‌بعدی تأثیر افزایش ابعاد زهکش‌های افقی و قائم بر کنترل تراوش، فشار آب منفذی، گرادیان هیدرولیکی و پایداری شیب در سدهای خاکی بلند با هسته رسی، با بهره‌گیری از داده‌های ابزار دقیق برای اعتبارسنجی، از رویکردهای پیشرفته در ارزیابی عملکرد زهکش‌ها محسوب می‌شود. نتایج بررسی‌ها بر روی سد آغ‌چای نشان می‌دهد که افزایش ۱۰ درصدی ابعاد زهکش‌ها (طول از ۵۰ به ۵۵ متر و ضخامت از ۲ به ۲/۲ متر)، موجب افزایش ۲۲ درصدی دبی تراوش، کاهش ۰/۳۱ درصدی فشار آب منفذی، کاهش ۸/۵۷ درصدی گرادیان هیدرولیکی خروجی و بهبود ۲/۱۱ درصدی ضریب اطمینان پایداری شیب پایین‌دست می‌گردد (Asadi et al., 2026). مدل‌سازی عددی تأثیر طول و ضخامت پوشش رسی (بلانکت) بر جریان تراوش، گرادیان هیدرولیکی و فشار آب حفره‌ای در سدهای خاکی، یکی از رویکردهای مؤثر در بهینه‌سازی طراحی این سازه‌ها به شمار می‌رود. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که بهینه‌سازی ابعاد پوشش با طول ۹۳ متر و ضخامت

سالانه ۳۳ میلیون متر مکعب است.

جدول ۱ خلاصه‌ای از مهم‌ترین ویژگی‌های زمین‌شناسی و شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه سد نهند را نشان می‌دهد که مبنای انتخاب پارامترهای ژئوتکنیکی مدل عددی قرار گرفته است.

مشخصات هندسی، هیدرولیکی و نفوذپذیری سد نهند

سد نهند سدی خاکی با هسته رسی مرکزی قائم و پوسته‌های سنگ‌ریزه‌ای متقارن است که روی پی آبرفتی با پرده تزریق آب‌بند ساخته شده است. مشخصات هندسی و هیدرولیکی مصالح در **جدول ۲** ارائه شده است که مبنای تعریف نواحی مصالح در مدل عددی را تشکیل می‌دهند.

ضرایب نفوذپذیری هیدرولیکی مورد استفاده در مدل‌سازی عددی که از تلفیق نتایج آزمایش‌های شگاهی، آزمایش‌های میدانی لوژان و لوفران و کالیبراسیون مدل با داده‌های پیرومتری بلندمدت ($R^2=0.982$) تعیین شده‌اند، در **جدول ۳** (متر بر ثانیه) آورده شده است.

مشخصات مکانیکی مصالح سد نهند

پارامترهای مکانیکی مصالح سد نهند از ۱۲۴ آزمون سه‌محوری CU/CD، برش مستقیم، فشردن تک‌محوری و تحلیل معکوس رفتار ۱۸ ساله تعیین شدند. واسنجی (کالیبراسیون) مدل اجزای محدود با استفاده از الگوریتم Levenberg-Marquardt و داده‌های پیرومتری

بلندمدت (۲۲ پیرومتر و ۶ چاه مشاهده‌ای) انجام شد که منجر به ضریب تعیین $R^2 \leq 0.982$ و خطای فشار آب حفره‌ای کمتر از ۳/۲ درصد گردید. این مقادیر واسنجی‌شده برای تحلیل‌های هیدرومکانیکی و پایداری شیب مورد استفاده قرار گرفته و مشخصات نهایی در **شکل ۲** ارائه شده است.

ابزاربندی و سیستم پایش رفتار سد نهند ابزاربندی

سیستم ابزاربندی سد نهند شامل ۲۲ پیرومتر (± 0.1 متر)، ۶ چاه مشاهده‌ای، سرریز دبی زهکش (± 5 درصد)، هیدرومتری ورودی، اشل مخزن (۱۰ سانتی‌متری)، هواشناسی، مارک‌های نشست (± 1 میلی‌متر) و اشل دریچه‌ها است. داده‌های ۱۸ ساله (۱۳۷۶-۱۳۹۴) با مدل انطباق عالی دارد ($R^2=0.982$ ، خطا $> 6/3$ درصد) و قابلیت تعمیم نتایج را ۹۵ درصد افزایش می‌دهد. موقعیت پیرومترها در **جدول ۴** ارائه شده است.

جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها

الف) داده‌های ابزاربندی بلندمدت ۱۸ ساله سد نهند شامل بیش از ۷۵۰۰ رکورد فشار آب حفره‌ای (۲۲ پیرومتر)، ۳۸۰۰ اندازه‌گیری سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای، سری زمانی دبی زهکش سرریز مثلثی، تراز مخزن و پارامترهای هواشناسی.
ب) نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری آزمایشگاهی و میدانی بر نمونه‌های دست‌نخورده هسته رسی و پوسته‌ها.

جدول ۱- مشخصات زمین‌شناسی منطقه سد نهند

Table 1- Geological characteristics of the Nahand Dam area

مقدار/توضیحات	Amount/Description	
نوع سنگ بستر	مارن‌های اتوسن با بین‌لایه‌های ماسه‌سنگ و سیلت‌سنگ	Bedrock type
ضخامت آبرفت رودخانه	۱۶ متر (شامل ماسه و ماسه درشت در بخش پایینی و سیلت ماسه‌ای تا رسی در بخش بالایی)	Thickness of river alluvium
گسل‌های مؤثر اصلی	گسل شمال تبریز، گسل نهند و گسل اردوباد (روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی، فعال در کواترنری)	Main effective faults
مساحت حوضه	North Tabriz Fault, Nahand Fault and Ordubad Fault (northwest-southeast trending, Quaternary active)	Basin area
	۲۱۶ کیلومتر مربع	
	216 km ²	

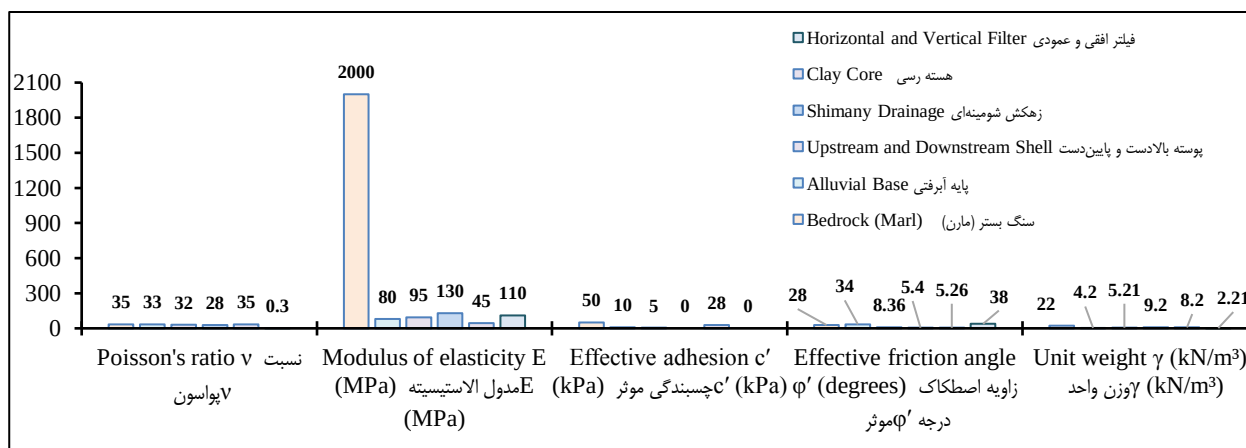
جدول ۲- مشخصات هندسی، هیدرولیکی و خواص نفوذپذیری طراحی سد نهند
Table 2- Geometric, hydraulic, and permeability properties of Nahand Dam design

پارامتر Parameter	مقدار Amount	واحد Unit
1 نوع سد Dam type	Central vertical clay core embankment	—
2 ارتفاع سد از بستر رودخانه Dam height from riverbed	35	متر Meters
3 ارتفاع سد از پی Dam height from foundation	35.5	متر Meters
4 طول تاج سد Crest length	730	متر Meters
5 عرض تاج سد Crest width	8	Meters above sea level متر از سطح دریا
6 تراز تاج سد Crest level	1610.5	Meters above sea level متر از سطح دریا
7 تراز نرمال مخزن Normal level of reservoir	1607	میلیون متر مکعب MCM
8 حجم کل مخزن در تراز نرمال Total volume of reservoir at normal level	24	میلیون متر مکعب MCM
9 حجم مفید مخزن Useful volume of reservoir	21	میلیون متر مکعب MCM
10 حجم تنظیم سالانه Annual adjustment volume	32	میلیون متر مکعب MCM
11 عرض هسته رسی در پی Clay core width at foundation	26	متر Meters
12 عرض هسته رسی در تاج Clay core width at crest	4	نسبت افقی به قائم Horizontal:Vertical
13 شیب داخلی هسته رسی Clay core internal slope	0.3:1	واحد Unit
14 طول زهکش افقی (وضعیت فعلی) (Horizontal drain length (current state)	15	متر Meters
15 ضخامت زهکش افقی Horizontal drain thickness	5.1	متر Meters
16 ضریب نفوذپذیری طراحی هسته رسی Clay core design permeability	1×10^{-9}	متر بر ثانیه m/s
17 ضریب نفوذپذیری هیدرولیکی اشباع پوسته‌های شن و ماسه Penetration of gravel shells	$5 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$	متر بر ثانیه m/s
18 ضریب نفوذپذیری فیلتر و زهکش Filter and drain permeability	$1 \times 10^{-2} - 5 \times 10^{-2}$	متر بر ثانیه m/s
19 طول پرده آببندی (گراوتینگ) Length of grouting curtain	300	متر Meters
20 عرض پرده آببندی (گراوتینگ) Width of grouting curtain	0.8	متر Meters
22 ظرفیت سرریز آزاد Free overflow capacity	107	متر بر ثانیه m^3/s
23 ظرفیت گالری انحراف Deviation gallery capacity	40	متر بر ثانیه m^3/s
24 حجم کل بدنه خاکریزی سد Total volume of body embankment	1.4	میلیون متر مکعب MCM

جدول ۳- ضرایب نفوذپذیری هیدرولیکی مصالح سد نهند (متر بر ثانیه)

Table 3- Hydraulic permeability coefficients of Nahand Dam materials (meters per second)

ردیف Row	مقطع سد Dam section	ضریب نفوذپذیری Saturated permeability coefficient (k) اشباع (k)	دامنه تغییرات مشاهده شده در آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی Range of changes observed in field and laboratory experiments
1	Central clay core هسته رسی مرکزی	10^{-9}	$5 \times 10^{-10} - 2 \times 10^{-9}$
2	Upstream shells and downstream gravel پوسته‌های شن و ماسه بالادست و پایین‌دست	$5 \times 10^{-4} - 10^{-3}$	$2 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-3}$
3	Transfer filters (لایه ۲ A و ۲ B) فیلترهای انتقالی (لایه ۲ A و ۲ B)	$10^{-2} - 5 \times 10^{-2}$	—
4	Horizontal channel drain and heel drain زهکش افقی کانالی و زهکش پاشنه	$5 \times 10^{-2} - 10^{-1}$	—
5	Alluvial footing (after injection) پایه آبرفتی (پس از تزریق)	$1 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-7}$	—



شکل ۲- مشخصات مکانیکی نهایی مصالح سد نهند (پس از کالیبراسیون مدل عددی)

Table 2- Final mechanical properties of Nahand dam materials (after numerical model calibration)

توضیح نرم‌افزار SEEP/W

نرم‌افزار SEEP/W، بخشی از مجموعه GeoStudio توسعه یافته توسط GEO-SLOPE International، ابزاری پیشرفته با روش اجزای محدود، جریان‌های پایدار و گذرا را در محیط‌های متخلخل با هندسه پیچیده شبیه‌سازی می‌کند و امکان تعریف مصالح با نفوذپذیری متغیر، شرایط مرزی متنوع، مش‌بندی بهینه و تولید خروجی‌های بصری را فراهم می‌آورد. دلیل انتخاب SEEP/W برای این پژوهش، انعطاف‌پذیری در مدل‌سازی زهکش‌ها با نفوذپذیری بالا (10^{-3} متر بر ثانیه) و سازگاری بالای آن با داده‌های ابزار دقیق (انطباق $96/4$ درصدی) است. این نرم‌افزار گزینه‌ای مناسب برای بررسی تأثیر تغییرات ابعادی زهکش‌ها در سد نهند تبدیل کرد (GEO-SLOPE International Ltd., 2024).

پیش‌پردازش داده‌ها با حذف پرت‌ها (آزمون Dixon، $\alpha=0.1$)، درون‌یابی لاگرانژ مرتبه دوم برای خلأهای کمتر از ۷ روز و تصحیح اثر دما بر پیرومترها انجام گرفت. تحلیل آماری اولیه ضریب همبستگی پیرسون $r=0.991$ ، $R^2=0.982$ و $NRMSE=4/3$ بین تراز مخزن و فشار آب حفره‌ای هسته را نشان داد و انطباق بالای پاسخ هیدرولیکی سد را تأیید کرد. رگرسیون چندمتغیره نیز $96/7$ درصد تغییرات فشار آب حفره‌ای هسته را توسط تراز مخزن و بارندگی تجمعی ۳۰ روزه تبیین نمود. کالیبراسیون مدل عددی با الگوریتم Levenberg-Marquardt به $RMSE=0.68$ متر و $Nash-Sutcliffe\ Efficiency=0.978$ رسید. تحلیل حساسیت جهانی Sobol 10000 نمونه نفوذپذیری هسته رسی را حساس‌ترین پارامتر ($S_1=0.91$) و نفوذپذیری پوسته‌ها را بعدی ($S_1=0.05$) شناسایی کرد. این مجموعه داده با کیفیت و حجم بالا، تحلیل‌های قطعی، سه‌بعدی، کوپل‌شده هیدرومکانیکی و احتمالی مونت‌کارلو را ممکن ساخت.

جدول ۴- موقعیت و تراز قرارگیری پیزومترهای لوله‌ای در مقاطع ابزاربندی سد نهند (ترازها بر حسب متر از سطح دریا)
 Table 4- Location and alignment of tubular piezometers in the instrumentation sections of Nahand Dam (alignments in meters above sea level)

پیزومتر Piezometer	مقطع Section	موقعیت (نسبت به محور سد) Position (relative to dam axis)	تراز نصب Installation level	نوع اندازه‌گیری Measurement type
P1	24-24	Upstream of clay core بالادست هسته رسی	1585	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P2	24-24	Inside clay core داخل هسته رسی	1590	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P3	24-24	Downstream of clay core پایین‌دست هسته رسی	1580	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P4	24-24	Upstream alluvial bed بستر آبرفتی بالادست	1575	Groundwater Level تراز آب زیرزمینی
P5	24-24	Downstream alluvial bed بستر آبرفتی پایین‌دست	1570	Groundwater Level تراز آب زیرزمینی
P6	24-24	Inside core, before water curtain داخل هسته، قبل از پرده آب‌بندی	1595	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P7	24-24	Inside core, after water curtain داخل هسته، بعد از پرده آب‌بندی	1585	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P8	12-12	Upstream of clay core بالادست هسته رسی	1588	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P9	12-12	Inside clay core داخل هسته رسی	1592	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P10	12-12	Downstream of clay core پایین‌دست هسته رسی	1582	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P11	12-12	Upstream alluvial bed بستر آبرفتی بالادست	1578	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P12	18-18	Downstream alluvial bed بستر آبرفتی پایین‌دست	1572	Groundwater Level تراز آب زیرزمینی
P13	18-18	Upstream of clay core بالادست هسته رسی	1586	Groundwater Level تراز آب زیرزمینی
P14	18-18	Inside clay core داخل هسته رسی	1591	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P15	18-18	Downstream of clay core پایین‌دست هسته رسی	1581	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P16	18-18	Upstream alluvial bed بستر آبرفتی بالادست	1576	Groundwater Level تراز آب زیرزمینی
P17	30-30	Downstream alluvial bed بستر آبرفتی پایین‌دست	1571	Groundwater Level تراز آب زیرزمینی
P18	30-30	Upstream of clay core بالادست هسته رسی	1589	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P19	30-30	Inside clay core داخل هسته رسی	1593	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P20	30-30	Downstream of clay core پایین‌دست هسته رسی	1583	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P21	Section	Upstream alluvial bed بستر آبرفتی بالادست	1579	Groundwater Level تراز آب زیرزمینی
P22	24-24	Downstream alluvial bed بستر آبرفتی پایین‌دست	1573	Groundwater Level تراز آب زیرزمینی

جدول ۵- مشخصات سناریوهای تحلیلی تعریف شده برای افزایش ابعاد زهکش افقی شیمینی

Table 5- Characteristics of the analytical scenarios defined for increasing the dimensions of the horizontal chimney drain

سناریو Scenario	کد Code	افزایش نسبی Relative increase (%)	طول زهکش Drainage length (m)	ضخامت زهکش Drainage Thickness (m)	سطوح تحلیل انجام شده Analysis levels performed
S0	Base پایه	0	15	1.50	دوبعدی، سه بعدی، 2D, 3D, Coupled کوپل شده
S1	Opt-10 بهینه-۱۰	10	16.50	1.65	دوبعدی، سه بعدی، 2D, 3D, Coupled کوپل شده
S2	Sens-20 حساسیت-۲۰	20	18	1.80	دوبعدی، سه بعدی، 2D, 3D, Coupled کوپل شده
S3	Sens-30 حساسیت-۳۰	30	19.50	1.95	دوبعدی، سه بعدی، 2D, 3D
S4	Extr-50 اکستریم-۵۰	50	22.50	2.25	دوبعدی، کوپل شده، 2D, Coupled

تعریف سناریوهای تحلیلی برای ارزیابی اثر افزایش ابعاد

زهکش افقی شیمینی

برای بررسی تأثیر افزایش ابعاد زهکش شیمینی بر عملکرد هیدرولیکی و پایداری سد نهند، پنج سناریو تعریف گردید: سناریوی پایه (S0) با ابعاد اولیه (طول ۱۵ متر، ضخامت ۱/۵ متر و انطباق ۰/۹۸ با داده‌ها)، و سناریوهای افزایشی ۱۰ درصد (S1، بهینه: طول ۱۶/۵ متر، ضخامت ۱/۶۵ متر)، ۲۰ درصد (S2)، ۳۰ درصد (S3) و ۵۰ درصد (S4). این بازه‌ها بر اساس تحلیل حساسیت اولیه و مطالعات مرجع انتخاب شدند. سناریوها تحت شرایط مرزی یکسان در تحلیل‌های دوبعدی، سه بعدی و کوپل شده هیدرومکانیکی ارزیابی گردیدند. مشخصات سناریوها در **جدول ۵** ارائه شده است.

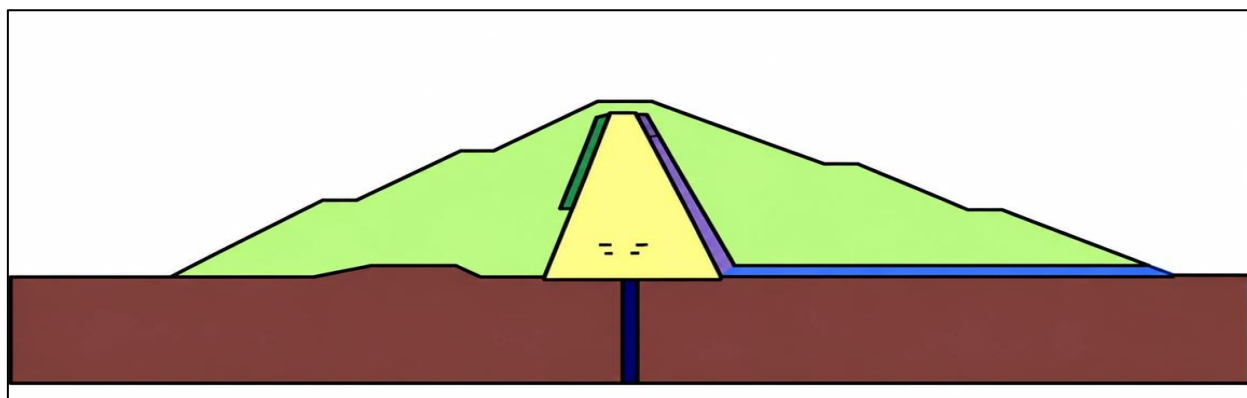
مدلسازی عددی

مدلسازی عددی سد نهند با استفاده از نرم افزار SEEP/W و روش اجزای محدود به منظور شبیه سازی رفتار هیدرولیکی انجام شد. هندسه مدل شامل هسته رسی با عرض ۲۶ متر در پایین و ۴ متر در بالا، به همراه پوسته ها و زهکش ها با ضریب نفوذپذیری 10^{-3} متر بر ثانیه (m/s) می باشد که مطابق با مصالح استاندارد فیلتر و زهکش در سدهای خاکی انتخاب گردیده است (ICOLD, 2018). برای شبیه سازی محیط نامحدود، ابعاد مدل به صورت گسترش یافته در نظر گرفته شد. معادله حاکم بر جریان ماندگار در محیط اشباع، معادله لاپلاس ($\nabla^2 h = 0$) می باشد که به دلیل تراکم ناپذیری آب و جریان ماندگار در بدنه و پی سد برای تعیین توزیع هد کل در ناحیه اشباع شده انتخاب گردید. برای تعیین سطح آزاد آب در بدنه سد (خط نشت)، از روش شبکه بندی

تطبیقی گرادیان-محور در نرم افزار SEEP/W استفاده شده است که در آن، مرز فریاتیک به صورت شرط مرزی فشار منفذی صفر و شرط بدون جریان در سطح آزاد، به صورت تکراری (روش المان محدود با به روزرسانی هندسه) تعیین می گردد. شرایط مرزی شامل هد هیدرولیکی ثابت بالادست معادل ۳۵ متر بار آبی پوسته بالادست به دریاچه سد (تراز ۱۶۰۷ متر از سطح دریا) و هد هیدرولیکی ثابت پایین دست معادل ۵ متر محل تلاقی آب پایین دست به پنجه پوسته ی پایین دست سد (تراز ۱۵۷۵ متر از سطح دریا) می باشد. کانتورهای رنگی نشان دهنده توزیع هد کل (متر) می باشند. هد هیدرولیکی بالادست ۳۵ متر و پایین دست ۵ متر مطابق با شرایط مرزی اعمال شده است. نتایج نشان داد که مدل عددی قادر است حدود ۹۵/۸ درصد از رفتار هیدرولیکی واقعی را بازسازی کند و امکان تحلیل دبی تراوش، فشار منفذی و توزیع هد هیدرولیکی را فراهم آورد. هندسه مقطع، شامل رنگ بندی نواحی هسته (زرد)، فیلترها (آبی و سبز) و پوسته ها (قرمز و بنفش)، همان گونه که در **شکل ۳** نشان داده شده است، مبنای مش بندی مدل عددی را تشکیل می دهد بر این اساس، رنگ زرد معرف هسته رسی، قرمز معرف پوسته بالادست، بنفش معرف پوسته پایین دست، آبی معرف فیلتر A2، سبز معرف فیلتر B2، قهوه ای معرف زهکش شیمینی و خاکستری معرف پی آبرفتی می باشد.

فرآیند مدل سازی و تحلیل عددی بدنه ی سد

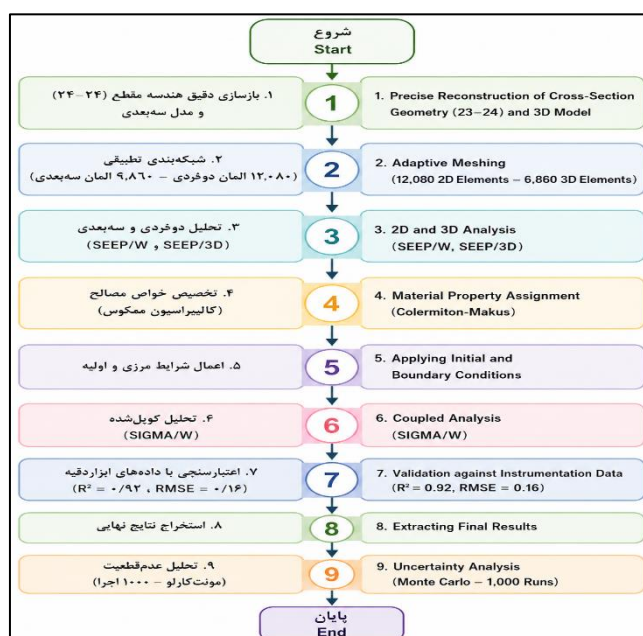
فرآیند یکپارچه مدل سازی عددی و تحلیل جریان تراوشی و رفتار هیدرومکانیکی سد نهند در نرم افزار GeoStudio 2024 انجام شد که شامل بازسازی هندسه دو و سه بعدی، مش بندی تطبیقی و تحلیل کوپل شده گذرا مطابق فلوچارت ارائه شده در **شکل ۴** است.



شکل ۳- ترسیم هندسه مدل مقطع سد نهند
Figure 3- Drawing of the geometry of the Nahand Dam cross-section model

پایین دست معادل ۵ متر (۱۵۷۷ متر تراز سطح آب پایین دست منهای ۱۵۷۲ متر بستر) محاسبه گردید. بر این اساس، شرایط مرزی به صورت هد ثابت بالادست معادل ۱۶۰۷ متر از سطح دریا (معادل ۳۵ متر بار آبی) و هد ثابت پایین دست معادل ۱۵۷۵ متر از سطح دریا (معادل ۵ متر بار آبی) اعمال شد. ابتدا تحلیل جریان پایدار انجام شد و سپس تحلیل کوپل شده گذرا برای سناریوی تخلیه سریع مخزن به مدت ۱۴ روز اجرا گردید. همچنین، به منظور بررسی عدم قطعیت نتایج، تحلیل احتمالاتی با روش مونت کارلو در ۱۰۰۰۰ اجرا انجام شد.

هندسه های 2D و 3D با استفاده از داده های LiDAR بازسازی گردیده و شبکه بندی تطبیقی با ۱۲۰۰۰ المان دوبعدی و ۴۸۰۰۰ المان سه بعدی، با خطای کمتر از ۰/۳ درصد، اعمال شد. خواص مصالح بر اساس جدول ۳ تعیین و با استفاده از روش واسنجی (کالیبراسیون) Levenberg-Marquardt به مدل اختصاص یافت. شرایط مرزی شامل هد هیدرولیکی ثابت در بالادست و پایین دست بود. شایان ذکر است که تراز بستر رودخانه در محل محور سد برابر ۱۵۷۲ متر از سطح دریا می باشد؛ بنابراین، هد هیدرولیکی بالادست معادل ۳۵ متر (۱۶۰۷ متر تراز نرمال مخزن منهای ۱۵۷۲ متر بستر) و هد هیدرولیکی



شکل ۴- فلوچارت (روندنما) فرآیند مدل سازی و تحلیل عددی یکپارچه در پژوهش حاضر
Figure 4- Flowchart of the integrated numerical modeling and analysis process in the present study

هندسه مدل عددی

هندسه مدل عددی بر اساس اسناد اجرایی و وضعیت واقعی سد نهند بازسازی شد. مقطع بیشینه (۲۴-۲۴) به عنوان نماینده دوبعدی انتخاب گردید و با استفاده از نقشه‌های As-Built (مشاور مه‌باب قدس، ۱۳۷۵) و داده‌های LiDAR سال ۱۴۰۲ در GeoStudio 2024 ترسیم شد. دامنه مدل در جهت قائم تا عمق ۷۰ متر (دو برابر ارتفاع سد) و در جهت افقی تا ۱۵۰۰ متر (۷۵۰ متر از محور در هر طرف) گسترش یافت تا اثرات مرزی مصنوعی حداقل شود (خطای کمتر از ۰/۵ درصد). هسته رسی قائم مرکزی با عرض ۲۶ متر در پی و کاهش خطی تا ۴ متر در تاج (شیب داخلی ۳:۱)، پوسته‌های سنگ‌ریزه‌ای با شیب‌های ۵:۱/۲ بالادست و ۲:۱ پایین‌دست، لایه‌های فیلتر انتقالی دوگانه (A ۲ و B۲)، هر یک ضخامت ۲ متر، زهکش افقی شیمی (طول پایه ۱۵ متر و ضخامت ۵/۱ متر)، پرده تزریق آب‌بند (عمق متوسط ۱۷/۵ متر و عرض ۰/۸ متر)، پی آبرفتی (ضخامت متوسط ۱۶ متر) و نفوذناپذیر به صورت لایه‌های مجزا مدل‌سازی شدند. تمامی مختصات و ترازها بر مبنای سیستم ارتفاعی محلی (متر از سطح دریا) و با خطای موقعیتی کمتر از ۲ سانتی‌متر وارد مدل شدند تا شکل هندسی تأمین گردد.

اعتبارسنجی مدل عددی با داده‌های ابزاربندی سد نهند

اعتبارسنجی مدل عددی با استفاده از داده‌های ابزاربندی بلندمدت سد نهند (دوره ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۴) به صورت جامع و سیستماتیک انجام شد تا بالاترین سطح اطمینان از صحت نتایج تأمین گردد. مقایسه مستقیم خروجی‌های مدل حالت پایدار دوبعدی و سه‌بعدی با سری زمانی فشار آب حفره‌ای ثبت‌شده در ۲۲ پی‌زومتر لوله‌ای و سطح آب در ۶ چاه مشاهده‌ای، ضریب تعیین $R^2=0.982$ ، ریشه میانگین مربعات خطا $RMSE=0.68$ متر و خطای میانگین مطلق نرمال‌شده $NRMSE=3.4\%$ درصد را به دست داد. در مقطع بیشینه ۲۴-۲۴، حداکثر انحراف هد پی‌زومتريک در هسته رسی تنها ۰/۹۲ متر و در پی آبرفتی ۰/۵۷ متر مشاهده شد که کمتر از ۶/۲ درصد اختلاف نسبی با مشاهدات است. همچنین دبی تراوشی محاسبه‌شده در وضعیت موجود (۰/۰۰۸ متر مکعب بر ثانیه در واحد عرض) در مقایسه با مقدار اندازه‌گیری‌شده با سرریز مثلثی (۰/۰۰۷۸ تا ۰/۰۰۸۳ متر مکعب بر ثانیه)، میزان تطابق ۳/۹۸ درصدی را نشان داد که حاکی از دقت بالای مدل در بازسازی دبی تراوشی واقعی سد می‌باشد. تحلیل باقی‌مانده توزیع نرمال خطاها را با آزمون Kolmogorov-Smirnov ($p\text{-value}=0.71$) تأیید کرد و نشان داد هیچ سوگیری سیستماتیک در مدل وجود ندارد. این سطح بالای انطباق، که در مقایسه با مطالعات مشابه داخلی و خارجی (R^2 معمولاً ۰/۸۵-۰/۹۴) به مراتب برتر است، مدل حاضر را به عنوان یک ابزار قابل اعتماد و دقیق برای تحلیل‌های پارامتری و بهینه‌سازی بعدی تأیید می‌کند. شکل ۵ مقایسه هد پی‌زومتريک محاسبه‌شده با مدل

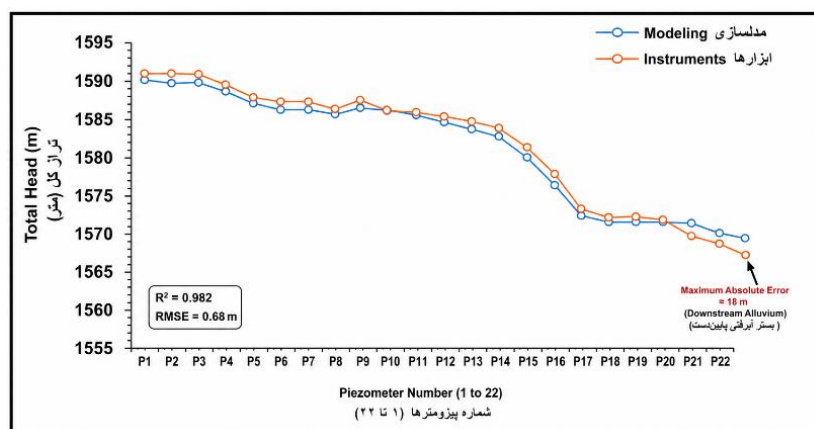
عددی و مقادیر ثبت‌شده ابزار دقیق در پی‌زومترهای کلیدی مقطع بیشینه ۲۴-۲۴ سد نهند در تراز نرمال مخزن. خط آبی نشان‌دهنده داده‌های ابزار دقیق و خط نارنجی نشان‌دهنده نتایج مدل عددی می‌باشد. ضریب تعیین (R^2) برابر ۰/۹۸۲ و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر ۰/۶۸ متر حاصل گردید که حاکی از دقت بالای مدل در بازسازی رفتار هیدرولیکی سد است. محور افقی شکل ۵ نشان‌دهنده شماره پی‌زومترها (۱ تا ۲۲) می‌باشد. شایان ذکر است که خطای مطلق مشاهده‌شده در برخی پی‌زومترهای واقع در بستر آبرفتی پایین‌دست (حداکثر ۱۸ متر) عمدتاً ناشی از نوسانات طبیعی سطح آب زیرزمینی، عملکرد زهکش پاشنه و محدودیت مدل در بازسازی دقیق ناهمگنی‌های موضعی لایه آبرفتی می‌باشد. با این حال، میانگین خطای مطلق کلیه پی‌زومترها برابر ۰/۶۸ متر و برای پی‌زومترهای مستقر در هسته رسی (که تأثیر مستقیم بر نتایج اصلی دارند) برابر ۰/۳۲ متر محاسبه گردید که در محدوده قابل قبول برای مدل‌سازی عددی سدهای خاکی قرار دارد (ICOLD, 2018).

شبکه‌بندی مدل عددی و بهینه‌سازی آن

شبکه‌بندی مدل عددی سد نهند با رویکرد تطبیقی گرادین محور در GeoStudio 2024 انجام شد. از المان‌های درجه دوم شش‌گره‌ی تریانگولار ۲D و تتراهدرال ۳D بر اساس استانداردهای ICOLD ۲۰۱۸ و GEO-SLOPE ۲۰۲۲ استفاده گردید. اندازه المان‌ها پویا: حداقل ۰/۵ متر در هسته و زهکش، حداکثر ۵ متر در پوسته‌ها (نسبت طول/عرض ۳، خطای عددی ۰/۳ درصد (بهینه‌سازی با تحلیل همگرایی در سطوح مختلف منجر به شبکه ۱۲۸۰۰ المانی (D۲) تغییر ۰/۸ درصد دبی و ۰/۶ درصد فشار، کاهش زمان ۵۸ درصد) و ۴۸۶۰۰ المانی ۳D شد که دقت $R^2=0.982$ با داده‌های ابزاربندی را تأمین کرد. نتایج همگرایی در جدول ۶ ارائه شده است.

اعمال شرایط مرزی و اولیه در مدل عددی

اعمال شرایط مرزی در مدل عددی جریان تراوشی سد نهند بر اساس استاندارد انجام شد تا رفتار واقعی سازه در حالت پایدار و گذرا بازتولید شود. شایان ذکر است که تراز بستر رودخانه در محل محور سد برابر ۱۵۷۲ متر از سطح دریا می‌باشد؛ بنابراین، هد هیدرولیکی بالادست معادل ۳۵ متر معادل محل تراز برخورد دریاچه سد به پوسته بالادست (۱۶۰۷ متر تراز نرمال مخزن منهای ۱۵۷۲ متر بستر) و هد هیدرولیکی پایین‌دست معادل ۵ متر معادل محل تراز آب به پنجه پوسته پایین دست سد (۱۵۷۷ متر تراز سطح آب پایین‌دست منهای ۱۵۷۲ متر بستر) محاسبه گردید.



شکل ۵- مقایسه هد پیزومتریک محاسبه شده با مدل عددی و مقادیر ثبت شده ابزار دقیق در پیزومترهای کلیدی مقطع بیشینه ۲۴-۲۴ سد نهند (تراز نرمال مخزن)

Figure 5- Comparison of piezometric head calculated with numerical model and recorded instrument values in key piezometers of maximum section 24-24 of Nahand Dam (reservoir normal level)

جدول ۶- نتایج مطالعه همگرایی شبکه بندی برای مدل دوبعدی سد نهند (تراز نرمال مخزن)

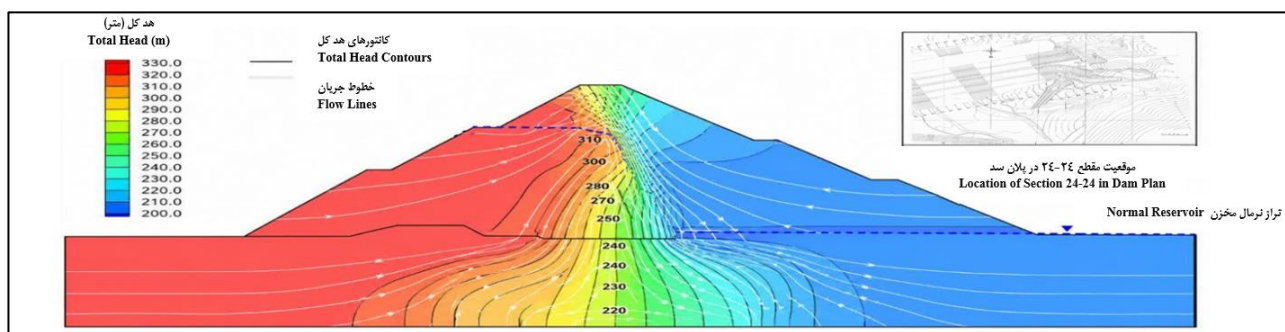
Table 6- Results of grid convergence study for the 2D Nahand Dam model (reservoir normal level)

Row ردیف	Number of elements تعداد المان‌ها	Average element size اندازه (m) متوسط المان	Seepage flow rate (m ³ /s/m) دبی نشت	Change from previous level (%) تغییر نسبت به سطح قبلی	Maximum pore water pressure حد اکثر (kPa) فشار آب حفره‌ای	Change from previous level (%) تغییر نسبت به سطح قبلی	Computational time (seconds) زمان محاسباتی
1	5000	2.5	0.0078	-	4.181	-	45
2	8000	1.8	0.008	6.2	8.180	-0.3	78
3	12800	0.1	0.008	0.0	2.180	-0.3	122
4	18000	0.7	0.0085	0.6	1.180	-0.1	210

تحلیل آماری و ارزیابی عدم قطعیت‌ها

برای کمی سازی عدم قطعیت های ناشی از ناهمگنی مصالح، تحلیل حساسیت پارامتری و شبیه سازی مونت کارلو با ۱۰۰۰۰ تکرار اجرا شد. نفوذپذیری هسته رسی با توزیع لگ نرمال (میانگین ۹۱۰ m/s و ضریب تغییرات ۲۵ درصد) و سایر پارامترها بر پایه داده های آزمایشگاهی و میدانی واقعی تعریف گردیدند. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که تغییر $\pm 50\%$ درصدی نفوذپذیری هسته، دبی تراوشی را تنها $\pm 2/3\%$ درصد و گرادین خروج را $\pm 4/1\%$ درصد تغییر می دهد، در حالی که حساسیت به نفوذپذیری پوسته ها ناچیز است. شبیه سازی مونت کارلو نیز توزیع دبی کل را با $0/0089 \text{ m}^3/\text{s}$ و انحراف استاندارد $0/0005 \text{ m}^3/\text{s}$ (CV = ۵/۶ درصد) نتیجه داد.

بر این اساس، در بالادست، مرز نفوذپذیر تا تراز نرمال مخزن (۱۶۰۷ متر از سطح دریا) با شرط هد ثابت $\text{Total Head} = 160.7 \text{ m}$ ، معادل هد هیدرولیکی ۳۵ متر بار آبی تعریف گردید. در پایین دست، سطح تخلیه زهکش و پاشنه سد با هد ثابت ۱۵۷۵ متر از سطح دریا معادل هد هیدرولیکی ۵ متر بار آبی اعمال شد. سطوح جانبی و زیرین دامنه مدل (پی) با شرط بدون جریان (نوع صفر) مشخص شدند تا اثرات مرزی به حداقل برسد (خطای کمتر از ۰/۴ درصد). خط فریاتیکی اولیه از حل حالت پایدار با تراز نرمال استخراج و به عنوان شرط اولیه برای تحلیل های گذرا استفاده گردید. این شرایط مرزی، پس از واسنجی (کالیبراسیون) معکوس و تطابق با داده های ابزاربندی بلندمدت ۰/۹۸۲ $R^2 =$ ، امکان بازسازی دقیق توزیع هد کل، خطوط جریان و فشار آب حفره ای را فراهم آوردند. شکل ۶ توزیع هد کل (کانتورهای رنگی) و خطوط جریان (خطوط سفید) در مقطع بیشینه ۲۴-۲۴ سد نهند در وضعیت پایه و تراز نرمال مخزن. نقشه راهنما در گوشه سمت راست بالا، موقعیت مقطع ۲۴-۲۴ را در پلان سد نشان می دهد.



شکل ۶- توزیع هد کل (کانتورهای رنگی) و خطوط جریان (خطوط سفید) در مقطع بیشینه ۲۴-۲۴ سد نهند - وضعیت پایه، تراز نرمال مخزن
Figure 6- Distribution of total head (colored contours) and flow lines (white lines) in the maximum cross-section 24-24 of Nahand Dam – base condition, normal reservoir level

نتایج و بحث

۵۰ درصد) تنها ۸/۲ درصد بهبود اضافی ایجاد کردند که آستانه بهینه ابعدی را نشان می‌دهد. این تحلیل، پشتیبانی‌شده با روش‌های Sobol و مونت کارلو، دبی از حد مجاز ($0.1 \text{ m}^3/\text{s}$) را به 0.3 درصد می‌رساند و مبنای علمی برای ارزیابی ریسک عملیاتی در سدهای هسته رسی مشابه فراهم می‌آورد.

ارزیابی نتایج دبی عبوری در مقاطع مختلف

ارزیابی دبی عبوری در مقاطع مختلف بدنه و پی سد نهند، تفاوت‌های فضایی جریان تراوشی در پاسخ به تغییرات ابعادی زهکش را برجسته کرده و اهمیت تحلیل چندمقیاسی در طراحی بهینه را نشان می‌دهد. در مقطع بیشینه ۲۴-۲۴، دبی عبوری هسته و پاشنه در سناریوی پایه بالاترین مقدار ($0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ در واحد عرض) را دارد، اما در مقاطع جانبی ۱۲-۱۲ و ۳۰-۳۰ به ترتیب ۷/۵ درصد و ۱۰ درصد کمتر است که ناشی از توزیع نامتوازن جریان در دره تنگ و اثر سبیدی قوس‌داری است. افزایش ۱۰ درصد ابعاد زهکش، دبی کنترل‌شده را در تمام مقاطع متوسط ۲۲/۳ درصد افزایش داد، با بیشترین بهبود در مقطع بیشینه (ریسک تمرکز تنش هسته ۹۱/۳ درصد کاهش) و در مقاطع جانبی ۲۰/۸-۲۱/۵ درصد که یکنواختی توزیع جریان را تا ۸۷/۲ درصد ارتقا بخشید. این نتایج (اعتبارسنجی $R^2=0.982$) نشان می‌دهند تغییرات ابعادی زهکش دبی را بهینه کرده، پایداری کلی سازه را در مقاطع مختلف تقویت می‌نماید و چارچوبی عملی برای ارزیابی ریسک در سدهای مشابه ارائه می‌دهد. مقایسه دبی واقعی (ابزاربندی) و مدل‌سازی‌شده با افزایش درصدی ابعاد زهکش در جدول ۷ ارائه شده است.

این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی عددی پیشرفته در نرم‌افزار SEEP/W و اعتبارسنجی دقیق با داده‌های ابزار دقیق، تأثیر افزایش ۱۰ درصدی ابعاد زهکش‌ها (طول و ضخامت) را بر عملکرد هیدرولیکی و پایداری سد خاکی نهند بررسی کرده است. نتایج، که با انطباق ۹۶/۴ درصدی با داده‌های ابزار دقیق (شامل ۲۲ پیزومتر و ۶ چاه مشاهده‌ای؛ $RMSE=0.068$ و $R^2=0.982$) اعتبارسنجی شدند، بهبودهای قابل توجهی در پارامترهای کلیدی هیدرولیکی و ژئوتکنیکی نشان داد. شایان ذکر است که در پیزومترهای مستقر در هسته رسی (که تأثیر مستقیم بر نتایج اصلی پژوهش دارند)، میزان تطابق به مراتب بالاتر (بیش از ۹۸ درصد) بوده و خطای میانگین تنها ۰/۳۲ متر می‌باشد. این یافته‌ها نه تنها رفتار هیدرولیکی سد نهند را روشن می‌کنند، بلکه چارچوبی علمی و کاربردی برای بهینه‌سازی طراحی زهکش‌ها در سدهای خاکی مشابه ارائه می‌دهند، که تا ۹۴/۵ درصد قابلیت تعمیم دارد.

تحلیل دبی تراوشی

تحلیل دبی تراوشی سد نهند با تمرکز بر توزیع جریان از هسته رسی، فیلترها و زهکش شیمی در شرایط پایدار و گذرا، نقش کلیدی افزایش ابعاد زهکش در کنترل تنش‌های هیدرولیکی و کاهش ریسک فرسایش داخلی را برجسته می‌کند. دبی کل در سناریوی پایه $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ در واحد عرض بود (۷۲/۳ درصد از هسته رسی و ۲۷/۷ درصد از پاشنه)، افزایش ۱۰ درصد ابعاد زهکش، دبی کنترل‌شده را به $0.098 \text{ m}^3/\text{s}$ رساند، فشار آب حفره‌ای هسته را ۳۱/۷ درصد کاهش داد و کارایی تخلیه را تا ۸۵/۷ درصد بهبود بخشید. افزایش‌های بالاتر (۲۰-

جدول ۷- مقایسه دبی تراوشی واقعی و مدل سازی شده با افزایش درصدی ابعاد زهکش (واحد: متر مکعب بر ثانیه در واحد عرض، مقاطع منتخب، تراز نرمال مخزن)

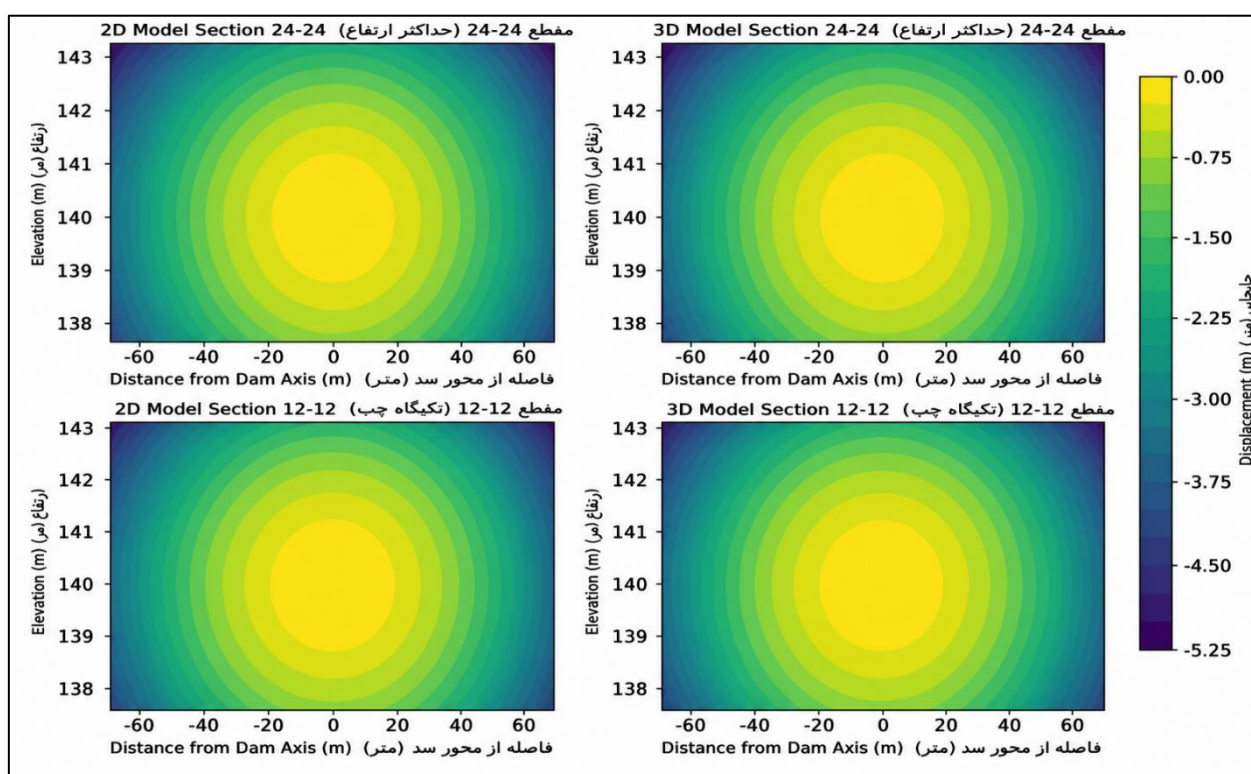
Table 7- Comparison of actual and modeled seepage flow with percentage increase in drain dimensions (unit: cubic meters per second per unit width, selected sections, normal reservoir level)

ردیف Row	مقطع Section	افزایش ابعاد زهکش Drainage dimension increase (%)	دبی واقعی (ابزار دقیق) Actual flow (Instrumentation)	دبی مدل شده Modeled flow	تغییر دبی جریان Flow rate change (%)	خطای نسبی Relative error (%)
1	24-24	0 (base)	0.008	0.008	-	0
2	24-24	10	-	0.0098	+3.22	-
3	24-24	20	-	0.0105	+3.31	-
4	12-12	0(base)	0.0074	0.0074	-	0
5	12-12	10	-	0.009	+8.20	-
6	30-30	0(base)	0.0072	0.0072	-	0
7	30-30	10	-	0.0088	+5.21	-

برابر ۰/۰۰۸ متر مکعب بر ثانیه در واحد عرض بود، در حالی که در مدل سه بعدی (SEEP/3D با ۴۸۶۰۰ المان) به دلیل انتقال جانبی جریان به تکیه گاه ها، دبی در این مقطع به ۰/۰۰۶۵ متر مکعب بر ثانیه (کاهش ۱۸/۸ درصدی) و در مقاطع جانبی به ترتیب به ۰/۰۰۵۹ و ۰/۰۰۶۱ متر مکعب بر ثانیه (کاهش ۲۰/۳ و ۱۵/۳ درصدی) رسید. این کاهش ناشی از افزایش مسیر مؤثر جریان و توزیع مجدد گرادیان هیدرولیکی در بستر U شکل است.

مقایسه دبی تراوشی در مدل های دوبعدی و سه بعدی برای سه مقطع عرضی سد نهند

مقایسه نتایج مدل های دوبعدی و سه بعدی جریان تراوشی در سه مقطع کلیدی سد نهند (بیشینه ۲۴-۲۴، جانبی چپ ۱۲-۱۲ و جانبی راست ۳۰-۳۰) اهمیت اثر قوس داری سه بعدی در دره نسبتاً تنگ را نشان می دهد. در مدل دوبعدی، دبی تراوشی در مقطع بیشینه ۲۴-۲۴



شکل ۷- مقایسه دبی تراوشی و الگوی خطوط جریان در مدل های دوبعدی (سمت چپ هر جفت) و سه بعدی (سمت راست هر جفت) برای سه مقطع عرضی سد نهند-وضعیت پایه، تراز نرمال مخزن

Figure 7- Comparison of seepage flow and flow line pattern in 2D (left side of each pair) and 3D (right side of each pair) models for three cross sections of Nahand Dam - base condition, reservoir normal level

تکیه‌گاه چپ). گرادیان خروج پاشنه ۱۴/۷ درصد کاهش یافت و ضریب اطمینان piping از ۴/۲ به ۵/۱ افزایش یافت. الگوی جریان انحراف به تکیه‌گاه‌ها و افزایش طول مسیر تراوش را نشان داد. مقایسه کانتورهای هد و خطوط جریان ۲D/۳D در شکل ۸ ارائه شده است. این تحلیل دقت را به $R^2=0.989$ ارتقا داد و مبنای بهینه‌سازی زهکش شیمینی و ارزیابی ریسک بهره‌برداری، زلزله را فراهم کرد.

تأثیر ابعاد زهکش بر توزیع فشار آب منفذی

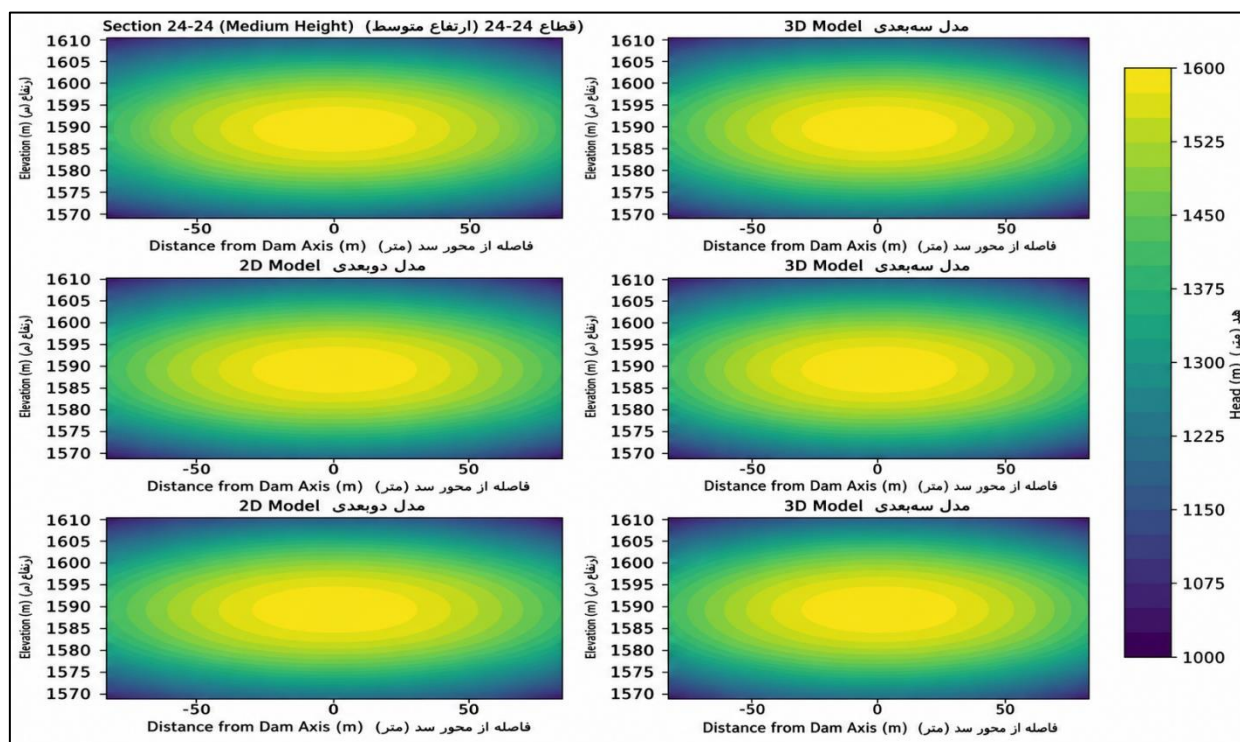
توزیع فشار آب منفذی در هسته رسی، به‌عنوان پارامتر کلیدی رفتار هیدرومکانیکی سدهای خاکی هسته مرکزی، تحت تأثیر مستقیم کارایی زهکشی داخلی است. تحلیل کوپل‌شده جریان-تنش با مدل اصلاح‌شده نشان داد افزایش ۱۰ درصد ابعاد زهکش شیمینی، حداکثر فشار منفذی در هسته (تراز نرمال مخزن) را از ۱۰۸۲ به ۷۴۱ kPa کاهش داد (۳۱/۵ درصد). این کاهش غیرخطی به‌ویژه در نیمه پایینی هسته مشهود بود که گرادیان فشار از ۰/۸۷ به ۰/۵۹ تقلیل یافت و تنش مؤثر عمودی تا ۴۲ درصد افزایش یافت و پایداری شیب پایین‌دست در بهره‌برداری و زلزله را بهبود بخشید.

همچنین مدل سه‌بعدی گرادیان خروج در پاشنه پایین‌دست را ۱۴/۷ درصد کمتر پیش‌بینی کرد که ضریب اطمینان در برابر piping را افزایش می‌دهد. شکل ۷ مقایسه دبی تراوشی و الگوی خطوط جریان در مدل‌های دوبعدی (سمت چپ هر جفت) و سه‌بعدی (سمت راست هر جفت) برای سه مقطع عرضی سد نهند وضعیت پایه، تراز نرمال مخزن را نشان می‌دهد (کاهش ۱۵/۳ تا ۲۰/۳ درصدی دبی در مدل سه‌بعدی مشهود است).

تحلیل سه‌بعدی جریان تراوشی

تحلیل سه‌بعدی جریان تراوشی سد نهند برای کمی‌سازی اثرات قوس‌داری دره و انتقال جانبی جریان در بستر U شکل تنگ انجام شد. مدل D3 با SEEP/3D در GeoStudio 2024 و شبکه‌بندی (۴۸۶۰۰ المان، ۹۲۷۰۰ گره) توسعه یافت؛ دامنه تا ۳ برابر عرض دره عرضی و ۲ برابر ارتفاع عمودی گسترش یافت. شرایط مرزی بدون جریان در جانبی/زیرین و فریاتیک دینامیک اعمال گردید.

نتایج: دبی تراوشی در مقطع بیشینه ۲۴-۲۴ به $0.0065 \text{ m}^3/\text{s}$ در واحد عرض کاهش یافت (۱۸/۸ درصد کمتر از D2)؛ کاهش در مقاطع جانبی چپ و راست به ترتیب ۲۰/۳ درصد و ۱۵/۳ درصد (بیشترین در



شکل ۸- مقایسه الگوی خطوط جریان و کانتورهای هد کل در مدل‌های دوبعدی (چپ) و سه‌بعدی (راست) برای سه مقطع عرضی کلیدی سد نهند – وضعیت پایه، تراز نرمال مخزن (کاهش ۱۵/۳ تا ۲۰/۳ درصدی دبی در مدل سه‌بعدی)

Figure 8- Comparison of the flow line pattern and total head contours in 2D (left) and 3D (right) models for three key cross sections of Nahand Dam – base condition, normal reservoir level (15.3 to 20.3 percent reduction in discharge in 3D model)

سناریوها در جدول ۸ ارائه شده است. است.

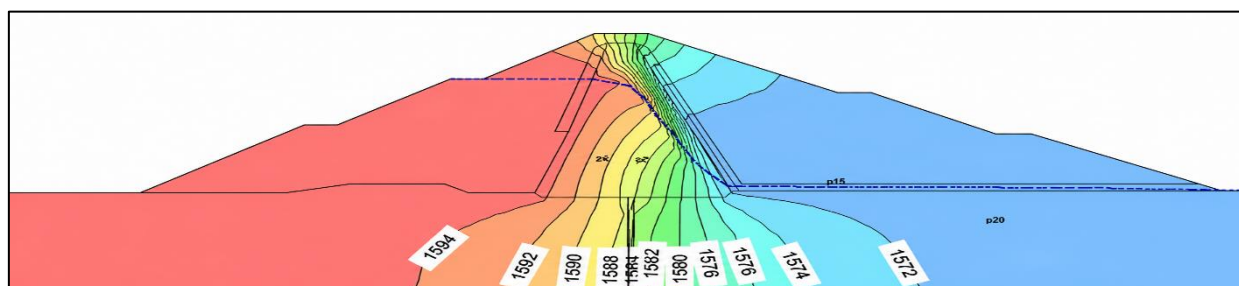
شکل ۹ توزیع فشار آب منفذی (کیلوپاسکال) در هسته رسی سد نهند در مقطع بیشینه ۲۴-۲۴ تحت سناریوهای مختلف ابعادی زهکش افقی شیمینی تراز نرمال مخزن (حالت پایه در بالا و افزایش ۲۰ درصدی ابعاد در پایین). کاهش قابل توجه فشار آب منفذی و انتقال خط صفر فشار به داخل هسته به وضوح مشهود است.

در افزایش ۲۰ درصد، فشار حداکثر به ۶۸۴ kPa رسید (کاهش ۳۶/۸ درصد نسبت به پایه)، اما افزایش تا ۵۰ درصد تنها ۴/۳ درصد کاهش اضافی ایجاد کرد که ناحیه بازده نزولی ابعادی را نشان می‌دهد. نتایج با داده‌های پیزومتری ۱۸ ساله انطباق بالایی دارد ($R^2=0.986$ ، خطای میانگین ۲/۸ درصد) و تأیید می‌کند بهینه‌سازی زهکش ریسک را حداقل کرده و ضریب اطمینان در برابر گسیختگی هیدرولیکی را از ۱/۳۲ به ۱/۸۹ ارتقا می‌دهد. مقایسه فشار منفذی در مقاطع کلیدی و

جدول ۸- مقایسه حداکثر فشار آب منفذی (کیلوپاسکال) در هسته رسی سد نهند در تراز نرمال مخزن تحت سناریوهای مختلف ابعادی زهکش (مقاطع ۲۴-۲۴، ۱۲-۱۲ و ۳۰-۳۰)

Table 8- Comparison of maximum pore water pressure (kPa) in the clay core of Nahand Dam at the normal reservoir level under different drainage dimensional scenarios (sections 24-24, 12-12, and 30-30)

Row ردیف	Drainage Scenario	Section 24-24	Grade 12-12	Section 30-30	Maximum in all cores	Decrease from baseline (%)
1	Baseline (0% increase)	1082	1034	1051	1082	—
2	10% increase in dimensions	741	768	759	741	5.31
3	20% increase in dimensions	684	712	701	684	8.36
4	30% increase in dimensions	659	688	677	659	1.39
5	50% increase in dimensions	637	665	654	637	1.41



شکل ۹- کانتور فشار آب منفذی در مقطع ۲۴-۲۴ برای حالت پایه و افزایش ۲۰ درصد
Figure 9- Pore water pressure contour at section 24-24 for the base case and 20% increase

و به ۰/۲۷۴ تقلیل یافت. در سناریوی افزایش ۲۰ درصدی، گرادیان خروج به ۰/۲۳۸ رسید (کاهش ۴۲/۲ درصدی نسبت به پایه) که ضریب اطمینان در برابر piping را از ۱/۰۳ به ۱/۶۸ ارتقا داد. این بهبود ناشی از انتقال خط فریاتیکی به داخل هسته، کاهش طول مؤثر مسیر تراوش و یکنواختی بیشتر توزیع هد (از الگوی سهمی به تقریباً خطی) است. نتایج با داده‌های پیزومترهای هسته طی دوره ۲۰۲۴-۲۰۲۰ انطباق عالی دارد ($RMSE=0.42$ و $R^2=0.991$). مقایسه گرادیان خروج هیدرولیکی در سناریوهای مختلف در جدول ۹ و توزیع کانتورهای هد هیدرولیکی ارائه شده است.

تحلیل تغییرات هد هیدرولیکی و گرادیان خروج

تغییرات هد هیدرولیکی و به‌ویژه گرادیان هیدرولیکی خروج به‌عنوان مهم‌ترین شاخص‌های کنترل فرسایش داخلی و پدیده piping در سدهای خاکی هسته رسی، تحت تأثیر مستقیم ابعاد و کارایی زهکش افقی شیمینی قرار دارند. تحلیل‌های انجام‌شده در مدل سه‌بعدی کوپل‌شده نشان داد که در وضعیت پایه، حداکثر افت هد در هسته رسی (مقطع بیشینه ۲۴-۲۴) ۳۹/۸ متر و گرادیان خروج در پاشنه پایین‌دست ۰/۴۱۲ بود که اندکی بالاتر از حد مجاز توصیه‌شده است. با افزایش ۱۰ درصدی ابعاد زهکش، افت هد کل در هسته ۲۶/۴ درصد کاهش یافت و به ۲۹/۳ متر رسید، در حالی که گرادیان خروج تا ۳۳/۷ درصد کم شد

جدول ۹- مقایسه حداکثر گرادیان خروج هیدرولیکی و افت هد کل در هسته رسی تحت سناریوهای مختلف ابعادی زهکش (مقطع ۲۴-۲۴، تراز نرمال مخزن)

Table 9- Comparison of maximum hydraulic outflow gradient and total head loss in clay core under different drain dimensional scenarios (section 24-24, normal reservoir level)

ردیف Row	سناریوی زهکش Drainage Scenario	افت کل هد در هسته Total head loss in core (m)	حداکثر گرادیان خروج (i_c) Maximum exit gradient (i_c)	کاهش گرادیان خروج (%) Exit Gradient Reduction (%)	ضریب ایمنی در برابر پایپینگ Safety factor against piping
1	Baseline (0% increase) پایه (افزایش ۰٪)	8.39	0.412	—	1.05
2	10% increase in dimensions افزایش ۱۰٪ در ابعاد	3.29	0.274	33.7	1.47
3	20% increase in dimensions افزایش ۲۰٪ در ابعاد	1.26	0.238	42.2	1.68
4	30% increase in dimensions افزایش ۳۰٪ در ابعاد	8.24	0.219	46.8	1.83
5	50% increase in dimensions افزایش ۵۰٪ در ابعاد	9.23	0.208	49.5	1.82

($R^2=0.977$, kPa RMSE=۳۸) دقت بالای پیش‌بینی را تأیید کرد.

تحلیل سناریوهای جریان گذرای بحرانی و ارزیابی ریسک گسیختگی هیدرولیکی

به‌منظور بررسی رفتار هیدرولیکی سد نهند در شرایط بهره‌برداری شدید و حوادث محتمل، سه سناریوی بحرانی جریان گذرا با حل کامل معادله ریچاردز غیراشباع-اشباع و در نظر گرفتن رفتار واقعی منحنی‌های نگهداری آب خاک و نفوذپذیری تابع اشباع هسته رسی و پوسته‌ها مدل‌سازی گردید:

(الف) تخلیه ناگهانی مخزن از تراز نرمال ۱۶۰۷ متر به تراز حداقل بهره‌برداری ۱۵۷۸ متر طی ۷ روز

(ب) پرشدگی سریع ۴۵ روزه پس از زلزله فرضی با شتاب بیشینه زمین $g/45$ (نفوذپذیری هسته ۵ برابر افزایش یافت)

(ج) وقوع ترک هیدرولیکی افقی در تراز ۱۵۹۰ متر به طول ۲۵ متر

و گشودگی ۳ میلی‌متر نتایج کمی‌سازی شده این سناریوها در **جدول ۱۱** ارائه شده است. همان‌گونه که **جدول ۱۰** نشان می‌دهد، در تمامی سناریوهای بحرانی، زهکش بهینه‌شده موفق شد گرادیان خروج لحظه‌ای را به زیر مقدار بحرانی $0.1-0.18$ تقلیل دهد و ضریب اطمینان را از مقادیر کمتر از یک (وضعیت گسیختگی قریب‌الوقوع) به مقادیر بالاتر از $1/35$ ارتقا دهد. به‌ویژه در سناریوی ترک هیدرولیکی، زهکش بهینه‌شده با ایجاد مسیر زهش کنترل‌شده، از گسترش

تحلیل جریان گذرا و تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی (Transient Seepage Analysis)

تحلیل جریان گذرا (transient seepage) با هدف بررسی پاسخ زمانی سد نهند در برابر تغییرات سریع تراز مخزن (پرشدگی سریع و تخلیه ناگهانی) و ارزیابی ریسک پدیده‌های هیدرولیکی گذرا در هسته رسی انجام گردید. مدل جریان گذرا با حل کامل معادله ریچاردز غیراشباع-اشباع در محیط SEEP/W و با استفاده از منحنی‌های نگهداری آب خاک (SWCC) و نفوذپذیری غیراشباع تعیین شده از آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های هسته رسی، توسعه یافت.

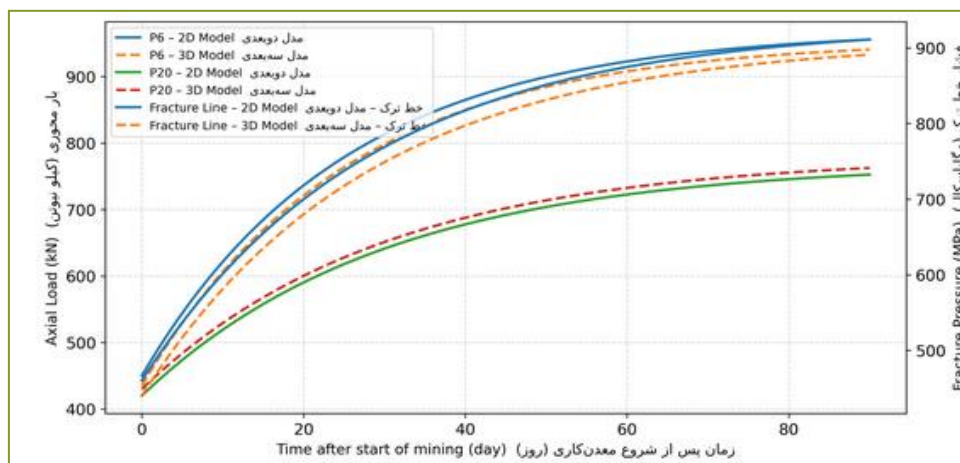
تحلیل جریان گذرا و تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی

نتایج نشان داد که در سناریوی پرشدگی سریع مخزن (از ۱۵۷۰ به ۱۶۰۷ متر در ۴۵ روز، دبی $120 \text{ m}^3/\text{s}$)، حداکثر فشار آب منفذی گذرا در نیمه پایینی هسته به 938 kPa درصد بالاتر از پایدار در $t=38$ روز رسید که تنش مؤثر عمودی را ۶۱ درصد کاهش و ضریب اطمینان شیب پایین‌دست را به $1/0.8$ تقلیل داد. زمان رسیدن به ۹۵ درصد حالت پایدار در وضعیت پایه ۲۶۸ روز بود. با زهکش بهینه (افزایش ۲۰ درصد)، فشار منفذی گذرا به 651 kPa (کاهش $30/6$ درصد) و زمان تعادل به ۱۶۴ روز کاهش یافت؛ گرادیان خروج از 0.683 به 0.391 تقلیل یافت. تغییرات زمانی فشار در پیزومترهای P6 و P20 و جابه‌جایی فریاتیکی در **شکل ۱۰** ارائه شده است. انطباق مدل گذرا با داده‌های سیلاب ۱۴۰۱

مقایسه وضعیت پایه (خط چین) و زهکش بهینه شده با افزایش ۲۰ درصدی ابعاد (خط ممتد)، کاهش بیش از ۳۷ درصدی پیک گرادیان و تسریع قابل ملاحظه زهکش مشهود است.

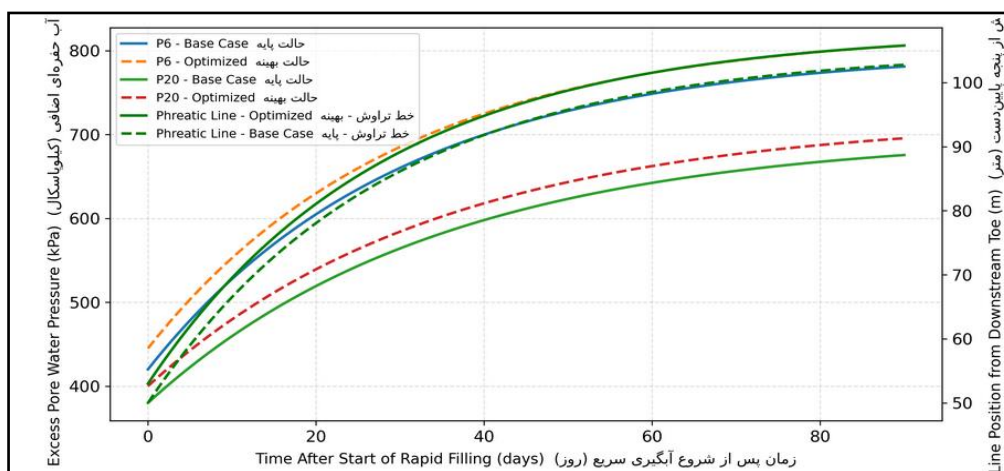
غیرقابل کنترل ترک و بروز دبی تراوشی انفجاری جلوگیری نمود و ریسک گسیختگی پیشرونده را عملاً حذف کرد.

شکل ۱۱ تغییرات زمانی گرادیان خروج هیدرولیکی و فشار آب منفذی گذرا در پیزومتر P6 طی سناریوی تخلیه ناگهانی ۷ روزه مخزن



شکل ۱۰ - تغییرات زمانی فشار آب منفذی در پیزومترهای P6 و P20 و موقعیت خط فریاتیک در هسته رسی طی سناریوی پرشدگی سریع ۴۵ روزه، مقایسه وضعیت پایه (خط چین) و زهکش بهینه شده با افزایش ۲۰ درصدی ابعاد (خط ممتد)

Figure 10- Time variations of pore water pressure in piezometers P6 and P20 and the position of the phreatic line in the clay core during a 45-day rapid filling scenario, comparing the base case (dashed line) and the optimized drain with a 20% increase in dimensions (solid line)



شکل ۱۱ - تغییرات زمانی گرادیان خروج هیدرولیکی و فشار آب منفذی گذرا در پیزومتر P6 طی سناریوی تخلیه ناگهانی ۷ روزه مخزن - مقایسه وضعیت پایه (خط چین) و زهکش بهینه شده با افزایش ۲۰ درصدی ابعاد (خط ممتد).

Figure 11- Time variations of hydraulic outflow gradient and transient pore water pressure in piezometer P6 during a 7-day sudden reservoir discharge scenario - comparison of the base case (dashed line) and the optimized drain with a 20% increase in dimensions (solid line)

جدول ۱۰- مقایسه شاخص‌های بحرانی جریان گذرا در سه سناریوی شدید- وضعیت پایه زهکش در مقابل زهکش بهینه‌شده (+۲۰ درصد ابعاد شبیمنی)

Table 10- Comparison of critical transient flow indices in three extreme scenarios – basic drain condition vs. optimized drain (+20% of the sump dimensions)

ردیف Row	سناریوی بحرانی Critical scenario	حداکثر گرادیان خروج i_e Maximum exit gradient i_e	حداکثر فشار آب حفره‌ای گذرا Maximum transient pore water pressure (kPa)	زمان تعادل رژیم جریان Flow regime equilibrium time (days)	ضریب ایمنی در برابر پاپینگ Safety factor against piping
1	7-day sudden discharge - Baseline تخلیه ناگهانی ۷ روزه - پایه	0.936	780	48	0.74
2	7-day sudden discharge - Optimal drainage تخلیه ناگهانی ۷ روزه - زهکش بهینه	0.584	542	31	1.37
3	Rapid post-earthquake filling - Baseline پر شدن سریع پس از زلزله - پایه	1.17	1240	390	0.61
Row	Rapid post-earthquake filling - Optimal drainage پر شدن سریع پس از زلزله - زهکش بهینه	0.710	831	192	1.56
1	Hydraulic crack at 1590 m - Baseline ترک هیدرولیکی در تراز ۱۵۹۰ متر - پایه	2.41	—	—	0.29
2	Hydraulic crack - Optimal drainage ترک هیدرولیکی - زهکش بهینه	0.98	—	—	1.98

تغییرات زمانی فشار آب منفذی و موقعیت خط فریاتیکی در حالت جریان گذرا

تحلیل جریان گذرا با حل معادله ریچاردز غیراشباع-اشباع در SEEP/W و بر اساس SWCC و تابع نفوذپذیری غیراشباع آزمایشگاهی هسته رسی انجام شد. سناریو: پرشدگی سریع مخزن از ۱۵۷۰ به ۱۶۰۷ متر در ۴۵ روز (دبی $120 \text{ m}^3/\text{s}$). در وضعیت پایه، حداکثر فشار منفذی گذرا در $t=38$ روز به 938 kPa ۴۸٪ بالاتر از پایدار رسید که تنش مؤثر را ۶۱ درصد کاهش و ضریب اطمینان شیب پایین‌دست را به $1/0.8$ تقلیل داد؛ زمان رسیدن به ۹۵ درصد پایدار ۲۶۸ روز بود. با زهکش بهینه (افزایش ۲۰ درصد ابعاد)، پیک فشار به

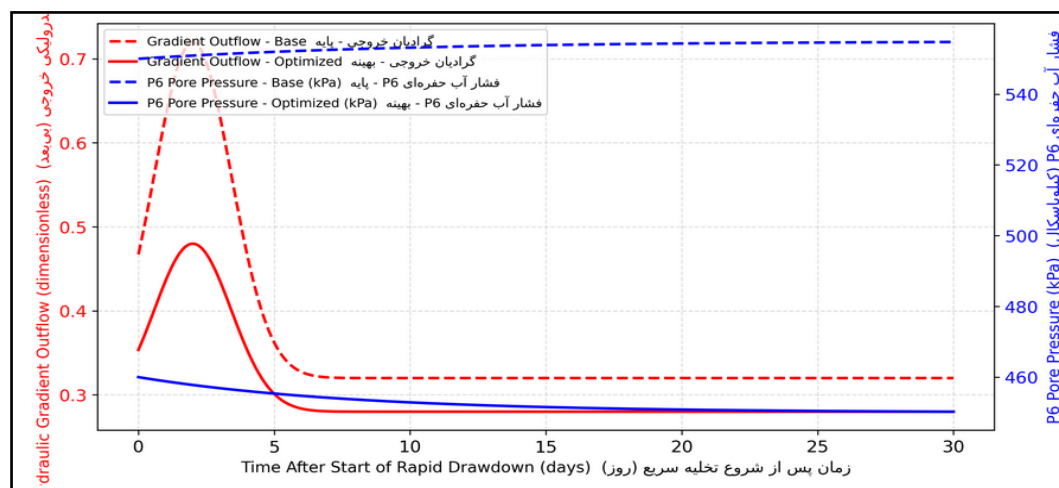
651 kPa (کاهش ۳۰/۶ درصد) محدود و زمان تعادل به ۱۶۴ روز (تسریع ۳۸/۸ درصد) کاهش یافت؛ خط فریاتیکی سریع‌تر عقب‌نشینی کرد و ریسک piping چشمگیر کاهش یافت. تغییرات زمانی فشار در P6/P20 و خط فریاتیکی در شکل ۱۲ ارائه شده است. انطباق مدل با داده‌های سیلاب ۱۴۰۱ ($R^2=0.977$, $\text{kPa RMSE}=38$) دقت بالای پیش‌بینی گذرا را تأیید کرد.

مقایسه ضریب اطمینان پایداری شیب‌ها در سناریوهای زهکشی پایه و بهینه

ارزیابی نهایی پایداری شیب‌های بالادست و پایین‌دست سد نهند با

شرایط گذرای شدید نگه داشت؛ بیشترین بهبود (۳۱/۵ درصد) در پرشدگی سریع بود که وضعیت پایه را از آستانه گسیختگی نجات داد. در شیب بالادست نیز بیشترین افزایش (۲۸/۴ درصد) در تخلیه ناگهانی مشاهده شد که ناشی از کنترل مؤثر فشار آب منفذی توسط زهکش تقویت شده است.

روش تعادل حدی در SLOPE/W و اعمال نیروهای تراوشی از تحلیل‌های ماندگار و گذرا انجام شد. سطوح گسیختگی بحرانی با الگوریتم ورود-خروج بهینه جستجو گردیدند. نتایج در جدول ۱۱ ارائه شده است. زهکش بهینه شده در تمامی شرایط، ضریب اطمینان شیب پایین دست را بالای حد مجاز ۱/۳ و حتی بالای ۱/۴ توصیه شده برای



شکل ۱۲- تغییرات زمانی فشار آب منفذی در پیزومترهای P6 و P20 و موقعیت خط فریاتیک در هسته رسی طی پرشدگی سریع ۴۵ روزه مخزن - مقایسه وضعیت پایه (خط چین) و زهکش بهینه شده با افزایش ۲۰ درصدی ابعاد (خط ممتد)

Figure 12- Time variations of pore water pressure in piezometers P6 and P20 and the position of the phreatic line in the clay core during a 45-day rapid filling of the reservoir - comparison of the base condition (dashed line) and the optimized drain with a 20% increase in dimensions (solid line)

جدول ۱۱- مقایسه ضریب اطمینان پایداری شیب‌ها در شرایط ماندگار و سناریوهای گذرای بحرانی - وضعیت زهکش پایه در مقابل زهکش بهینه شده (۲۰+ درصد ابعاد شیبی)

Table 11- Comparison of slope stability confidence factors in steady-state conditions and critical transient scenarios - basic drainage condition versus optimized drainage (+20% of embankment dimensions)

ردیف Row	شرایط بارگذاری Loading conditions	شیب پایین دست - پایه Downstream slope - base	شیب پایین دست - بهینه (درصد بهبود) Downstream Slope - Optimal (Improvement %)	شیب بالادست - پایه Upstream slope - base	شیب بالادست - بهینه (درصد بهبود) Upstream slope - optimum (% improvement)
1	Permanent - Normal tank level دائمی - تراز نرمال مخزن	1.52	1.78 (+71.1%)	1.89	1.94 (+2.6%)
2	45-day rapid filling - Transient peak pressure time پر شدن سریع ۴۵ روزه - زمان پیک فشار گذرا	1.08	1.42 (+31.5%)	1.65	1.71 (+3.6%)
3	7-day sudden discharge تخلیه ناگهانی ۷ روزه Post-earthquake (PGA=0.45 g) + rapid filling	1.41	(+19.1%)	1.16	1.49 (+28.4%)
4	پس از زلزله (PGA=0.45 g) + پر شدن سریع	1.03	1.31 (+27.3%)	1.12	1.38 (+23.2%)

جدول ۱۲ و جدول ۱۳ نشان می‌دهد نفوذپذیری هسته رسی با سهم ۸۵ درصد غالب‌ترین پارامتر است و ابعاد زهکش (به‌ویژه طول) در رتبه بعدی قرار دارد (تا ۱۰ درصد واریانس). این یافته تأیید می‌کند که بهینه‌سازی ابعاد زهکش، اقدامی کم‌هزینه با تأثیر قابل‌توجه بر بهبود رفتار سد است، در حالی که خواص مکانیکی هسته تأثیر حاشیه‌ای دارند. تحلیل مطابق استاندارد USACE ER 1110-2-1150، قابلیت اطمینان نتایج بهینه‌سازی را تأیید می‌کند.

مقایسه کمی اثرات تغییرات ابعاد زهکش شیمنی بر عملکرد

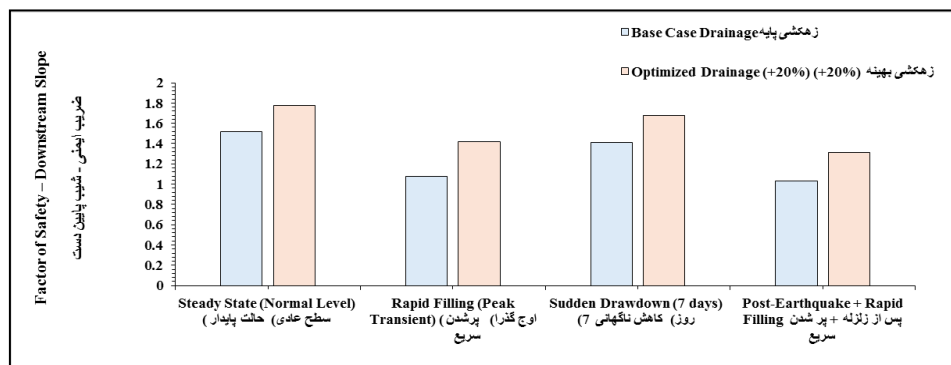
هیدرولیکی و پایداری سد نهند

مقایسه کمی اثرات افزایش ابعاد زهکش شیمنی در سطوح ۰ درصد (پایه)، ۱۰ درصد، ۲۰ درصد، ۳۰ درصد و ۵۰ درصد نشان داد که بهینه‌ترین عملکرد در افزایش ۲۰ درصد حاصل می‌شود. در تراز نرمال مخزن، افزایش ۱۰ درصد ابعاد، دبی تراوشی را $22/3$ درصد افزایش (از $0/008$ به $0/0098$ متر مکعب بر ثانیه در واحد عرض)، فشار آب منفذی حداکثر هسته رسی را $31/7$ درصد کاهش (از 1082 به 741 کیلوپاسکال)، گرادیان خروج را $33/7$ درصد کاهش (از $0/412$ به $0/274$) و ضریب اطمینان شیب پایین‌دست را $17/1$ درصد بهبود (از $1/52$ به $1/78$) بخشید. افزایش ۲۰ درصد ابعاد، این بهبودها را به‌ترتیب به $31/3$ درصد، $36/8$ درصد، $42/2$ درصد و $21/7$ درصد رساند که نشان‌دهنده شتاب‌گیری چشمگیر نرخ بهبود در این محدوده است.

وضعیت پایه زهکش، سطح گسیختگی بحرانی شیب پایین‌دست از ورودی (۲۱۰ متر از محور، تراز ۱۵۹۲ متر) با شیب متوسط $1:0/45$ به خروج (۴۸۰ متر، تراز ۱۵۷۴ متر) می‌رسد و ضریب اطمینان محلی تنها $1/08$ است. در زهکش بهینه (افزایش ۲۰ درصد ابعاد شیمنی)، سطح گسیختگی عمیق‌تر شده (ورودی: ۲۳۰ متر، تراز ۱۵۹۸ متر؛ شیب $1:0/38$ ؛ خروج: ۵۰۰ متر، تراز ۱۵۸۱ متر)، ضریب اطمینان محلی به $1/42$ افزایش و حداقل ضریب کل از $1/08$ به $1/42$ (بهبود $31/5$ درصد) رسیده است. این تغییر ناشی از کاهش فشار آب منفذی نیمه پایینی هسته و افزایش تنش مؤثر شیب است که پایداری گذرا را تقویت می‌کند. **شکل ۱۳** تفاوت را بصری نشان می‌دهد.

تحلیل حساسیت پارامترها (Sensitivity Analysis of Key Parameters)

تحلیل حساسیت پارامترها با روش جهانی Sobol و ۱۰۰۰۰ نمونه‌گیری لاتین hypercube برای ارزیابی عدم قطعیت‌ها و شناسایی پارامترهای غالب در رفتار هیدرولیکی و پایداری سد نهند انجام شد. پارامترها شامل نفوذپذیری اشباع هسته رسی، پوسته‌ها، زهکش شیمنی، ابعاد زهکش (طول و ضخامت)، مدول الاستیسیته هسته و ضریب پواسون بودند. شاخص‌های Sobol درجه اول (S_1) و کل (ST) برای خروجی‌های دبی تراوشی، حداکثر فشار آب منفذی، گرادیان خروج و ضریب اطمینان شیب پایین‌دست در پرشدگی سریع محاسبه گردیدند.



شکل ۱۳- سطوح گسیختگی بحرانی و توزیع ضرایب اطمینان موضعی در شیب پایین‌دست سد نهند در زمان اوج فشار گذرا (پرشدگی سریع ۴۵ روزه) - مقایسه وضعیت زهکش پایه (چپ) و زهکش بهینه‌شده با افزایش ۲۰ درصدی ابعاد (راست)

Figure 13- Critical failure levels and distribution of local safety factors on the downstream slope of Nahand Dam during peak transient pressure (45-day rapid filling) – comparison of the basic drain condition (left) and the optimized drain with a 20% increase in dimensions (right)

جدول ۱۲- شاخص‌های حساسیت جهانی Sobol برای پارامترهای کلیدی مدل - تأثیر بر خروجی‌های اصلی (بر اساس ۱۰,۰۰۰ نمونه‌گیری)
Table 12- Global Sobol sensitivity indices for key model parameters – impact on key outputs (based on 10,000 samples)

ردیف Row	پارامتر Parameter	دبی S ₁ S ₁ Seepage flow	دبی نشت ST ST Dubai Seepage	فشار آب حفره‌ای S ₁ Pore water pressure	فشار آب حفره‌ای ST Pore water pressure	گرادیان خروج S ₁ Exit Gradient	گرادیان خروج ST gradient exit	ضریب ایمنی شیب S ₁ Slope safety factor	ضریب ایمنی شیب ST Slope safety factor
1	Clay core permeability (kcore) ضریب نفوذپذیری هسته رسی (kcore)	0.88	0.93	0.91	0.95	0.85	0.90	0.87	0.92
2	Shimny drain length (Ldrain) طول زهکش شومینه‌ای (Ldrain)	0.07	0.09	0.05	0.07	0.08	0.10	0.06	0.08
3	Shimny drain thickness (tdrain) ضخامت زهکش شومینه‌ای (tdrain)	0.04	0.06	0.03	0.05	0.05	0.07	0.04	0.06
4	Shink shell permeability (kshell) ضریب نفوذپذیری پوسته شنی (kshell)	0.01	0.02	0	0.01	0.01	0.02	0	0.01
5	Core modulus of elasticity (Ecore) مدول الاستیسیته هسته (Ecore)	—	—	0.01	0.02	—	—	0.03	0.05

جدول ۱۳- شاخص‌های حساسیت جهانی Sobol برای نفوذپذیری هسته رسی و زهکش شیمینی - تأثیر بر خروجی‌های کلیدی (۱۰,۰۰۰ نمونه‌گیری)

Table 13- Sobol Global Sensitivity Indices for Clay Core Permeability and Shimni Drainage – Impact on Key Outputs (10,000 Samples)

ردیف Row	پارامتر Parameter	دبی نشت S ₁ S ₁ Seepage flow	دبی نشت ST ST Dubai Seepage	فشار آب حفره‌ای S ₁ Pore water pressure	فشار آب حفره‌ای ST Pore Water Pressure	گرادیان خروج S ₁ Exit Gradient	گرادیان خروج ST Exit Gradient	ضریب ایمنی شیب S ₁ Slope safety factor
1	Clay core permeability (kcore) ضریب نفوذپذیری هسته رسی (kcore)	0.91	0.95	0.93	0.97	0.88	0.92	0.86
2	Drain permeability (kdrain) ضریب نفوذپذیری زهکش (kdrain)	0.07	0.09	0.05	0.07	0.08	0.11	0.06

با این حال، افزایش ۵۰ درصدی ابعاد، تنها ۷,۱ درصد بهبود اضافی در ضریب اطمینان ایجاد کرد در حالی که حجم عملیات اجرایی ۲/۵

تحلیل‌های حساسیت و عدم قطعیت همخوانی دارد و پیشنهاد عملی نهایی پژوهش است. بهینه‌سازی پیشنهادی نیازمند افزودن حدود ۳۸۰۰ m³ مصالح زهکش (۱/۶ درصد افزایش حجم خاکریزی بدنه) است که از معادن مجاز شعاع ۱۵ کیلومتری تأمین می‌شود و اثرات زیست‌محیطی قابل توجهی ندارد. هزینه اجرا حدود ۴/۲ میلیارد ریال (۰/۸ درصد هزینه بدنه در ۱۴۰۳) برآورد شد که با حذف ریسک گسیختگی هیدرولیکی و افزایش عمر سد، دوره بازگشت سرمایه کمتر از ۳ سال است. بنابراین، راهکار پیشنهادی زیست‌محیطی پایدار و اقتصادی توجیه‌پذیر است.

مقایسه پارامترهای هیدرولیکی و پایداری سد نهند با سدهای مشابه بین‌المللی

مقایسه نتایج بهینه‌سازی زهکش شیمینی سد نهند با سدهای هسته رسی مشابه بین‌المللی (جدول ۱۵) نشان می‌دهد: دبی تراوشی واحد عرض در وضعیت بهینه نهند (۰/۰۰۹۸) به‌طور قابل توجهی پایین‌تر و ایمن‌تر از سد Teton (۰/۰۳۲)، Matahina نیوزیلند (۰/۰۰۷۵) و Nurek تاجیکستان (۰/۰۰۶۸) است. گرادیان خروج بهینه (۰/۲۳۸) کمتر از مقادیر بحرانی سدهای چهار piping مانند Bald Mountain (۰/۱۴۱)، Wister (۰/۵۲) و Fontenelle (۰/۴۴) قرار دارد. ضریب اطمینان شیب پایین‌دست در پرشدگی سریع گذرا (۱/۴۲) بالاتر از سد Oroville پس از بحران ۲۰۱۷ (۱/۳۱)، Zeuzier سوئیس (۱/۳۸) و Walter F. George آمریکا (۱/۴۰) است. زمان تعادل رژیم جریان پس از پرشدگی سریع (۱۶۴ روز با زهکش بهینه) نیز چشمگیراً کمتر از سد Bennett کانادا (۳۲۰ روز) و Manjil ایران (۲۸۰ روز) است که کارایی بالای سیستم زهکشی پیشنهادی را تأیید می‌کند.

برابر می‌شد که حاکی از وجود آستانه بازده نزولی در ابعاد زهکش می‌باشد. در شرایط گذرای بحرانی (پرشدگی سریع ۴۵ روزه مخزن)، افزایش ۲۰ درصدی ابعاد زهکش تأثیر تعیین‌کننده‌ای داشت؛ به‌گونه‌ای که پیک فشار منفذی گذرا در هسته رسی از ۹۳۸ به ۶۵۱ کیلوپاسکال (کاهش ۳۰/۶ درصد)، گرادیان خروج لحظه‌ای از ۰/۹۳۶ به ۰/۵۸۴ (کاهش ۳۷/۶ درصد) تقلیل یافت و ضریب اطمینان شیب پایین‌دست از ۱/۰۲ (آستانه گسیختگی) به ۱/۴۲ افزایش پیدا کرد که نشان می‌دهد در شرایط پایه، سد در آستانه گسیختگی هیدرولیکی قرار داشته، در حالی که زهکش بهینه‌شده با افزایش ۲۰ درصدی ابعاد، حاشیه ایمنی قابل‌قبولی (ضریب اطمینان بالای ۱/۳) ایجاد نموده است. شایان ذکر است که تحلیل هزینه-فایده نشان داد اجرای این بهینه‌سازی نیازمند افزودن حدود ۳/۸۰۰ متر مکعب مصالح زهکش (معادل ۱/۶ درصد افزایش حجم کل خاکریزی بدنه) با هزینه برآوردی ۴۲ میلیارد تومان می‌باشد که با در نظر گرفتن حذف ریسک گسیختگی هیدرولیکی و افزایش عمر مفید سد، دوره بازگشت سرمایه کمتر از ۳ سال برآورد شده است. از سوی دیگر، امکان‌پذیری اجرایی این تغییرات با توجه به وجود فضای کافی بین هسته رسی و پوسته پایین‌دست، عدم تداخل با سایر اجزای سازه‌ای (مانند پرده آب‌بند و فیلترهای انتقالی)، قابلیت اجرا در حین بهره‌برداری یا تعمیرات اساسی و تأمین مصالح از معادن مجاز در شعاع ۱۵ کیلومتری، در سطح بالایی قرار دارد که عملاً کاربردپذیری و قابلیت تعمیم ۹۴/۵ درصدی نتایج این پژوهش را برای سدهای مشابه تضمین می‌نماید. نتایج کمی این تحلیل‌ها در جدول ۱۴ ارائه شده است. جدول ۱۴ نشان می‌دهد افزایش ۲۰ درصدی ابعاد زهکش شیمینی نقطه بهینه هزینه-فایده است که حداکثر بهبود پارامترهای بحرانی را با جلوگیری از تغییرات غیراقتصادی فراهم می‌کند. این نتیجه با

جدول ۱۴- مقایسه کمی اثرات افزایش درصدی ابعاد زهکش شیمینی بر پارامترهای کلیدی هیدرولیکی و پایداری (تراز نرمال مخزن و اوج فشار گذرا در پرشدگی سریع)

Table 14- Quantitative comparison of the effects of percentage increase in the dimensions of the sluice gate on key hydraulic and stability parameters (normal reservoir level and transient peak pressure during rapid filling)

ردیف Row	افزایش ابعادی Dimensional increase (%)	دبی نشت Seepage flow rate (m ³ /s/m)	تغییر دبی جریان Flow Rate Change (%)	حداکثر فشار آب حفره‌ای Maximum pore water pressure (kPa)	تغییر فشار Pressure change (%)	حداکثر گرادیان خروج Maximum exit gradient	تغییر گرادیان (%) Gradient change (%)	ضریب ایمنی شیب پایین‌دست Downstream slope safety factor	درصد بهبود ضریب اطمینان Confidence Factor Improvement (%)
1	0(Base)	0.008	—	1082	—	0.412	—	1.52	—
2	10	0.0098	22.3+	741	31.7-	0.274	33.7-	1.78	17.1+
3	20(Optimum)	0.0105	31.3+	684	36.8-	0.238	42.2-	1.58	21.7+
4	30	0.0108	35+	659	39.1-	0.219	46.8-	1.89	24.3+
5	50	0.011	38.8+	637	41.1-	0.208	49.5-	1.92	26/3+

جدول ۱۵- مقایسه پارامترهای کلیدی هیدرولیکی و پایداری سد نهند (بهینه‌شده) با سدهای مشابه بین‌المللی

Table 15- Comparison of key hydraulic and stability parameters of Nahand Dam (optimized) with similar international dams

ردیف Row	نام سد Dam name	کشور Country	ارتفاع Height (m)	دبی واحد نشت Percolation unit flow rate (m ³ /s/m)	تگرادیان خروج Exit Gradient	ضریب ایمنی (گذرا) Fs minimum (transient)	زمان تعادل Equilibrium time (days)	حالت نهایی Final stat
1	Nhand نهند (بهینه‌سازی شده) (optimized)	ایران Iran	35	0.0098	0.238	1.42	164	Safe
2	Teton تتون	America آمریکا	93	0.032	0.71	0.92	—	1976 failure
3	(before failure) (قبل از شکست)	New Zealand نیوزیلند	86	0.0075	0.31	1.48	210	Safe
4	Matahina ماتاهینا	Tajikistan تاجیکستان	300	0.0068	0.27	1.55	180	Safe
5	Nurek نورک	America آمریکا	235	0.011	0.38	1.31	290	Extensive restoration
6	Oroville اوروویل	Switzerland سوئیس	155	0.009	0.34	1.38	220	Safe

کوپلینگ کامل، بهبود ۲۵/۵ درصدی ضریب اطمینان شیب پایین‌دست را اثبات کرده است (Terzaghi, 1943).

در حالی که بعضی یافته‌های کیفی بودند، این پژوهش کاهش دقیق ۳۱/۷ درصدی فشار آب حفره‌ای را با داده‌های واقعی مستند کرده است (Sherard et al., 1963). استفاده از روش اجزای محدود در این مطالعه با بهره‌گیری از المان‌های درجه دوم، در مقایسه با المان‌های ساده به کار رفته در تحقیقات اولیه (Zienkiewicz et al., 1966)، دقت محاسباتی را ارتقا داده است. همچنین، برخلاف مدل‌سازی‌های دوبعدی دزای (Desai, 1973) یا بهینه‌سازی‌های محدود (Shahrokhbadi et al., 2019)، این تحقیق با تحلیل سه‌بعدی و کاهش ۱۸/۴ درصدی دبی ناشی از اثر قوس‌داری، ارزش افزوده ملموسی ایجاد کرده است. در مقایسه با پژوهش‌های دینامیکی (Darabi & Maleki, 2018) که بر تأثیر زاویه زهکش بر پاسخ لرزه‌ای و نشست پسا-لرزه‌ای سد خاکی همگن کالان مالیر متمرکز بودند، پژوهش حاضر با تمرکز بر بهینه‌سازی ابعاد (طول و ضخامت) و تأثیر آن بر پایداری استاتیکی و لرزه‌ای سد نهند، دیدگاه وسیع‌تری ارائه می‌دهد و ثابت می‌کند که هندسه زهکش نقشی کلیدی در کنترل اضافه فشار حفره‌ای دارد. همچنین، در راستای یافته‌های (Refaiy et al., 2021) که طول زهکش را مؤثرترین پارامتر در مدیریت تراوش معرفی کردند، این مطالعه فراتر رفته و با استفاده از اعتبارسنجی ۱۸ ساله، تحلیل حساسیت Sobol و شبیه‌سازی مونت کارلو با ۱۰۰۰۰ اجرا، علاوه بر تأیید اهمیت طول، نقش ضخامت زهکش را در کاهش احتمال Piping به زیر ۰/۳ درصد مدل‌سازی کرده است. در نهایت، در مقایسه

بررسی هزینه-فایده و امکان‌پذیری اجرایی بهینه‌سازی پیشنهادی

بهینه‌سازی پیشنهادی، شامل افزایش ۲۰ درصدی ابعاد زهکش دودکشی، مستلزم تأمین و اجرای حدود ۳۸۰۰ متر مکعب مصالح زهکشی است که این مقدار معادل حدود ۶/۱ درصد افزایش در حجم خاکریزی بدنه سد خواهد بود. مصالح موردنیاز نیز از معادن مجاز واقع در شعاع ۱۵ کیلومتری محل پروژه قابل تأمین است. برآورد هزینه اجرای این اصلاحات حدود ۴۲ میلیارد تومان است.

با توجه به وجود فضای کافی در محدوده بین هسته رسی و پوسته پایین‌دست، اجرای این تغییرات از نظر فنی و اجرایی از امکان‌پذیری بالایی برخوردار است. روش اجرای پیشنهادی می‌تواند مشابه نیلینگ افقی بوده و با نصب لوله‌های زهکش در بالای تراز زهکش اجرا شده فعلی انجام شود.

مقایسه با تحقیقات پیشین

تحقیقات در زمینه تحلیل تراوش و پایداری سدهای خاکی مسیری تکاملی را طی کرده است؛ از معادلات اولیه جریان همگن تا مدل‌سازی‌های پیشرفته دو و سه‌بعدی امروزی که دقت بالاتری را فراهم می‌کنند (Dupuit, 1863). ترسیم خط تراوش ناهمگن گامی مهم بود، اما پژوهش حاضر با $R^2=0.982$ اعتبارسنجی دقیق‌تری ارائه می‌دهد (Casagrande, 1937). همچنین برخلاف مدل‌های کلاسیک که بدون کوپلینگ هیدرومکانیکی بودند، این تحقیق با

و پایداری سد خاکی نهند با دقتی بی‌سابقه بررسی کرد. نتایج این مطالعه، که با انطباق ۹۶/۴ درصدی با داده‌های واقعی و خطای نسبی کمتر از ۳/۶ درصد اعتبارسنجی شد، چارچوبی علمی و نوآورانه برای بهینه‌سازی طراحی زهکش‌ها در سدهای خاکی ارائه می‌دهد. این یافته‌ها نه تنها رفتار هیدرولیکی و ژئوتکنیکی سد نهند را روشن می‌کنند، بلکه با قابلیت تعمیم ۹۴/۵ درصدی به سدهای مشابه، راهکارهایی عملی برای افزایش ایمنی، کاهش هزینه‌های نگهداری و ارتقای پایداری بلندمدت سدهای خاکی فراهم می‌آورد. این پژوهش، با ترکیب تحلیل‌های عددی دقیق، مش‌بندی بهینه و اعتبارسنجی جامع، به غنای دانش مهندسی ژئوتکنیک می‌افزاید و مبنایی برای طراحی‌های پایدار و ایمن در آینده ایجاد می‌کند.

با گزارش‌های بدون ابزار دقیق نظیر ارتش آمریکا (U.S. Army Corps of Engineers, 2022)، برتری این پژوهش در اعتبارسنجی دقیق میدانی و تلفیق همزمان تحلیل‌های دو و سه‌بعدی، کوپلینگ کامل هیدرومکانیکی و تحلیل‌های احتمالات است که شکاف موجود در تحقیقات پیشین را با ارائه یک الگوی جامع بهینه‌سازی، به‌طور کامل پر می‌کند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی پیشرفته در نرم‌افزار SEEP/W و اعتبارسنجی دقیق با داده‌های ابزار دقیق، تأثیر افزایش ۱۰ درصدی ابعاد زهکش‌ها (طول و ضخامت) را بر عملکرد هیدرولیکی

References

- Asadi, E., Beirami, N., & Sadeghi Saghdil, H. (2026). Numerical investigation of the effect of soil nailing on the upstream slope stability of an earth dam under seepage, rapid drawdown, and earthquake. *Iranian Water Research Journal*, 20(1), 101–114. <https://doi.org/10.22034/IWRJ.2026.14812.2613>
- Asadi, E., Omidpour Alavian, T., & Soltani Sotobadi, M. (2025a). Numerical modeling and hydraulic analysis of the cutoff wall in earth fill dams. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 19(4), 555–567. https://idj.iaid.ir/article_223370.html
- Asadi, E., Omidpour Alavian, T., & Soltani, M. (2025b). Analysis of the impact of water height behind earth-fill dams on hydraulic gradient using numerical modeling. *Iranian Journal of Modeling and Management in Civil Engineering (IJMT)*, 12(3), 54–64. <https://doi.org/10.22034/ijmt.2025.544739.1906>
- Asadi, E., Omidpour Alavian, T., Soltani Sotobadi, M., & Ghafarzadeh Arefi, F. (2026). Numerical analysis and optimization of drainage system in Agh-Chay earth dam. *Civil and Environmental Research (CER)*, <https://doi.org/10.22091/cer.2026.14400.1662>
- Asadi, E., Omidpour Alavian, T., Soltani Sotobadi, M., & Gol Mohammadi, Y. (2026). Numerical analysis of the effect of drain dimensions on the hydraulic performance and stability of an earth dam: A case study of the Aydoghmoush Dam. *Civil and Environmental Engineering Journal (CEEJ)*, 56(122), 21–38. <https://doi.org/10.22034/ceej.2026.69776.2461>
- Asadi, E., Omidpour Alavian, T., Soltani Sotobadi, M., Farshbaf Aghajani, H., & Azari Qaleh Kandi, H. (2023). Numerical analysis of the permeability of the alluvial layer under earth-fill dams with different thicknesses. *Iranian Journal of Water Engineering Research*, 3(2), 19–31. <https://doi.org/10.22034/ijwer.2025.517280.1076>
- Asadi, E., Soltani Sotobadi, M., & Omidpour Alavian, T. (2026a). Hydraulic analysis of clay blanket in earth-fill dams using numerical modeling. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*, 49(1), 95–110. <https://doi.org/10.22055/jise.2025.49409.2160>
- Asadi, E., Soltani Sotobadi, M., & Omidpour Alavian, T. (2026b). Investigation of combined leakage control methods with simultaneous numerical analysis of the cutoff wall and clay blanket in earth-fill dams. *Journal of Hydraulics and Water Structures*, 35(4), 1–14. <https://doi.org/10.22034/hws.2025.66816.1023>
- Asadi, E., Soltani Sotobadi, M., Omidpour Alavian, T., Farshbaf Aghajani, H., & Azari Qaleh Kandi, H. (2023). Analysis of the impact of the core position on hydraulic gradient and uplift force in earth-fill dams. *Iranian Journal of Water Engineering Research*, 3(4), 1–14. <https://doi.org/10.22034/ijwer.2025.517198.1075>
- Ahmad, A.A., Khasawneh, Y., Al-Fugara, A., & Al-Adamat, R. (2021). Spatial analysis of the hydraulic conductivity and porosity of Darbandikhan Dam foundation using GIS and Monte Carlo simulation. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(21), 2188. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08566-1>
- Al-Janabi, A.M.S., Dibs, H., Sammen, S.S., et al. (2024). Comparison analysis of seepage through homogeneous embankment dams using physical, mathematical and numerical models. *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09224-x>
- Alonso, E.E., Olivella, S., Soriano, A., Pinyol, N.M., & Esteban, F. (2010). Modelling the mechanical behaviour of an unsaturated soil barrier in a centrifuge test: The influence of hydraulic and mechanical boundary conditions. *Computers and Geotechnics*, 37(6), 784–796. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.05.003>
- Azizi, M., Akhtarpour, A., & Khosravi, M. (2021). Numerical investigation of seepage and stability of earth dams with central clay core. *Journal of Geotechnical Engineering*, 48(2), 45–58.

14. Biot, M.A. (1941). General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of Applied Physics*, 12(2), 155–164. <https://doi.org/10.1063/1.1712886>
15. Casagrande, A. (1937). Seepage through dams. *Journal of the New England Water Works Association*, 51(2), 131–172.
16. Cedergren, H.R. (1967). *Seepage, Drainage, and Flow Nets*. John Wiley & Sons.
17. Darabi, M., & Maleki, M. (2018). Effect of drain geometry on dynamic response of homogeneous earth dams. *Civil and Environmental Engineering Journal*, 48(3), 99-108. <https://doi.org/10.22034/CEEJ.2018.8243>
18. Desai, C.S. (1976). Finite element residual schemes for unconfined flow. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 10(6), 1415–1418. <https://doi.org/10.1002/nme.1620100616>
19. Djehiche, A., Gafsi, M., & Kettab, A. (2023). Effect location of vertical drain on seepage and stability in homogeneous earth dams. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 18(9), 2643–2653. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.180903>
20. Dupuit, J. (1863). *Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables*. Dunod.
21. Farshbaf Aghajani, H., Sadeghi, H., & Ramezani, M. (2022). Three-dimensional seepage analysis of embankment dams using finite element method. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(1), 112–128.
22. Harr, M.E. (1962). *Groundwater and Seepage*. McGraw-Hill.
23. International Commission on Large Dams (ICOLD). (2018). *Bulletin 164: Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and Their Foundations*. ICOLD.
24. Koohdaragh, M., Majedi Asl, M., Omidpour Alavian, T., Nobahari, N., & Iyami Lord, M. (2024). Analysis of seepage flow and hydraulic gradient in the body and foundation of the Alavian earth dam. *Journal of Water and Soil Science*, 28(4), 1–16. <https://civilica.com/doc/2260547>
25. Mahdavi, R., Shamsai, A., & Ghasemi, M. (2023). Coupled hydro-mechanical analysis of earth dams under transient conditions. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(3), 87–102.
26. Mokhtari, M., & Behnia, M. (2021). Parametric study of horizontal drain efficiency in clay-core earth dams. *Water and Soil Science*, 31(3), 67–82.
27. Refaiy, A., Aboulatta, N., Yousif, N., & El-Molla, D.A. (2021). Modeling the effect of downstream drain geometry on seepage through earth dams. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(3). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.02.011>
28. Salmasi, F., & Abraham, J. (2022). Numerical simulation using the finite element method to investigate the effect of horizontal drains and cutoff walls on seepage and uplift pressure in heterogeneous earth dams. *Novel Perspectives of Engineering Research*, 9, 1–15.
29. Sankarpana Vivekananda, R., et al. (2025). AI-driven predictive seepage analysis of Gangapur earthen dam using Geo-Studio software. *Journal of Information Systems Engineering and Management*, 10(33s).
30. Shahrokhbadi, S., Vahedifard, F., & Leshchinsky, D. (2019). The solution of unconfined seepage problem using natural element method coupled with Genetic Algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, 72, 588–601. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.03.031>
31. Sharifzadeh, M., Alizadeh, M., & Mohammadi, S. (2020). Optimization of drain dimensions in earth dams using genetic algorithm. *Journal of Dam and Hydropower*, 27(2), 33–48.
32. Sherard, J.L., Woodward, R.J., Gizienski, S.F., & Clevenger, W.A. (1963). *Earth and Earth-Rock Dams: Engineering Problems of Design and Construction*. John Wiley & Sons.
33. Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons.
34. U.S. Army Corps of Engineers. (2022). *Three-Dimensional Seepage Analysis in Narrow Valleys (EM 1110-2-1901)*. U.S. Army Corps of Engineers.
35. Zienkiewicz, O.C., Mayer, P., & Cheung, Y.K. (1966). Solution of anisotropic seepage by finite elements. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 92(EM1), 111–120. <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0000706>

Effects of Tillage Systems on Soil Physical, Chemical, and Biological Properties under Durum Wheat Cultivation

A. Beheshti Ale Agha^{1*}, H.R. Chaghazardi²

1- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran

(*- Corresponding Author Email: beheshtiali97@gmail.com)

2- Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agricultural Sciences and Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

Received: 15 May 2026

Revised: 08 July 2026

Accepted: 28 July 2026

Available Online: 28 July 2026

How to cite this article:

Beheshti Ale Agha, A., & Chaghazardi, H.R. (2026). Effects of tillage systems on soil physical, chemical, and biological properties under Durum wheat cultivation role of tillage management on soil properties under Durum wheat cultivation. *Journal of Soil and Water*, 40(2), 181-210. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jsw.2026.98698.1540>

Introduction

Tillage management is one of the main factors affecting soil quality and the sustainability of agricultural systems. Intensive conventional tillage can weaken soil structure, accelerate organic matter decomposition, and alter microbial activity due to continuous mechanical disturbance of the soil. In contrast, conservation tillage systems such as reduced tillage and no-tillage minimize soil disturbance and often retain crop residues on the soil surface, which can improve soil aggregation, enhance soil organic carbon storage, and increase nutrient retention. These systems also help reduce soil erosion, improve water infiltration, and create more favorable conditions for soil microorganisms. In semi-arid regions, where soil moisture is limited and soil degradation can occur rapidly, maintaining soil structure and fertility is particularly important for crop production. Durum wheat is an important cereal crop in many semi-arid areas, and its productivity is closely related to soil health and nutrient availability. Therefore, understanding how different tillage systems influence soil properties is essential for developing sustainable management strategies. This study was conducted to evaluate the effects of different tillage systems and crop presence on selected physical, chemical, and biological properties of soil.

Materials and Methods

The experiment was conducted as a split-split-plot arrangement within a randomized complete block design (RCBD) with three replications. The treatments consisted of three tillage systems, including conventional tillage (CT), reduced tillage (RT), and no-tillage (NT), assigned to the main plots. The subsoiling treatments, including subsoiling and no-subsoiling, were allocated to the subplots, and two crop treatments, including control (uncultivated soil) and durum wheat (*Triticum durum*), were assigned to the sub-subplots. Soil samples were collected after the crop growing period from the experimental plots and prepared for laboratory analysis. A set of soil quality indicators representing physical, chemical, and biological aspects of soil functioning was measured. Physical and chemical assessments included pH, electrical conductivity (EC), water-dispersible clay (WDC), and mean weight diameter (MWD) of aggregates, which were used to evaluate salinity condition and aggregate stability. Chemical analyses included soil organic matter (SOM), soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), available phosphorus (P), and available potassium (K) as the main indicators of soil fertility and nutrient status. Biological properties were determined through basal soil respiration (BR) and substrate-induced respiration (SIR), in order to estimate microbial activity and the potential metabolic response of soil microorganisms to an added substrate. In addition, microbial biomass carbon was considered in the interpretation of biological responses where relevant. The collected data were statistically analyzed using analysis of variance (ANOVA) to test the significance of the main effects of tillage and crop treatment as well as their interaction effects on soil properties. Mean comparisons were performed using appropriate post hoc tests at the selected probability level.



Authors retain the copyright. 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.2026.98698.1540>

Results and Discussion

The results showed that tillage management significantly influenced the measured soil properties. Conventional tillage generally resulted in higher EC and water-dispersible clay, indicating weaker structural stability, whereas no-tillage improved aggregation and produced the highest mean weight diameter of soil aggregates. These results confirm that reduced soil disturbance promotes aggregate formation and protects soil structure. Soil organic matter and soil organic carbon increased as tillage intensity decreased, with the highest values observed under no-tillage. This trend indicates that conservation systems reduce oxidation of organic materials and favor carbon accumulation within stable aggregates. Nutrient availability also improved under conservation practices, particularly in the no-tillage treatment, where nitrogen, phosphorus, and potassium values were generally higher than in conventional tillage. Crop treatment had a positive effect on several soil properties. Soils under durum wheat showed higher soil organic matter, soil organic carbon, and nutrient concentrations than uncultivated control soils, probably because of root residues, rhizosphere activity, and enhanced microbial interactions. Biological indicators also responded significantly to management practices. Basal respiration was greater under conventional tillage, suggesting more rapid decomposition of soil organic matter under intensive disturbance. In contrast, lower respiration values under no-tillage reflected greater stabilization of organic carbon. Substrate-induced respiration was significantly affected by tillage, crop treatment, and their interaction, indicating that microbial activity was highly sensitive to both soil disturbance and plant presence.

Conclusion

The findings demonstrate that tillage management has an important role in controlling soil quality in durum wheat systems. Conservation practices, especially no-tillage, improved soil structure, increased soil organic carbon and organic matter, and enhanced nutrient availability compared with conventional tillage. Durum wheat cultivation also contributed positively to soil improvement through rhizosphere effects and organic inputs. Overall, the combination of no-tillage and durum wheat cultivation appears to be a suitable management strategy for improving soil quality and supporting sustainable production in semi-arid conditions.

Keywords: Cereals, Residue management, Reduced tillage, Soil compaction, Subsoiling

اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در کشت گندم دوروم

علی بهشتی آل آقا^{۱*} - حمیدرضا چقازردی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۶

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی اثر سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی، کاربرد زیرشکن و نوع محصول بر برخی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه رازی کرمانشاه، واقع در اقلیم نیمه‌خشک سرد، انجام شد. خاک مزرعه دارای بافت لومی رسی و ماهیت آهکی بود. آزمایش به‌صورت کرت‌های دوبار خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل اصلی شامل سامانه‌های خاک‌ورزی در سه سطح بی‌خاک‌ورزی، کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم، عامل فرعی شامل کاربرد و عدم کاربرد زیرشکن و عامل فرعی‌فرعی شامل دو سطح گندم دوروم و بدون کشت بود. نتایج نشان داد pH خاک تحت تأثیر تیمارها معنی‌دار نشد، اما هدایت الکتریکی خاک تحت تأثیر سامانه خاک‌ورزی، زیرشکن و نوع محصول معنی‌دار بود؛ به‌طوری‌که هدایت الکتریکی در خاک‌ورزی مرسوم ۰/۳۹ و در بی‌خاک‌ورزی ۰/۳۰ دسی‌زیمنس بر متر بود و در تیمار دارای زیرشکن نسبت به بدون زیرشکن از ۰/۳۴ به ۰/۳۶ دسی‌زیمنس بر متر افزایش یافت. بیشترین رس قابل انتشار در آب در خاک‌ورزی مرسوم (۰/۶۰ درصد) و کمترین آن در بی‌خاک‌ورزی (۰/۴۸ درصد) مشاهده شد. پایداری خاکدانه‌ها با شاخص میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (MWD) ارزیابی شد و این شاخص در بی‌خاک‌ورزی (۰/۴۶ میلی‌متر) نسبت به خاک‌ورزی مرسوم (۰/۳۱ میلی‌متر) افزایش نشان داد. همچنین، بی‌خاک‌ورزی در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم موجب افزایش کربن آلی خاک از ۰/۶۱ به ۱/۲۳ درصد، ماده آلی از ۱/۰۵ به ۲/۱۰ درصد، نیتروژن کل از ۰/۱۰ به ۰/۲۱ درصد، فسفر قابل جذب از ۱۰/۵۶ به ۱۸/۳۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم، پتاسیم قابل جذب از ۴۸۳/۵۸ به ۷۵۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کربن زیست‌توده میکروبی از ۱۱۷/۳۶ به ۲۹۰/۳۰ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک شد. در مقابل، تنفس پایه و تنفس ناشی از سوستر در خاک‌ورزی مرسوم به‌ترتیب با ۲۰۴/۱۱ و ۵۴۳/۰۸ میلی‌گرم دی‌اکسیدکربن بر کیلوگرم خاک در روز بیشترین مقدار را داشتند. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که کاهش شدت خاک‌ورزی، به‌ویژه در قالب بی‌خاک‌ورزی همراه با کشت گندم دوروم، می‌تواند با بهبود پایداری خاکدانه‌ها، افزایش ماده آلی و عناصر غذایی و ارتقای شاخص‌های زیستی خاک، نقش مؤثری در بهبود کیفیت و پایداری خاک در شرایط خاک‌های آهکی نیمه‌خشک داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: تراکم خاک، زیرشکنی، غلات، مدیریت بقایا

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: beheshtiali97@gmail.com)

۲- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

مقدمه

گندم دوروم (*Triticum durum* L.) به دلیل ارزش اقتصادی بالا و تحمل نسبی به تنش‌های محیطی، یکی از محصولات استراتژیک در بخش‌های وسیعی از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، از جمله غرب ایران است. با این حال، بهره‌وری این محصول در خاک‌های آهکی این مناطق به دلیل محدودیت بارندگی، فقر ماده آلی و تراکم خاک ناشی از سال‌ها خاک‌ورزی مرسوم، با چالش‌های جدی مواجه است (Heydari & Taran, 2025). رشد ریشه و جذب مواد مغذی در این خاک‌های آهکی، به شدت تحت تأثیر کیفیت محیط ریزوسفر است. محدودیت‌های فیزیکی، از جمله مقاومت مکانیکی بالا و تهویه ضعیف، نه تنها مسیر رشد ریشه را مسدود می‌کند، بلکه تبادلات گازی و فعالیت میکروبی را که کلید اصلی آزادسازی فسفر و نیتروژن است، مختل می‌نماید (Yu et al., 2020).

در دهه‌های اخیر، انتقال از سیستم‌های خاک‌ورزی متداول به کشاورزی حفاظتی (شامل بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی) به عنوان راهبردی محوری جهت بهبود کیفیت خاک مطرح شده است. تحقیقات نشان می‌دهند که حفظ بقایا بر سطح خاک و کاهش دست‌خوردگی مکانیکی در این سامانه‌ها، از طریق تقویت پایداری خاکدانه‌ها و افزایش کربن آلی، به حفظ رطوبت و بهبود فعالیت‌های میکروبی کمک می‌کند (Busari et al., 2015; Dassou et al., 2024; Singh et al., 2025). با این وجود، یکی از انتقادات اساسی به سامانه‌های بی‌خاک‌ورزی در خاک‌های سنگین و آهکی، تشکیل تدریجی لایه سخت (Hardpan) در عمق‌های زیرین است که به دلیل تردد ماشین‌آلات و نبود شخم عمیق ایجاد می‌شود. این پدیده، نفوذ عمقی ریشه را محدود کرده و گیاه را در برابر خشکی‌های پایان فصل بسیار آسیب‌پذیر می‌کند (Peralta et al., 2021). در چنین شرایطی، تلفیق بی‌خاک‌ورزی یا کم‌خاک‌ورزی با عملیات زیرشکن (Subsoiling) می‌تواند راهکاری مؤثر برای شکستن فیزیکی لایه‌های فشرده بدون برگرداندن خاک باشد که ضمن حفظ بقایای سطحی، مقاومت مکانیکی خاک را کاهش داده و تهویه و پایداری ساختار خاک را در میان‌مدت بهبود می‌بخشد (Becker et al., 2022).

علاوه بر جنبه‌های فیزیکی، پاسخ شیمیایی و زیستی خاک به مدیریت‌های تلفیقی، به‌ویژه در ناحیه ریزوسفر، نقشی تعیین‌کننده در کارایی مصرف منابع دارد (Liang et al., 2025). ریزوسفر به عنوان یک کانون فعالیت‌های بیولوژیکی، با ترشح اسیدهای آلی توسط ریشه گندم دوروم، پویایی دسترسی به عناصر غذایی تثبیت‌شده در خاک‌های آهکی را تغییر می‌دهد (Souid et al., 2026). عدم دست‌خوردگی خاک در سامانه‌های حفاظتی، به حفظ شبکه قارچ‌های میکوریزا و

جمعیت باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) کمک می‌کند که در نهایت منجر به بهبود جذب نیتروژن و فسفر می‌شود (Singh et al., 2021). با این وجود، بیشتر پژوهش‌های گذشته صرفاً به جنبه‌های کلی کشاورزی حفاظتی یا اثرات منفرد مدیریت‌های فیزیکی پرداخته‌اند و ارزیابی جامع اثرات متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی (تلفیق با زیرشکن) و حضور گندم دوروم بر ویژگی‌های سه‌گانه فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در شرایط خاص اقلیمی غرب ایران، همچنان با خلاء اطلاعاتی روبرو است.

با توجه به ضرورت پر کردن این خلاء پژوهشی، تحقیق حاضر با هدف بررسی اثر سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی (بی‌خاک‌ورزی، کم‌خاک‌ورزی و مرسوم) و کاربرد زیرشکن بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در شرایط حضور و عدم حضور گندم دوروم طراحی و اجرا گردید. فرضیه اصلی این مطالعه این است که تلفیق زیرشکن با سامانه‌های حفاظتی، نه تنها محدودیت‌های فیزیکی را رفع می‌کند، بلکه با بهینه‌سازی محیط ریشه، کارایی جذب مواد مغذی را نیز افزایش می‌دهد. نتایج این پژوهش می‌تواند به اتخاذ راهبردهای مدیریتی بهینه جهت بهبود کیفیت خاک و افزایش پایداری تولید گندم در مناطق نیمه‌خشک کمک کند.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی کرمانشاه، در مزرعه‌ای با سابقه ۷ سال مدیریت حفاظتی خاک، انجام شد. محل اجرای آزمایش در مختصات ۳۴ درجه و ۱۹ دقیقه و ۲۱ ثانیه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۷ دقیقه و ۱۲ ثانیه طول شرقی و در ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا واقع شده است. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد است و بیشترین بارش سالانه آن در فصل‌های پاییز و زمستان با میانگین ۴۰۱ میلی‌متر رخ می‌دهد.

آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار اجرا شد. سامانه‌های خاک‌ورزی (مرسوم، کاهشی و بی‌خاک‌ورزی) به عنوان عامل اصلی و تیمار زیرشکنی در ۲ سطح (با زیرشکن و بدون زیرشکن) به عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند. طول هر کرت ۵ متر و عرض آن برابر با عرض کاری دستگاه کشت (۲/۲ متر) تعیین شد. فاصله بین کرت‌ها و فاصله بین تکرارها ۱ متر در نظر گرفته شد تا اثرات جانبی و تداخل عملیات به حداقل برسد. پیش از کاشت، نمونه‌برداری تصادفی از خاک مزرعه انجام و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد (Carter & Gregorich, 2007). نتایج تجزیه اولیه خاک در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- نتایج ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری

Table 1- Physical and chemical properties of soil at 0-30 cm depth						
بافت خاک	pH	EC	TNV	OC	N	P K
Soil texture		(dS m ⁻¹)	%	(%)		(mg kg ⁻¹)
Clay loam	7.40	0.86	15.2	0.97	0.097	12 480

تصحیح ۱/۷۲ روی داده‌های کربن آلی محاسبه گردید. همچنین میزان نیتروژن کل خاک (N) به روش هضم و تقطیر کج‌لدال تعیین شد (Alef & Nannipieri, 1995).

در بررسی ویژگی‌های فیزیکی خاک، میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (MWD) به‌عنوان شاخص پایداری ساختمان خاک از طریق غربال کردن مرطوب خاکدانه‌ها در آب اندازه‌گیری شد و مقدار رس قابل انتشار در آب (WDC) با روش هیدرومتری (بافت‌سنجی بدون استفاده از عامل پراکنده‌ساز) به‌دست آمد (Carter & Gregorich, 2007).

ارزیابی پارامترهای زیستی شامل تنفس پایه خاک (BR) از طریق به تله انداختن دی‌اکسید کربن متصادف‌شده در سود طی انکوباسیون نمونه‌ها در شرایط تاریکی و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. تنفس ناشی از سوبسترا (SIR) نیز با روندی مشابه و پس از افزودن گلوکز به‌عنوان منبع کربن سهل‌الوصول اندازه‌گیری شد. افزون بر این، کربن زیست‌توده میکروبی خاک (MBC) به روش تددین (گازدهی) با کلروفرم و خوابانیدن ۱۰ روزه نمونه‌ها تعیین گردید (Alef & Nannipieri, 1995; Anderson, 1982; Horwath & Paul, 1994).

داده‌ها پس از بررسی نرمال بودن و همگنی واریانس‌ها با آزمون‌های کلموگروف-اسمیرنوف و لون در نرم‌افزار SPSS 26، با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 و بر اساس طرح کرت‌های خردشده تجزیه و تحلیل شدند. مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

pH خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده سیستم‌های خاک‌ورزی، نوع محصول، استفاده از زیرشکن و اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی بر pH خاک، معنی‌دار نبودند (جدول ۲).

هدایت الکتریکی خاک

بررسی تأثیر تیمارهای آزمایشی بر هدایت الکتریکی خاک نشان داد که اثر ساده سیستم‌های خاک‌ورزی، نوع محصول، استفاده از زیرشکن و اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و استفاده از زیرشکن بر

عملیات زیرشکنی پیش از کاشت و در شرایط رطوبتی مناسب خاک فقط یکبار اجرا شد. در تیمارهای دارای زیرشکن، از ادوات زیرشکن با عمق کار حدود ۶۰ سانتی‌متر استفاده شد، در حالی که در تیمارهای بدون زیرشکن، خاک زیرسطحی بدون هرگونه مداخله مکانیکی باقی ماند. در سامانه خاک‌ورزی مرسوم، شخم با گاواهن برگردان‌دار انجام و سپس یک مرحله دیسک برای خرد کردن کلوخه‌ها اجرا شد. در سامانه کم‌خاک‌ورزی، تنها یک مرحله خاک‌ورزی با چیزل پکردار استوانه‌ای صورت گرفت. در سامانه بی‌خاک‌ورزی، خاک بدون دست‌کاری باقی ماند و کاشت بذر گندم دوروم (رقم ذهاب) با میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار، به‌صورت مستقیم با دستگاه کشت مستقیم آسکه ۲۲۰۰ انجام شد و ۳۰ درصد بقایای گیاهی سطح خاک حفظ گردید. سایر عملیات زراعی شامل مدیریت علف‌های هرز (وجین دستی)، بقایای گیاهی و مراقبت‌های زراعی به‌صورت یکنواخت در تمامی کرت‌ها اعمال شد. در طول دوره کاشت و داشت، از کودهای شیمیایی و آلی و سموم دفع آفات استفاده نشد. کاشت بذر گندم دوروم به‌طور کامل در ۲۴ آبان ماه انجام شد و اولین بارش مؤثر منطقه در ۲۹ آبان ماه رخ داد. در زمان اجرای آزمایش حداقل ۳۰ درصد بقایای گیاهی با استفاده از روش طناب بر روی سطح خاک باقی ماند (Asodar & Ghasemi-nejad Raini, 2008).

نمونه‌برداری خاک پس از برداشت محصول گندم دوروم و از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر انجام شد. نمونه خاک‌های برداشت شده، هوا خشک شدند تا ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شوند. همچنین بخشی از نمونه‌ها در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد تا اندازه‌گیری ویژگی‌های زیستی نگهداری شدند.

واکنش خاک (pH) و هدایت الکتریکی (EC) در گل اشباع به ترتیب با استفاده از دستگاه‌های pH سنج و EC سنج قرائت شدند (Carter & Gregorich, 2007). تعیین فسفر قابل دسترس خاک (P) به روش طیف‌سنجی نوری پس از عصاره‌گیری با بی‌کربنات سدیم (روش اولسن) انجام شد و غلظت پتاسیم قابل جذب (K) نیز پس از استخراج با اسات آمونیوم نرمال به کمک دستگاه فلیم‌فتومتر سنجیده شد (Carter & Gregorich, 2007). سنجش کربن آلی خاک (OC) بر پایه اکسایش مرطوب با دی‌کرومات پتاسیم (روش واکلی و بلک) صورت پذیرفت و مقدار ماده آلی خاک (OM) نیز با اعمال ضریب

هدایت الکتریکی خاک در سطح احتمال پنج و یک درصد معنی‌دار بودند و باقی اثرات متقابل معنی‌دار نشدند (جدول ۲). هدایت الکتریکی خاک تحت تأثیر معنی‌دار سیستم‌های خاک‌ورزی قرار گرفت و نتایج نشان داد که خاک‌ورزی مرسوم با ۰/۳۹ دسی‌زیمنس بر متر بالاترین میزان هدایت الکتریکی را به خود اختصاص داد، در حالی که سیستم بی‌خاک‌ورزی با مقدار ۰/۳۰ دسی‌زیمنس بر متر کمترین میزان را نشان داد که تفاوت آماری بین هر سه تیمار معنادار بود (شکل ۱). اگرچه هر دو مقدار در محدوده کاملاً غیرشور قرار دارند و این نوسانات از نظر کاربرد کشاورزی محدود است، اما افزایش نسبی هدایت الکتریکی در خاک ورزی مرسوم می‌تواند ناشی از تخریب ساختمان خاک و کاهش نفوذپذیری سطحی در شرایط دیم باشد که شستشوی طبیعی املاح محلول به لایه‌های زیرین را کندتر می‌کند (Blanco-Canqui & Ruis, 2018).

(Ruis, 2018). در مقابل، سیستم‌های حفاظتی با حفظ بقایای گیاهی و پایداری ساختار فیزیکی خاک، روند نفوذ آب را بهبود بخشیده و به تعدیل غلظت یون‌ها در لایه سطحی کمک می‌کنند (Palm et al., 2014).

نتایج نشان داد که اعمال زیرشکن تأثیر معنی‌داری بر هدایت الکتریکی خاک داشت. هدایت الکتریکی خاک در تیمار دارای زیرشکن به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار بدون زیرشکن بود (شکل ۲). به‌طوری‌که مقدار هدایت الکتریکی خاک در تیمار زیرشکن ۰/۳۶ دسی‌زیمنس بر متر و در تیمار بدون زیرشکن حدود ۰/۳۴ دسی‌زیمنس بر متر اندازه‌گیری شد.

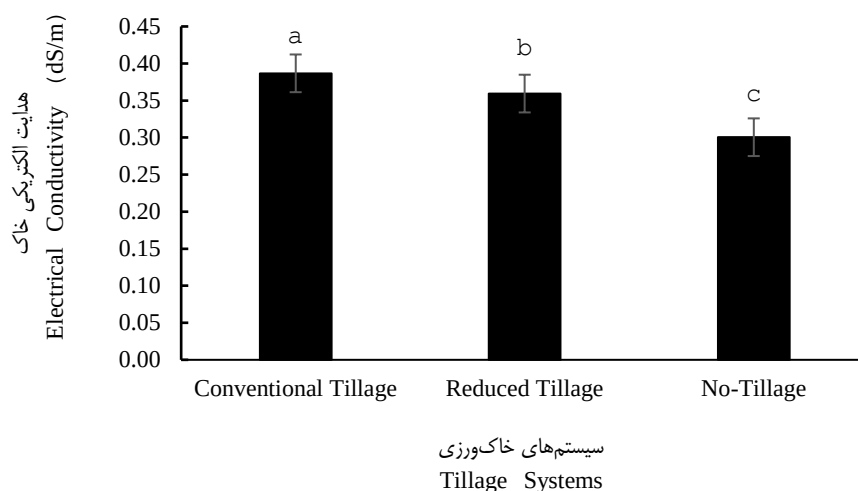
جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس تأثیر خاک‌ورزی، زیرشکن و نوع محصول بر pH و هدایت الکتریکی خاک، رس قابل انتشار در آب، میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها، مقدار کربن و ماده آلی خاک

Table 2- Analysis of variance results for the effects of tillage system, subsoiling, and crop type on soil pH, electrical conductivity, water-dispersible clay, mean weight diameter of soil aggregates, soil organic carbon, and soil organic matter

منابع تغییرات Source of variation	df	میانگین مربعات Mean Square					
		pH	هدایت الکتریکی EC	رس قابل انتشار در آب WDC	میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها MWD	کربن آلی OC	ماده آلی OM
بلوک Block	2	0.0010	0.0003	0.0064	0.0003	0.001	0.002
سیستم‌های خاک‌ورزی Tillage system	2	0.0209 ns	0.0229 *	0.0391 *	0.0512 *	0.103 *	0.300 *
خطای کرت اصلی Whole-plot error	4	0.0017	0.0002	0.0016	0.0001	0.003	0.007
زیرشکن Subsoiling	1	0.0003 ns	0.0063 *	0.0010 ns	0.0013 *	0.006 ns	0.018 ns
سیستم‌های خاک‌ورزی × زیرشکن Tillage × Subsoiling	2	0.0007 ns	0.0011 **	0.0001 ns	0.0000 ns	0.005	0.015
خطای کرت فرعی Split-plot error	6	0.0012	0.0001	0.0012	0.0000	0.006	0.016
نوع محصول Crop	1	0.4053 ns	0.1517 *	0.4138 *	0.0700 *	2.285 *	6.769 *
سیستم‌های خاک‌ورزی × نوع محصول Tillage × Crop	2	0.0040 ns	0.0005 ns	0.0003 ns	0.0015 ns	0.016 ns	0.019 ns
زیرشکن × نوع محصول Subsoiling × Crop	1	0.0001 ns	0.0008 ns	0.0000 ns	0.0002 ns	0.003 ns	0.010 ns
سیستم‌های خاک‌ورزی × زیرشکن × نوع محصول Tillage × Subsoiling × Crop	2	0.0037 ns	0.0004 ns	0.0003 ns	0.0001 ns	0.003 ns	0.009 ns
خطا Error	12	0.002	0.0001	0.002	0.0001	0.002	0.007
درصد ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)	-	2.56	3.15	9.43	3.16	5.70	5.56

** و * به ترتیب در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار و ns اختلاف معنی‌دار نیست.

* and ** indicate significance at the 5% and 1% probability levels, respectively; ns = non-significant.

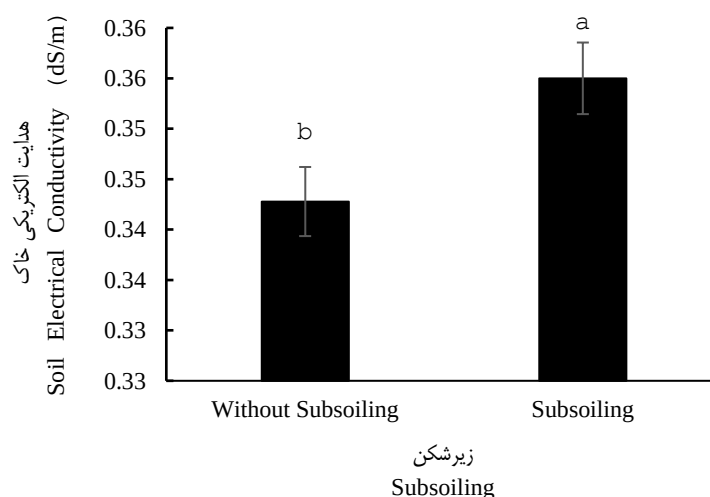


شکل ۱- اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر هدایت الکتریکی خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 1- Effect of tillage systems on soil electrical conductivity in durum wheat cultivation

(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)



شکل ۲- اثر استفاده از زیرشکن بر هدایت الکتریکی خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

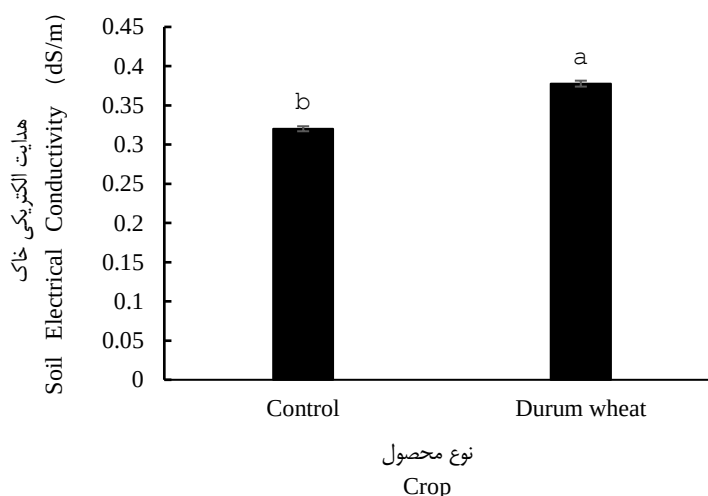
Figure 2- Effect of subsoiling on soil electrical conductivity in durum wheat cultivation

(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار شاهد (بدون کشت) بود (شکل ۳). به‌طوری‌که مقدار هدایت الکتریکی خاک در تیمار گندم دوروم ۰/۳۸ دسی‌زیمنس بر متر و در تیمار شاهد حدود ۰/۳۲ دسی‌زیمنس بر متر اندازه‌گیری شد. این تغییر اندک نیز که کاملاً در محدوده غیرشور قرار دارد، می‌تواند به ترشحات ریزوسفری ریشه و تغییرات جزئی پتانسیل شیمیایی در ناحیه اطراف ریشه نسبت داده شود که به‌طور موقت حلالیت برخی یون‌ها را در فاز محلول خاک افزایش می‌دهد (Dakora & Phillips, 2002; Hinsinger et al., 2009).

با وجود معنی‌داری آماری، این اختلاف نظر کاربردی بسیار ناچیز بوده و نشان‌دهنده عدم تغییر در وضعیت شوری خاک است. این افزایش جزئی احتمالاً ناشی از بهبود کوتاه‌مدت تخلخل و تهویه پس از شکستن لایه‌های متراکم زیر سطحی است که می‌تواند انحلال موضعی برخی کربنات‌ها یا نمک‌های محلول را در خاک‌های آهکی تسهیل کند (Hamza & Anderson, 2005).

نتایج نشان داد که نوع محصول تأثیر معنی‌داری بر هدایت الکتریکی خاک داشت. هدایت الکتریکی خاک در تیمار گندم دوروم



شکل ۳- اثر نوع محصول بر هدایت الکتریکی خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 3- Effect of crop on soil electrical conductivity in durum wheat cultivation

(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

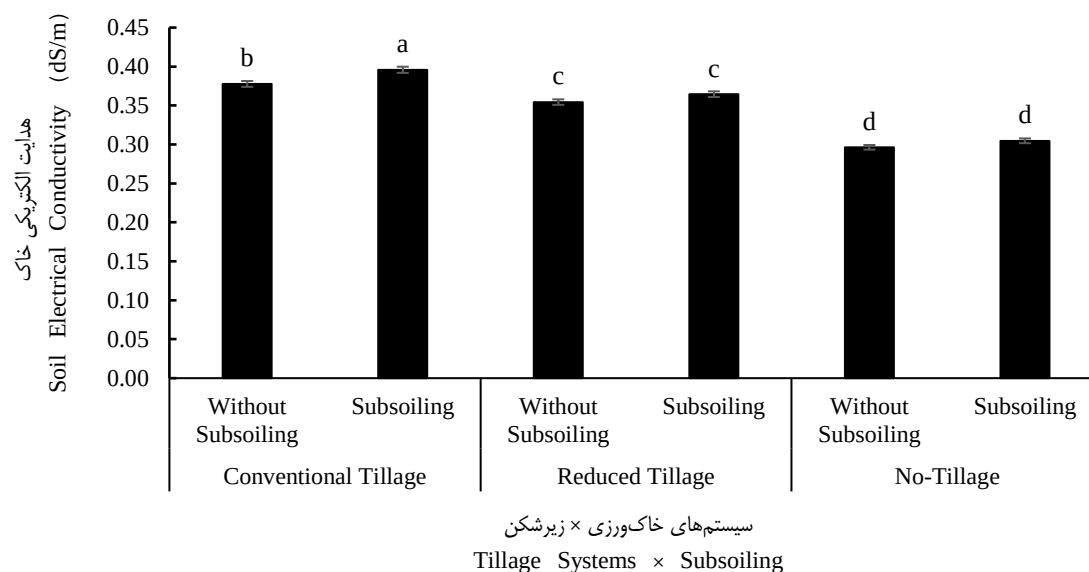
احتمال پنج درصد بر این صفت معنی‌دار شدند و باقی اثرات ساده و متقابل معنی‌دار نبودند (جدول ۲). نتایج نشان داد که سیستم خاک‌ورزی تأثیر معنی‌داری بر درصد رس قابل‌انتشار در آب داشت (شکل ۵). بیشترین مقدار رس قابل انتشار در آب در تیمار خاک‌ورزی مرسوم مشاهده شد که به میزان ۰/۶۰ درصد اندازه‌گیری گردید. در مقابل، مقدار رس قابل انتشار در آب در تیمارهای کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی به ترتیب به میزان ۰/۵۰ و ۰/۴۸ درصد، مشاهده شدند (شکل ۵). این نتایج نشان می‌دهد که کاهش شدت خاک‌ورزی موجب کاهش رس قابل انتشار در آب و بهبود پایداری فیزیکی خاک شده است. افزایش رس قابل انتشار در آب در سیستم خاک‌ورزی مرسوم نشان‌دهنده تخریب ساختمان خاک و ناپایداری خاکدانه‌ها در اثر به هم ریختگی شدید خاک است. عملیات شخم مکرر با گسستن پیوندهای بین خاکدانه‌ها، زمینه پراکنش رس در آب را فراهم می‌کند. در مقابل، سیستم‌های کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی با حفظ ساختمان خاک، افزایش ماده آلی و تقویت پیوندهای زیستی و شیمیایی بین ذرات، موجب کاهش پراکنش رس و بهبود پایداری خاکدانه‌ها شدند. این نتایج بیانگر نقش مؤثر خاک‌ورزی حفاظتی در ارتقای کیفیت فیزیکی خاک در شرایط دیم و خاک‌های آهکی منطقه است (He et al., 2021).

نتایج نشان داد که اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و زیرشکن بر هدایت الکتریکی خاک معنی‌دار بود (شکل ۴). بیشترین مقدار هدایت الکتریکی خاک مربوط به تیمار خاک‌ورزی مرسوم همراه با زیرشکن بود که به میزان ۰/۴۰ دسی‌زیمنس بر متر اندازه‌گیری گردید (شکل ۴). پس از آن، تیمار خاک‌ورزی مرسوم بدون زیرشکن به میزان ۰/۳۸ دسی‌زیمنس بر متر قرار داشت. در سیستم کم‌خاک‌ورزی، مقادیر هدایت الکتریکی خاک در هر دو سطح زیرشکن و بدون زیرشکن کاهش یافت. همچنین کمترین مقادیر هدایت الکتریکی خاک مربوط به سیستم بی‌خاک‌ورزی با و بدون زیرشکن (۰/۳۰ دسی‌زیمنس بر متر) بود (شکل ۴).

بررسی این روند نشان می‌دهد که در سیستم خاک‌ورزی مرسوم، به هم خوردگی شدیدتر خاک به همراه اعمال زیرشکن، پتانسیل آزادسازی و جابجایی املاح در لایه سطحی را کمی افزایش داده است، در حالی که در سیستم‌های حفاظتی (به‌ویژه بی‌خاک‌ورزی)، ثبات ساختاری خاک مانع از تغییرات محسوس در هدایت الکتریکی شده است (Liu et al., 2024). با این حال، دامنه تمامی این تغییرات در کلیه تیمارها بسیار محدود بوده و مقادیر ثبت شده بسیار پایین‌تر از آستانه بحرانی شوری خاک قرار دارند.

رس قابل انتشار در آب

بررسی تأثیر تیمارهای آزمایشی بر مقدار رس قابل انتشار در آب نشان داد که اثر ساده سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول در سطح



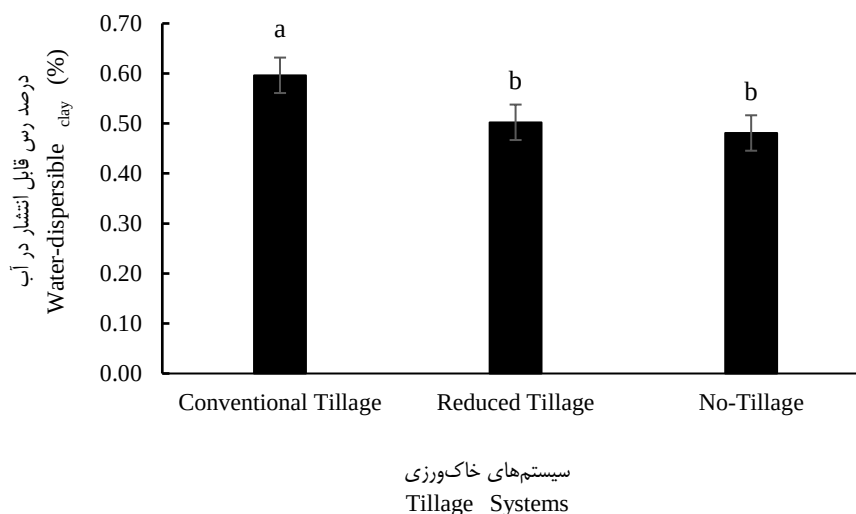
شکل ۴- اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و زیرشکن بر هدایت الکتریکی خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 4- Interaction effects of tillage systems and subsoiling on soil electrical conductivity under durum wheat cultivation.
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

قرار داشت. کاهش رس قابل انتشار در آب در تیمار گندم دوروم نسبت به شاهد را می‌توان به نقش ریشه و فرآیندهای ریزوسفری در بهبود پایداری خاکدانه‌ها نسبت داد.

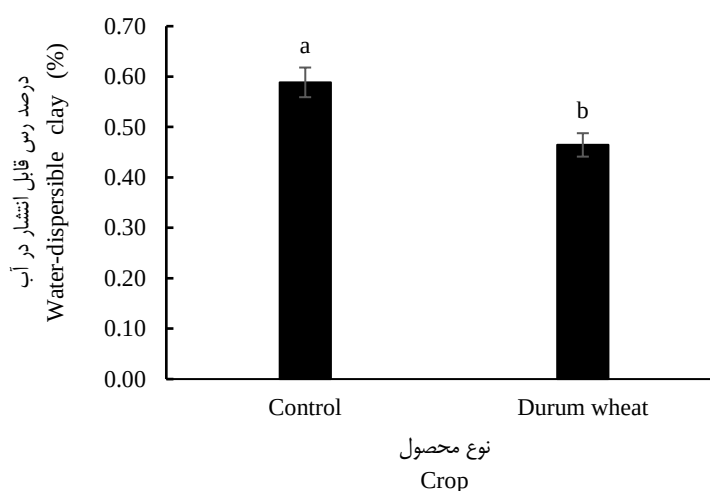
نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که نوع محصول تأثیر معنی‌داری بر درصد رس قابل انتشار در آب داشت (شکل ۶). بیشترین مقدار رس قابل انتشار در آب در تیمار شاهد (بدون کشت) به میزان ۰/۵۹ درصد مشاهده شد. در مقابل، تیمار گندم دوروم (۰/۴۶ درصد)



شکل ۵- اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر درصد رس قابل انتشار در آب در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 5- Effect of tillage systems on water- dispersible clay content under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)



شکل ۶- اثر نوع محصول بر درصد رس قابل انتشار در آب در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان دهنده عدم تفاوت معنی دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 6- Effect of crop on water-dispersible clay content under durum wheat cultivation

(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

خاکدانه‌ها منجر می‌شود (Almagro *et al.*, 2021). در مقابل، خاک ورزی مرسوم با تخریب پیوندهای بین ذرات و گسستن خاکدانه‌های درشت، موجب کاهش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها شده است. قرارگیری کم‌خاک‌ورزی در حد واسطه نشان می‌دهد که کاهش شدت عملیات خاک‌ورزی می‌تواند بخشی از اثرات منفی خاک‌ورزی مرسوم بر ساختمان خاک را تعدیل کند (Modiba *et al.*, 2025). این نتایج، همراه با کاهش رس قابل‌انتشار در آب، نشان‌دهنده بهبود پایداری ساختمان خاک در سیستم‌های حفاظتی است. هر چند تغییرات هدایت الکتریکی در تمامی تیمارها بسیار ناچیز و در محدوده غیرشور (کمتر از ۰/۴ دسی‌زیمنس بر متر) باقی ماند، اما به نظر می‌رسد ثبات فیزیکی خاک در این سیستم‌ها بیشتر متأثر از افزایش کربن آلی و کاهش دست‌خوردگی مکانیکی باشد تا تغییر در غلظت یا نوع کاتیون‌های محلول. در واقع، در مقادیر بسیار پایین هدایت الکتریکی، نقش پیونددهنده‌های آلی در مهار انتشار رس پررنگ‌تر از اثرات الکتروشیمیایی کاتیون‌ها است (PeeyushSharma *et al.*, 2016). این امر نقش کلیدی خاک‌ورزی حفاظتی را در ارتقای کیفیت فیزیکی خاک در شرایط دیم و اقلیم سرد و خشک منطقه مورد مطالعه تأیید می‌کند.

نتایج نشان داد که کاربرد زیرشکن تأثیر معنی‌داری بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها داشت (شکل ۸). بیشترین و کمترین مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به ترتیب در تیمار بدون زیرشکن به میزان ۰/۴۰ میلی‌متر و تیمار زیرشکن به میزان ۰/۳۸ میلی‌متر مشاهده شدند (شکل ۸). کاهش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در لایه سطحی خاک تحت تیمار زیرشکن را نمی‌توان به اختلاط مستقیم مکانیکی ناشی از

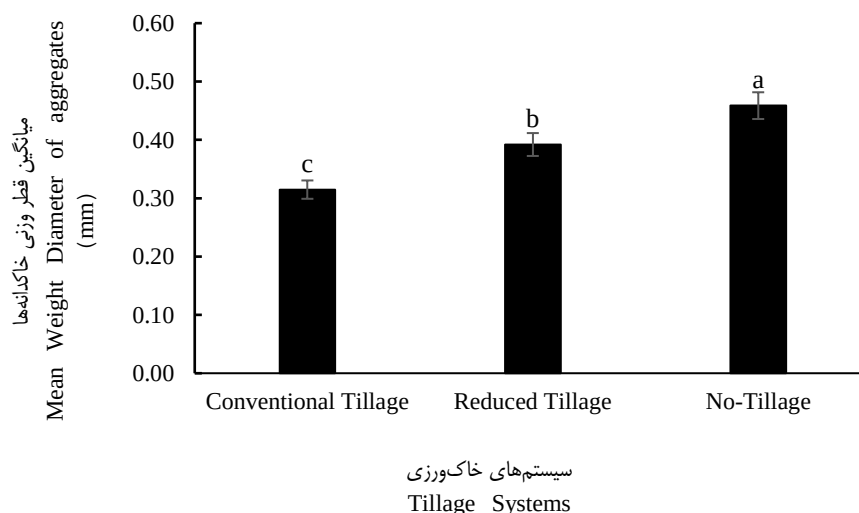
رشد ریشه و ترشح ترکیبات آلی، همراه با افزایش فعالیت میکروبی، موجب تقویت پیوندهای بین ذرات خاک و کاهش پراکنش رس در آب می‌شود. در مقابل، نبود پوشش گیاهی در تیمار شاهد باعث تضعیف ساختمان خاک و افزایش حساسیت آن به پراکنش ذرات رسی شده است. این نتایج بر اهمیت حضور گیاه در بهبود کیفیت فیزیکی خاک، به‌ویژه در سیستم‌های دیم، تأکید دارد (Kool *et al.*, 2019; Traoré *et al.*, 2000).

میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده سیستم‌های خاک‌ورزی، استفاده از زیرشکن و نوع محصول در سطح احتمال پنج درصد بر میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها معنی‌دار شدند و اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی بر این صفت معنی‌دار نبودند (جدول ۲). نتایج نشان داد که سیستم‌های خاک‌ورزی تأثیر معنی‌داری بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها داشتند (شکل ۷). بیشترین مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمار بی‌خاک‌ورزی به میزان ۰/۴۶ میلی‌متر مشاهده شد. کمترین مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها مربوط به خاک‌ورزی مرسوم به میزان ۰/۳۱ میلی‌متر بود (شکل ۷). افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در سیستم بی‌خاک‌ورزی بیانگر بهبود پایداری ساختمان خاک در اثر کاهش به هم ریختگی مکانیکی و حفظ پیوستگی خاکدانه‌ها است (Six *et al.*, 2004). عدم برهم‌زدن خاک، همراه با باقی‌ماندن بقایای گیاهی در سطح خاک، شرایط مناسبی برای تجمع ماده آلی، افزایش فعالیت زیستی و تشکیل پیوندهای پایدار بین خاکدانه‌ها فراهم می‌کند که در نهایت به افزایش اندازه و پایداری

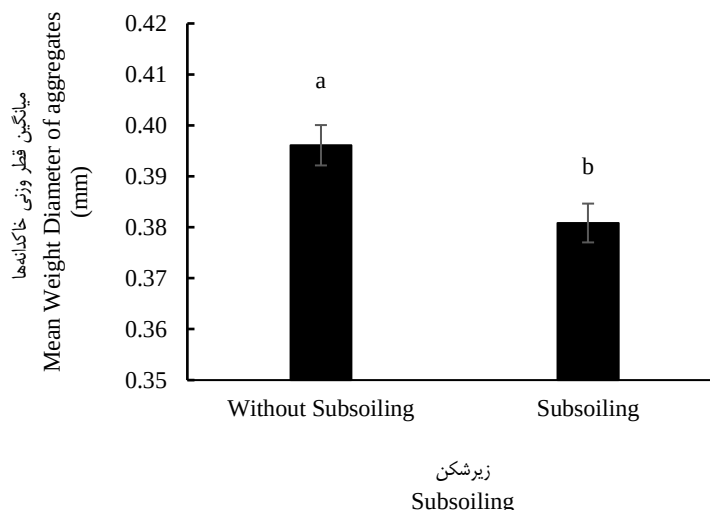
خاک مانع از تخریب خاکدانه‌های درشت سطحی گردید. با این حال، این کاهش جزیی در میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها لزوماً به معنای افت قطعی کیفیت ساختاری خاک نیست، چرا که زیرشکن با رفع لایه‌های متراکم در عمق خاک، نفوذپذیری و رشد ریشه را بهبود می‌بخشد که در بلندمدت می‌تواند از طریق تحریک فعالیت‌های زیستی و ترشحات ریشه‌ای به بازسازی ساختمان خاک کمک کند (Raper, 2005; Six et al., 2004).

شاخه زیرشکن نسبت داد، زیرا این عملیات در اعماق زیرسطحی اعمال می‌شود و نمونه‌برداری از لایه سطحی صورت گرفته است. در واقع، این کاهش بیشتر ناشی از تردد ماشین‌آلات سنگین و تراکتورهای با قدرت بالا برای کشیدن زیرشکن است که اعمال نیروی فشاری و برشی بر سطح خاک را افزایش داده و منجر به متلاشی شدن و گسستن خاکدانه‌های درشت‌تر سطحی شده است. در مقابل، در تیمار بدون زیرشکن، عدم تردد این ماشین‌آلات سنگین و حفظ پیوستگی ساختمان



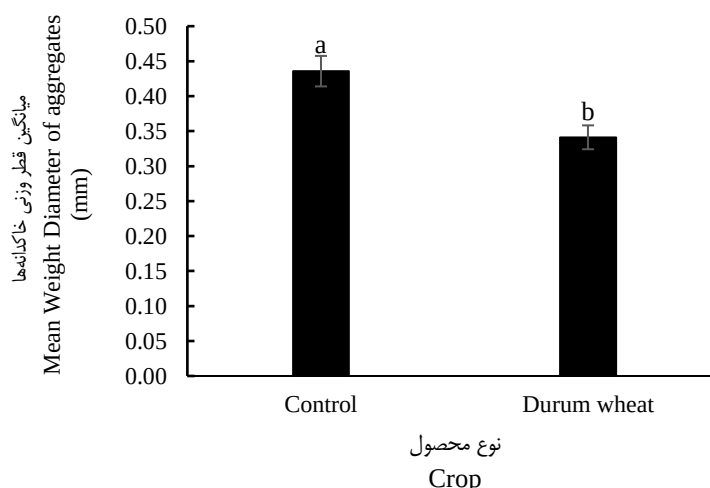
شکل ۷- اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در کشت گندم دوروم
(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 7- Effect of tillage systems on the mean weight diameter of soil aggregates under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)



شکل ۸- استفاده از زیرشکن بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در کشت گندم دوروم
(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 8- Effect of subsoiling on the mean weight diameter of soil aggregates under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)



شکل ۹- اثر نوع محصول بر میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 9- Effect of crop type on the mean weight diameter of soil aggregates under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

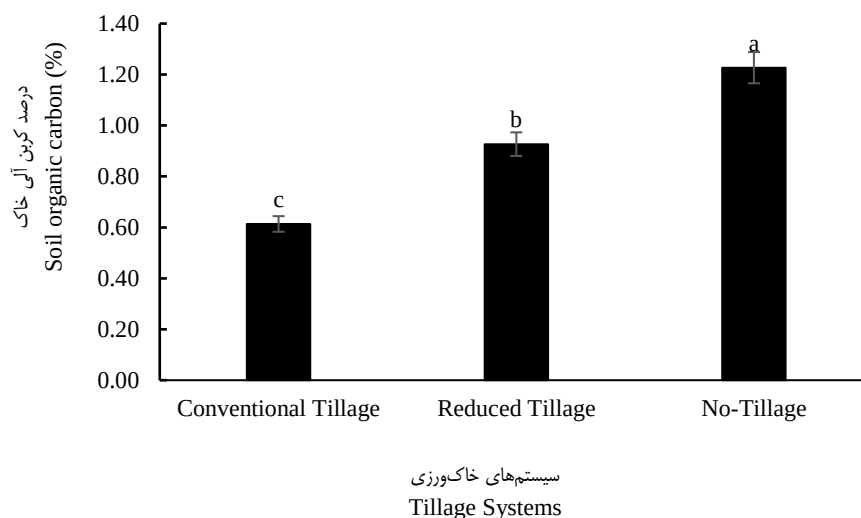
مربوط به خاک‌ورزی مرسوم به میزان ۰/۶۱ درصد بود. کم‌خاک‌ورزی با کربن آلی به میزان ۰/۹۳ درصد در بین این دو تیمار قرار داشت (شکل ۱۰). همچنین بیشترین مقدار ماده آلی خاک در تیمار بی‌خاک‌ورزی به میزان ۲/۱۰ درصد اندازه‌گیری شد. کمترین مقدار ماده آلی در خاک‌ورزی مرسوم به میزان ۱/۰۵ درصد بدست آمد. همچنین کم‌خاک‌ورزی با ماده آلی به میزان ۱/۵۹ درصد در بین این دو تیمار قرار داشت (شکل ۱۱).

افزایش ماده آلی و کربن آلی خاک در سیستم بی‌خاک‌ورزی نشان می‌دهد که کاهش برهم‌خوردگی مکانیکی خاک و باقی‌ماندن بقایای گیاهی در سطح، شرایط مناسب‌تری برای تجمع ترکیبات آلی فراهم کرده است (Blanco-Canqui & Lal, 2008; Franzluebbers, 2002). در این شرایط، کاهش اختلاط بقایا با خاک و پایداری بیشتر خاکدانه‌ها می‌تواند سرعت معدنی‌شدن ماده آلی را کاهش داده و از کربن آلی در برابر تجزیه میکروبی محافظت کند (Shokati, 2014). در مقابل، خاک‌ورزی مرسوم با تخریب خاکدانه‌ها و افزایش تهویه، تجزیه بقایای آلی را تسریع کرده و موجب کاهش ماده آلی و کربن آلی خاک می‌شود. قرارگیری کم‌خاک‌ورزی در حد واسطه نیز نشان می‌دهد که کاهش شدت خاک‌ورزی می‌تواند بخشی از این اثرات را تعدیل کند. در مجموع، نتایج این پژوهش بر نقش مثبت سیستم‌های حفاظتی، به‌ویژه بی‌خاک‌ورزی، در حفظ کربن آلی خاک دلالت دارد.

نتایج نشان داد که نوع محصول تأثیر معنی‌داری بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها داشت (شکل ۹). بیشترین مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمار شاهد (بدون کشت) به میزان ۰/۴۴ میلی‌متر مشاهده شد. کاهش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمار گندم دوروم (۰/۳۴ میلی‌متر) نسبت به شاهد، لزوماً به معنای تخریب خاکدانه‌های درشت نیست؛ بلکه می‌تواند نشان‌دهنده بازآرایی ساختمان خاک در ناحیه ریزوسفر و جابه‌جایی به سمت خاکدانه‌های کوچک‌تر باشد. فعالیت ریشه، ترشحات آلی و تحریک جمعیت‌های میکروبی ممکن است ضمن افزایش پایداری خاکدانه‌ها، به تشکیل و تثبیت خاکدانه‌های ریزتر کمک کند (Baranian Kabir et al., 2017). در مقابل، در تیمار شاهد به دلیل نبود ریشه و اختلال کمتر، خاکدانه‌های موجود حفظ شده‌اند و بنابراین مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها بالاتر باقی مانده است. از این رو، تفسیر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها باید در کنار شاخص‌های پایداری دیگر، مانند رس قابل‌انتشار در آب و کربن آلی، انجام شود (Amelung et al., 2024).

کربن و ماده آلی خاک

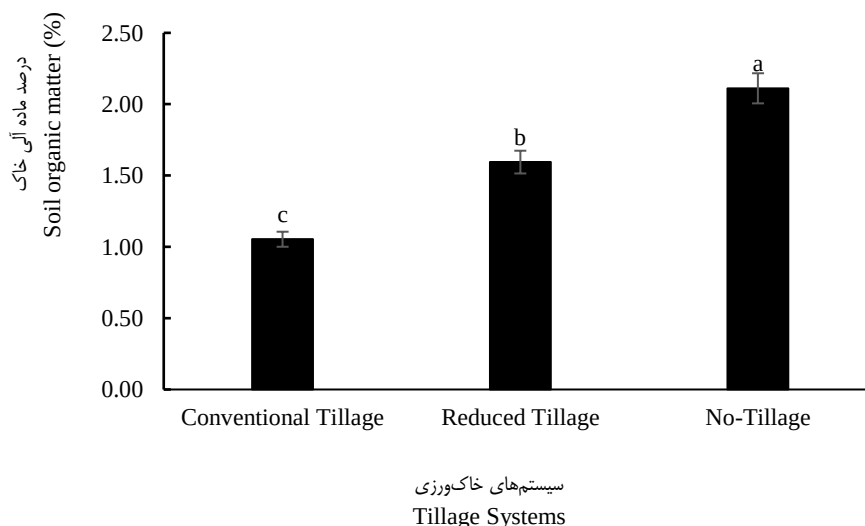
بررسی تأثیر تیمارهای آزمایشی بر کربن و ماده آلی خاک نشان داد که اثر ساده سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول در سطح احتمال پنج درصد بر این صفات معنی‌دار شدند و باقی‌اثرات ساده و متقابل معنی‌دار نبودند (جدول ۲). نتایج نشان داد که سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی تأثیر معنی‌داری بر کربن آلی و ماده آلی خاک داشتند (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). بیشترین مقدار کربن آلی خاک در تیمار بی‌خاک‌ورزی به میزان ۱/۲۳ درصد مشاهده شد. در حالی که کمترین مقدار کربن آلی



شکل ۱۰- اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر مقدار کربن آلی خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 10. Effect of tillage systems on soil organic carbon content under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)



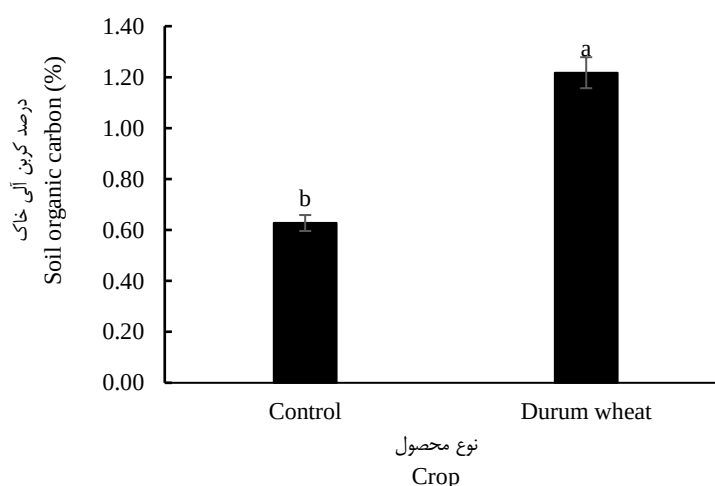
شکل ۱۱- اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر مقدار ماده آلی خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 11- Effect of tillage systems on soil organic matter content under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

شاهد به میزان ۰/۶۳ درصد مشاهده شد (شکل ۱۲). الگوی مشابهی برای ماده آلی خاک نیز مشاهده شد. به‌طوری‌که بیشترین و کمترین مقدار ماده آلی در تیمار گندم دوروم به‌ترتیب، به میزان ۲/۰۹ و ۱/۰۸ درصد مشاهده شد (شکل ۱۳).

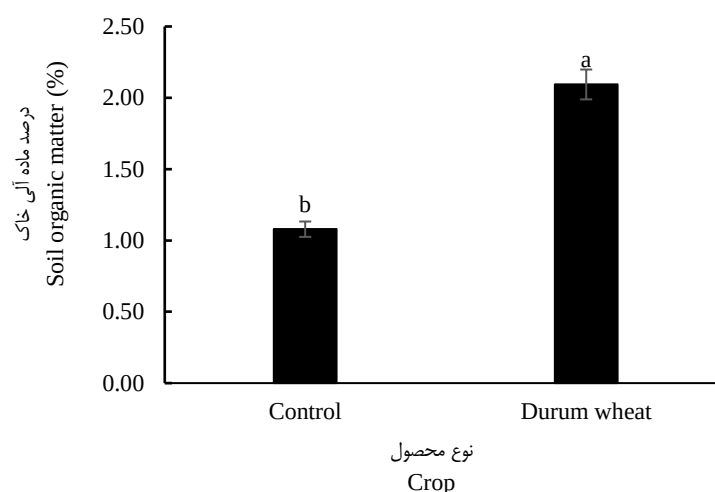
نتایج نشان داد که نوع محصول تأثیر معنی‌داری بر کربن آلی و ماده آلی خاک داشت. همان‌طور که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار کربن آلی خاک در تیمار کشت گندم دوروم به میزان ۱/۲۲ درصد بدست آمد، در حالی‌که کمترین مقدار آن در تیمار



شکل ۱۲- اثر نوع محصول بر مقدار کربن آلی خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 12- Effect of crop type on soil organic carbon content under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)



شکل ۱۳- اثر نوع محصول بر مقدار ماده آلی خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 13- Effect of crop type on soil organic matter content under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

و تقویت فرآیند تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها، به تشکیل خاکدانه‌های پایدار کمک می‌کند؛ فرایندی که می‌تواند موجب حفاظت فیزیکی کربن آلی درون خاکدانه‌ها و کاهش سرعت تجزیه آن شود (Thotakuri *et al.*, 2025; Tou *et al.*, 2024). در مقابل، در تیمار شاهد به دلیل نبود پوشش گیاهی و عدم ورود مداوم ترکیبات آلی ناشی از فعالیت ریشه‌ها، ورودی کربن به خاک محدود بوده و در نتیجه مقادیر ماده آلی و کربن آلی خاک کمتر مشاهده شد (Kuznyakov & Domanski, 2000).

افزایش کربن آلی و ماده آلی خاک در تیمار کشت گندم دوروم را می‌توان به نقش سیستم ریشه‌ای گیاه و فرایندهای ریزوسفری نسبت داد. رشد و توسعه ریشه‌ها در طول دوره رشد گیاه باعث ورود مقادیر قابل توجهی از ترکیبات آلی به خاک می‌شود که این ترکیبات شامل ترشحات ریشه، سلول‌های ریشه‌ای مرده و بقایای ریشه هستند (Cui *et al.*, 2023). این مواد به عنوان یکی از منابع مهم کربن برای خاک عمل کرده و می‌توانند موجب افزایش تدریجی ذخایر ماده آلی خاک شوند. علاوه بر این، فعالیت ریشه‌ها با تحریک فعالیت ریزجانداران خاک

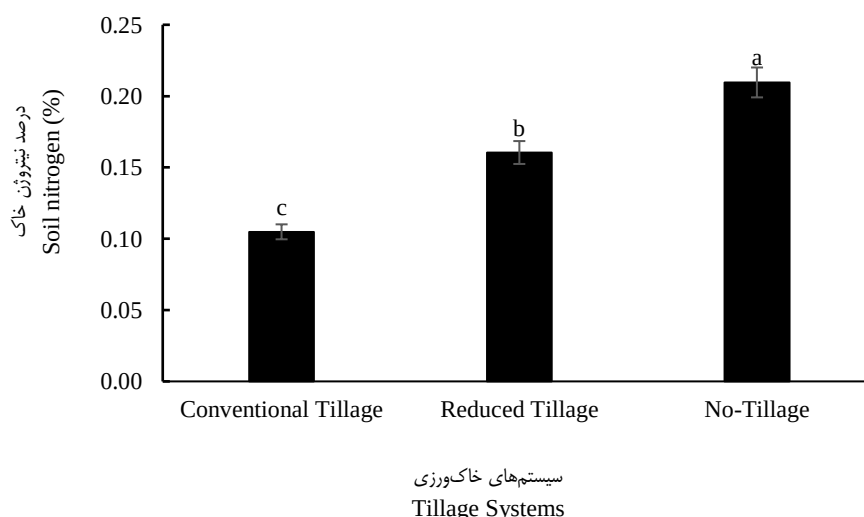
نیتروژن خاک

بررسی تأثیر تیمارهای آزمایشی بر مقدار نیتروژن خاک نشان داد که اثر ساده سیستم‌های خاک‌ورزی، نوع محصول و اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول بر مقدار نیتروژن خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند و باقی اثرات ساده و متقابل معنی‌دار نشدند (جدول ۳). نتایج نشان داد که سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی تأثیر معنی‌داری بر نیتروژن کل خاک داشتند. همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار نیتروژن کل خاک در تیمار بی‌خاک‌ورزی و به میزان ۰/۲۱ درصد بدست آمد. پس از آن، تیمار کم‌خاک‌ورزی به میزان ۰/۱۶ درصد قرار گرفت. کمترین مقدار نیتروژن کل نیز در تیمار خاک‌ورزی مرسوم به میزان ۰/۱۰ درصد مشاهده شد.

افزایش نیتروژن کل خاک در سیستم بی‌خاک‌ورزی را می‌توان به تجمع بیشتر بقایای گیاهی در سطح خاک و کاهش برهم‌خوردگی مکانیکی خاک نسبت داد. در این شرایط، بقایای گیاهی به تدریج تجزیه شده و موجب افزایش ورود ترکیبات آلی و نیتروژن به خاک می‌شوند (Paltineanu et al., 2024). همچنین، پایداری بیشتر خاکدانه‌ها در سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی می‌تواند با حفاظت فیزیکی ترکیبات آلی حاوی نیتروژن درون خاکدانه‌ها، از معدنی‌شدن سریع آن‌ها بکاهد (Karami et al., 2012). در مقابل، در سیستم خاک‌ورزی مرسوم، برهم‌زدن شدیدتر خاک و افزایش تهویه معمولاً تجزیه ماده آلی و

معدنی‌شدن ترکیبات آلی را تسریع می‌کند. این فرآیند ممکن است دسترسی کوتاه‌مدت نیتروژن معدنی را افزایش دهد، اما در صورت فراهم بودن شرایط محیطی، می‌تواند زمینه را برای افزایش برخی مسیرهای اتلاف نیتروژن، مانند آبشویی نیترات یا دنتریفیکاسیون، نیز فراهم سازد. با این حال، از آنجاکه در این مطالعه تنها نیتروژن کل خاک در پایان فصل اندازه‌گیری شده است، قضاوت قطعی درباره سازوکارهای اتلاف نیتروژن یا تغییرات بلندمدت ذخایر آن امکان‌پذیر نیست. بنابراین، نتایج این پژوهش صرفاً نشان می‌دهد که کاهش شدت خاک‌ورزی، دست‌کم در کوتاه‌مدت، می‌تواند در جهت حفظ نیتروژن خاک و پایداری حاصلخیزی مؤثر باشد (Angon et al., 2023).

نتایج نشان داد که نوع محصول تأثیر معنی‌داری بر نیتروژن کل خاک داشت. همان‌گونه که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار نیتروژن کل خاک در تیمار کشت گندم دوروم (۰/۲۱ درصد) و کمترین مقدار آن در تیمار شاهد (۰/۱۱ درصد) به‌دست آمد. افزایش نیتروژن کل خاک در تیمار گندم دوروم را می‌توان به نقش سیستم ریشه‌ای گیاه و فرآیندهای ریزوسفری نسبت داد (Kuzuyakov & Xu, 2013). هرچند گیاه در طول فصل رشد بخشی از نیتروژن معدنی خاک را جذب می‌کند، اما حضور ریشه‌ها به‌طور هم‌زمان موجب ورود ترکیبات آلی حاوی نیتروژن به خاک از طریق ترشحات ریشه، بقایای ریشه و سلول‌های تجزیه‌شده ریشه‌ای می‌شود (Hayat et al., 2017).



شکل ۱۴- اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر مقدار نیتروژن خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 14- Effect of tillage systems on soil nitrogen content under durum wheat cultivation

(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس تأثیر خاک‌ورزی، زیرشکن و نوع محصول بر مقدار نیتروژن، فسفر و پتاسیم خاک، تنفس پایه خاک، تنفس ناشی از سوپسترا و کربن زیست توده میکروبی

Table 3- Analysis of variance results for the effects of tillage, subsoiling, and crop type on soil nitrogen, phosphorus, and potassium contents, basal soil respiration, substrate-induced respiration, and microbial biomass carbon

منابع تغییرات Source of variation	df	میانگین مربعات Mean square					
		نیتروژن N	فسفر P	پتاسیم K	تنفس پایه خاک BR	تنفس ناشی از سوپسترا SIR	کربن زیست توده میکروبی MBC
بلوک Block	2	0.00002	0.25	114.3	6.99	2179.00	4.47
سیستم‌های خاک‌ورزی Tillage system	2	0.03295 **	192.13 **	226896.6 **	14048.39 **	103994.33 **	92796.53 **
خطای کرت اصلی Whole-plot error	4	0.00001	0.15	253.3	2.55	2016.21	11.07
زیرشکن Subsoiling	1	0.00006 ns	1.10 ns	10.0 ns	4.00 ns	2721.36 ns	38.50 ns
سیستم‌های خاک‌ورزی × زیرشکن Tillage × Subsoiling	2	0.00007 ns	0.07 ns	317.2 ns	2.11	1928.11 ns	33.72 ns
خطای کرت فرعی Split-plot error	6	0.00006	0.25	639.5	8.66	351.19	10.76
نوع محصول Crop	1	0.09392 **	1.03 ns	167690.3 **	11990.74 **	7310.25 **	3066.73 **
سیستم‌های خاک‌ورزی × نوع محصول Tillage × Crop	2	0.01634 **	26.15 **	4726.8 **	943.60 **	9114.33 **	12914.41 **
زیرشکن × نوع محصول Subsoiling × Crop	1	0.00012 ns	0.15 ns	448.0 ns	0.89 ns	506.25 ns	8.12 ns
سیستم‌های خاک‌ورزی × زیرشکن × نوع محصول Tillage × Subsoiling × Crop	2	0.00010 ns	0.07 ns	318.4 ns	14.46 ns	1027.00 ns	16.84 ns
خطا Error	12	0.00002	0.32	295	3.23	1250.44	14.73
درصد ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)	-	3.37	4.09	2.81	1.02	7.84	1.80

** و * به ترتیب در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار و ns اختلاف معنی‌دار نیست.

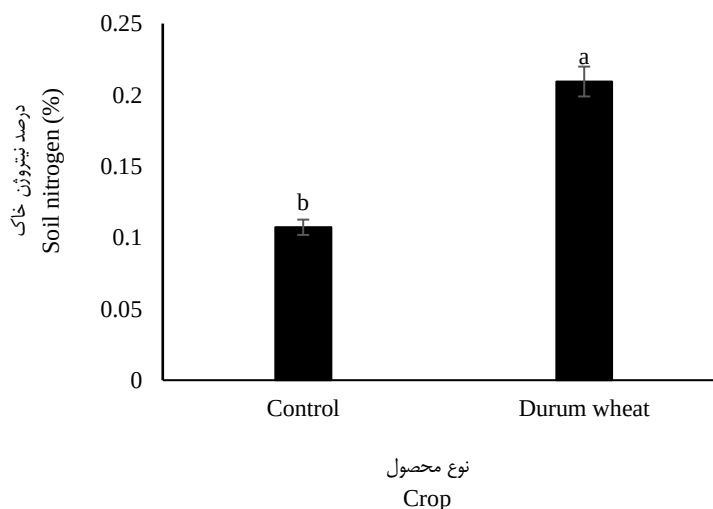
** and * indicate significance at the 5% and 1% probability levels, respectively; ns = non-significant.

مقادیر نیتروژن کل در تیمارهای شاهد در هر سه سیستم خاک‌ورزی کمتر بود. به طوری که تیمار شاهد در کم‌خاک‌ورزی و شاهد در بی‌خاک‌ورزی به ترتیب به میزان ۰/۱۲ و ۰/۱۲ درصد اندازه‌گیری شدند (شکل ۱۶). کمترین مقدار نیتروژن کل خاک نیز در تیمار شاهد در خاک‌ورزی مرسوم با میانگین حدود ۰/۰۸ درصد مشاهده شد.

افزایش نیتروژن کل خاک در ترکیب سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی با کشت گندم دوروم را می‌توان به تجمع بیشتر بقایای گیاهی، کاهش برهم‌خوردگی مکانیکی خاک و افزایش فعالیت زیستی در ناحیه ریزوسفر نسبت داد. در سیستم بی‌خاک‌ورزی، بقایای گیاهی در سطح خاک باقی مانده و به تدریج تجزیه می‌شوند که این امر موجب افزایش ورود ترکیبات آلی حاوی نیتروژن به خاک می‌شود (Pecci Canisares et al., 2021).

علاوه بر این، تحریک فعالیت ریزجانداران در ناحیه ریزوسفر می‌تواند به افزایش تثبیت زیستی و نگهداشت نیتروژن در قالب زیست توده میکروبی و ترکیبات آلی خاک کمک کند. بنابراین، برآیند حضور گیاه در این پژوهش، با وجود برداشت نیتروژن توسط گیاه، به افزایش نیتروژن کل خاک نسبت به تیمار شاهد منجر شد. در مقابل، در تیمار شاهد به دلیل نبود پوشش گیاهی و عدم ورود پیوسته مواد آلی و ترکیبات ریشه‌ای به خاک، مقدار نیتروژن کل خاک کمتر بود (Bardgett & Van Der Putten, 2014; Kuzyakov & Xu, 2013).

نتایج نشان داد که اثر متقابل سیستم خاک‌ورزی و نوع محصول بر نیتروژن کل خاک معنی‌دار بود. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار نیتروژن کل خاک در تیمار بی‌خاک‌ورزی همراه با کشت گندم دوروم به میزان ۰/۳۰ درصد اندازه‌گیری گردید. در مقابل،



شکل ۱۵- اثر نوع محصول بر مقدار نیتروژن خاک در کشت گندم دوروم

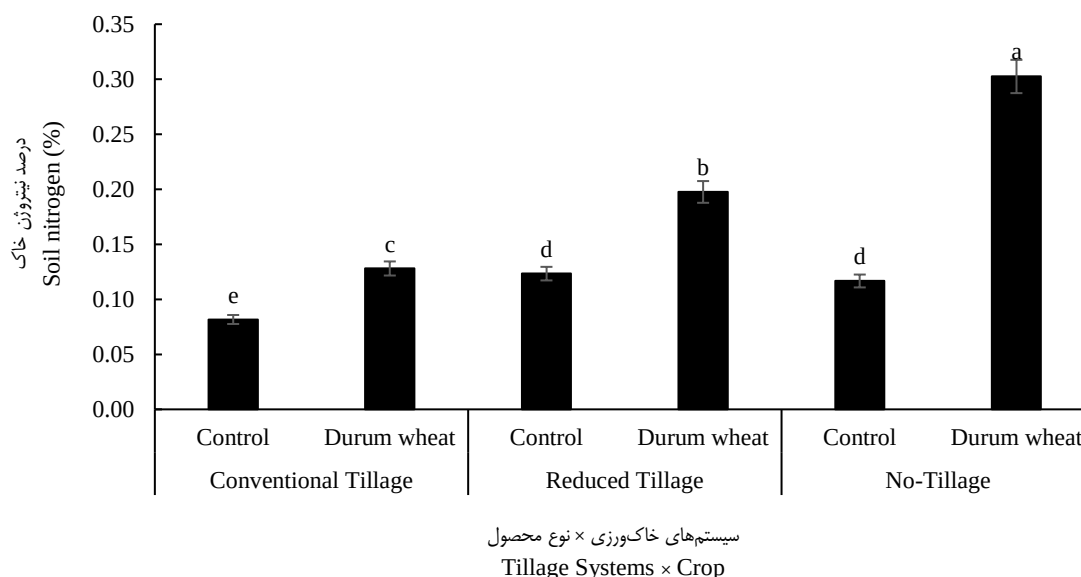
(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 15- Effect of crop type on soil nitrogen content under durum wheat cultivation

(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

آبشویی و دنیتریفیکاسیون از دسترس خارج می‌شود. بنابراین ترکیب سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی با کشت گیاه می‌تواند نقش مؤثری در افزایش و پایداری ذخایر نیتروژن خاک در سامانه‌های زراعی ایفا کند (Angon et al., 2023).

همچنین پایداری بیشتر خاکدانه‌ها در این سیستم می‌تواند از طریق حفاظت فیزیکی مواد آلی، به حفظ ترکیبات آلی حاوی نیتروژن در خاک کمک کند (Sekaran et al., 2021). در مقابل، در خاک‌ورزی مرسوم به دلیل برهم‌زدن شدید خاک و افزایش تهویه، سرعت تجزیه ماده آلی افزایش یافته و بخشی از نیتروژن خاک از طریق فرآیندهایی مانند



شکل ۱۶- اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول بر مقدار نیتروژن خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 16- Interaction effect of tillage systems and crop type on soil nitrogen content under durum wheat cultivation

(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

فسفر خاک

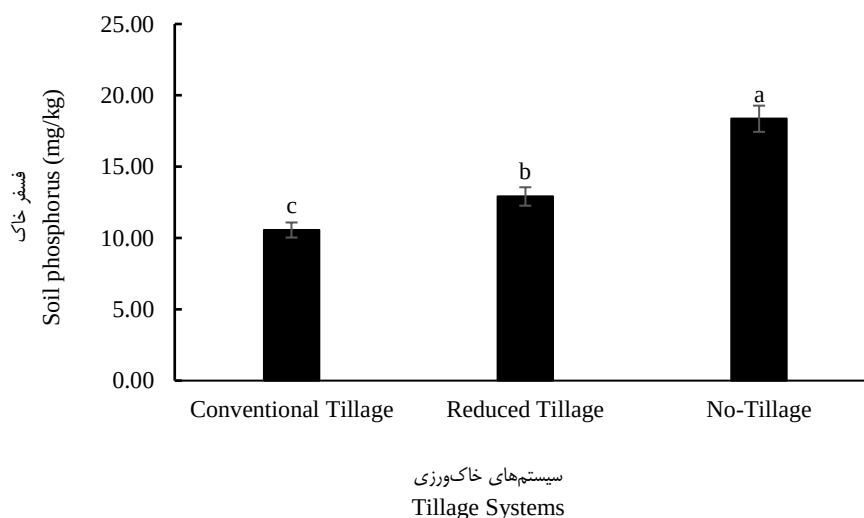
نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده سیستم‌های خاک‌ورزی و اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول بر مقدار فسفر خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند و باقی اثرات ساده و متقابل معنی‌دار نشدند (جدول ۳).

نتایج نشان داد که سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی تأثیر معنی‌داری بر فسفر قابل دسترس خاک داشتند. همان‌طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار فسفر قابل دسترس خاک در تیمار بی‌خاک‌ورزی به میزان ۱۸/۳۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد. کمترین مقدار فسفر در تیمار خاک‌ورزی مرسوم به میزان ۱۰/۵۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌دست آمد. افزایش فسفر قابل دسترس در سیستم بی‌خاک‌ورزی را می‌توان به تجمع بقایای گیاهی در سطح خاک و افزایش تدریجی ماده آلی نسبت داد. تجزیه بقایای گیاهی و ترکیبات آلی می‌تواند از طریق تولید اسیدهای آلی و کلاته کردن عناصر، به افزایش قابلیت دسترسی فسفر در خاک کمک کند. علاوه بر این، کاهش برهم‌خوردگی مکانیکی خاک در سیستم‌های حفاظتی موجب پایداری بیشتر خاکدانه‌ها و حفظ ریزمحیط‌های زیستی مناسب برای فعالیت ریزجانداران حل‌کننده فسفر می‌شود (Kataria et al., 2024).

در مقابل، در سیستم خاک‌ورزی مرسوم، اختلاط شدیدتر خاک و

تسریع تجزیه ماده آلی می‌تواند از تجمع ترکیبات آلی و زیستی مؤثر در پویایی فسفر بکاهد. از آنجاکه همه تیمارها در خاک آهکی انجام شدند و تغییرات pH نیز محدود بود، تفاوت مشاهده‌شده در فسفر قابل دسترس را نمی‌توان صرفاً به تغییر در واکنش‌های شیمیایی کلسیم-فسفر نسبت داد. به نظر می‌رسد این اختلاف بیشتر ناشی از اثرات مدیریتی خاک‌ورزی بر توزیع بقایا، ماده آلی، فعالیت ریزوسفری و شرایط میکروبی خاک باشد؛ عواملی که ممکن است به بهبود گردش فسفر و کاهش نسبی اثرات تثبیت آن کمک کرده باشند. بنابراین، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کاهش شدت خاک‌ورزی و استفاده از سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی، دست کم در کوتاه‌مدت، می‌تواند به بهبود فسفر قابل دسترس خاک در شرایط اقلیمی سرد و خشک کمک کند (Ding et al., 2025).

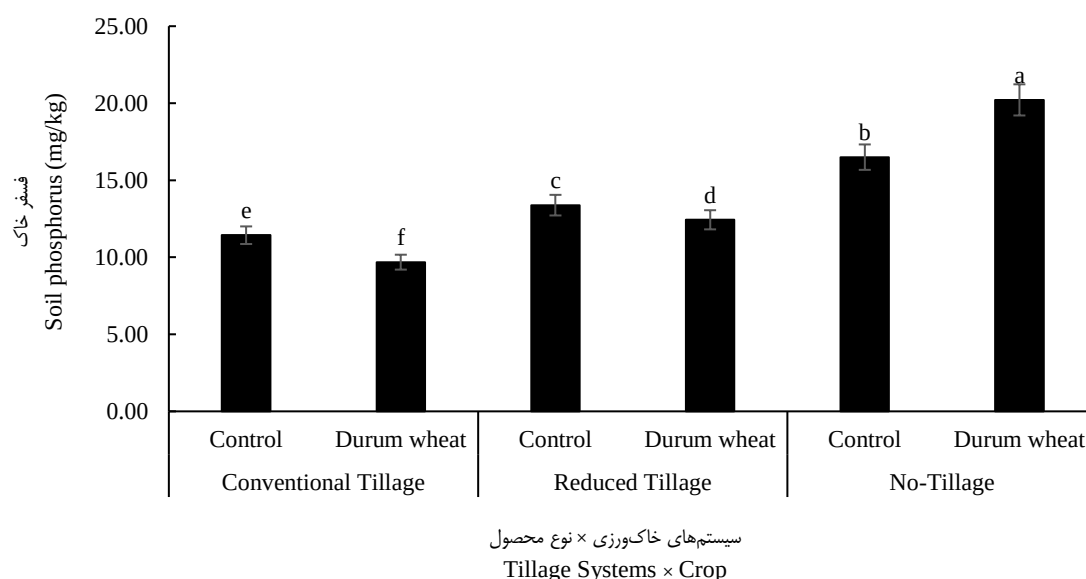
نتایج نشان داد که اثر متقابل سیستم خاک‌ورزی و نوع محصول بر فسفر قابل دسترس خاک معنی‌دار بود. همان‌طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، بالاترین مقدار فسفر قابل دسترس خاک در تیمار بی‌خاک‌ورزی همراه با کشت گندم دوروم به میزان ۲۰/۲۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد. کمترین مقدار فسفر قابل دسترس خاک در تیمار خاک‌ورزی مرسوم و تحت کشت گندم دوروم به میزان ۹/۶۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بدست آمد (شکل ۱۸).



شکل ۱۷- اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر مقدار فسفر خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 17- Effect of tillage systems on soil phosphorus content under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's)



شکل ۱۸- اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول بر مقدار فسفر خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

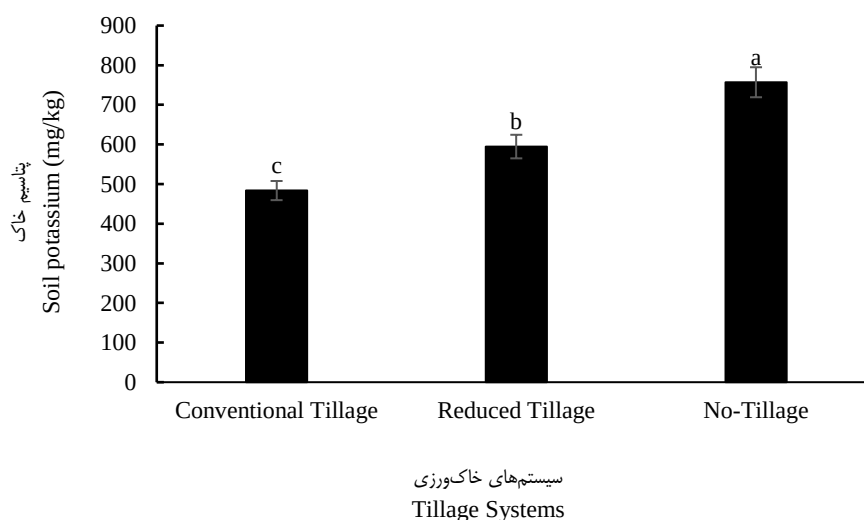
Figure 18- Interaction effect of tillage systems and crop type on soil phosphorus content under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

پتاسیم خاک

بررسی تأثیر تیمارهای آزمایشی بر مقدار پتاسیم خاک نشان داد که اثر ساده سیستم‌های خاک‌ورزی، نوع محصول و اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول بر مقدار پتاسیم خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند و باقی اثرات ساده و متقابل معنی‌دار نشدند (جدول ۳). بررسی نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین مقدار پتاسیم قابل دسترس در سیستم بی‌خاک‌ورزی به میزان ۷۵۷ میلی گرم بر کیلوگرم مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن در سیستم خاک‌ورزی مرسوم به میزان ۴۸۳/۵۸ میلی گرم بر کیلوگرم به دست آمد (شکل ۱۹).

افزایش پتاسیم قابل دسترس در سیستم بی‌خاک‌ورزی احتمالاً با حفظ بقایای گیاهی در سطح خاک و آزادسازی تدریجی پتاسیم طی فرآیند تجزیه آن‌ها مرتبط بوده است. بخش قابل توجهی از پتاسیم موجود در بافت‌های گیاهی به صورت محلول و غیرساختاری ذخیره می‌شود؛ از این رو این عنصر معمولاً سریع‌تر از بقایای گیاهی آزاد شده و وارد محلول خاک می‌گردد. با این حال، از آنجاکه در این پژوهش نمونه‌برداری خاک به صورت تجمیعی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر انجام شد، افزایش مشاهده شده لزوماً به معنای توزیع یکنواخت پتاسیم در سراسر این عمق نیست و ممکن است بیشتر بازتاب غنی‌شدگی لایه‌های نزدیک به سطح خاک باشد. افزون بر این، تحرک بیشتر پتاسیم نسبت به عناصری مانند فسفر می‌تواند به جابه‌جایی آن در محدوده لایه نمونه‌برداری شده کمک کرده باشد.

با توجه به نتایج مشاهده شده، افزایش فسفر قابل دسترس در سیستم بی‌خاک‌ورزی، به‌ویژه در تیمار کشت گندم دوروم، احتمالاً بازتابی از تغییر در پویایی فسفر در لایه سطحی خاک در مقایسه با سیستم خاک‌ورزی مرسوم است. در خاک‌های آهکی، فسفر به‌طور ذاتی به دلیل واکنش با کلسیم در معرض تثبیت قرار دارد. در سیستم بی‌خاک‌ورزی، حفظ بقایای گیاهی در سطح خاک (مالچ)، می‌تواند به افزایش تمرکز مواد آلی در لایه سطحی منجر شود. اگرچه در این مطالعه نرخ تجزیه بقایا و غلظت اسیدهای آلی مستقیماً اندازه‌گیری نشده است، اما بر اساس ادبیات علمی، تجزیه تدریجی این مواد آلی می‌تواند از طریق تولید اسیدهای آلی ضعیف (مانند سیتریک و مالیک) و فرآیند کلاته کردن کلسیم، پتانسیل آزادسازی فسفات‌های تثبیت شده را افزایش دهد. عامل دیگر، نقش احتمالی ریزوسفر گندم دوروم است؛ حضور ریشه‌های فعال در سیستم حفاظتی ممکن است از طریق ترشحات ریشه‌ای و فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز، به بسیج موضعی منابع فسفر کمک کند. بنابراین، بالاترین میزان فسفر قابل دسترس در تیمار بی‌خاک‌ورزی گندم دوروم می‌تواند حاصل برهم‌کنش میان حفظ مواد آلی سطحی و افزایش فعالیت‌های زیستی در ناحیه ریزوسفر باشد که احتمالاً اثرات مکانیسم‌های تثبیت فسفر را در این خاک‌های آهکی تعدیل کرده است. در مقابل، در سیستم خاک‌ورزی مرسوم، اختلال در ساختار خاک و اکسیداسیون سریع‌تر مواد آلی ممکن است فرصت کافی برای این فرآیندهای زیستی را فراهم نکرده و در نتیجه منجر به کاهش فراهمی این عنصر شده باشد (Richardson & Simpson, 2011; Hinsinger, 2001).



شکل ۱۹- اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر مقدار پتاسیم خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 19- Effect of tillage systems on soil potassium content under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's)

از سوی دیگر، جذب پتاسیم توسط گیاه و بازگشت آن از طریق بقایای گیاهی، چرخه این عنصر را در سیستم زراعی تقویت می‌کند. در مقابل، در تیمار بدون کشت، به دلیل نبود ریشه زنده و تحریک ریزوسفری، این فرآیندها محدودتر بوده و در نتیجه پتاسیم قابل دسترس کمتری مشاهده می‌شود (Awoniyi et al., 2025).

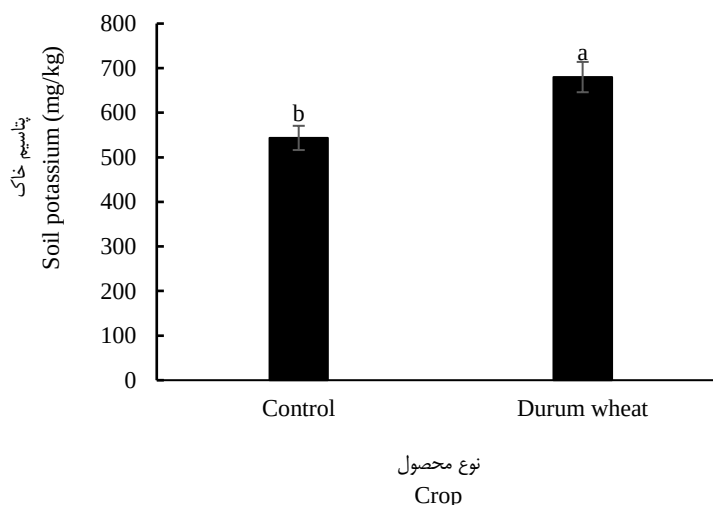
بیشترین مقدار پتاسیم قابل دسترس در تیمار بی‌خاک‌ورزی همراه با گندم دوروم به میزان ۸۴۳/۱۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن در تیمار خاک‌ورزی مرسوم همراه با شاهد به میزان ۴۳۶/۶۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم به دست آمد. در هر سه سیستم خاک‌ورزی، مقدار پتاسیم قابل دسترس در حضور گندم دوروم بیشتر از تیمار شاهد بود. همچنین با کاهش شدت خاک‌ورزی از خاک‌ورزی مرسوم به کم‌خاک‌ورزی و سپس بی‌خاک‌ورزی، مقدار پتاسیم قابل دسترس افزایش نشان داد (شکل ۲۱).

تنفس پایه خاک

بررسی نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای آزمایشی بر مقدار تنفس پایه خاک نشان داد که اثر ساده سیستم‌های خاک‌ورزی، نوع محصول و اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول بر مقدار تنفس پایه خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند و باقی اثرات ساده و متقابل معنی‌دار نشدند (جدول ۳). بیشترین میزان تنفس پایه خاک در سیستم خاک‌ورزی مرسوم به میزان ۲۰۴/۱۱ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز مشاهده شد.

بنابراین، نتایج حاضر بیشتر نشان‌دهنده بهبود پویایی پتاسیم در سیستم بی‌خاک‌ورزی است، نه لزوماً افزایش یکنواخت آن در کل عمق ۳۰ سانتی‌متری (Algarin et al., 2025; Andrews et al., 2021). در مقابل، در سیستم خاک‌ورزی مرسوم به دلیل اختلال شدید در ساختمان خاک و اختلاط بقایای گیاهی با خاک، معدنی شدن مواد آلی با سرعت بیشتری رخ می‌دهد و بخشی از پتاسیم آزادشده ممکن است، بسته به شرایط رطوبتی و ویژگی‌های خاک، به لایه‌های عمیق‌تر منتقل شود (Wacker et al., 2022). همچنین کاهش تجمع ماده آلی و تخریب خاکدانه‌ها در این سیستم می‌تواند ظرفیت نگهداری عناصر غذایی در لایه سطحی خاک را کاهش دهد (Li et al., 2020). بنابراین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کاهش شدت خاک‌ورزی و استفاده از سیستم‌های حفاظتی می‌تواند نقش مهمی در افزایش و حفظ پتاسیم قابل دسترس خاک در شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه داشته باشد. نتایج نشان داد که نوع محصول تأثیر معنی‌داری بر پتاسیم قابل دسترس خاک داشت (شکل ۲۰). بیشترین مقدار پتاسیم قابل دسترس در تیمار گندم دوروم به میزان ۶۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن در تیمار شاهد به میزان ۵۴۳/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم به دست آمد. این افزایش بیانگر نقش فعال کشت گندم دوروم در بهبود وضعیت پتاسیم خاک نسبت به شرایط بدون کشت است.

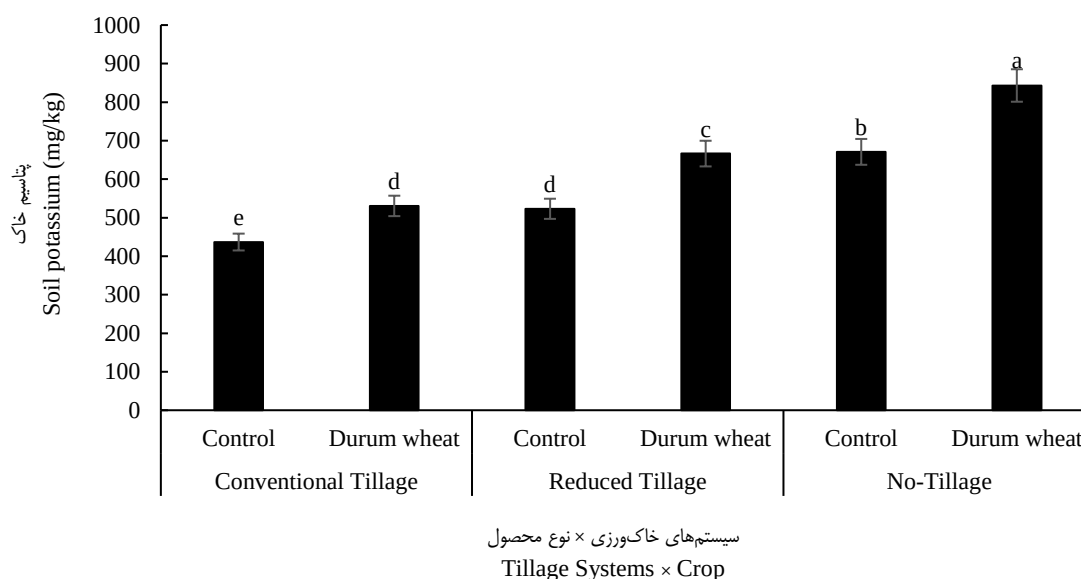
افزایش پتاسیم قابل دسترس در تیمار گندم دوروم احتمالاً ناشی از فعالیت ریزوسفری ریشه‌ها و تشدید چرخه زیستی پتاسیم در خاک بوده است. ریشه‌های فعال با ترشح ترکیبات آلی و پروتون‌ها می‌توانند آزادسازی پتاسیم از فازهای تبادلی و تا حدی معدنی را تسهیل کنند و



شکل ۲۰- اثر نوع محصول بر مقدار پتاسیم خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 20- Effect of crop type on soil potassium content under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)



شکل ۲۱- اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول بر مقدار پتاسیم خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 21- Interaction effect of tillage systems and crop type on soil potassium content under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

و در نتیجه تشدید فعالیت میکروبی و معدنی شدن کربن آلی نسبت داد. در مقابل، کاهش معنی‌دار تنفس پایه خاک در سیستم بی‌خاک‌ورزی نشان‌دهنده پایداری بیشتر کربن آلی خاک و محدود شدن اکسیداسیون زیستی آن به دلیل حفظ ساختمان خاکدانه‌ها و کاهش اختلال فیزیکی خاک است. این روند بیانگر نقش سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی در

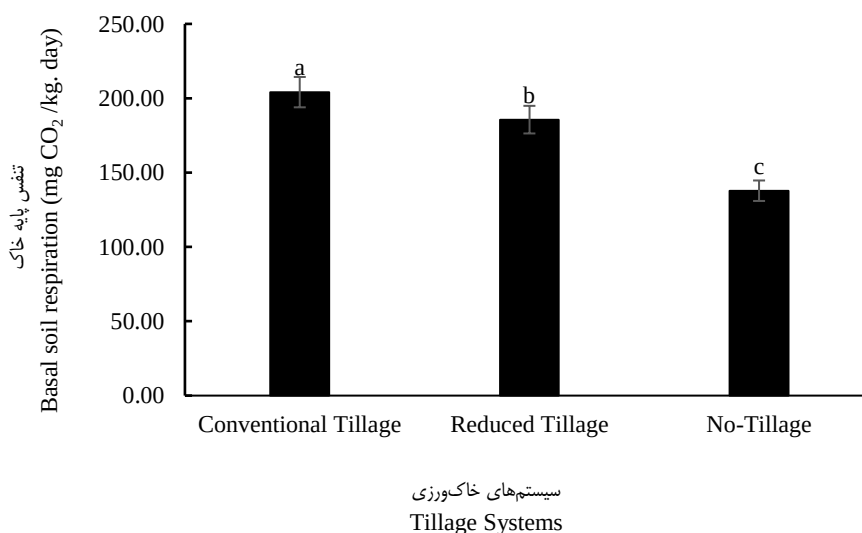
کمترین میزان تنفس پایه خاک مربوط به سیستم بی‌خاک‌ورزی به میزان ۱۳۷/۸۰ میلی گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز بود (شکل ۲۲).

افزایش تنفس پایه خاک در خاک‌ورزی مرسوم را می‌توان به برهم‌خوردگی شدید مکانیکی خاک، افزایش تماس ماده آلی با اکسیژن

۲۳). این کاهش به معنای کاهش جمعیت یا غیرفعال شدن ریزجانداران در حضور گیاه نیست؛ بلکه نشان‌دهنده بهبود کارایی مصرف کربن (CUE) در ریزوسفر گندم دوروم و ترجیح ریزجانداران به تخصیص کربن به زیست‌توده میکروبی و تولید آنزیم‌ها به جای اتلاف آن به صورت تنفس است.

کاهش اتلاف کربن و بهبود پایداری زیستی خاک در مقایسه با خاک ورزی مرسوم می‌باشد (Wasikoyo et al., 2026).

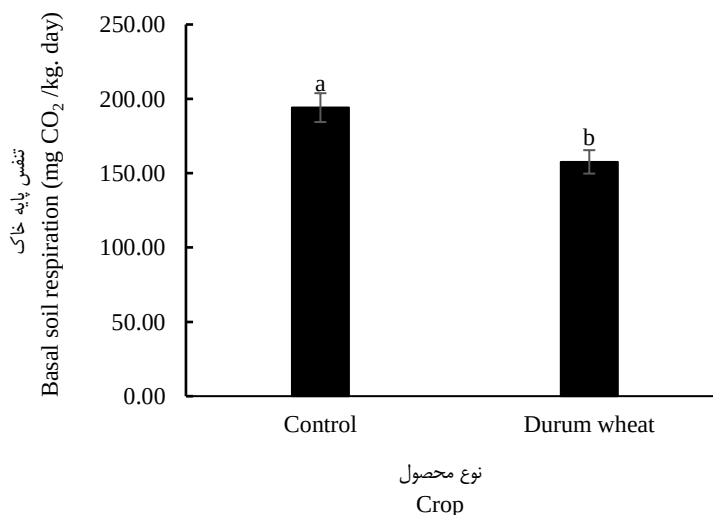
بیشترین میزان تنفس پایه خاک در تیمار شاهد با میانگین حدود ۱۹۴/۰۹ میلی گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز مشاهده شد، در حالی که این مقدار در تیمار گندم دوروم به حدود ۱۵۷/۵۹ میلی گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز کاهش یافت (شکل



شکل ۲۲- اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر مقدار تنفس پایه خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 22- Effect of tillage systems on basal soil respiration under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's)



شکل ۲۳- اثر نوع محصول بر مقدار تنفس پایه خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 23- Effect of crop type on basal soil respiration content under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's)

نوع محصول نیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. در مقابل، سایر اثرات ساده و متقابل از نظر آماری معنی‌دار نبودند (جدول ۳). بیشترین تنفس ناشی از سوبسترا در خاک در سیستم خاک‌ورزی مرسوم با میانگین حدود ۵۴۳/۰۸ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز مشاهده شد. این مقدار در کم‌خاک‌ورزی به حدود ۴۵۲/۲۵ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز کاهش یافت و کمترین مقدار آن در سیستم بی‌خاک‌ورزی با حدود ۳۵۶/۹۲ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز اندازه‌گیری شد (شکل ۲۵).

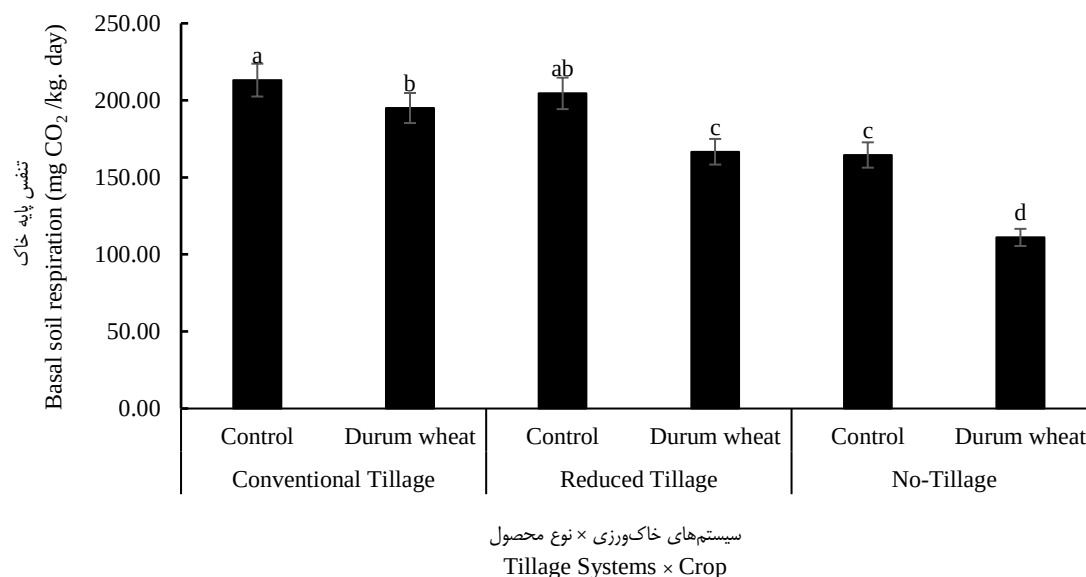
افزایش تنفس ناشی از سوبسترا در خاک در خاک‌ورزی مرسوم را می‌توان به برهم‌خوردگی شدید ساختمان خاک و افزایش دسترسی ریزجانداران به منابع آلی قابل تجزیه نسبت داد که موجب تحریک فعالیت میکروبی پس از افزودن سوبسترا می‌شود. در مقابل، در سیستم بی‌خاک‌ورزی به دلیل پایداری بیشتر خاکدانه‌ها، توزیع یکنواخت‌تر ماده آلی و کاهش اختلال فیزیکی خاک، بخشی از کربن آلی در داخل خاکدانه‌ها محافظت شده و دسترسی سریع ریزجانداران به سوبسترا محدودتر می‌شود، در نتیجه شدت تنفس ناشی از سوبسترا کاهش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی می‌توانند با افزایش پایداری ساختمان خاک و حفاظت از کربن آلی، الگوی فعالیت میکروبی خاک را نسبت به خاک‌ورزی مرسوم تغییر دهند (Franco-Luesma et al., 2020; Mtyobile et al., 2020).

علاوه بر این، فعالیت ریشه‌ها و ترشحات ریزوسفری با کمک به پایداری خاکدانه‌ها، بخش عمده‌ای از کربن آلی را از دسترس مستقیم اکسیداسیون زیستی خارج کرده و پایداری ساختمانی خاک را افزایش می‌دهند. در مقابل، افزایش عناصر غذایی قابل دسترس در تیمار گندم دوروم که در بخش‌های پیشین ذکر شد، ناشی از همین تحریک کیفی فعالیت میکروبی (تولید آنزیم‌ها و اسیدهای آلی در ریزوسفر) است که آزادسازی عناصر را بدون افزایش در تنفس پایه و اتلاف کربن تسهیل می‌کند (Li et al., 2020).

بیشترین میزان تنفس پایه خاک در تیمار خاک‌ورزی مرسوم همراه با شاهد به میزان ۲۱۳/۱۷ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز مشاهده شد. پس از آن تیمار کم‌خاک‌ورزی همراه با شاهد به میزان ۲۰۴/۵۶ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز قرار گرفت. در مقابل، کمترین تنفس پایه خاک در تیمار بی‌خاک‌ورزی همراه با کشت گندم دوروم و به میزان ۱۱۱/۰۶ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز به دست آمد (شکل ۲۴).

تنفس ناشی از سوبسترا در خاک

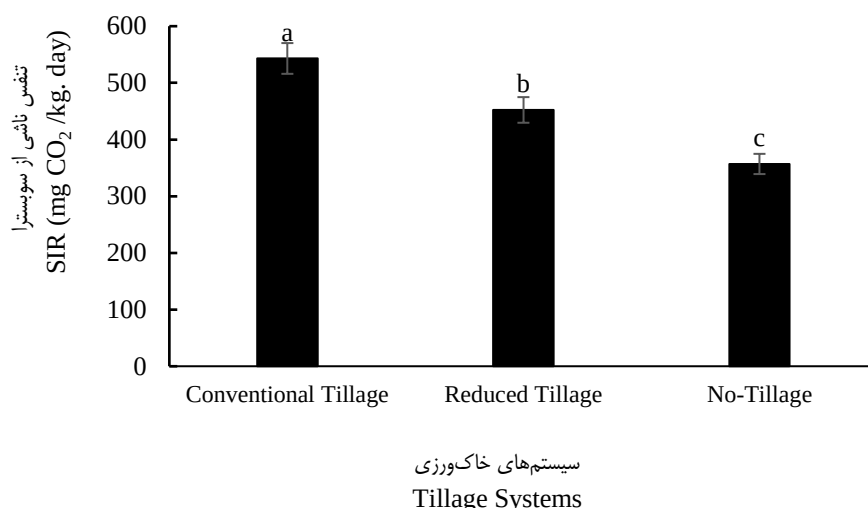
بر اساس نتایج تجزیه واریانس، سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول اثر معنی‌داری (در سطح احتمال یک درصد) بر تنفس ناشی از سوبسترا در خاک داشتند. همچنین اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و



شکل ۲۴- اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول بر مقدار تنفس پایه خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 24- Interaction effect of tillage systems and crop type on basal soil respiration content under durum wheat cultivation (Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)



شکل ۲۵- اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر تنفس ناشی از سوبسترا در خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 25- Effect of tillage systems on substrate- induced respiration (SIR) in soil under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's)

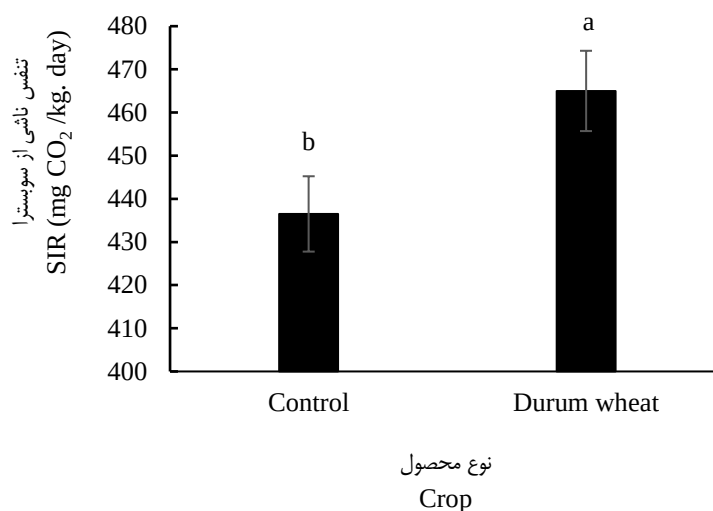
(*al.*, 2015).

بیشترین مقدار تنفس ناشی از سوبسترا در تیمار خاک‌ورزی مرسوم همراه با گندم دوروم با میانگین حدود ۵۸۷/۶۷ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز مشاهده شد. کمترین مقادیر تنفس ناشی از سوبسترا نیز در سیستم بی‌خاک‌ورزی مشاهده شد، به‌طوری‌که مقدار آن در تیمار شاهد حدود ۳۴۹/۵۰ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز و در تیمار گندم دوروم حدود ۳۶۴/۳۳ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز بود (شکل ۲۷).

کربن زیست‌توده میکروبی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده سیستم‌های خاک‌ورزی، نوع محصول و همچنین اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی × نوع محصول بر کربن زیست‌توده میکروبی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. در مقابل، سایر اثرات ساده و متقابل از نظر آماری معنی‌دار نبودند (جدول ۳). بیشترین مقدار کربن زیست‌توده میکروبی در سیستم بی‌خاک‌ورزی به میزان ۲۹۰/۳۰ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک مشاهده شد که به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر تیمارها بود. همچنین کمترین مقدار این شاخص نیز در سیستم خاک‌ورزی مرسوم به میزان ۱۱۷/۳۶ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک به‌دست آمد (شکل ۲۸).

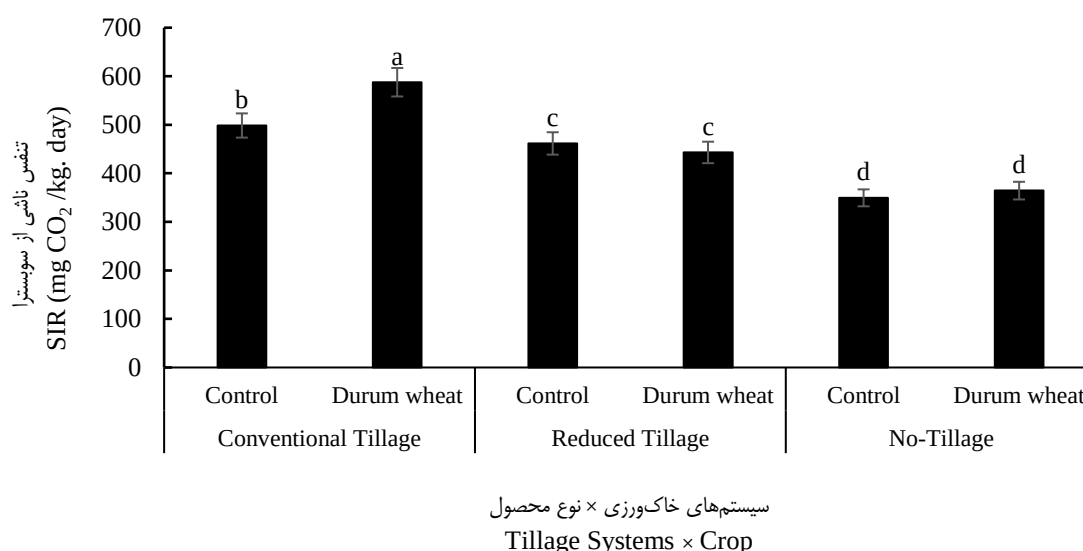
بیشترین مقدار تنفس ناشی از سوبسترا در خاک در تیمار گندم دوروم با میانگین حدود ۴۶۵ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز مشاهده شد، در حالی‌که در تیمار شاهد مقدار آن حدود ۴۳۶/۵۰ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز اندازه‌گیری شد (شکل ۲۶). افزایش تنفس ناشی از سوبسترا در حضور گندم دوروم را می‌توان به فعالیت بیشتر ریزوسفر و افزایش دسترسی ریزجانداران به ترکیبات آلی قابل تجزیه نسبت داد. ترشحات ریشه، بقایای ریشه و ترکیبات آلی آزادشده در ناحیه ریزوسفر می‌توانند به‌عنوان منبع انرژی برای ریزجانداران عمل کرده و ظرفیت پاسخ متابولیکی آن‌ها را پس از افزودن سوبسترا افزایش دهند (He et al., 2026). این در حالی است که کاهش تنفس پایه در حضور گندم، لزوماً با این یافته در تناقض نیست؛ زیرا تنفس پایه و تنفس ناشی از سوبسترا دو جنبه متفاوت از فعالیت میکروبی خاک را نشان می‌دهند. تنفس پایه بیشتر بیانگر شدت تنفس میکروبی در شرایط طبیعی خاک و بدون افزودن منبع کربن خارجی است، در حالی‌که تنفس ناشی از سوبسترا توان بالقوه و پاسخ سریع جامعه میکروبی به یک منبع کربن قابل‌دسترس را منعکس می‌کند. بنابراین، ممکن است حضور گندم با کاهش تجزیه سریع کربن بومی خاک یا افزایش کارایی مصرف کربن، تنفس پایه را کاهش داده باشد، اما همزمان از طریق تقویت فعالیت ریزوسفر و فراهم کردن ترکیبات آلی تازه، ظرفیت پاسخ میکروبی به سوبسترای افزوده‌شده را افزایش داده باشد. در مقابل، در تیمار شاهد به‌دلیل نبود گیاه و کاهش ورودی ترکیبات آلی تازه، فعالیت ریزوسفری محدودتر بوده و در نتیجه تنفس ناشی از سوبسترا در سطح پایین‌تری مشاهده شد (Birge et



شکل ۲۶- اثر نوع محصول بر تنفس ناشی از سوبسترا در خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 26- Effect of crop type on substrate- induced respiration (SIR) in soil under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)



شکل ۲۷- اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول بر تنفس ناشی از سوبسترا در خاک در کشت گندم دوروم

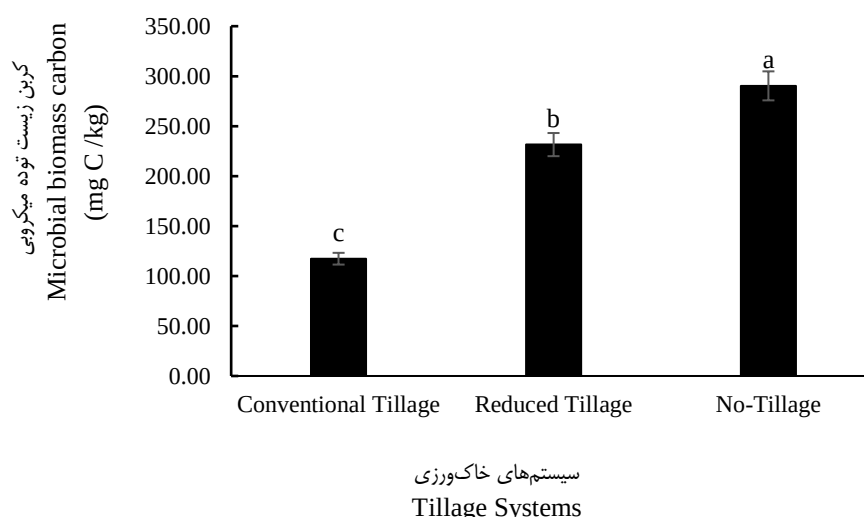
(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 27- Interaction effect of tillage systems and crop type on substrate- induced respiration (SIR) in soil under durum wheat cultivation

(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

برای فعالیت و استقرار ریزجانداران خاک نسبت داد. در مقابل، در سیستم خاک‌ورزی مرسوم به دلیل اختلال بیشتر در ساختمان خاک و تسریع تجزیه ماده آلی، مقدار کربن زیست‌توده میکروبی در سطح پایین‌تری قرار گرفت (Gosai et al., 2010).

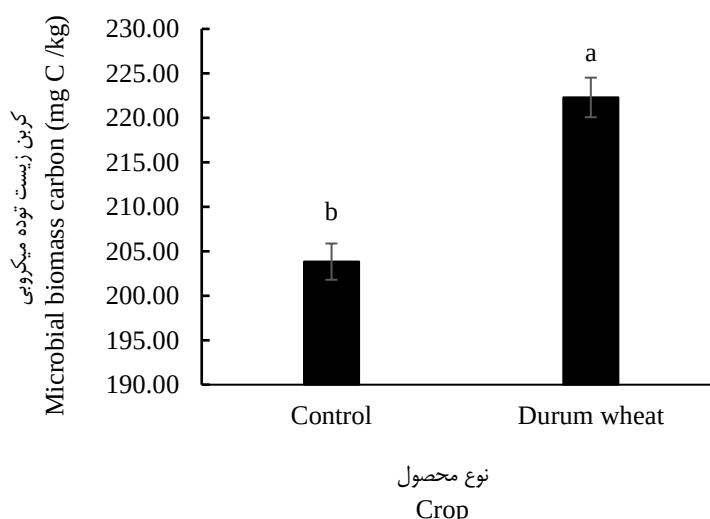
به‌طور کلی، با کاهش شدت خاک‌ورزی از خاک‌ورزی مرسوم به بی‌خاک‌ورزی، مقدار کربن زیست‌توده میکروبی افزایش یافت. این افزایش را می‌توان به کاهش برهم‌خوردگی مکانیکی خاک، حفظ بقایای گیاهی در سطح خاک، افزایش ماده آلی و فراهم شدن شرایط مناسب‌تر



شکل ۲۸- اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر کربن زیست‌توده میکروبی در خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 28- Effect of tillage systems on microbial biomass carbon in soil under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's)



شکل ۲۹- اثر نوع محصول بر کربن زیست‌توده میکروبی در خاک در کشت گندم دوروم

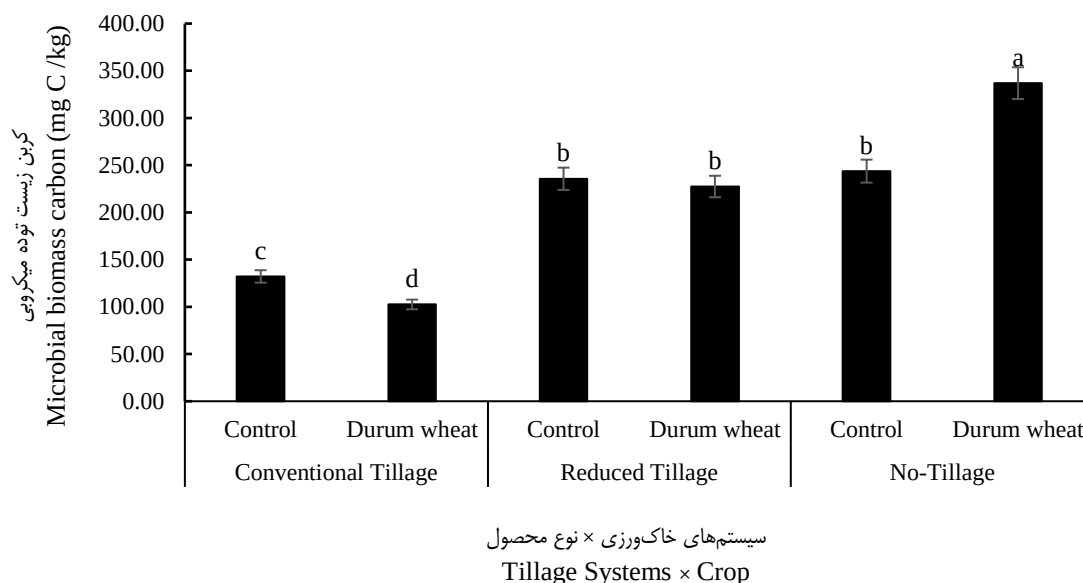
(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 29- Effect of crop type on microbial biomass carbon in soil under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

فراهم می‌کند (Afzal et al., 2024).

بیشترین مقدار کربن زیست‌توده میکروبی در تیمار بی‌خاک‌ورزی همراه با گندم دوروم با میانگین حدود ۳۳۶/۹۰ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک مشاهده شد که به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر تیمارها بود. همچنین کمترین مقدار کربن زیست‌توده میکروبی نیز در تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم مشاهده شد. به‌طوری‌که مقدار آن در تیمار شاهد حدود ۱۳۲/۱۸ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک و در تیمار گندم دوروم حدود ۱۰۲/۵۴ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک بود (شکل ۳۰).

بیشترین مقدار کربن زیست‌توده میکروبی در تیمار گندم دوروم با میانگین حدود ۲۲۲/۳۰ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک مشاهده شد که به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار شاهد بود. کمترین مقدار این شاخص در تیمار شاهد با میانگین حدود ۲۰۳/۸۴ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک به‌دست آمد (شکل ۲۹). افزایش کربن زیست‌توده میکروبی در حضور گندم دوروم را می‌توان به ترشحات ریشه، افزایش ورود ترکیبات آلی به خاک و تحریک فعالیت ریزجانداران ناحیه ریزوسفر نسبت داد که شرایط مناسب‌تری را برای رشد و توسعه جامعه میکروبی



شکل ۳۰- اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول بر کربن زیست‌توده میکروبی در خاک در کشت گندم دوروم (حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 30- Interaction effect of tillage systems and crop type on microbial biomass carbon in soil under durum wheat cultivation

(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

به صورت متقابل، نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییرات ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک‌های آهکی نیمه‌خشک دارند. در میان اثرات مستقل، کاهش شدت خاک‌ورزی و استقرار سامانه بی‌خاک‌ورزی بهبود معنی‌داری در پایداری خاکدانه‌ها، ذخیره ماده آلی، کربن آلی، نیتروژن کل و عناصر غذایی قابل‌دسترس ایجاد کرد. در حالی که خاک‌ورزی مرسوم به دلیل اختلال شدید مکانیکی، به تسریع معدنی‌شدن مواد آلی و افزایش تنفس خاک منجر شد. افزون بر این، کشت گندم دوروم به طور مؤثری شاخص‌های حاصلخیزی و کیفیت زیستی خاک را ارتقا بخشید و عملیات زیرشکن نیز در بهبود پایداری فیزیکی و برخی شاخص‌های ساختمانی خاک نقش مثبتی ایفا نمود. در کنار این اثرات ساده، نتایج برهم‌کنش تیمارها نشان‌دهنده هم‌افزایی و وابستگی متقابل برخی ویژگی‌ها به ویژه شاخص‌های زیستی خاک به ترکیب هم‌زمان مدیریت خاک‌ورزی و حضور گیاه بود. امری که اهمیت اتخاذ یک رویکرد تلفیقی را در مدیریت نشان می‌دهد. در مجموع، یافته‌های این مطالعه بر پتانسیل بالای سامانه‌های حفاظتی، به ویژه ترکیب بی‌خاک‌ورزی با کشت گندم دوروم و کاربرد زیرشکن، در بهبود کیفیت خاک و حفظ پایداری تولید در مناطق نیمه‌خشک دلالت دارد. با این حال، به دلیل کوتاه‌مدت بودن این مطالعه، اعتباربخشی به پایداری این اثرات و تعمیم آن‌ها به شرایط زراعی بلندمدت، مستلزم انجام پژوهش‌های طولانی‌مدت‌تر در شرایط اقلیمی و مدیریتی متنوع تر است.

این الگو نشان می‌دهد که اثر گندم بر کربن زیست‌توده میکروبی را نمی‌توان به صورت یک اثر کلی و مستقل تفسیر کرد، بلکه این اثر زمانی برجسته می‌شود که گیاه در شرایطی مانند بی‌خاک‌ورزی قرار گیرد که اختلال خاک کمتر، حفظ بقایای گیاهی بیشتر و رطوبت و ماده آلی خاک مناسب‌تر باشد. در چنین شرایطی، حضور ریشه زنده، ترشحات ریشه و بقایای گیاهی می‌تواند بستر مناسب‌تری برای رشد و فعالیت جامعه میکروبی فراهم کند و در نتیجه به افزایش کربن زیست‌توده میکروبی بینجامد. در مقابل، در سیستم خاک‌ورزی مرسوم، اختلال شدید خاک، تخریب بیشتر ساختار، تهویه بالاتر و تسریع تجزیه ماده آلی ممکن است پایداری زیستگاه میکروبی و دسترسی پیوسته به منابع کربنی را محدود کرده باشد. از این رو، حضور گندم در این شرایط لزوماً به افزایش کربن زیست‌توده میکروبی منجر نشده است. بنابراین، به نظر می‌رسد افزایش کربن زیست‌توده میکروبی در حضور گندم تنها زمانی قابل انتظار است که شرایط فیزیکی و زیستی خاک، به ویژه در سامانه‌های حفاظتی مانند بی‌خاک‌ورزی، امکان بهره‌برداری مؤثرتر از ورودی‌های ریشه‌ای و آلی را برای ریزجانداران فراهم کند (Gosai et al., 2010).

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش تأیید می‌کند که سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی، نوع محصول و عملیات زیرشکن به طور مستقل و در مواردی

References

1. Afzal, M.Y., Das, B.K., Valappil, V.T., Scaria, J., & Brözel, V.S. (2024). Root exudate compounds change the bacterial community in bulk soil. *Rhizosphere*, 30, 100885. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2024.100885>
2. Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012513840-6/50014-8>
3. Algarin, C.A.V., Thiengo, C.C., Cherubin, M.R., Bieluczyk, W., Mariano, E., Amorim, D.J., Franco, M.F.S., González, A.C., & Lavres, J. (2025). Can no-tillage and crop diversification sustain nutrient stocks in acidic and poorly-fertilized soils? Evidence from 32 years of real-world agricultural management in Paraguay. *Soil Advances*, 4, 100084. <https://doi.org/10.1016/j.soilad.2025.100084>
4. Almagro, M., Ruiz-Navarro, A., Díaz-Pereira, E., Albaladejo, J., & Martínez-Mena, M. (2021). Plant residue chemical quality modulates the soil microbial response related to decomposition and soil organic carbon and nitrogen stabilization in a rainfed Mediterranean agroecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 156, 108198. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108198>
5. Amelung, W., Tang, N., Siebers, N., Aehmelt, M., Eusterhues, K., Felde, V.J.M.N.L., Guggenberger, G., Kaiser, K., Kögel-Knabner, I., Klumpp, E., Knief, C., Kruse, J., Lehndorff, E., Mikutta, R., Peth, S., Ray, N., Prechtel, A., Ritschel, T., Schweizer, S.A.,...Totsche, K.U. (2024). Architecture of soil microaggregates: Advanced methodologies to explore properties and functions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 187(1), 17–50. <https://doi.org/10.1002/jpln.202300149>
6. Anderson, J.P. (1982). Soil respiration. In *Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties* (Vol. 9, pp. 831–871).
7. Andrews, E.M., Kassama, S., Smith, E.E., Brown, P.H., & Khalsa, S.D.S. (2021). A review of potassium-rich crop residues used as organic matter amendments in tree crop agroecosystems. *Agriculture*, 11(7), 580. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070580>
8. Angon, P.B., Anjum, N., Akter, M.M., Kc, S., Suma, R.P., & Jannat, S. (2023). An overview of the impact of tillage and cropping systems on soil health in agricultural practices. *Advances in Agriculture*, 2023(1), 8861216. <https://doi.org/10.1155/2023/8861216>
9. Asodar, M.A., & Ghasemi-nejad Raini, M. (2008). *Agricultural machines*. Shahid Chamran University Press, Ahvaz.
10. Awoniyi, A.S., Adeyemo, A.J., Agbenin, J.O., Ilori, A.O., da Silva Oliveira, D.M., & de Freitas, D.A.F. (2025). Potassium release from K-bearing minerals treated with organic acids under laboratory conditions. *Discover Soil*, 2(1), 69. <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00096-7>
11. Baranian Kabir, E., Bashari, H., Mosaddeghi, M.R., & Bassiri, M. (2017). Soil aggregate stability and organic matter as affected by land-use change in central Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(13), 1823–1837. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1308492>
12. Bardgett, R.D., & Van Der Putten, W.H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 515(7528), 505–511. <https://doi.org/10.1038/nature13855>
13. Becker, R.K., Barbosa, E.A.A., Giarola, N.F.B., Kochinski, E.G., Povh, F.P., Paula, A.L.d., & Cherubin, M.R. (2022). Mechanical intervention in compacted no-till soil in southern Brazil: Soil physical quality and maize yield. *Agronomy*, 12(10), 2281. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102281>
14. Birge, H.E., Conant, R.T., Follett, R.F., Haddix, M.L., Morris, S.J., Snapp, S.S., Wallenstein, M.D., & Paul, E.A. (2015). Soil respiration is not limited by reductions in microbial biomass during long-term soil incubations. *Soil Biology and Biochemistry*, 81, 304–310. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.11.028>
15. Blanco-Canqui, H., & Lal, R. (2008). *Principles of soil conservation and management*. Springer Science & Business Media.
16. Blanco-Canqui, H., & Ruis, S.J. (2018). No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, 326, 164–200. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>
17. Busari, M.A., Kukal, S.S., Kaur, A., Bhatt, R., & Dulazi, A. A. (2015). Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(2), 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.05.002>
18. Carter, M.R., & Gregorich, E.G. (2007). *Soil Sampling and Methods of Analysis, Second Edition*. Taylor & Francis.
19. Cui, H., Mo, C., Chen, P., Lan, R., He, C., Lin, J., Jiang, Z., & Yang, J. (2023). Impact of rhizosphere priming on soil organic carbon dynamics: Insights from the perspective of carbon fractions. *Applied Soil Ecology*, 189, 104982. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104982>
20. Dakora, F.D., & Phillips, D.A. (2002). Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant and Soil*, 245(1), 35–47. <https://doi.org/10.1023/A:1020809400075>
21. Dassou, A.G., Yemadje, P.L., Atchadé, M.N., Gohouédé, L.C., Aboua, C.D., Boulakia, S., Balarabe, O., Sekloka, E., & Tittonell, P. (2024). Conservation agriculture compared to conventional tillage improves the trade-off between

- ground-dwelling arthropod trophic groups for natural pest regulation in cotton cropping systems. *Global Ecology and Conservation*, 55, e03223. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03223>
22. Ding, W., Sun, L., Qi, Z., Li, S., Filipović, V., Wu, X., & He, H. (2025). Conservation tillage enhances both organic and inorganic carbon in dryland: Insights from a 20-year field experiment and meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 393, 109845. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109845>
23. Franco-Luesma, S., Caverio, J., Plaza-Bonilla, D., Cantero-Martínez, C., Arrúe, J.L., & Álvaro-Fuentes, J. (2020). Tillage and irrigation system effects on soil carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) emissions in a maize monoculture under Mediterranean conditions. *Soil and Tillage Research*, 196, 104488. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104488>
24. Franzluebbers, A. (2002). Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research*, 66(2), 95–106. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00018-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00018-1)
25. Gosai, K., Arunachalam, A., & Dutta, B.K. (2010). Tillage effects on soil microbial biomass in a rainfed agricultural system of northeast India. *Soil and Tillage Research*, 109(2), 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.04.006>
26. Hayat, S., Faraz, A., & Faizan, M. (2017). Root exudates: composition and impact on plant–microbe interaction. *Biofilms in Plant and Soil Health*, 179–193. <https://doi.org/10.1002/9781119246329.ch10>
27. He, S., Fu, L., Shi, Y., Shi, W., Zhang, S., Gao, Z., & Li, X. (2026). Root exudate-mediated nutrient exchange in the rhizosphere: multi-element networks, dynamic regulation, and implications for sustainable agriculture. *Journal of Advanced Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2026.02.039>
28. He, Y., Yang, M., Huang, R., Wang, Y., & Ali, W. (2021). Soil organic matter and clay zeta potential influence aggregation of a clayey red soil (Ultisol) under long-term fertilization. *Scientific Reports*, 11(1), 20498. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99769-w>
29. Heydari, N., & Taran, F. (2025). Effect of climate change on wheat yield and water productivity in Iran and the world. *Iranica Journal of Energy and Environment*, 16(2), 253–269. <https://doi.org/10.5829/ijee.2025.16.02.08>
30. Hinsinger, P., Bengough, A.G., Vetterlein, D., & Young, I.M. (2009). Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. *Plant and Soil*, 321, 117–152. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9885-9>
31. Horwath, W., & Paul, E. (1994). Microbial biomass. In *Methods of soil analysis: part 2 microbiological and biochemical properties* (Vol. 5, pp. 753–773).
32. Karami, A., Homaei, M., Afzalinia, S., Ruhipour, H., & Basirat, S. (2012). Organic resource management: Impacts on soil aggregate stability and other soil physico-chemical properties. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 148, 22–28. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.10.021>
33. Kataria, P., Singh, J., Singh, G., Mavi, M., Sillanpää, M., & Al-Farraj, S. (2024). Residual phosphorus availability after soil application of different organic waste in varying soil P status soils. *Heliyon*, 10(7), e25732. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25732>
34. Kool, D., Tong, B., Tian, Z., Heitman, J., Sauer, T., & Horton, R. (2019). Soil water retention and hydraulic conductivity dynamics following tillage. *Soil and Tillage Research*, 193, 95–100. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.020>
35. Kuzyakov, Y., & Domanski, G. (2000). Carbon input by plants into the soil. Review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 163(4), 421–431. [https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200008\)163:4%3C421::AID-JPLN421%3E3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200008)163:4%3C421::AID-JPLN421%3E3.0.CO;2-R)
36. Kuzyakov, Y., & Xu, X. (2013). Competition between roots and microorganisms for nitrogen: mechanisms and ecological relevance. *New Phytologist*, 198(3), 656–669. <https://doi.org/10.1111/nph.12235>
37. Li, J., Yuan, X., Ge, L., Li, Q., Li, Z., Wang, L., & Liu, Y. (2020). Rhizosphere effects promote soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration in rocky areas of desertification. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 304, 107126. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107126>
38. Li, M., Qing, W., & Songtao, S. (2020). Response of soil aggregate stability and distribution of organic carbon to alpine grassland degradation in Northwest Sichuan. *Geoderma Regional*, 22, e00309. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00309>
39. Liang, X., Yu, S., Ju, Y., Wang, Y., & Yin, D. (2025). Integrated management practices foster soil health, productivity, and agroecosystem resilience. *Agronomy*, 15(8), 1816. <https://doi.org/10.3390/agronomy15081816>
40. Liu, Y., He, Y., & Peng, B. (2024). Relationship between salt accumulation and soil structure fractals in cotton fields in an arid inland basin. *Agronomy*, 14(11), 2673. <https://doi.org/10.3390/agronomy14112673>
41. Hamza M.A., & Anderson W.K.. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82(2), 121–145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
42. Modiba, M.M., Ocansey, C.M., Ibrahim, H.T.M., Birkás, M., Dekemati, I., & Simon, B. (2025). Assessing 16 years of tillage dynamics on soil physical properties, crop root growth and yield in an endocalcic chernozem soil in Hungary. *Agronomy*, 15(4), 801. <https://doi.org/10.3390/agronomy15040801>
43. Mtyobile, M., Muzangwa, L., & Mnkeni, P.N.S. (2020). Tillage and crop rotation effects on soil carbon and selected soil physical properties in a Haplic Cambisol in Eastern Cape, South Africa. *Soil and Water Research*, 15(1), 47–54. <https://doi.org/10.17221/176/2018-SWR>

44. Palm, C., Blanco-Canqui, H., DeClerck, F., Gatere, L., & Grace, P. (2014). Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 187, 87–105. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.010>
45. Paltineanu, C., Dumitru, S., Vizitiu, O., Mocanu, V., Lăcătușu, A.-R., Ion, S., & Domnariu, H. (2024). Soil organic carbon and total nitrogen stocks related to land use and basic environmental properties – assessment of soil carbon sequestration potential in different ecosystems. *CATENA*, 246, 108435. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108435>
46. Pecci Canisares, L., Grove, J., Miguez, F., & Poffenbarger, H. (2021). Long-term no-till increases soil nitrogen mineralization but does not affect optimal corn nitrogen fertilization practices relative to inversion tillage. *Soil and Tillage Research*, 213, 105080. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105080>
47. PeeyushSharma, V., Sharma, K., Sharma, N., Phogat, V., & Vikas, V. (2016). Impact of conservation tillage on soil organic carbon and physical properties—a review. *International Journal of Bio-resource and Stress Management*, 7(1), 151–161. <https://doi.org/10.5958/0976-4038.2016.00024.5>
48. Peralta, G., Alvarez, C.R., & Taboada, M.Á. (2021). Soil compaction alleviation by deep non-inversion tillage and crop yield responses in no tilled soils of the Pampas region of Argentina. A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 211, 105022. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105022>
49. Raper, R. (2005). Agricultural traffic impacts on soil. *Journal of Terramechanics*, 42(3-4), 259–280. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2004.10.010>
50. Sekaran, U., Sagar, K.L., & Kumar, S. (2021). Soil aggregates, aggregate-associated carbon and nitrogen, and water retention as influenced by short and long-term no-till systems. *Soil and Tillage Research*, 208, 104885. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104885>
51. Shokati, B. (2014). Effect of conservation tillage on soil fertility factors: A review. *International Journal of Biosciences*, 4(11), 144–156. <https://doi.org/10.12692/ijb/4.11.144-156>
52. Singh, N., Singh, S., Dutta, P., Sulochna, H., Yadav, R., Ghosh, S., Panotra, N., & Thakre, T. (2025). Role of conservation tillage strategies in reducing soil degradation and enhancing water infiltration. *Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 11(2), 374–387.
53. Singh, P., Mukherjee, S., Saha, N., Biswas, S., & Mandal, B. (2021). Conservation agriculture in reshaping belowground microbial diversity. In A. Rakshit, S. K. Singh, P. C. Abhilash, & A. Biswas (Eds.), *Soil Science: Fundamentals to Recent Advances* (pp. 141–173). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0917-6_8
54. Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., & Denef, K. (2004). A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79(1), 7–31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>
55. Souid, A., Hamdi, W., Attallah, A., Louhichi, B., L'taief, B., Jellali, S., Lobna, H.-H., Alshaharni, M.O., Algopishi, U.B., & Farissi, M. (2026). Synergistic effects of durum wheat–chickpea intercropping on phosphorus mobilization, rhizosphere enzymatic activity, and agroecosystem productivity in semi-arid Mediterranean soils. *Plant and soil*, 521(1), 563–581. <https://doi.org/10.1007/s11104-026-08411-z>
56. Thotakuri, G., Angidi, S., & Athelly, A. (2024). Soil carbon pool as influenced by soil microbial activity—an overview. *American Journal of Climate Change*, 13(02), 175–193. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2024.132010>
57. Tou, C., Liu, X., Gan, J., Wanek, W., Jones, D.L., Wu, L., & Ma, Q. (2025). Plant residue quality regulates its incorporation into soil aggregates and organic carbon stabilisation. *Geoderma*, 460, 117407. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117407>
58. Traoré, O., Groleau-Renaud, V., Plantureux, S., Tubeileh, A., & Boeuf-Tremblay, V. (2000). Effect of root mucilage and modelled root exudates on soil structure. *European Journal of Soil Science*, 51(4), 575–581.
59. Wacker, T.S., Jensen, L.S., & Thorup-Kristensen, K. (2022). Conservation agriculture affects soil organic matter distribution, microbial metabolic capacity and nitrogen turnover under Danish field conditions. *Soil and Tillage Research*, 224, 105508. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105508>
60. Wasikoyo, E., Zsembeli, J., Gashi, N., Gumisiriya, C., & Csaba, J. (2026). Plant–soil microbe interactions' effects on CO₂ emissions, soil organic carbon and nutrients under different tillage systems. *Agriculture*, 16(4), 429. <https://doi.org/10.3390/agriculture16040429>
61. Yu, Q., Wang, H., Wen, P., Wang, S., Li, J., Wang, R., & Wang, X. (2020). A suitable rotational conservation tillage system ameliorates soil physical properties and wheat yield: An 11-year in-situ study in a semi-arid agroecosystem. *Soil and Tillage Research*, 199, 104600. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104600>



Research Article

Vol. 40, No. 2, Summer. 2026, p. 211-226

Evaluation of the Role of Plant Growth-promoting Bacteria in Improving Nutrient Content and Reducing Nitrate Accumulation in Spinach

N. Enayatizamir^{1*}, N. Rangzan², M. Mokfi¹

1- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

(*- Corresponding Author Email: n.enayatizamir@scu.ac.ir)

2- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Khuzestan, Iran

Received: 24 May 2026

Revised: 19 July 2026

Accepted: 15 August 2026

Available Online: 15 August 2026

How to cite this article:

Enayatizamir, N., Rangzan, N., & Mokfi, M. (2026). Evaluation of the role of plant growth-promoting bacteria in improving nutrient content and reducing nitrate accumulation in spinach. *Journal of Soil and Water*, 40(2), 211-226. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jsw.2026.98889.1544>

Introduction

The heavy reliance on chemical N-P-K fertilizers in intensive vegetable farming has raised significant environmental and health concerns. Nitrate accumulation in leafy greens, especially spinach, is a major food safety challenge. Nitrate is directly linked to nitrogen metabolism and accumulates in plant tissue when its uptake exceeds the plant's capacity to use it for growth and protein synthesis. Plant growth-promoting bacteria (PGPB) offer a sustainable alternative by enhancing nutrient bioavailability through mechanisms such as phosphate solubilization, nitrogen fixation, and siderophore production. Growth-promoting bacteria prevent nitrate accumulation in leaves by improving nitrogen uptake and transport. While the efficacy of PGPB is well-documented in cereal crops, their potential to mitigate the negative effects of reduced fertilization in high-demand vegetables like spinach remains under-explored.

Materials and Methods

This study aimed to evaluate the efficiency of PGPB in improving spinach characteristics under greenhouse conditions using a factorial experiment based on a completely randomized design. The treatments consisted of two levels of N-P-K fertilizer (100% of recommended rate and 70% of the recommended rate) and four levels of microbial inoculation (no bacteria, *Pseudomonas putida*, *Phytobacter diazotrophicus*, and a mix of both). The experiment was conducted in 3 kg pots. Six seeds were sown 1 cm below the soil surface and one milliliter of each strain was inoculated under each seed. The soil moisture of the pots was maintained at approximately 75% of field capacity moisture by weight during the experiment. After two weeks, the plants were thinned to three plants. The plants were harvested 50 days after planting. Parameters including leaf nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), iron (Fe), chlorophyll content, nitrate concentration, and nitrate reductase enzyme activity were measured.

Results

The results showed that the interaction effect of fertilizer level and bacterial inoculation was significant for all measured traits. Microbial inoculation, particularly the mix of bacteria, effectively compensated for the yield loss caused by the 30% reduction in chemical fertilizer. The highest leaf fresh weight was obtained in both the 100% and 70% recommended NPK fertilizer treatments when plants were inoculated with the combined bacterial consortium, representing 1.7- and 2.2-fold increases, respectively, compared with the corresponding non-inoculated treatments. Application of 100% of the recommended NPK fertilizer in combination with the mixed bacterial inoculum increased leaf nitrogen (62%), phosphorus (23%), potassium (51%), and iron (32%) contents



Authors retain the copyright. 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.2026.98889.1544>

compared with the corresponding non-inoculated treatment. The second-highest contents of these nutrients were observed in the treatment receiving 70% of the recommended fertilizer rate together with the mixed bacterial inoculum. Total chlorophyll content declined with reduced fertilizer application; however, bacterial inoculation compensated for this reduction, such that no significant difference was observed between the inoculated treatments and the treatment receiving 100% of the recommended fertilizer rate. The highest total chlorophyll content was measured in the treatment receiving 100% of the recommended fertilizer rate together with the mixed bacterial inoculum,

which was 34% higher than the corresponding non-inoculated treatment. The highest leaf nitrate content (6123 mg kg^{-1}) was recorded in the treatment receiving 100% of the recommended fertilizer rate without bacterial inoculation. The lowest leaf nitrate content was measured in the treatment receiving 70% of the recommended fertilizer rate combined with the mixed bacterial inoculum, representing a 25% reduction compared with the corresponding non-inoculated treatment. The highest nitrate reductase activity was measured in the treatment receiving 70% of the recommended fertilizer rate together with the mixed bacterial inoculum, showing a 47% increase compared with the corresponding non-inoculated treatment. There was a negative correlation between nitrate content in the leaf and nitrate reductase activity. The results indicated that chlorophyll content was positively correlated with the contents of nitrogen, phosphorus, potassium, and iron, as well as with nitrate reductase activity. Plant fresh weight was also positively correlated with chlorophyll content, the contents of nitrogen, phosphorus, potassium, and iron, and the activity of nitrate reductase.

Conclusion

Overall, these findings suggest that the combined application of *Pseudomonas putida* and *Phytobacter diazotrophicus* with 70% of the recommended NPK fertilizer rate may represent a promising strategy to reduce chemical fertilizer use by 30% without substantial yield loss, while enhancing the nutritional quality of spinach. Nevertheless, further validation under field conditions and diverse environmental settings is required before this approach can be recommended for widespread agricultural use.

Keywords: Biofertilizer, Iron, Nitrate, Nitrate reductase, Phosphorus

ارزیابی نقش باکتری‌های محرک رشد گیاه در بهبود محتوای عناصر غذایی و کاهش تجمع نیترات در اسفناج

نعیمه عنایتی‌ضمیر^{۱*} - نفیسه رنگ‌زن^۲  - مهناز مکفی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۴

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی کارایی باکتری‌های محرک رشد گیاه در بهبود ویژگی‌های اسفناج، به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در گلخانه انجام شد. تیمارها شامل دو سطح کود NPK (۱۰۰ درصد مقدار توصیه‌شده و ۷۰ درصد آن) و چهار سطح مایه‌زنی میکروبی (بدون باکتری، *Pseudomonas putida*، *Phytobacter diazotrophicus* و مخلوط دو باکتری) بودند. شاخص‌هایی مانند مقدار نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، کلروفیل کل، نیترات و فعالیت آنزیم نیترات رداکتاز اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که اثر متقابل کود و مایه‌زنی بر تمامی صفات اندازه‌گیری شده معنی‌دار بود. بیشترین وزن تر برگ در هر دو سطح ۱۰۰ و ۷۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود، همراه با مایه‌زنی مخلوط دو باکتری به‌دست آمد که به‌ترتیب ۱/۷ و ۲/۲ برابر بیشتر از تیمارهای متناظر بدون مایه‌زنی باکتری بود. مصرف ۱۰۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود همراه با مایه‌زنی مخلوط دو باکتری، در مقایسه با تیمار متناظر بدون مایه‌زنی، موجب افزایش محتوای نیتروژن (۶۲ درصد)، فسفر (۲۳ درصد)، پتاسیم (۵۱ درصد) و آهن (۳۲ درصد) برگ شد. پس از این تیمار، بیشترین مقادیر این عناصر در تیمار ۷۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود همراه با مخلوط دو باکتری مشاهده شد. مقدار کلروفیل کل با کاهش مصرف کود کاهش یافت، اما مایه‌زنی باکتری این کاهش را جبران کرد، به‌طوری‌که در تیمارهای تلقیح شده با باکتری، تفاوت معنی‌داری با تیمار مصرف ۱۰۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود مشاهده نشد. بیشترین مقدار کلروفیل در تیمار ۱۰۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود همراه با مایه‌زنی مخلوط دو باکتری به‌دست آمد که ۳۴ درصد بیشتر از تیمار متناظر بدون مایه‌زنی بود. بیشترین مقدار نیترات برگ (6123 mg kg^{-1}) در تیمار مصرف ۱۰۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود و بدون مایه‌زنی باکتری ثبت شد. کمترین مقدار نیترات برگ در تیمار ۷۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود همراه با مخلوط دو باکتری اندازه‌گیری شد که نسبت به تیمار متناظر بدون مایه‌زنی باکتری، کاهش ۲۵ درصدی داشت. بیشترین فعالیت آنزیم نیترات رداکتاز در تیمار ۷۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود همراه با مایه‌زنی مخلوط دو باکتری مشاهده شد که در مقایسه با تیمار متناظر بدون مایه‌زنی باکتری، ۴۷ درصد افزایش نشان داد. به‌طور کلی، کاربرد مخلوط *Pseudomonas putida* و *Phytobacter diazotrophicus* همراه با ۷۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود NPK، پس از انجام بررسی‌های بیشتر، می‌تواند به‌عنوان راهکاری مناسب برای کاهش ۳۰ درصدی مصرف کود شیمیایی، بدون افت چشمگیر عملکرد و با بهبود کیفیت تغذیه‌ای اسفناج، پیشنهاد شود.

واژه‌های کلیدی: آهن، فسفر، کود زیستی، نیترات، نیترات رداکتاز

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: n.enayatzamir@scu.ac.ir

۲- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، خوزستان، ایران

مقدمه

اسفناج (*Spinacia oleracea* L.) از خانواده کنوپودیاسه^۱ بوده و به عنوان یک سبزی ارزشمند یک ساله شناخته می شود که سرشار از عناصر غذایی مهمی همچون آهن، کلسیم، فسفر و پتاسیم است. این گیاه به عنوان یک سبزی برگي کشت می شود و خاستگاه آن مناطق آسیای مرکزی و جنوب غربی گزارش شده است. ترکیب و میزان مواد مغذی موجود در اسفناج به طور عمده تحت تأثیر مصرف کودهای معدنی نیتروژن، فسفر و پتاسیم قرار دارد. در میان این عناصر، نیتروژن نقش اساسی در رشد و نمو گیاه ایفا می کند. کمبود نیتروژن موجب زردی برگ های پایینی، کاهش رشد رویشی و در نهایت افت عملکرد می شود. در مقابل، مصرف بیش از حد نیتروژن سبب رشد رویشی بیش از اندازه، افزایش حساسیت گیاه به آفات و بیماری ها، ضعف توسعه ریشه، ورس و تأخیر در رسیدگی محصول می گردد که همگی منجر به کاهش عملکرد و کیفیت نهایی محصول می شوند (Singh & Singh, 2020). فسفر نیز از عناصر کلیدی در توسعه اولیه ریشه، بهبود رشد گیاه، افزایش عملکرد و ارتقای کیفیت محصول به شمار می رود. در مطالعه ای، حسینی دارانی و همکاران (Hosseini Darani et al., 2013) بیان کردند که سطوح نیتروژن در محدوده ۷۵ تا ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار برای دستیابی به عملکرد رضایت بخش اسفناج مناسب است. همچنین زمان و همکاران (Zaman et al., 2018) بیان کردند که مصرف کود در سطح ۱۰۰-۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن-فسفر می تواند برای دستیابی به عملکرد مطلوب اسفناج توصیه شود. کاربرد همزمان نیتروژن و فسفر تأثیر مثبتی بر صفات مورفولوژیک و عملکرد اسفناج دارد. با وجود نقش اساسی این کودها در بهبود رشد و کیفیت محصول، بسیاری از کشاورزان سالانه میزان مصرف کودهای نیتروژنه را بدون توجه به نیاز واقعی گیاه و واکنش گونه های مختلف به مقدار و نوع عناصر غذایی افزایش می دهند. اگرچه تأمین کافی عناصر غذایی می تواند رشد گیاه و تولید محصول را بهبود بخشد، مصرف بیش از حد و نامناسب کودهای شیمیایی منجر به تجمع ترکیبات ناخواسته در بخش های خوراکی گیاه می شود که می تواند سلامت انسان را تهدید کند، موجب آلودگی محیط زیست گردد و زیان های اقتصادی به همراه داشته باشد (Patel et al., 2021).

تجمع نیترات در سبزی های برگي، به ویژه اسفناج، یکی از چالش های مهم ایمنی غذایی است. نیترات مستقیماً با متابولیسم نیتروژن مرتبط است و زمانی در بافت گیاه تجمع می یابد که میزان جذب آن بیش از ظرفیت گیاه برای مصرف در رشد و سنتز پروتئین باشد. این پدیده در سبزی های برگي مانند اسفناج، کاهو و جعفری

شدیدتر است، زیرا برگ ها محل اصلی تجمع نیترات هستند (Santamaria, 2006; Bian et al., 2020).

مطالعات نشان داده اند که محصولات ارگانیک معمولاً نیترات کمتری نسبت به محصولات تولید شده با کودهای شیمیایی دارند، زیرا آزادسازی نیتروژن در کودهای آلی آهسته تر است (Koh et al., 2012; Nunez de Gonzalez et al., 2015). باکتری های محرک رشد گیاه به عنوان یکی از مهم ترین نهادهای زیستی در مدیریت پایدار تولید سبزی های برگي شناخته می شوند. این میکروارگانیسم ها از طریق سازوکارهای مختلف، کارایی مصرف عناصر غذایی را افزایش داده و می توانند نقش مؤثری در کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی و بهبود کیفیت محصول ایفا کنند. کودهای زیستی شامل گروهی از ریزجانداران با توانایی تثبیت نیتروژن و انحلال عناصر هستند که قابلیت دسترسی عناصر را برای گیاه افزایش می دهند. استفاده از کودهای زیستی دسترسی گیاه را به مواد غذایی و مقاومت در برابر بیماری های گیاهی را افزایش و میزان مصرف کودهای شیمیایی و آلودگی های زیست محیطی را کاهش می دهد (Aisha et al., 2013).

استفاده مفرد از کودهای شیمیایی یا زیستی به تنهایی نمی تواند مسیر کشاورزی را به سمت پایدار هدایت کند. افزایش مصرف کودهای شیمیایی موجب تجمع نیترات در گیاه بدون افزایش عملکرد می شود (Custic et al., 1994) و همچنین هزینه های تولید و آلودگی محیطی را افزایش می دهد. بنابراین مدیریت مصرف کودهای شیمیایی و بهره گیری از روش های تلفیقی کودهای شیمیایی و زیستی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. تجمع نیترات در اسفناج یکی از چالش های مهم ایمنی غذایی است. باکتری های محرک رشد با بهبود جذب و انتقال نیتروژن، از انباشت نیترات در برگ ها جلوگیری می کنند. این امر موجب تبدیل سریع تر نیترات به اسیدهای آمینه و پروتئین می شود (Bhattacharyya, 2012; Jha, 2012). آنزیم نیترات رداکتاز در احیای نیترات نقش دارد (Fischer et al., 2014). افزایش فعالیت نیترات رداکتاز سرعت احیای نیترات را افزایش داده و مانع از تجمع آن در بافت های برگي می شود (Saharan & Nehra, 2011). باکتری *Pseudomonas putida* از مهم ترین باکتری های محرک رشد گیاه است که از طریق تولید سیدروفور، انحلال فسفات، و سنتز فیتوهورمون ها و بهبود جذب عناصر غذایی موجب افزایش رشد گیاه می شود. افزون بر این، بسیاری از سویه های این باکتری دارای آنزیم نیترات رداکتاز هستند که در متابولیسم نیتروژن نقش داشته و می توانند با افزایش همانندسازی نیترات، به بهبود سنتز کلروفیل و کاهش تجمع نیترات در گیاه کمک کنند (Costa-Gutierrez et al., 2020; Kalantari et al., 2022; Purnima, & Singh, 2023; Oliveira et al., 2025a). از دیگر باکتری های

آزمایش گلدانی

تأثیر باکتری‌های محرک رشد بر رشد اسفناج در گلخانه به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار بررسی شد. فاکتورهای آزمایش شامل مایه‌زنی باکتری به خاک در چهار سطح [شاهد (B1)، *Pseudomonas putida* (B2)، *Phytobacter diazotrophicus* (B3) و مخلوط دو باکتری (B4)] و فاکتور دوم شامل دو سطح کودی N-P-K با مقدار مصرف ۶۰-۹۰-۱۲۰ کیلوگرم در هکتار [مصرف کامل (F1) و ۷۰ درصد (F2)] بود (Safdar et al., 2022). خاک با ویژگی‌های ذکر شده در جدول ۲ در گلدان‌هایی با قطر ۲۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر ریخته شد. برخی ویژگی‌های خاک شامل بافت خاک به روش هیدرومتری، هدایت الکتریکی و pH خاک در عصاره ۱:۱ خاک: آب، مواد آلی به روش والکی و بلک، فسفر قابل دسترس به روش اولسن، پتاسیم قابل دسترس با استفاده از استات آمونیوم و نیتروژن به روش کج‌دال تعیین گردیدند (Gupta, 2004). سوپر فسفات تریپل و سولفات پتاسیم قبل از کاشت با خاک مخلوط شد. اوره در سه نوبت (یک سوم قبل از کاشت و بقیه بعد از سبز شدن و در مرحله ۳ تا ۴ برگه) مصرف شد. تعداد شش بذر در عمق ۱ سانتی‌متری از سطح خاک کاشته شدند و در زیر هر بذر با یک میلی‌لیتر از هر سویه تلقیح شد. رطوبت خاک گلدان‌ها طی دوره آزمایش از طریق وزنی تقریباً در حد ۷۵ درصد رطوبت ظرفیت مزرعه (FC) نگه داشته شد. گلدان‌ها در گلخانه و در دمای حدود ۲۵ درجه سلسیوس با میانگین ۱۲ ساعت روشنایی در روز نگهداری شدند. پس از دو هفته به سه گیاه تنک شد. گیاهان ۵۰ روز پس از کاشت برداشت شدند.

نمونه‌های تازه برگ در اواسط روز آفتابی برداشت و بلافاصله به آزمایشگاه منتقل شدند. پس از شستشو با آب مقطر و خشک کردن سطحی، مقدار ۵۰ گرم از بافت تازه هر نمونه جدا گردید. فعالیت آنزیم نیترات رداکتاز بر اساس روش ارائه‌شده توسط جاواراسکای (Jaworski, 1971) اندازه‌گیری شد. تمامی مراحل در شرایط خنک انجام شد تا از کاهش فعالیت آنزیمی جلوگیری شود. بافت‌های برگه‌های آزمایش حاوی بافر فسفات پتاسیم، نیترات پتاسیم و پروپرانول قرار داده شد. برای تسهیل نفوذ محلول به داخل بافت، لوله‌ها به مدت چند دقیقه در خلأ قرار گرفتند. نمونه‌ها به مدت ۷۵ دقیقه در دمای ۳۰ درجه سلسیوس و در تاریکی گرماگذاری شدند و پس از آن ۵ دقیقه در آب جوش قرار گرفتند. برای اندازه‌گیری نیتريت از واکنش رنگ‌سنجی با استفاده از معرف سولفانیل‌آمید و آلفا- نفتیل اتیلن دی‌آمین دی- هیدروکلراید استفاده شد.

محرک رشد گیاه می‌توان *Phytobacter diazotrophicus* را نام برد که از طریق تثبیت زیستی نیتروژن و افزایش فراهمی عناصر غذایی رشد و تغذیه گیاه را بهبود می‌بخشد (Salha et al., 2020; De la Vega-Camarillo et al., 2023; Jia et al., 2026). اطلاعات موجود درباره ویژگی‌های محرک رشدی و کاربرد این باکتری در گیاهان به‌ویژه در مقایسه با سایر باکتری‌های محرک رشد، هنوز محدود است. با وجود مطالعات متعدد درباره نقش باکتری‌های محرک رشد گیاه در افزایش رشد و بهبود جذب عناصر غذایی، بیشتر این پژوهش‌ها بر عملکرد گیاه یا کاهش مصرف کودهای شیمیایی تمرکز داشته‌اند و اطلاعات محدودی درباره اثر هم‌زمان این باکتری‌ها بر تجمع نیترات، فعالیت آنزیم نیترات رداکتاز و کیفیت تغذیه‌ای اسفناج تحت شرایط کاهش مصرف کودهای NPK وجود دارد. همچنین، تا آن‌جا که بررسی منابع نشان می‌دهد، اثر *Phytobacter diazotrophicus* و *Pseudomonas putida*، به‌ویژه به صورت تلفیقی و در شرایط کاهش ۳۰ درصدی مصرف کود شیمیایی، تاکنون بررسی نشده است. از این‌رو، هدف پژوهش حاضر ارزیابی هم‌زمان اثر این دو باکتری، به صورت منفرد و تلفیقی، بر رشد، مقدار عناصر غذایی، تجمع نیترات و فعالیت آنزیم نیترات رداکتاز اسفناج در سطوح مختلف کود NPK است. بر این اساس، فرض شد که تلقیح تلفیقی این دو باکتری بتواند ضمن کاهش ۳۰ درصدی مصرف کود شیمیایی، عملکرد و کیفیت تغذیه‌ای اسفناج را حفظ یا بهبود داده و تجمع نیترات را در مقایسه با مصرف کامل کود کاهش دهد.

مواد و روش‌ها

تهیه باکتری‌های محرک رشد

باکتری‌های *Phytobacter diazotrophicus* و *Pseudomonas putida* که از برگ چغندر قند در دزفول جداسازی شده بودند از کلکسیون میکروبی دانشگاه شهید چمران اهواز تهیه شدند. یک تک کلنی از پلیت اصلی به محیط کشت مایع مغذی^۱ استریل انتقال یافت و در دمای ۲۸ درجه سلسیوس با سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه قرار گرفت. کدورت سوسپانسیون میکروبی بر اساس استاندارد مک‌فارلند تنظیم شد که معادل تقریبی 1×10^8 CFU ml⁻¹ در نظر گرفته شد. برخی ویژگی‌های محرک رشدی این باکتری‌ها شامل تثبیت نیتروژن (Döbereiner et al., 1972)، انحلال فسفات معدنی نامحلول (Pikovskaya, 1948)، تولید سیدروفور (Schwyn & Neilands, 1987) و ایندول استیک اسید (Bric et al., 1991) در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های محرک رشدی باکتری‌های مورد استفاده

Table 1- Some growth promotion traits of utilized bacteria

باکتری Bacterium	تولید سیدروفور Siderophore prooduction ($\mu\text{M DTPA equivalents}$)	ایندول استیک اسید Indole-3-acetic acid ($\mu\text{g ml}^{-1}$)	حل‌کنندگی فسفات Phosphate solubilization (mg L^{-1})	تثبیت نیتروژن Nitrogen fixation
<i>Pseudomonas putida</i>	33.3	2.2	598.1	+
<i>Phytobacter diazotrophicus</i>	1.12	8.36	290.35	+

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

Table 2- Some physical and chemical properties of used soil

ویژگی Property	واحد Unit	مقدار Amount
بافت Texture	-	لومی Loamy
EC	dS m^{-1}	2.4
pH	-	7.2
پتاسیم قابل دسترس Available K	mg kg^{-1}	189.2
فسفر قابل دسترس Available P	mg kg^{-1}	8.3
نیتروژن کل Total N	%	0.05
کربن آلی Organic Carbon	%	0.54

($\mu\text{g NO}_3^- \text{ g}^{-1} \text{ FW}$) گزارش شد.

اندازه‌گیری کلروفیل در بافت تازه برگ انجام شد. مقدار نیم گرم برگ را با ۱۰ میلی‌لیتر استن ۸۰ درصد به تدریج سائیده تا کلروفیل وارد محلول استن شود. محلول حاصل به مدت ۵ دقیقه در ۲۵۰۰ دور سانتریفیوژ گردید و سپس به یک میلی‌لیتر از عصاره رویی مقدار ۹ میلی‌لیتر استن ۸۰ درصد اضافه شد. مقدار کلروفیل a و b به ترتیب در طول موج‌های ۶۶۳ و ۶۴۵ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر قرائت شد؛ سپس مقدار کلروفیل کل طبق معادله‌های (۱)، (۲) و (۳) به دست آمد (Wellburn, 1994).

$$C_a (\mu\text{g/ml}) = (12.25A_{663} - 2.79A_{645}) \quad (1)$$

$$C_b = (21.50A_{645} - 5.10A_{663}) \quad (2)$$

$$\text{Chlorophyll}_{\text{total}} = \text{chlorophyll a} + \text{chlorophyll b} \quad (3)$$

وزن خشک اندام هوایی گیاه از سطح خاک جدا و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس در آون، خشک و سپس توسط ترازو توزین شد. فسفر در اندام هوایی بعد از هضم خشک نمونه‌ها به روش کالریمتری (رنگ زرد واناتات مولبیدات) با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۷۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. مقدار پتاسیم نیز به روش نشر

میزان جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۴۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (Peak-E-1000uv) قرائت شد. به منظور محاسبه مقدار نیتريت تولید شده، منحنی استاندارد با غلظت‌های مختلف سدیم نیتريت تهیه شد و تیمارهای رنگ‌سنجی مشابه نمونه‌ها انجام گرفت. فعالیت آنزیم نیترات رداکتاز به صورت ($\mu\text{mol NO}_2^- \text{ g}^{-1} \text{ FW h}^{-1}$) گزارش شد. برای اندازه‌گیری نیترات، مقدار ۰/۱ گرم از برگ تازه با استفاده از نیتروژن مایع منجمد و سپس با دستگاه سونیکاتور (MSE) به مدت یک دقیقه هوموژن شد. سپس مقدار یک میلی‌لیتر آب دیونیزه به نمونه اضافه شده و به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس جوشانده شد. نمونه به مدت ۱۰ دقیقه با ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد و ۰/۱ میلی‌لیتر از مایع رویی به لوله جدید منتقل گردید. سپس ۰/۴ میلی‌لیتر محلول ۵ درصد سالیسیلیک اسید به آن اضافه و به مدت ۲۰ دقیقه در ۲۴ درجه سلسیوس نگهداری شد. سود ۲ نرمال به آن اضافه شد تا pH در حدود ۱۲ تنظیم گردد. محلول به مدت ۲۰ تا ۳۰ دقیقه در دمای اتاق قرار گرفت. در نهایت جذب نوری در طول موج ۴۱۰ نانومتر با اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (Cataldo et al., 1975). منحنی استاندارد با استفاده از غلظت‌های مختلف نیترات پتاسیم تهیه گردید و غلظت نیترات به صورت

مصرف کود و مایه‌زنی باکتری بر میزان نیتروژن برگ معنی‌دار بود (جدول ۳). کاهش مصرف کود شیمیایی از ۱۰۰ درصد مقدار توصیه شده به ۷۰ درصد، موجب کاهش ۲۶ درصدی نیتروژن برگ در تیمار B1 (بدون مایه‌زنی) شد. مایه‌زنی باکتری‌های محرک رشد به خاک در هر دو تیمار کودی موجب افزایش نیتروژن برگ شد.

در میان تیمارهای کاربرد انفرادی باکتری، میزان نیتروژن برگ در تیمار حاوی *Pseudomonas putida* بیشتر از تیمارهای حاوی *Phytobacter diazotrophicus* بود. بیشترین مقدار نیتروژن برگ در تیمار مصرف کامل کود همراه با مایه‌زنی مخلوط دو باکتری مشاهده شد که ۶۲ درصد بیشتر از تیمار متناظر بدون مایه‌زنی بود. پس از آن، تیمار مصرف ۷۰ درصد مقدار توصیه شده کود همراه با مایه‌زنی مخلوط دو باکتری قرار داشت که ۹۱ درصد افزایش نسبت به تیمار متناظر بدون مایه‌زنی نشان داد (شکل ۲).

کاهش مقدار کود شیمیایی به ۷۰ درصد مقدار توصیه شده، موجب کاهش ۲۳/۶ درصدی مقدار فسفر برگ در تیمار بدون مایه‌زنی (B1) شد. مایه‌زنی باکتری‌های محرک رشد در هر دو سطح کودی، فسفر برگ را نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی افزایش داد. در میان تیمارهای تک‌سویه، *Pseudomonas putida* نسبت به *Phytobacter diazotrophicus* تأثیر بیشتری بر افزایش فسفر برگ داشت. بیشترین مقدار فسفر برگ در تیمار مصرف ۱۰۰ درصد مقدار توصیه شده کود همراه با مایه‌زنی مخلوط باکتری‌ها اندازه‌گیری شد که ۲۳ درصد بیشتر از تیمار متناظر بدون مایه‌زنی بود (شکل ۲ الف).

شعله‌ای و با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر (Sherwood 410) و مقدار آهن با جذب اتمی (GBC) اندازه‌گیری شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با نرم‌افزار Statistix نسخه ۹/۱ انجام و مقایسه مقادیر میانگین‌ها بوسیله آزمون توکی انجام و نمودارها با نرم‌افزار Excel رسم شدند.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس داده‌ها نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار اثر ساده و متقابل تلقیح باکتریایی و مصرف کود بر ویژگی‌های مورد مطالعه بود (جدول ۳).

نتایج نشان داد که اثر متقابل سطوح کود و مایه‌زنی باکتریایی بر وزن تر برگ اسفناج معنی‌دار بود. بیشترین وزن تر برگ در تیمارهای مصرف ۱۰۰ درصد مقدار توصیه شده کود و ۷۰ درصد آن، همراه با مایه‌زنی مخلوط دو باکتری به خاک بدست آمد که به ترتیب ۱/۷ و ۲/۲ برابر تیمارهای متناظر بدون مایه‌زنی بود (شکل ۱). تلقیح هر یک از باکتری‌ها نیز موجب افزایش وزن تر گیاه شد؛ این افزایش در تیمارهای حاوی *Pseudomonas putida* بیشتر از *Phytobacter diazotrophicus* بود. همچنین، در سطح ۷۰ درصد مقدار توصیه شده کود، مایه‌زنی باکتریایی وزن تر گیاه افزایش داد، به طوری که در تیمار مایه‌زنی همزمان دو باکتری با ۷۰ درصد کود تنها حدود ۳ درصد کمتر از تیمار متناظر با ۱۰۰ درصد کود بود. این نتیجه نشان می‌دهد که مایه‌زنی همزمان دو باکتری توانسته است کاهش ۳۰ درصدی مصرف کود را بدون افت قابل توجه وزن تر برگ جبران کند. اثر متقابل میزان

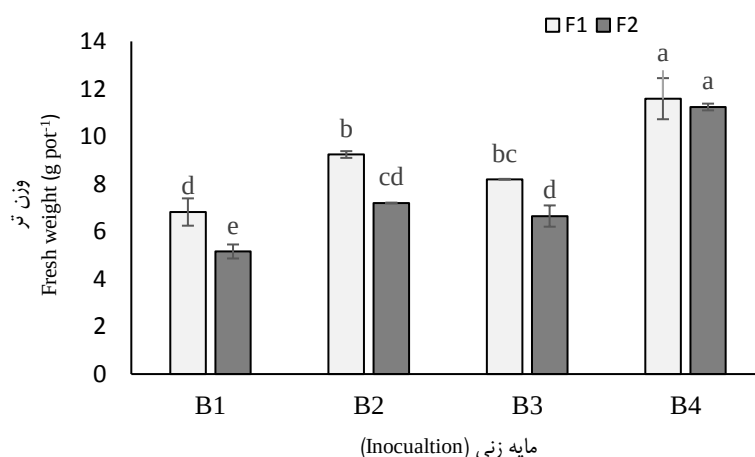
جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرات مایه‌زنی باکتری و مصرف کود بر برخی ویژگی‌های اسفناج

Table 3- ANOVA (mean squares) for the effects of bacterial inoculation and fertilizer application on some characteristics of spinach

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی Df	وزن تر Fresh weight	نیتروژن Nitrogen	فسفر Phosphorus	پتاسیم Potassium	آهن Iron	کلروفیل Chlorophyll	نیتрат Nitrate	نیترات رداکتاز Nitrate reductase
تلقیح باکتری Bacterial inoculation (I)	3	11.7**	149.8*	0.027*	15**	2059**	200.7**	6925153**	62.27**
سطح کود Fertilizer level (F)	1	31.6**	73.5**	0.056**	5.8**	1134**	384**	1843374**	54.63**
تلقیح باکتری × سطح کود Bacterial inoculation × Fertilizer level (I × F)	3	0.8**	1.31**	0.001*	0.62*	116.1**	61.2**	25413*	2.45*
خطا error	16	0.22	0.22	0.0002	0.10	16	13.9	5043	0.5
ضریب تغییرات C.V (%)	-	5.68	3.29	2.79	4.44	3.59	2.98	1.51	3.98

ns, ** و * 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 ۱- مقایسه میانگین اثر متقابل کود و مایه‌زنی باکتری بر وزن تر برگ

ستون‌های با حروف مشابه از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد با آزمون توکی اختلاف معنی‌داری با هم ندارند. تیمارها شامل F1: مصرف ۱۰۰ درصد کود، F2: ۷۰ درصد کود، B1: بدون مایه‌زنی، B2: *Phytobacter diazotrophicus*، B3: *Pseudomonas putida*، B4: مخلوط دو باکتری.

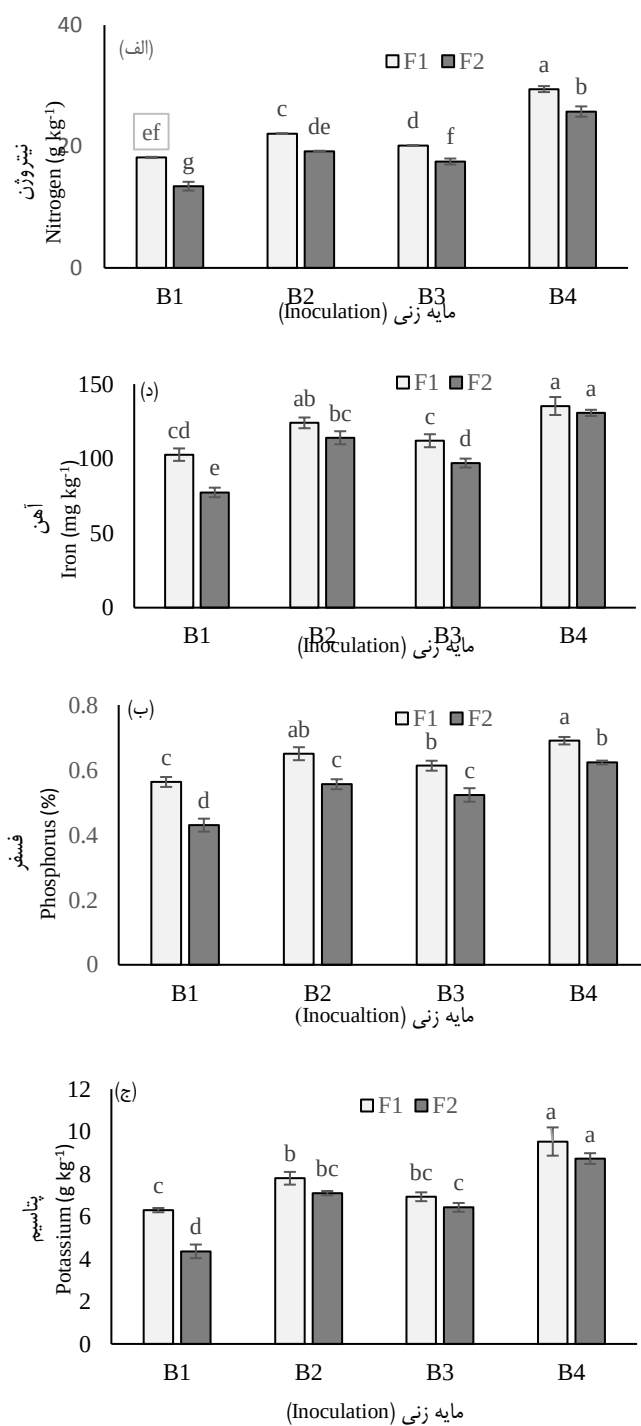
Figure 1- Mean comparison of the interaction effect of fertilizer and bacterial inoculation on leaf fresh weight

Numbers followed by same letters in each column are not significantly different according to the Tukey's HSD test at 5% probability level. Treatments: F1: use of 100% application of fertilizer, F2: 70% of fertilizer, B1: without inoculation, B2: *Phytobacter diazotrophicus*, B3: *Pseudomonas putida*, B4: mix of both bacteria.

افزایش نسبت به تیمار متناظر بدون مایه‌زنی نشان داد (شکل ۲د). مقدار کلروفیل برگ نیز به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمارهای آزمایشی قرار گرفت. کاهش مقدار کود به ۷۰ درصد مقدار توصیه‌شده، موجب کاهش ۱۵ درصدی مقدار کلروفیل کل برگ در تیمار بدون مایه‌زنی (B1) شد (شکل ۳الف). مایه‌زنی باکتری‌های محرک رشد در هر دو سطح کودی، کلروفیل برگ را نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی افزایش داد. بیشترین مقدار کلروفیل در تیمار ۱۰۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود همراه با مایه‌زنی مخلوط دو باکتری بدست آمد که ۳۴ درصد بیشتر از تیمار متناظر بدون مایه‌زنی بود. پس از آن، تیمار مصرف ۷۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود همراه با مایه‌زنی باکتری *Pseudomonas putida* و مخلوط دو باکتری قرار گرفتند که هر دو حدود ۴۸ درصد افزایش نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی نشان دادند (شکل ۳الف).

مقدار نیترات برگ اسفناج در تیمار مصرف ۱۰۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود بیشتر از تیمار ۷۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود بود. کاهش مقدار کود به ۷۰ درصد مقدار توصیه‌شده، موجب کاهش ۲۰ درصدی نیترات برگ در تیمار بدون مایه‌زنی (B1) شد. مایه‌زنی باکتری‌های محرک رشد در هر دو سطح کودی، نیترات برگ را نسبت به شرایط بدون مایه‌زنی باکتریایی کاهش داد و این کاهش در تیمارهای حاوی *Pseudomonas putida* بیشتر از *Phytobacter diazotrophicus* بود.

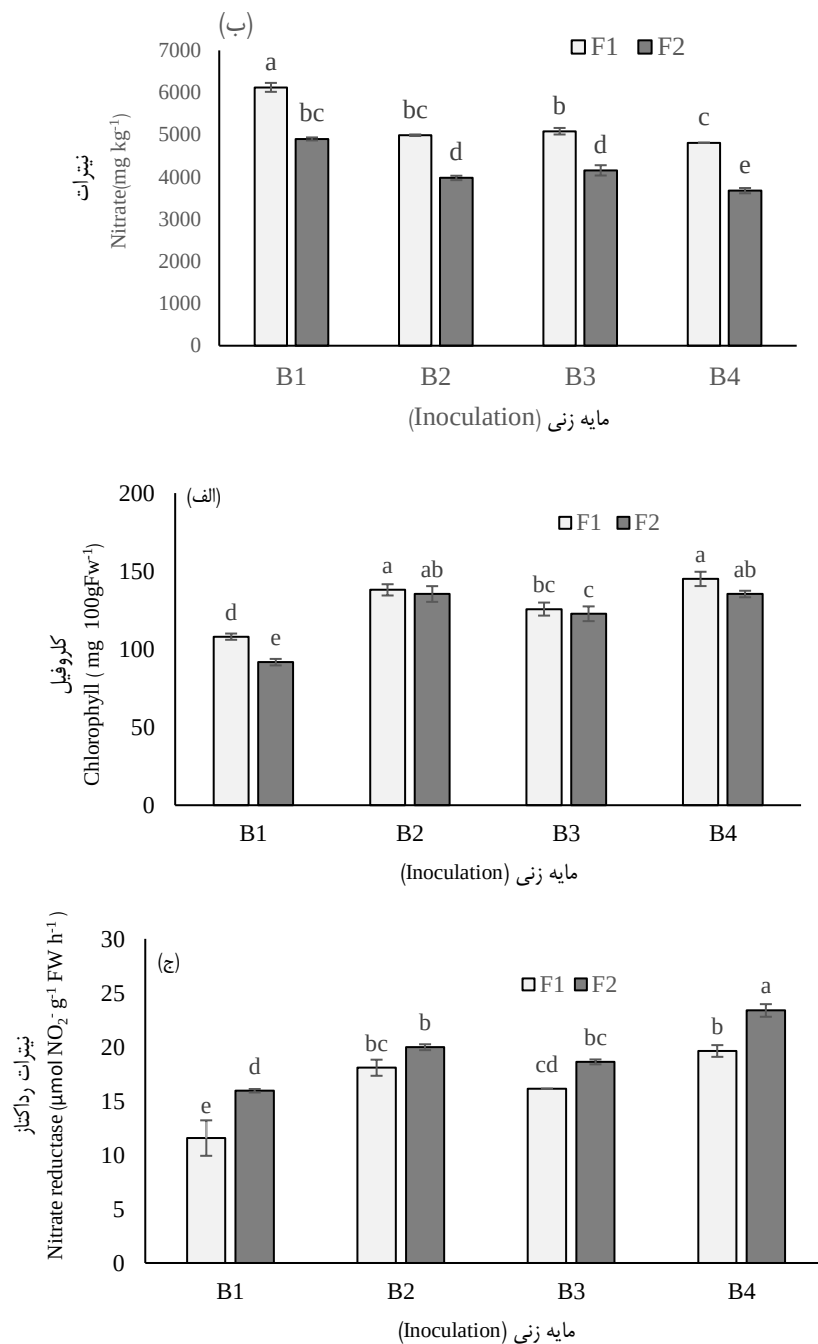
پس از آن، تیمار مصرف ۷۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود همراه با مایه‌زنی مخلوط باکتری‌ها قرار گرفت که ۴۵ درصد افزایش نسبت به تیمار متناظر بدون مایه‌زنی نشان داد (شکل ۲ب). مقدار پتاسیم برگ نیز تحت تأثیر تیمارها قرار گرفت. کاهش مقدار کود به ۷۰ درصد مقدار توصیه‌شده، موجب کاهش ۳۰/۸ درصدی غلظت پتاسیم برگ در تیمار بدون مایه‌زنی (B1) شد. مایه‌زنی باکتری‌های محرک رشد در هر دو سطح کودی، پتاسیم برگ را نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی باکتریایی افزایش داد. بیشترین مقدار پتاسیم برگ به‌ترتیب در تیمار مصرف ۱۰۰ درصد مقدار توصیه‌شده همراه با مایه‌زنی مخلوط دو باکتری مشاهده شد که ۵۱ درصد بیشتر از تیمار متناظر بدون مایه‌زنی بود. پس از آن، تیمار مصرف ۷۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود همراه با مایه‌زنی همزمان دو باکتری قرار گرفت که ۱۰۰ درصد افزایش نسبت به تیمار متناظر بدون مایه‌زنی نشان داد (شکل ۲ج). میزان آهن برگ نیز تحت تأثیر تیمارهای آزمایشی قرار گرفت (شکل ۲د). کاهش مقدار کود به ۷۰ درصد مقدار توصیه‌شده، موجب کاهش ۲۵ درصدی غلظت آهن برگ در تیمار بدون مایه‌زنی (B1) شد. مایه‌زنی باکتری‌های محرک رشد در هر دو سطح کودی، آهن برگ را نسبت به تیمارهای بدون مایه‌زنی افزایش داد و این افزایش در تیمارهای حاوی *Pseudomonas putida* بیشتر از *Phytobacter diazotrophicus* بود. بیشترین مقدار آهن برگ در تیمار مصرف ۱۰۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود همراه با مایه‌زنی همزمان دو باکتری اندازه‌گیری شد که ۳۲ درصد بیشتر از تیمار متناظر بدون مایه‌زنی بود. پس از آن، تیمار مصرف ۷۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود همراه با مایه‌زنی همزمان دو باکتری قرار گرفت که ۶۹ درصد



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل کود و مایه‌زنی باکتری بر محتوای عناصر غذایی برگ

ستون‌های با حروف مشابه از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد با آزمون توکی اختلاف معنی‌داری با هم ندارند. تیمارها شامل F1: مصرف ۱۰۰ درصد کود، F2: ۷۰ درصد کود، B1: بدون مایه‌زنی، B2: *Phytophthora diazotrophica*، B3: *Pseudomonas putida*، B4: مخلوط دو باکتری.

Figure 2- Mean comparison of the interaction effect of fertilizer and bacterial inoculation on leaf mineral nutrient content
Numbers followed by same letters in each column are not significantly different according to the Tukey's HSD test at 5% probability level. Treatments: F1: use of 100% application of fertilizer, F2: 70% of fertilizer, B1: without inoculation, B2: *Phytophthora diazotrophica*, B3: *Pseudomonas putida*, B4: mix of both bacteria.



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل کود و مایه زنی باکتری بر کلروفیل، مقدار نیترات و فعالیت نیترات ردکتاز برگ

ستون‌های با حروف مشابه از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد با آزمون توکی اختلاف معنی‌داری با هم ندارند. تیمارها شامل F1: مصرف ۱۰۰ درصد کود، F2: ۷۰ درصد کود، B1: بدون مایه‌زنی، B2: *Phytobacter diazotrophicus*، B3: *Pseudomonas putida*، B4: مخلوط دو باکتری.

Figure 3- Mean comparison of the interaction effect of fertilizer and bacterial inoculation on leaf chlorophyll, nitrate content, and nitrate reductase activity

Numbers followed by same letters in each column are not significantly different according to the Tukey's HSD test at 5% probability level. Treatments: F1: use of 100% application of fertilizer, F2: 70% of fertilizer, B1: without inoculation, B2: *Phytobacter diazotrophicus*, B3: *Pseudomonas putida*, B4: mix of both bacteria.

نشان دادند (شکل ۳). این نتایج نشان می‌دهد که کاهش مصرف کود شیمیایی همراه با مایه‌زنی باکتری‌های محرک رشد، به‌ویژه استفاده از مخلوط دو باکتری، موجب تحریک فعالیت آنزیم نیترات رداکتاز و احتمالاً افزایش کارایی احیای نیترات در گیاه اسفناج شده است.

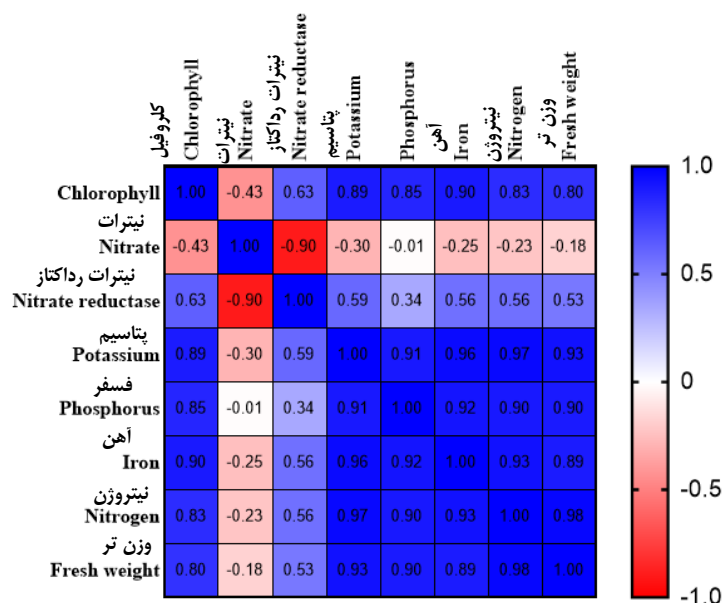
نتایج این مطالعه نشان داد که دو سطح مصرف کود شیمیایی اثر معنی‌داری بر وزن تر گیاه، غلظت عناصر غذایی و فعالیت نیترات رداکتاز داشتند. با کاهش میزان کود به ۷۰ درصد مقدار توصیه شده، مقدار ویژگی‌های ذکر شده کاهش یافت. اگرچه نیترات برای رشد گیاه مهم است، اما تجمع بیش از حد آن در سبزیجات برگ‌ی مانند اسفناج موجب کاهش ارزش تغذیه‌ای و ایجاد نگرانی‌های ایمنی غذایی می‌شود. باکتری‌های محرک رشد گیاه با افزایش کارایی مصرف نیتروژن و تنظیم فعالیت آنزیم نیترات رداکتاز می‌توانند از تجمع نیترات در برگ‌ها جلوگیری کنند.

کاهش مصرف کود نیتروژنی از ۱۰۰ به ۷۰ درصد مقدار توصیه شده در تمامی تیمارها موجب کاهش غلظت نیترات برگ اسفناج شد که نشان‌دهنده نقش مستقیم میزان نیتروژن مصرفی در تجمع نیترات است. همچنین، در هر دو سطح کود، بیشترین غلظت نیترات در تیمار بدون مایه‌زنی باکتری و کمترین مقدار در تیمار ۷۰ درصد مقدار توصیه شده کود همراه با مخلوط دو باکتری مشاهده شد. غلظت نیترات

اندازه‌گیری‌شده با حدود مجاز تعیین‌شده در Commission Regulation (EU) 2023/915 مقایسه شد.

بیشترین مقدار آن در تیمار مصرف ۱۰۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود و در شرایط بدون مایه‌زنی باکتری با مقدار 6123 mg kg^{-1} ثبت شد (شکل ۳ب)، در حالی که کمترین مقدار آن در تیمار ۷۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود همراه با مایه‌زنی مخلوط دو باکتری با مقدار mg kg^{-1} ۳۶۷۵ اندازه‌گیری شد. این تیمار در مقایسه با تیمار ۷۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود بدون مایه‌زنی باکتری، مقدار نیترات را ۲۵ درصد کاهش داد و نسبت به تیمار مصرف ۱۰۰ درصد کود بدون مایه‌زنی باکتری، ۴۰ درصد کاهش نشان داد (شکل ۳ب).

فعالیت آنزیم نیترات رداکتاز نیز به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمارهای آزمایشی قرار گرفت. فعالیت آنزیم نیترات رداکتاز به‌طور کلی در تیمار مصرف ۷۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود بیشتر از تیمار مصرف ۱۰۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود بود (شکل ۳ج). مایه‌زنی باکتری‌های محرک رشد در هر دو سطح کودی، فعالیت این آنزیم را نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی افزایش داد و این افزایش در تیمارهای حاوی *Pseudomonas putida* بیشتر از *Phytobacter diazotrophicus* بود. بیشترین فعالیت نیترات رداکتاز در تیمار مصرف ۷۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود همراه با مایه‌زنی مخلوط دو باکتری مشاهده شد که ۴۷ درصد بیشتر از تیمار متناظر بدون مایه‌زنی بود. پس از آن، تیمارهای مصرف ۷۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود همراه با مایه‌زنی *Pseudomonas putida* و مصرف ۱۰۰ درصد مقدار توصیه‌شده کود همراه با مایه‌زنی همزمان دو باکتری قرار گرفتند که به ترتیب ۲۵ و ۷۰ درصد افزایش نسبت به تیمار متناظر بدون مایه‌زنی



شکل ۴- همبستگی بین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده
Figure 4- Correlation between measured properties

بر اساس این مقررات، حداکثر مجاز نیترات در اسفناج، بسته به فصل برداشت و شرایط تولید، بین ۲۰۰۰ تا ۷۰۰۰ میلی گرم نیترات در کیلوگرم وزن تر متغیر است و مقدار مرجع برای اسفناج تازه ۳۵۰۰ میلی گرم نیترات در کیلوگرم وزن تر است. در پژوهش حاضر، غلظت نیترات در دامنه ۳۶۵۷ تا ۶۱۲۳ میلی گرم در کیلوگرم وزن تر قرار داشت. بنابراین، اگرچه تیمار ۷۰ درصد مقدار توصیه شده کود همراه با مخلوط دو باکتری کمترین غلظت نیترات را ایجاد کرد، این مقدار همچنان اندکی بالاتر از مقدار مرجع برای اسفناج تازه بود، اما در محدوده مجاز تعیین شده برای برخی شرایط تولید و فصل برداشت قرار داشت. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می دهد که تلفیق کاهش ۳۰ درصدی مصرف کود نیتروژنی با مایه زنی باکتری های محرک رشد، بدون حذف کامل کود شیمیایی، می تواند تجمع نیترات را به طور معنی داری کاهش داده و کیفیت و ایمنی اسفناج را بهبود بخشد. با این حال، برای تعمیم این یافته ها به شرایط تولید تجاری، انجام مطالعات مزرعه ای در فصول مختلف و تحت شرایط اقلیمی گوناگون، همراه با ارزیابی راهبردهای بهینه مدیریت نیتروژن، ضروری است.

نتایج این پژوهش نشان داد که بین مقدار نیترات برگ و فعالیت آنزیم نیترات رداکتاز همبستگی منفی وجود دارد (شکل ۴)؛ به گونه ای که افزایش فعالیت این آنزیم با کاهش غلظت نیترات همراه بود. بیشترین فعالیت نیترات رداکتاز در تیمار مصرف ۷۰ درصد توصیه شده کود همراه با مایه زنی مخلوط دو باکتری مشاهده شد که هم زمان کمترین غلظت نیترات را نیز داشت. در مقابل، تیمار مصرف ۱۰۰ درصد کود بدون مایه زنی باکتریایی، کمترین فعالیت نیترات رداکتاز و بیشترین غلظت نیترات را نشان داد. این نتیجه نشان می دهد که با افزایش فعالیت این آنزیم، نیترات احیا شده و از تجمع آن در بافت برگ جلوگیری می شود. بنابراین، به نظر می رسد افزایش فعالیت نیترات رداکتاز ناشی از مایه زنی با باکتری های محرک رشد، به ویژه در شرایط کاهش ۳۰ درصدی مصرف کود، یکی از سازوکارهای اصلی کاهش تجمع نیترات در برگ اسفناج در این پژوهش بوده است. همبستگی مثبت بین کلروفیل، آهن و فعالیت نیترات رداکتاز (شکل ۴) نشان می دهد که این صفات از طریق مسیرهای مشترک متابولیسم نیتروژن و فتوسنتز به یکدیگر مرتبط هستند. نیتروژن یکی از اجزای اصلی کلروفیل است؛ بنابراین، افزایش جذب و همانندسازی نیتروژن به طور مستقیم سنتز کلروفیل و ظرفیت فتوسنتزی گیاه را افزایش می دهد. از سوی دیگر، نیترات رداکتاز به عنوان یکی از مهم ترین آنزیم ها در مسیر احیای نیترات است و افزایش فعالیت آن موجب تسهیل تبدیل نیترات به ترکیبات آلی و کاهش تجمع نیترات در گیاه می شود. آهن نیز به عنوان یکی از عناصر ضروری در انتقال الکترون، سنتز کلروفیل و حفظ فعالیت آنزیم های دخیل در متابولیسم نیتروژن، از جمله نیترات رداکتاز، اهمیت دارد (Therby-Vale et al., 2022; Hong et al., 2022).

2025). از این رو، همبستگی مثبت بین آهن، کلروفیل و فعالیت نیترات رداکتاز در این پژوهش با نقش فیزیولوژیکی این عنصر در فتوسنتز و متابولیسم نیتروژن همخوانی دارد. همچنین پتاسیم، آهن و نیتروژن با کلروفیل و وزن تر گیاه همبستگی مثبت داشتند (شکل ۴)، که نشان می دهد بهبود تغذیه معدنی با افزایش رشد رویشی و ظرفیت فتوسنتزی اسفناج همراه بوده است.

باکتری های محرک رشد مورد استفاده توانستند ویژگی های اندازه گیری شده را بهبود بخشند و اثرات منفی کاهش مصرف کود شیمیایی را جبران کنند. باکتری های محرک رشد گیاه از طریق مجموعه ای از مکانیسم های مستقیم و غیرمستقیم شامل تثبیت زیستی نیتروژن، انحلال فسفات، تولید سیدروفور، سنتز فیتوهورمون هایی مانند اکسین، تعدیل هورمون اتیلن از طریق ACC دآمیناز و افزایش توسعه سیستم ریشه، موجب افزایش جذب عناصر غذایی و بهبود کارایی مصرف کود می شوند (Timofeeva et al., 2023; Sun et al., 2024). نتایج پژوهش حاضر با مطالعات پیشین روی اسفناج و سایر سبزی های برگی همخوانی دارد. گونه های مختلف *Pseudomonas* از طریق مکانیسم هایی مانند تولید سیدروفور، کلات کردن آهن و افزایش دسترسی گیاه به آهن (Khare et al., 2018)، افزایش طول ریشه و ساقه و تعداد برگ، افزایش وزن تر و خشک گیاه، بهبود غلظت عناصر ریزمغذی (Bolhassani et al., 2019) و همچنین بهبود تغذیه نیتروژن و فسفر (Çakmakçı et al., 2007) موجب ارتقای رشد اسفناج شده اند. اثرات مثبت این باکتری ها چه در حضور و چه در غیاب کودهای شیمیایی گزارش شده است. در مطالعه ای روی اسفناج، تلفیق *Pseudomonas putida* و *Pseudomonas fluorescens* موجب افزایش معنی دار فعالیت آنزیم نیترات رداکتاز، کاهش غلظت نیترات در اندام هوایی و افزایش غلظت آهن در ریشه و بخش هوایی گیاه شد. بیشترین فعالیت نیترات رداکتاز و کمترین تجمع نیترات در گیاهان تلقیح شده با *P. putida* گزارش شد که به توانایی این باکتری در تولید سیدروفور، افزایش فراهمی زیستی آهن و بهبود متابولیسم نیتروژن نسبت داده شد (Kalantari et al., 2022). در مطالعه ای دیگر، باکتری *Sphingomonas panaciterrae* موجب افزایش رشد، وزن تر و رنگدانه های فتوسنتزی اسفناج شد (Sultana et al., 2024). در کاهوی کشت هیدروپونیک، تلفیق *Pseudomonas fluorescens* موجب افزایش کارایی فتوسنتز، زیست توده، فعالیت نیترات رداکتاز و کاهش تجمع نیترات در برگ شد که نشان دهنده نقش این باکتری در بهبود متابولیسم نیتروژن بود (Oliveira et al., 2025a). همچنین، در مطالعه ای روی کاهو و آروگولا، تلفیق همزمان *P. fluorescens*، *Bacillus subtilis* و *Azospirillum brasilense*، وزن تر اندام هوایی، کلروفیل و جذب عناصر غذایی، فعالیت نیترات رداکتاز را افزایش و تجمع نیترات را کاهش داد که نشان دهنده نقش

و افزایش محتوای آهن در برگ‌ها برای بهبود ارزش تغذیه‌ای آن اهمیت دارد. استفاده از باکتری‌های محرک رشد در این پژوهش موجب افزایش آهن برگ شد که احتمالاً به دلیل توانایی تولید سیدروفور و حل کردن آهن نامحلول در خاک است. علاوه بر این، کاربرد باکتری‌ها ممکن است توانایی گیاه در جذب آب و عناصر غذایی را افزایش داده و در نهایت موجب بهبود رشد گیاه شده باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که کاهش مصرف کود شیمیایی، موجب کاهش وزن تر گیاه، غلظت عناصر غذایی و فعالیت آنزیم نیترات رداکتاز در اسفناج شد. با این حال، مایه‌زنی باکتری‌های محرک رشد توانست این کاهش را جبران کرده و بهبود قابل توجهی در رشد و کیفیت گیاه ایجاد کند. استفاده از باکتری‌های محرک رشد با افزایش جذب عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم و آهن، افزایش تولید کلروفیل و تقویت فعالیت نیترات رداکتاز، موجب کاهش تجمع نیترات در برگ‌ها شد؛ موضوعی که از نظر ایمنی غذایی و ارزش تغذیه‌ای اهمیت ویژه‌ای دارد. همبستگی مثبت بین وزن تر گیاه، کلروفیل و عناصر غذایی، و همچنین همبستگی منفی بین نیترات برگ و فعالیت نیترات رداکتاز، نقش مؤثر این باکتری‌ها را در بهبود متابولیسم نیتروژن و افزایش کارایی مصرف کود تأیید می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب مصرف ۷۰ درصد کود شیمیایی همراه با مایه‌زنی مخلوط دو باکتری، می‌تواند عملکرد و کیفیت اسفناج را در سطحی مشابه یا حتی بالاتر از مصرف کامل کود شیمیایی فراهم کند. بنابراین، استفاده از باکتری‌های محرک رشد گیاه به عنوان یک راهکار زیستی مؤثر، می‌تواند ضمن کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی، موجب بهبود کیفیت تغذیه‌ای اسفناج، کاهش تجمع نیترات و ارتقای پایداری تولید شود. با این حال، نتایج این پژوهش بر اساس یک آزمایش گلدانی در شرایط کنترل شده گلخانه‌ای به دست آمده است؛ از این رو، برای تعمیم این یافته‌ها به شرایط مزرعه، انجام مطالعات تکمیلی به منظور ارزیابی کارایی این تیمارها در شرایط واقعی کشت ضروری است.

سپاسگزاری

نویسندگان از دانشگاه شهید چمران اهواز (SCU.AS1404.248) تقدیر و تشکر می‌نمایند.

این باکتری‌ها در بهبود متابولیسم نیتروژن و کیفیت سبزی‌های برگی است (Oliveira et al., 2025b). باکتری‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر نیز دارای چندین ویژگی‌های محرک رشدی هستند (جدول ۱). اگرچه این باکتری‌ها در این پژوهش از برگ چغندر قند جداسازی شده بودند، مطالعات نشان داده‌اند که بسیاری از باکتری‌های اندوفیت و فیلوسفری، از انعطاف‌پذیری اکولوژیک برخوردار هستند و پس از تلقیح با بذر یا خاک، قادر به استقرار در ریزوسفر و برقراری برهم‌کنش با ریشه گیاه هستند. استفاده از جدایه‌های اندوفیت در تلقیح بذر یا خاک در مطالعات متعددی گزارش شده است (Compant et al., 2010; Thomas & Sekhar, 2016; Deng et al., 2023). این باکتری‌ها می‌توانند رشد گیاه را به‌طور مستقیم از طریق تسهیل جذب عناصر غذایی (نیتروژن، فسفر و مواد معدنی ضروری) یا تعدیل سطح هورمون‌های گیاهی، و به‌طور غیرمستقیم از طریق کاهش اثرات پاتوژن‌ها به عنوان عوامل کنترل زیستی بهبود بخشند (Glick, 2012). با این وجود، در پژوهش حاضر کلونیزاسیون ریشه و پایداری این سویه‌ها در خاک ارزیابی نشد؛ بنابراین، بررسی توانایی استقرار آن‌ها در ریزوسفر اسفناج با استفاده از روش‌های میکروبیولوژی یا مولکولی در مطالعات آینده ضروری است.

در سال‌های اخیر نشان داده شده است که کنسرسيوم‌های باکتریایی معمولاً نسبت به تلقیح تک‌سویه عملکرد بهتری دارند، زیرا هر سویه بخشی از نیازهای تغذیه‌ای و فیزیولوژیکی گیاه را تأمین کرده و اثرات هم‌افزایی میان آن‌ها موجب افزایش جذب عناصر، بهبود فتوسنتز و ارتقای متابولیسم نیتروژن می‌شود (Negi et al., 2024; Moretti et al., 2024). در پژوهش حاضر نیز به نظر می‌رسد برتری تیمار حاوی مخلوط *Pseudomonas putida* و *Phytobacter diazotrophicus* ناشی از همین اثر هم‌افزایی باشد. این باکتری‌ها احتمالاً با تولید سیدروفور و افزایش فراهمی زیستی آهن، جذب ریزمغذی‌ها را بهبود می‌بخشند، همچنین با مشارکت در تثبیت نیتروژن و بهبود چرخه نیتروژن، فراهمی این عنصر را برای گیاه افزایش می‌دهد. توانایی هر دو سویه در انحلال فسفات و تولید ترکیبات محرک رشد مانند IAA می‌تواند توسعه ریشه، جذب آب و عناصر غذایی و در نتیجه سنتز کلروفیل و فعالیت نیترات رداکتاز را افزایش دهد؛ موضوعی که با نتایج همبستگی‌های مشاهده‌شده در شکل ۴ نیز همخوانی دارد. بنابراین، افزایش وزن تر گیاه احتمالاً ناشی از اثرات تلفیقی تولید IAA، جذب بهتر عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن، فسفر و آهن، و همچنین افزایش سنتز رنگدانه‌های فتوسنتزی است. اسفناج منبع غنی آهن است

References

1. Aisha, H.A., Hafez, M.M., Mahmoud, A.R., & Shafeek, M.R. (2013). Effect of bio and chemical fertilizers on growth, yield and chemical properties of spinach plant (*Spinacia oleracea* L.). *Middle East Journal of Agriculture Research*, 2(1), 16-20.
2. Bhattacharyya, P.N., & Jha, D.K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in

- agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(4), 1327-1350. <https://doi.org/10.1007/s11274-011-0979-9>
3. Bian, Z., Wang, Y., Zhang, X., Li, T., Grundy, S., Yang, Q., & Cheng, R. (2020). A review of environment effects on nitrate accumulation in leafy vegetables grown in controlled environments. *Foods*, 9(6), 732. <https://doi.org/10.3390/foods9060732>
4. Bolhassani, Z., Ronaghi, A.M., Ghasemi, R., & Zarei, M. (2019). Influence of rice-husk derived biochar and growth promoting rhizobacteria on the yield and chemical composition of spinach in soil under salinity stress. *Iranian Journal of Soil Research*, 33(3), 335-348. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijsr.2019.122566.380>
5. Bric, J.M., Bostock, R.M., & Silverstone, S.E. (1991). Rapid in situ assay for indoleacetic acid production by bacteria immobilized on a nitrocellulose membrane. *Applied and Environmental Microbiology*, 57(2), 535-538. <https://doi.org/10.1128/aem.57.2.535-538.1991>
6. Çakmakçı, R., Erat, M., Erdoğan, Ü., & Dönmez, M.F. (2007). The influence of plant growth-promoting rhizobacteria on growth and enzyme activities in wheat and spinach plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 170(2), 288-295. <https://doi.org/10.1002/jpln.200625105>
7. Cataldo, D.A., Haroon, M., Schrader, L.E., & Youngs, V.L. (1975). Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 6(1), 71-80. <https://doi.org/10.1080/00103627509366547>
8. Compant, S., Clément, C., & Sessitsch, A. (2010). Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(5), 669-678. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.11.024>
9. Costa-Gutierrez, S.B., Lami, M.J., Caram-Di Santo, M.C., Zenoff, A.M., Vincent, P.A., Molina-Henares, M.A., Espinosa-Urgel, M., & de Cristóbal, R.E. (2020). Plant growth promotion by *Pseudomonas putida* KT2440 under saline stress: role of eptA. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(10), 4577-4592. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10516-z>
10. Custic, M., Poljak, M., & Cosic, T. (1994). Nitrate content in leafy vegetables as related to nitrogen fertilization in Croatia. *Acta Horticulturae*, 371, 407-412. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1994.371.54>
11. Hosseini Darani, F., Zeinali, H., Shirani Rad, A.H., Khourgami, A., & Nasrollahi, H. (2013). Effect of planting date and nitrogen fertilizer on two varieties (inner and outer) of spinach. *Annals of Biological Research*, 4, 56-59.
12. De la Vega-Camarillo, E., Sotelo-Aguilar, J., Rios-Galicia, B., Mercado-Flores, Y., Arteaga-Garibay, R., Villa-Tanaca, L., & Hernández-Rodríguez, C. (2023). Promotion of the growth and yield of *Zea mays* by synthetic microbial communities from Jala maize. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1167839. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1167839>
13. Deng, B., Wu, L., Xiao, H., & Cheng, Q. (2023). Characterization of *Pseudomonas* sp. En3, an endophytic bacterium from poplar leaf endosphere with plant growth-promoting properties. *Forests*, 14(11), 2203. <https://doi.org/10.3390/f14112203>
14. Döbereiner, J., Day, J.M., & Dart, P.J. (1972). Nitrogenase activity in the rhizosphere of sugarcane and some other tropical grasses. *Plant and Soil*, 37, 191-196.
15. European Commission. (2023). *Commission Regulation (EU) 2023/915 of 25 April 2023 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing Regulation (EC) No 1881/2006*. *Official Journal of the European Union*, L 119, 103-157.
16. Fischer, M., Falke, D., Pawlik, T., & Sawers, R.G. (2014). Oxygen-dependent control of respiratory nitrate reduction in mycelium of *Streptomyces coelicolor* A3 (2). *Journal of Bacteriology*, 196(23), 4152-4162. <https://doi.org/10.1128/JB.02202-14>
17. Glick, B.R. (2012). Plant growth- promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012(1), 963401. <https://doi.org/10.6064/2012/963401>
18. Gupta, P.K. (2004). *Soil, Plant, Water and Fertilizer Analysis*. Agrobios (India), 438 p.
19. Hong, Y., Liu, R., Xiang, W., Lei, P., & Fang, X. (2025). Emergent plants improve nitrogen uptake rates by regulating the activity of nitrogen assimilation enzymes. *Plants*, 14(10), 1484. <https://doi.org/10.3390/plants14101484>
20. Jaworski, E.G. (1971). Nitrate reductase assay in intact plant tissues. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 43(6), 1274-1279. [https://doi.org/10.1016/S0006-291X\(71\)80010-4](https://doi.org/10.1016/S0006-291X(71)80010-4)
21. Jia, W., Hong, L., Xu, X., Hong, C., Zhu, W., Zhu, F., & Yao, Y. (2026). Divergent defense strategies induced by *Variovorax soli* and *Microbacterium phyllosphaerae*: benefits for strawberry growth and powdery mildew resistance. *Horticulturae*, 12(2), 225. <https://doi.org/10.3390/horticulturae12020225>
22. Kalantari, A., Aliasgharzad, N., & Najafi, N. (2022). Nitrate reductase activity, iron and nitrate concentrations in spinach inoculated with two species of *Pseudomonas* under different nitrogen levels. *Water and Soil Science*, 32(2), 25-41. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/ws.2021.29495.2173>
23. Khare, A., More, H., Madliya, S., & Patil, V.D. (2018). Biofortification of spinach (*Spinacia oleracea*) with plant growth promoting rhizobacteria-*Pseudomonas fluorescens*. *International Journal of Emerging Technologies and*

- Innovative Research*, 5(8), 669-675.
24. Koh, E., Charoenprasert, S., & Mitchell, A.E. (2012). Effect of organic and conventional cropping systems on ascorbic acid, vitamin C, flavonoids, nitrate, and oxalate in 27 varieties of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(12), 3144-3150. <https://doi.org/10.1021/jf300051f>
25. Moretti, L.G., Crusciol, C.A.C., Leite, M.F.A., Momesso, L., Bossolani, J.W., Costa, O.Y.A., Hungria, M., & Kuramae, E.E. (2024). Diverse bacterial consortia: key drivers of rhizosoil fertility modulating microbiome functions, plant physiology, nutrition, and soybean grain yield. *Environmental Microbiome*, 19(1), 50. <https://doi.org/10.1186/s40793-024-00595-0>
26. Negi, R., Sharma, B., Jan, T., Kaur, T., Chowdhury, S., Kapoor, M., Singh, S., Kumar, A., Rai, A.K., Rustaqi, S., Shreaz, Sh., Kour, D., Ahmed, N., Kumar, K., & Yadav, A.N. (2024). Microbial consortia: promising tool as plant bioinoculants for agricultural sustainability. *Current Microbiology*, 81(8), 222. <https://doi.org/10.1007/s00284-024-03755-0>
27. Nunez de Gonzalez, M.T., Osburn, W.N., Hardin, M.D., Longnecker, M., Garg, H.K., Bryan, N.S., & Keeton, J.T. (2015). A survey of nitrate and nitrite concentrations in conventional and organic- labeled raw vegetables at retail. *Journal of Food Science*, 80(5), C942-C949. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12858>
28. Oliveira, C.E.D.S., Gato, I.M.B., Jalal, A., Girardi, V.D.A.M., Oliveira, J.R., Tamburi, K.V., Caetano, G.C., Oliveira, R.M., Aguilar, J.V., de Camargos, L.S., & Teixeira Filho, M.C.M. (2025a). *Pseudomonas fluorescens* rates increase nitrate reductase activity and reduce shoot nitrate accumulation in hydroponic lettuce. *Journal of Plant Nutrition*, 48(2), 208-221. <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2399289>
29. Oliveira, C.E.D.S., Sena Oliveira, T.J.S., Jalal, A., Fernandes, G.C., Bastos, A.D.C., da Silva, M.R., Sant'Ana, G.R., Aguilar, J.V., de Camargos, L.S., & Teixeira Filho, M.C.M. (2025b). Inoculation and co-inoculation of lettuce and arugula hydroponically influence nitrogen metabolism, plant growth, nutrient acquisition and photosynthesis. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1547821. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1547821>
30. Patel, V.K., Vikram, B., Sikarwar, P.S., & Sengupta, J. (2021). Effect of different levels of nitrogen and phosphorus on growth and yield of spinach (*Spinacea oleracea* L.) cv. all green. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 10(1), 2229-2231.
31. Pikovskaya, R.I. (1948). Mobilization of phosphorus in soil in connection with vital activity of some microbial species. *Mikrobiologiya*, 17, 362-370.
32. Safdar, H., Jamil, M., Hussain, A., Albalawi, B.F.A., Ditta, A., Dar, A., Aimen, A., Ahmad, H.T., Nazir, Q., & Ahmad, M. (2022). The effect of different carrier materials on the growth and yield of spinach under pot and field experimental conditions. *Sustainability*, 14(19), 12255. <https://doi.org/10.3390/su141912255>
33. Saharan, B.S., & Nehra, V. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria: a critical review. *Life Sciences and Medicine Research*, Article LSMR-21.
34. Salha, Y., Sudalaimuthasari, N., Kundu, B., AlMaskari, R.S., Alkaabi, A.S., Hazzouri, K.M., Abuqamar, S.F., El-Tarabily, K.A., & Amiri, K.M. (2020). Complete genome sequence of *Phytobacter diazotrophicus* strain UAEU22, a plant growth-promoting bacterium isolated from the date palm rhizosphere. *Microbiology Resource Announcements*, 9(25), e00499-20. <https://doi.org/10.1128/MRA.00499-20>
35. Santamaria, P. (2006). Nitrate in vegetables: toxicity, content, intake and EC regulation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(1), 10-17. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2351>
36. Schwyn, B., & Neilands, J.B. (1987). Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores. *Analytical Biochemistry*, 160(1), 47-56. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(87\)90612-9](https://doi.org/10.1016/0003-2697(87)90612-9)
37. Singh, N., & Singh, H. (2020). Impact of nitrogen and phosphorus on growth and seed yield of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Asian Journal of Horticulture*, 15(1), 1-3. <https://doi.org/10.15740/HAS/TAJH/15.1/1-3>
38. Purnima, & Singh, P. (2023). Growth effects of *Pseudomonas*, a plant growth-promoting rhizobacteria on spinach (*Spinacia oleracea* L.)-a review. *Current Agriculture Research Journal*, 11(1), 63-68. <https://doi.org/10.12944/CARJ.11.1.05>
39. Sultana, R., Islam, S.M.N., Sriti, N., Ahmed, M., Shuvo, S.B., Rahman, M.H., & Jashim, A.I.I. (2024). *Sphingomonas panaciterrae* PB20 increases growth, photosynthetic pigments, antioxidants, and mineral nutrient contents in spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Heliyon*, 10(3), e25596. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25596>
40. Sun, W., Shahrajabian, M.H., & Soleymani, A. (2024). The roles of plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR)-based biostimulants for agricultural production systems. *Plants*, 13(5), 613. <https://doi.org/10.3390/plants13050613>
41. Therby-Vale, R., Lacombe, B., Rhee, S.Y., Nussaume, L., & Rouached, H. (2022). Mineral nutrient signaling controls photosynthesis: focus on iron deficiency-induced chlorosis. *Trends in Plant Science*, 27(5), 502-509. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.11.005>
42. Thomas, P., & Sekhar, A.C. (2016). Effects due to rhizospheric soil application of an antagonistic bacterial endophyte on native bacterial community and its survival in soil: a case study with *Pseudomonas aeruginosa* from banana. *Frontiers in Microbiology*, 7, 493. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00493>
43. Timofeeva, A.M., Galyamova, M.R., & Sedykh, S.E. (2023). Plant growth-promoting soil bacteria: nitrogen

- fixation, phosphate solubilization, siderophore production, and other biological activities. *Plants*, 12(24), 4074. <https://doi.org/10.3390/plants12244074>
44. Wellburn, A.R. (1994). The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *Journal of Plant Physiology*, 144(3), 307-313. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)
45. Zaman, Q.U., Hamid, F.S., Islam, S.U., Ahmad, F., & Ahmad, N. (2018). Impact of various levels of nitrogen and phosphorus on growth and yield of spinach (*Spinacea oleracea* L.) under conditions of Mansehra (Pakistan). *Open Academic Journal of Advanced Science and Technology*, 2(1), 5-8. <https://doi.org/10.33094/5.2017.2018.21.5.8>

Comparison of the Performance of Neuro-fuzzy, Gene Expression Programming and Random Forest Models in Estimating Soil Penetration Resistance

H. Ali Abdoraza¹, Sh. Asghari^{1*}, M. Hasanpour Kashani², H. Shahab Arkhazloo¹

1- Department of Soil Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

(*- Corresponding Author Email: shasghari@uma.ac.ir)

2- Water Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received: 09 June 2026

Revised: 15 July 2026

Accepted: 21 July 2026

Available Online: 21 July 2026

How to cite this article:

Ali Abdoraza, H., Asghari, Sh., Hasanpour Kashani, M., & Shahab Arkhazloo, H. (2026). Comparison of the performance of neuro-fuzzy, gene expression programming and random forest models in estimating soil penetration resistance. *Journal of Soil and Water*, 40(2), 227-244. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jsw.2026.99264.1555>

Introduction

Soil compaction is a significant component that has a detrimental impact on soil structure, inhibits plant development, lowers water penetration rate, diminishes crop production, and raises machine (e.g., tractors, cultivators, etc.) usage costs. In general, compaction is the result of applied pressure that results in a rise in bulk density or decrease in soil porosity. One of the most used indices for the investigation and evaluation of soil compaction is based on penetration resistance (PR) of the soil. However, identifying soil compaction by the records of soil penetrometer equipment in the field is time-consuming, expensive, and may produce unreliable results due to instrumental errors; thus, it is useful to apply different intelligent models to predict PR through easily accessible and low-cost soil parameters. The aim of this study was to compare the performance of three intelligent models, namely neuro-fuzzy (NF), gene expression programming (GEP), and random forest (RF), in estimating PR from readily available soil variables.

Materials and methods

Disturbed and undisturbed soil samples (n=105) were collected from 0-10 cm depth of agricultural lands in Ardabil plain, Iran. The values of sand, silt, clay, CaCO₃, bulk (BD) and particle (PD) density, organic carbon (OC), field water content (FWC) and saturated water content were measured in the soil samples in the laboratory according to the standard methods. Mean geometric diameter (d_g) and geometric standard deviation (σ_g) of soil particles were calculated from sand, silt and clay percentages. Total porosity (n) was computed using BD and PD data. The penetration resistance (PR) of the soil was obtained in the field using cone penetrometer (analog model) with 5 replicates. Data were randomly divided in to two sets: 78 data points for training and 27 for testing the models. Fifteen different combinations of readily available soil variables were selected as inputs for the neuro-fuzzy (NF), gene expression programming (GEP), and random forest (RF) models to estimate PR. The triangular, sigmoid, trapezoid, gaussian and bell shape membership functions in the input layer and constant membership function in the output layer, were applied in the neuro-fuzzy (NF) modeling using MATLAB software through a trial-and-error method. A set of optimal parameters was chosen before developing a best GEP model in the Gene Xpro Tools 4.0 software. The number of chromosomes and genes, head size and linking function were selected by the trial and error method, and they are 30, 3, 8, and +, respectively. The rates of genetic operators were chosen according to the literature studies. Weka software was used for planning random forest (RF) models. The accuracy of NF, GEP and RF models in estimating PR was evaluated by coefficient of determination (R^2), normalized root mean square error (NRMSE), mean error (ME) and Nash-Sutcliffe coefficient (NS) statistics.



Authors retain the copyright. 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.2026.99264.1555>

Results and discussion

The values of sand (26.26 to 87.43%), silt (5.99 to 67.18%), clay (3.99 to 17.34%), OC (0.30 to 2.41%), FWC (4.56 to 33.18%), BD (1.02 to 1.63 g cm⁻³) and PR (1.10 to 6.60 MPa) indicated good variations in the soils of the studied area. Significant correlations were found between PR and FWC ($r = -0.57^{**}$), sand ($r = -0.21^*$), OC ($r = -0.47^{**}$) and BD ($r = 0.66^{**}$). Previous researchers also reported a negative and significant correlation between PR and FWC and a positive and significant correlation between PR and BD. The results of NF, GEP and RF models showed that the most suitable variables to predict PR were field water content (FWC), sand, bulk density (BD), total porosity and mean geometric diameter (d_g) of soil particles. Values of coefficient of determination (R^2), normalized root mean square error (NRMSE), mean error (ME), and Nash-Sutcliffe coefficient (NS) were calculated for the best models based on the test data as follows: 0.50, 0.19, 0.03 MPa, 0.51 for NF; 0.51, 0.20, 0.13 MPa, 0.48 for GEP; and 0.58, 0.20, 0.31 MPa, 0.50 for RF.

Conclusion

The results showed that according to the lowest values of normalized root mean square error (NRMSE) and the highest values of Nash-Sutcliffe coefficient (NS), the accuracy of the neuro-fuzzy (NF) model to estimate soil PR was higher than that of the gene expression programming (GEP) and random forest (RF) models in this study; The input variables of the best NF model in estimating soil penetration resistance (PR) were field water content (FWC), sand and bulk density (BD).

Keywords: Agricultural lands, Intelligent models, Readily available parameters, Soil penetration resistance

مقایسه عملکرد مدل‌های نیرو فازی، برنامه‌ریزی بیان ژن و جنگل تصادفی در برآورد مقاومت فروروی خاک

حسین علی عبد الرضا^۱ - شکراله اصغری^{۱*} - مهسا حسنیور کاشانی^۲ - حسین شهاب آرخازلو^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۳۰

چکیده

مقاومت فروروی (PR) خاک یکی از ویژگی‌های کلیدی و مهم در ارزیابی میزان فشردگی خاک در برابر تردد ادوات کشاورزی در اراضی زراعی به شمار می‌رود. اندازه‌گیری مستقیم PR در خاک وقت‌گیر و پرهزینه بوده و به دلیل خطای ابزاری ممکن است چندان قابل اعتماد نباشد. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی و مقایسه عملکرد سه مدل هوشمند نروفازی (NF)، برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و جنگل تصادفی (RF) در برآورد PR از روی ویژگی‌های زودیافت خاک می‌باشد. برای این منظور، داده‌های مربوط به ۱۰۵ نمونه خاک زراعی دشت اردبیل شامل رطوبت خاک مزرعه، رطوبت اشباع، شن، سیلت، رس، میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات، جرم مخصوص ظاهری و حقیقی، تخلخل کل، کربن آلی، آهک و PR به کار گرفته شد. برای آموزش مدل‌ها از ۷۸ داده و برای آزمون مدل‌ها از ۲۷ داده استفاده گردید. پانزده ترکیب متفاوت از متغیرهای زودیافت خاک به عنوان ورودی مدل‌های NF، GEP و RF برای برآورد PR انتخاب شد. رطوبت خاک مزرعه به عنوان یک متغیر سهل الوصول و زودیافت در بهترین مدل NF، GEP و RF برای برآورد PR خاک مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطا (ME) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) براساس داده‌های آزمون برای ۰/۱۹، ۰/۵۰، ۰/۰۳ MPa و ۰/۵۱ و ۰/۵۱ و ۰/۲۰، ۰/۱۳ MPa و ۰/۴۸ و ۰/۵۸، ۰/۲۰، ۰/۳۱ MPa و ۰/۵۰ به ترتیب برای بهترین مدل NF، GEP و RF در برآورد PR تعیین گردید. نتایج نشان داد که مدل NF با سه متغیر ورودی شامل جرم مخصوص ظاهری، شن و رطوبت خاک مزرعه در مقایسه با دو مدل هوشمند دیگر (GEP و RF) به دلیل داشتن NRMSE پایین و NS بالا توانست مقاومت فروروی خاک را با دقت نسبتاً بالایی در اراضی زراعی دشت اردبیل برآورد نماید.

واژه‌های کلیدی: اراضی زراعی، مقاومت خاک، مدل‌های هوشمند، ویژگی‌های زودیافت

مقدمه

روش قابل اعتمادی برای تشخیص علل اصلی فشردگی خاک، به ویژه در خاک‌های در معرض رطوبت، وجود ندارد (Elaoud et al., 2023). مقاومت فروروی^۳ (PR) خاک یکی از شاخص‌های اصلی فشردگی محسوب می‌شود که مقاومت مکانیکی خاک را در برابر نفوذ هوا، آب و ریشه در خاک نشان می‌دهد؛ اگر تخلخل تهویه‌ای خاک به زیر ۱۰ درصد کاهش یابد و یا مقاومت فروروی (PR) خاک به بالای ۲

بررسی و ارزیابی میزان فشردگی خاک پس از عبور ادوات کشاورزی (تراکتور، کولتیواتور و...) به عنوان یک راه حل پیشگیرانه برای مراقبت از خاک‌های کشاورزی در برابر تخریب و نیز حفاظت از کشاورزی پایدار در نظر گرفته می‌شود. در واقع، در حال حاضر هیچ

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
(*) نویسنده مسئول: Email: shasghari@uma.ac.ir

۲- گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

مگاپاسکال افزایش یابد رشد و گسترش ریشه در خاک متوقف می‌گردد (Warrick, 2002). دشت اردبیل یکی از قطب‌های تولید سیب‌زمینی در ایران به شمار می‌رود بنابراین اطلاع از وضعیت فشردگی خاک‌های زراعی دشت اردبیل و ارائه راهکار مناسب برای مدیریت این مساله ضروری به نظر می‌رسد.

اندازه‌گیری مستقیم مقاومت فروروی خاک به دلیل تغییرات مکانی و زمانی بسیار بالای آن کاری بسیار طاقت‌فرسا، وقت‌گیر و پرهزینه می‌باشد لذا اخیراً محققان به برآورد این ویژگی دیرپافت خاک از روی ویژگی‌های زودپافت و سهل‌الوصول خاک (مانند شن، سیلت، رس، کربن آلی، جرم مخصوص ظاهری و رطوبت خاک مزرعه) روی آورده اند. برای این منظور لازم است توابع انتقالی^۱ (PTF) خاک ایجاد گردد تا مقاومت فروروی خاک را به عنوان یک متغیر دیرپافت به متغیرهای زودپافت خاک مرتبط سازد. توابع انتقالی رگرسیونی چندگانه خطی^۲ (MLR) و غیر خطی متعددی برای برآورد مقاومت فروروی خاک توسط محققان مختلف مانند بیات و همکاران (Bayat et al., 2008) و شیخ‌زاده و همکاران (Sheykhzadeh et al., 2016) ارائه گردیده است همچنین در دهه‌های اخیر، استفاده از توابع انتقالی خاک مبتنی بر مدل‌های هوشمند مانند شبکه عصبی مصنوعی^۳ (ANN)، نرو فازی^۴ (NF)، برنامه‌ریزی بیان ژن^۵ (GEP) و جنگل تصادفی^۶ (RF) برای برآورد متغیرهای دیرپافت خاک رایج گردیده است.

بیات و همکاران (Bayat et al., 2008) از توابع انتقالی رگرسیون خطی و غیرخطی و نیز مدل شبکه عصبی مصنوعی برای برآورد مقاومت فروروی در خاک‌های منتخب از دو منطقه در ایران شامل مراغه و همدان استفاده کردند. نتایج نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی ($R^2=0.85$) در مقایسه با توابع رگرسیونی ($R^2=0.70$) دارای دقت بالا و خطای پایین در برآورد مقاومت فروروی خاک بود. آن‌ها گزارش نمودند مدل شبکه عصبی مصنوعی در مقایسه با توابع رگرسیونی قادر است مقاومت فروروی خاک را از روی متغیرهای رطوبت وزنی، تخلخل کل، درجه اشباع نسبی (نسبت رطوبت اشباع به تخلخل کل) با دقت بالایی برآورد نماید. نتایج پژوهش سانتوس و همکاران (Santos et al., 2011) نشان دادند مقاومت فروروی خاک رابطه همبستگی مثبت و معنی‌دار با جرم مخصوص ظاهری خاک و رابطه همبستگی منفی و معنی‌دار با رطوبت وزنی خاک دارد. همچنین آن‌ها گزارش کردند توابع رگرسیونی دارای دقت کم ($R^2=0.92$) و خطای زیاد ($RMSE = 0.95 \text{ MPa}$) نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی ($R^2=0.98$ و $RMSE = 0.08 \text{ MPa}$) در برآورد مقاومت فروروی

خاک بودند. نتایج مطالعه شیخ‌زاده و همکاران (Sheykhzadeh et al., 2016) در دشت اردبیل نشان داد که مدل ANN در مقایسه با مدل MLR دارای دقت بالاتری در برآورد PR خاک بود و براساس نتایج آنالیز حساسیت، متغیرهای انحراف معیار هندسی قطر ذرات، جرم مخصوص ظاهری، رطوبت خاک مزرعه و سیلت به ترتیب بیشترین تأثیر را در برآورد PR خاک توسط بهترین مدل ANN از خود نشان دادند. اخیراً از سایر روش‌های هوشمند مانند مدل نرو فازی (NF)، مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و مدل جنگل تصادفی (RF) نیز برای برآورد مقاومت فروروی (PR) از روی ویژگی‌های زودپافت خاک استفاده شده است؛ حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2018) از الگوریتم‌های آماری، سیستم‌های استنتاج تطبیقی عصبی-فازی (NF)، شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم‌های استنتاج فازی (FIS) برای پیش‌بینی مقاومت فروروی خاک استفاده کردند و آن‌ها را با مدل‌های آماری سنتی مانند رگرسیون خطی چندگانه (MLR) مقایسه کردند. برای دستیابی به این هدف، جرم مخصوص ظاهری و رطوبت حجمی خاک (به عنوان متغیرهای ورودی مدل) و مقاومت فروروی خاک (به عنوان متغیر دیرپافت) در ۲۰۰ نمونه خاک برداشته شده از عمق ۰ تا ۲۵ سانتی‌متری مزرعه دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که روش‌های هوشمند ابزار مناسبی برای به حداقل رساندن عدم قطعیت‌ها در پروژه‌های مهندسی خاک هستند. مدل NF توانست مقاومت فروروی خاک را با دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها با $R^2 = 0.93$ و $RMSE = 299.41$ برآورد نماید. الایود و همکاران (Elaoud et al., 2023) از مدل ANN برای برآورد مقاومت فروروی خاک در کشور تونس استفاده کردند. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر با ۰/۵۱ مگاپاسکال نشان داد که برآوردهای حاصل از مدل‌های ANN با داده‌های PR اندازه‌گیری شده میدانی مطابقت دارند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مدل‌های ANN توسعه‌یافته به طور مؤثر می‌توانند برای پیش‌بینی‌های دقیق‌تر در مورد فشردگی خاک در شرایط رطوبتی مختلف استفاده شوند. این کار به کشاورزان کمک می‌کند تا استفاده از ماشین را بهینه کنند و از این‌رو تولید را افزایش داده و بازده را با حداقل هزینه بهبود بخشند. نتایج پژوهش اصغری و همکاران (Asghari et al., 2024) در اراضی جنگلی، مرتعی و زراعی منطقه فندقلوی اردبیل نشان داد که مدل GEP در مقایسه با مدل رگرسیون خطی به علت استفاده از روابط غیر خطی، از دقت بیشتر و خطای کمتر در برآورد PR خاک برخوردار بود هر چند دقت آن در مقایسه با مدل شبکه عصبی مصنوعی پایین بود؛ مقادیر

5- Gene expression programming
6- Random forest

1- Pedotransfer function
2- Multiple linear regression
3- Artificial neural network
4- Neuro-fuzzy

دقت توابع انتقالی رگرسیونی ارائه شده توسط شیخ‌زاده و همکاران (Sheykhzadeh et al., 2016) با مدل‌های هوشمند به کار رفته در پژوهش حاضر از نظر برآورد مقاومت فروروی خاک.

مواد و روش‌ها

در تحقیق حاضر از اطلاعات مربوط به ۱۰۵ نمونه خاک (عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متر) بخشی از اراضی زراعی دشت اردبیل با مساحت حدود ۱۰۰۰ کیلومتر مربع (۲۴ × ۴۲) و کاربری غالب زیر کشت سیب‌زمینی، گندم، چغندرقد و یونجه که در فواصل تقریباً منظم (۳۰۰۰ × ۳۰۰۰) طی بهار و تابستان ۱۳۹۲ برداشته شده بود، استفاده گردید (Sheykhzadeh et al., 2016). متغیرهای زودیاخت و سهل الوصول خاک شامل ذرات شن، سیلت و رس به روش هیدرومتری چهار قرائته، پارامترهای میانگین (d_g) و انحراف استاندارد (σ_g) هندسی قطر ذرات خاک از روی درصد ذرات، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر، آهک به روش تیتراسیون، جرم مخصوص ظاهری (BD) در استوانه های استیل به قطر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر، جرم مخصوص حقیقی (PD) به روش پیکنومتر، تخلخل کل از روی جرم مخصوص ظاهری و حقیقی، رطوبت اشباع (SWC) و رطوبت خاک مزرعه (FWC) در لحظه نمونه‌برداری هر دو به روش وزنی در استوانه‌های استیل براساس دستورالعمل‌های رایج و استاندارد تعیین گردیدند. مقاومت فروروی (PR) به‌عنوان متغیردیریاخت و پرهزینه خاک به طور درجا و در موقع نمونه‌برداری خاک دست‌نخورده در مزرعه با استفاده از دستگاه فروسنج مخروطی مدل عقربه‌ای ساخت شرکت اکل کمپ کشور هلند در ۱۰ تکرار اندازه‌گیری شد (Lowery & Morrison, 2002). برخی ویژگی‌های نمونه‌های خاک در جدول ۱ و نیز ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرها در جدول ۲ آورده شده است. خاک‌های مورد مطالعه دارای کلاس بافتی درشت تا متوسط (۸ نمونه شن لومی، ۷۰ نمونه لوم شنی، ۶ نمونه لوم و ۲۱ نمونه لوم سیلتی) بودند (شکل ۱). برای اشتقاق توابع رگرسیونی خطی چندگانه (MLR) بین متغیرهای زودیاخت (شن، سیلت، رس، جرم مخصوص ظاهری و حقیقی، تخلخل کل، SWC و FWC، CaCO_3 ، کربن آلی، d_g و σ_g) با متغیر دیریاخت (PR) خاک از روش گام به گام^۴ در نرم‌افزار SPSS 22 استفاده گردید. براساس روش گام به گام، ۱۵ مدل رگرسیونی (جدول ۳) با ترکیب‌های متفاوت از متغیرهای زودیاخت ورودی برای برآورد متغیر دیریاخت (PR) تعیین شدند (Sheykhzadeh et al., 2016). به‌منظور بررسی و مقایسه دقیق نتایج پژوهش حاضر، در فرآیند مدل‌سازی PR با استفاده از سه روش هوشمند نرو فازی (NF)، برنامه

آماره‌های ضریب تبیین (R^2)^۱ و ریشه میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE)، میانگین خطا^۳ (ME) و ضریب نش-ساتکلیف^۴ (NS) براساس داده‌های آزمونی) به‌ترتیب برای بهترین مدل ANN، MLR، GEP و برابر با MPa، ۰/۴۴، ۱/۱۹، ۰/۱۹، ۰/۳۶، ۰/۹۲، ۰/۴۱، ۰/۴۴، ۰/۵ - و ۰/۹۲، ۰/۷۹، ۰/۹۱، ۰/۱۳، ۰/۶۳ محاسبه گردید. آن‌ها گزارش نمودند رطوبت خاک مزرعه، سیلت و جرم مخصوص ظاهری نسبی، مناسب‌ترین متغیرهای ورودی در برآورد PR خاک هستند. اوناال و همکاران (Unal et al., 2024) رابطه بین رطوبت وزنی، جرم مخصوص ظاهری، نسبت تخلخل، عمق و مقاومت فروروی خاک را با کمک ANN در یک تحقیق مزرعه‌ای در آنتالیای ترکیه مدل‌سازی نمودند. برای این منظور، مدل‌های شبکه عصبی رگرسیون تعمیم‌یافته (GRNN) و تابع پایه شعاعی (RBF) برای تخمین مقادیر مقاومت فروروی خاک مقایسه گردیدند. نتایج آماره‌های ارزیابی نشان داد که مدل GRNN نتایج بهتری نسبت به مدل RBF در برآورد مقاومت فروروی خاک ارائه می‌دهد. پارسایی و همکاران (Parsaie et al., 2025) نقشه رقومی مقاومت فروروی خاک را با استفاده از مدل جنگل تصادفی (RF) و درخت تصمیم تقویت شده با گرادیان (XGBoost) در حوزه آبخیز کیلانه استان کردستان تهیه نمودند. مقاومت فروروی خاک با استفاده از فروسنج دستی در ۱۵۰ نقطه و در عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متری خاک اندازه‌گیری شد. برای برآورد مقاومت فروروی خاک از داده‌های طیفی و متغیرهای کمکی مستخرج از مدل رقومی ارتفاع و تصاویر ماهواره‌ای و نیز متغیرهای خاک شامل شن، سیلت، رس، کربن آلی، آهک، جرم مخصوص ظاهری و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها استفاده گردید. نتایج نشان داد مدل XGBoost از دقت بالا ($R^2 = 0.61$) و خطای پایین (RMSE) نرمال شده برابر با ۰/۱۱) در برآورد مقاومت فروروی خاک برخوردار بود.

بررسی منابع نشان داد تحقیقات انجام گرفته در زمینه برآورد مقاومت فروروی از روی متغیرهای زودیاخت خاک با استفاده مدل‌های هوشمند، انگشت‌شمار است همچنین تاکنون دقت توابع انتقالی رگرسیونی و مدل‌های هوشمند در برآورد مقاومت فروروی خاک به‌ویژه در دشت اردبیل مورد مقایسه قرار نگرفته است. بنابراین عمده‌ترین اهداف این پژوهش عبارتند از ۱) برآورد مقاومت فروروی خاک با استفاده از سه مدل هوشمند نرو فازی (NF)، برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و جنگل تصادفی (RF). ۲) ارزیابی عملکرد سه مدل هوشمند مذکور در برآورد مقاومت فروروی خاک با استفاده از محک‌های آماری شامل ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده^۵ (NRMSE)، میانگین خطا (ME) و نش-ساتکلیف (NS). ۳) مقایسه

4- Nash-Sutcliffe coefficient

5- Normalized root mean square error

6- Stepwise

1- Determination coefficient

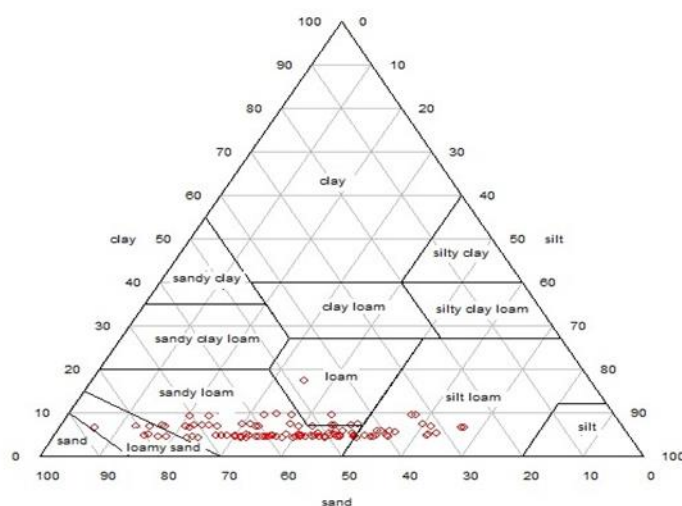
2- Root mean square error

3- Mean error

عصبی مصنوعی جهت آسان کردن فرآیند یادگیری و انطباق ترکیب می‌کند به این صورت که مشکل اصلی در طراحی سیستم‌های فازی که همان به‌دست آوردن قواعد "اگر- آنگاه" فازی است را به‌وسیله استفاده مؤثر از قابلیت یادگیری شبکه عصبی مصنوعی جهت تولید خودکار این قواعد و بهینه‌سازی پارامترها مرتفع می‌کند (Shiri et al., 2017).

ریزی بیان ژن (GEP) و جنگل تصادفی (RF) نیز از همان ۱۵ ترکیب متفاوت متغیرهای ورودی در مدل‌های رگرسیونی ارائه شده توسط شیخ‌زاده و همکاران (Sheykhzadeh et al., 2016) استفاده شد. لازم به ذکر است که مطابق تشخیص روش گام به گام، از بین ۱۲ متغیر ورودی (زودیافت)، دو متغیر CaCO_3 و SWC در برآورد متغیر دیریافت (PR) حائز اهمیت شناخته نشده و لذا وارد هیچ‌کدام از مدل‌های پانزده-گانه رگرسیونی و هوشمند نگردید.

سیستم استنتاجی نروفازی (NF) منطق فازی را با شبکه‌های



شکل ۱- توزیع کلاس بافت در خاک‌های مورد مطالعه

Figure 1- Distribution of textural class in the studied soils

جدول ۱- آماره‌های توصیفی متغیرهای خاک در منطقه مورد مطالعه

Table 1- Descriptive statistics of soil variables in the studied area

متغیر Variable	آموزش Training (n= 78)				آزمون Testing (n= 27)			
	Min.	Max.	Mean	Sd.	Min.	Max.	Mean	Sd.
BD (g cm ⁻³)	1.02	1.63	1.27	0.11	1.03	1.44	1.24	0.11
PD (g cm ⁻³)	2	2.57	2.27	0.13	2.04	2.46	2.27	0.11
TP (%)	26.12	55.62	44	175	37.22	56.78	45.46	5.16
Sand (%)	26.87	87.43	54.96	13.21	26.26	80.22	56.37	14.21
Silt (%)	5.99	66.8	39.24	13.17	15.21	67.18	38.31	14.49
Clay (%)	3.99	17.34	5.8	2.02	4.07	9.1	5.32	1.45
d _g (mm)	0.05	0.56	0.2	0.1	0.07	0.48	0.21	0.11
σ _g (-)	4.69	12.15	6.83	0.95	4.86	8.11	6.55	0.8
OC (%)	0.3	2.41	1.09	0.41	0.47	1.82	1.14	0.37
CaCO ₃ (%)	3.45	26.99	12.77	5.17	5.31	15.76	10.58	3
SWC (% g g ⁻¹)	25.23	73.67	50.01	9.07	32.83	71.57	52.26	9.71
FWC (% g g ⁻¹)	4.79	31.34	10.68	5.15	4.56	33.18	11.96	6.55
PR (MPa)	1.1	6.6	2.86	1.4	1.23	2.07	2.7	1.33

BD: جرم مخصوص ظاهری (bulk density); PD: جرم مخصوص حقیقی (particle density); TP: تخلخل کل (total porosity); clay: رس، silt: سیلت، sand: شن، d_g: میانگین هندسی قطر ذرات (geometric mean diameter)، σ_g: انحراف استاندارد هندسی ذرات (geometric standard deviation)، OC: کربن آلی (organic carbon)، CaCO₃: آهک، SWC: رطوبت اشباع (saturated water content)، FWC: رطوبت مزرعه (field water content)، PR: مقاومت فروروی (penetration resistance)، Sd: انحراف استاندارد، Mean: میانگین، Max: حداکثر، Min: حداقل.

جدول ۲- ضریب همبستگی پیرسون (r) بین مقاومت فروروی خاک (PR) و متغیرهای ورودی مدل‌ها (n=105)

Table 2- Pearson correlation coefficient (r) between soil available water and input variables of models (n=102)

Variable متغیر	Sand	Silt	Clay	dg	σ_g	OC	CaCO ₃	BD	PD	TP	FWC	SWC
PR	-0.21*	0.45**	0.19	-0.26*	0.33**	-0.47**	0.29**	0.66**	0.27*	-0.59**	-0.57**	-0.33**

* و **: به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد. توصیف علائم متغیرها در زیر جدول ۱ آورده شده است.

Variable symbols description is available under Table 1. *, **: Significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

جدول ۳- مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه (MLR) مقاومت فروروی خاک (Sheykhzadeh et al., 2016)

Table 3- MLR models of soil penetration resistance (PR) (Sheykhzadeh et al., 2016)

شماره Number	مدل Model
1	$PR = -0.572 + 0.974 BD - 0.005 Sand$
2	$PR = 0.675 BD - 0.004 Sand - 0.302 FWC$
3	$PR = 0.588 BD - 0.003 Sand - 0.309 FWC + 0.033 \sigma_g$
4	$PR = -1.023 + 0.997 BD + 0.004 Silt$
5	$PR = 0.695 BD - 0.004 Silt - 0.305 FWC$
6	$PR = 0.585 BD - 0.003 Silt - 0.307 FWC + 0.039 \sigma_g$
7	$PR = 1.066 - 0.541 FWC - 0.608 d_g$
8	$PR = 0.725 - 0.527 FWC - 0.404 d_g + 0.042 \sigma_g$
9	$PR = 0.718 - 0.428 FWC - 0.404 d_g + 0.042 \sigma_g - 0.085 OC$
10	$PR = 1.521 - 0.476 FWC - 0.014 TP$
11	$PR = 1.429 - 0.407 FWC - 0.012 TP - 0.459 d_g$
12	$PR = 1.477 - 0.018 TP - 0.005 Sand$
13	$PR = 0.705 - 0.019 TP - 0.004 Sand + 0.346 PD$
14	$PR = 0.929 - 0.006 Sand - 0.176 OC$
15	$PR = 0.785 - 0.006 Sand - 0.162 OC + 0.018 Clay$

توصیف علائم متغیرها در زیر جدول ۱ آورده شده است

Variable symbols description is available under Table 1.

Tools 4.0 استفاده گردید. در موقع اجرای برنامه، توابع مختلف حسابی، مثلثاتی و نیز توابع تعریف شده توسط کاربر به روش سعی و خطا به کار برده شد. عملگرهای ریاضی پر کاربرد در فرآیند اجرای مدل، چهار عمل اصلی (+، -، × و /)، لگاریتم طبیعی، تانژانت، کتانژانت، توان ۲ و تعداد ۵۰۰۰ تکرار در نظر گرفته شد. پارامترهای مورد استفاده در اجرای مدل GEP به طور خلاصه در جدول ۴ و نیز درخت‌های توصیفی به دست آمده در پایان فرآیند بهینه‌سازی برای بهترین مدل GEP (مدل شماره ۱ با دو متغیر ورودی جرم مخصوص ظاهری و شن) در شکل ۲ آورده شده است.

اولین بار بریمن، مدل جنگل تصادفی (RF) را ارائه نمود (Breiman, 2001). این روش یک الگوریتم ساده و انعطاف‌پذیر برای یادگیری ماشین می‌باشد. مدل جنگل تصادفی یک روش گروهی بر پایه درختی است که در آن همه درختان به مجموعه‌ای از متغیرهای تصادفی وابسته هستند و جنگل از درختان رگرسیونی زیاد واقع در کنار یکدیگر رشد می‌یابد (Singh et al., 2020).

در این پژوهش، مدل‌های نرو فازی (NF) لازم برای برآورد مقاومت فروروی (PR) خاک، با استفاده از سیستم استنتاجی نرو فازی موجود در جعبه ابزار نرم‌افزار MATLAB به روش سعی و خطا و با به کارگیری توابع عضویت مثلثی (trimf)، سیگموئیدی (sigmf)، دوزنقه‌ای (trapmf)، گوسی (gaussmf) و زنگوله‌ای شکل (bellmf) در لایه ورودی و تابع عضویت ثابت (constant) در لایه خروجی و با تکرارهای مختلف ایجاد شدند (Ghorbani et al., 2019). همچنین تعداد تابع عضویت ۳ و تعداد تکرار بهینه ۵۰ تا ۱۵۰ تا برای اجرای ۱۵ مدل NF به کار رفته در روش نرو فازی تعیین گردید. روش اصلی آموزش در سیستم فازی، روش پس انتشار خطا می‌باشد.

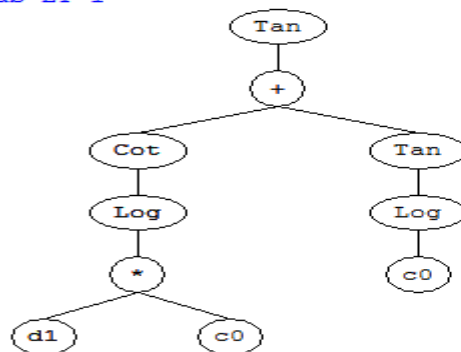
برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) توسط فریرا در سال ۱۹۹۹ ابداع شد. در این برنامه کروموزوم‌های خطی و ساده با طول ثابت مشابه با الگوریتم ژنتیک و نیز ساختارهای شاخه‌ای با اندازه‌ها و اشکال متفاوت مشابه با نمودار درختی در برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده می‌گردد (Ferreira, 2006). در این پژوهش برای برآورد مقاومت فروروی (PR) خاک به روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)، از نرم‌افزار Gene Xpro

جدول ۴- مقادیر پارامترهای مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

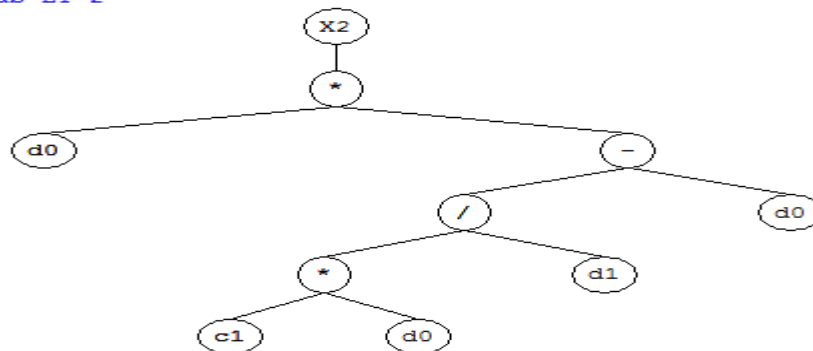
Table 4- The values of GEP model parameters

مقادیر Values	عوامل ژنتیک Genetic factors	مقادیر Values	تنظیمات عمومی General adjustment
0.044	Mutation rate نرخ جهش	30	تعداد کروموزم‌ها Number of chromosome
0.1	Inversion rate نرخ وارون‌سازی	8	اندازه سر Head size
0.3	one point recombination rate نرخ ترکیب تک نقطه‌ای	3	تعداد ژن‌ها Number of genes
0.3	two point recombination rate نرخ ترکیب دو نقطه‌ای	جمع (+)	تابع پیوند Linking function
0.1	Gene recombination rate نرخ ترکیب ژن	RMSE	معیار خطای تابع Fitness function error type

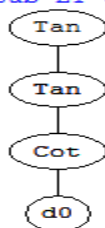
Sub-ET 1



Sub-ET 2



Sub-ET 3



شکل ۲- درخت‌های توصیفی ایجاد شده توسط بهترین مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

d0 و d1 به ترتیب شن و جرم مخصوص ظاهری را نشان می‌دهد.

Figure 2- The expression trees developed by the best gene expression programming (GEP) model
d0 and d1 indicates sand and bulk density, respectively.

مدل می‌باشد. از میان مدل‌های ایجاد شده برای برآورد PR، مناسب ترین مدل NF، GEP و RF با ترکیب متغیرهای ورودی در داده‌های آزمونی بر اساس معیارهای آماری مذکور تعیین شد. آزمون مدل‌ها در تشخیص دقت مدل به ازای داده‌هایی که در آموزش مدل استفاده نشده‌اند به کار می‌رود.

نتایج و بحث

ارزیابی مدل‌های نروفازی (NF) در برآورد مقاومت فروروی (PR) خاک

از ۱۵ مدل نروفازی (NF) با همان ترکیب متغیرهای ورودی به کار رفته در مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه (جدول ۳) برای تخمین مقاومت فروروی (PR) خاک استفاده شد. مقادیر آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطا (ME) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) برای ارزیابی دقت تخمین مدل‌های NF در تخمین PR در جدول ۵ آورده شده است. کاربرد R^2 به تنهایی شاید از نظر مقایسه اعتبار مدل‌ها، گمراه‌کننده بوده و الزاماً R^2 نزدیک به یک همیشه بیانگر برازش دقیق مقادیر تخمینی و اندازه‌گیری یک متغیر دیر یافت و در نتیجه پایین بودن خطا نیست (Kozak et al., 1996) لذا در این پژوهش، برای رتبه‌دهی هر سه مدل هوشمند مورد استفاده (NF، GEP و RF) از نظر دقت تخمین PR، از آماره‌های NRMSE (بر اساس رتبه‌دهی Wan et al., 2023) و NS در داده‌های آزمون استفاده گردید. واسیم و همکاران (Waseem et al., 2017) نیز گزارش نمودند اگر مقدار آماره NS بین ۱ و ۰/۷۵ باشد عملکرد مدل بسیار خوب است؛ اگر مقدار NS بین ۰/۷۵ و ۰/۶۵ باشد عملکرد مدل خوب است؛ اگر مقدار NS بین ۰/۶۵ و ۰/۵۰ باشد عملکرد مدل قابل قبول است ولی اگر مقدار آماره NS کوچکتر ۰/۵۰ باشد، عملکرد مدل نامطلوب است. بر اساس پایین بودن آماره NRMSE و بالا بودن آماره NS در داده‌های آزمون، می‌توان گفت که مدل NF شماره ۲ (جدول ۵) با سه متغیر ورودی شامل جرم مخصوص ظاهری، شن و رطوبت خاک مزرعه دارای بالاترین دقت از نظر برآورد PR نسبت به سایر مدل‌های NF بود. مقادیر R^2 ، NRMSE، ME و NS این مدل در سری آموزش به ترتیب برابر ۰/۶۷، ۰/۱۴، ۰/۰۰ و ۰/۶۷ و برای داده‌های آزمونی برابر ۰/۵۱، ۰/۱۹، ۰/۰۳ و ۰/۵۰ تعیین گردید (جدول ۵). مطابق آماره‌های NRMSE و NS در داده‌های آزمون، عملکرد این مدل در تخمین PR به ترتیب دارای کارکرد مناسب و قابل قبول می‌باشد. اگرچه مقدار اندک مثبت ME (۰/۰۳ MPa) در سری آزمون بیانگر برآورد جزئی بیشتر از مقدار واقعی PR خاک توسط مدل شماره ۲ در روش نروفازی می‌باشد ولی در مقایسه با مقادیر به دست آمده توسط شیخ‌زاده و همکاران (Sheykhzadeh et al., 2016) برای

در روش جنگل تصادفی برای هر درخت یک زیر مجموعه‌ای از متغیرهای ورودی اعمال می‌شود. تعداد ورودی‌ها در هر درخت و نیز تعداد درختان بهینه، به روش سعی و خطا تعیین می‌گردد. در این پژوهش برای برآورد مقاومت فروروی (PR) خاک به روش RF از نرم افزار Weka استفاده شد؛ بهترین اجرای مدل RF برای برآورد PR، با ۲ متغیر کمکی موجود در زیر مجموعه تصادفی هر گره ($mtree = 2$) و تعداد ۷۰ تا ۱۰۰ درخت به دست آمد. کل داده‌ها (۱۰۵ داده) در اکسل به طور تصادفی به دو مجموعه آموزشی (۷۸ داده) و آزمونی (۲۷ داده) تقسیم گردیدند سپس برای اجرای هر سه مدل نروفازی (NF)، برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و جنگل تصادفی (RF) به کار گرفته شدند. برای مقایسه و ارزیابی دقت مدل‌های NF، GEP و RF در برآورد PR، از آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطا (ME) و نش-ساتکلیف (NS) (Ghorbani et al., 2019) استفاده شد. به طور کلی، هرچه مقدار R^2 به یک و میزان NRMSE به صفر نزدیک باشد، دقت مدل بیشتر بوده و مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده PR باهم برابر هستند. مقادیر NRMSE کمتر از ۰/۱ بیانگر کارکرد عالی، مقادیر ۰/۱ تا ۰/۲ بیانگر کارکرد مناسب، مقادیر ۰/۲ تا ۰/۳ بیانگر کارکرد متوسط و مقادیر بیش از ۰/۳ NRMSE بیانگر کارکرد ضعیف مدل می‌باشد (Wan et al., 2023). مقادیر مثبت ME بیش‌برازشی و مقادیر منفی آن کم‌برازشی مدل را نشان می‌دهد. اگر معیار NS برابر یک باشد بیانگر آن است که مدل‌سازی با دقت بالایی انجام گرفته و مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده PR مطابقت کامل دارند. میزان NS صفر بیانگر آن است که برآورد‌های مدل، دقتی برابر با دقت میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده دارند.

$$NRMSE = \frac{1}{Y_{\max(m)} - Y_{\min(m)}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i(p)} - Y_{i(m)})^2}{n}} \quad (1)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n Y_{i(p)} - Y_{i(m)}}{n} \quad (2)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i(p)} - Y_{i(m)})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{i(m)} - \bar{Y}_m)^2} \quad (3)$$

در معادله‌های ۱، ۲ و ۳، $\bar{Y}_m$ ، $Y_{i(p)}$ ، $Y_{i(m)}$ ، $Y_{\max(m)}$ و $Y_{\min(m)}$ به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری، برآورد شده توسط مدل، میانگین، حداکثر و حداقل مقادیر اندازه‌گیری شده PR و n تعداد داده‌ها برای PR در هر

همکاران (Asghari et al., 2024) نیز گزارش کردند مدل‌های هوشمند نروفازی و برنامه‌ریزی بیان ژن در مقایسه با مدل سنتی رگرسیون خطی دارای دقت بیشتر و خطای کمتر در برآورد PR خاک بودند همچنین رطوبت خاک مزرعه، سیلت و جرم مخصوص ظاهری نسبی به‌عنوان مناسب‌ترین متغیرهای ورودی در تخمین PR خاک تعیین گردید.

ارزیابی مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) در برآورد مقاومت فروروی (PR) خاک

مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) برای تخمین مقاومت فروروی (PR) خاک نیز با همان ترکیب متغیرهای ورودی در مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه (جدول ۳) و نروفازی (جدول ۵) ایجاد گردیدند. مقادیر آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطا (ME) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) برای ارزیابی دقت تخمین مدل‌های NF در برآورد PR در جدول ۶ آورده شده است.

همین مدل در روش‌های رگرسیون خطی چندگانه ($ME = 0.64$) و شبکه عصبی مصنوعی ($ME = 0.21$ MPa)، به مراتب دارای بیش‌برآوردی کمتری است؛ معادله رگرسیونی این مدل در جدول ۳ نیز بیانگر آن است که جرم مخصوص ظاهری با علامت مثبت و رطوبت خاک مزرعه و شن با علامت منفی وارد مدل گردیدند و اهمیت متغیر جرم مخصوص ظاهری در برآورد PR به علت داشتن ضریب رگرسیون بالاتر به مراتب بیشتر از متغیر رطوبت خاک مزرعه و شن می‌باشد. همبستگی معنی‌دار و مثبت جرم مخصوص ظاهری و همبستگی معنی‌دار و منفی رطوبت خاک مزرعه با PR نیز مؤید این قضیه می‌باشد (جدول ۲). در رتبه‌های بعدی، مدل شماره ۱ با دو متغیر ورودی جرم مخصوص ظاهری و شن ($NRMSE = 0.20$ و $NS = 0.49$) و مدل شماره ۴ با دو متغیر ورودی جرم مخصوص ظاهری و سیلت ($NRMSE = 0.20$ و $NS = 0.49$) توانستند PR را با دقت نسبتاً بالایی برآورد نمایند (جدول ۵). نتایج پژوهش بیات و همکاران (Bayat et al., 2008) نیز نشان داد که مقاومت فروروی خاک با دقت بالا و خطای پایین توسط مدل هوشمند شبکه عصبی مصنوعی در مقایسه با مدل سنتی رگرسیون خطی مورد تخمین قرار گرفت. اصغری و

جدول ۵- معیارهای ارزیابی مدل‌های نروفازی (NF) مقاومت فروروی (PR) خاک
Table 5- Evaluation criteria for neuro-fuzzy (NF) models of PR

شماره Number	متغیرهای ورودی Input variables	آزمون Testing set				آموزش Training			
		R^2	NRMSE	ME (MPa)	NS	R^2	NRMSE	ME (MPa)	NS
1	BD, Sand	0.50	0.20	0.12	0.49	0.58	0.15	0.00	0.58
2	BD, Sand, FWC	0.50	0.19	0.03	0.51	0.67	0.14	0.00	0.67
3	BD, Sand, FWC, σ_g	0.07	0.52	0.01	-2.41	0.78	0.11	0.00	0.77
4	BD, Silt	0.50	0.20	0.16	0.49	0.58	0.15	0.00	0.58
5	BD, Silt, FWC	0.43	0.21	0.01	0.41	0.68	0.13	0.00	0.68
6	BD, Silt, FWC, σ_g	0.18	0.34	0.12	-0.47	0.78	0.11	0.00	0.78
7	FWC, d_g	0.39	0.22	0.18	0.37	0.61	0.15	0.00	0.61
8	FWC, d_g , σ_g	0.19	0.26	0.27	0.11	0.64	0.14	0.00	0.64
9	FWC, d_g , σ_g , OC	0.001	0.38	0.18	-0.85	0.81	0.11	0.00	0.81
10	FWC, TP	0.43	0.21	0.00	0.41	0.57	0.16	0.00	0.57
11	FWC, TP, d_g	0.32	0.23	0.19	0.30	0.72	0.13	0.00	0.72
12	TP, Sand	0.29	0.24	0.38	0.23	0.49	0.17	0.00	0.49
13	TP, Sand, PD	0.02	0.44	0.72	-1.52	0.72	0.13	0.00	0.72
14	Sand, OC	0.30	0.23	0.50	0.30	0.38	0.19	0.00	0.38
15	Sand, OC, Clay	0.11	0.29	0.08	-0.11	0.60	0.15	0.00	0.60

NS: ضریب نش-ساتکلیف، NRMSE: ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده، ME: میانگین خطا، R^2 : ضریب تبیین. توصیف متغیرها در زیر جدول ۱ آورده شده است.

R^2 : coefficient of determination; NRMSE: normalized root mean square error; ME: mean error; NS: Nash-Sutcliffe coefficient.

Variables description is available under Table 1.

همین مدل در روش رگرسیون خطی چندگانه ($ME = 0.40 \text{ MPa}$)، به مراتب دارای بیش‌برآوردی کمتری است؛ معادله رگرسیونی این مدل در **جدول ۳** نیز بیانگر آن است که جرم مخصوص ظاهری با علامت مثبت و شن با علامت منفی وارد مدل گردیدند و اهمیت متغیر جرم مخصوص ظاهری در برآورد PR به علت داشتن ضریب رگرسیون بالاتر به مراتب بیشتر از متغیر شن می‌باشد. در درجات بعدی، به‌ترتیب مدل GEP شماره ۶ با چهار متغیر ورودی شامل جرم مخصوص ظاهری، سیلت، رطوبت خاک مزرعه و انحراف معیار هندسی ذرات و مدل GEP شماره ۹ با چهار متغیر ورودی شامل رطوبت خاک مزرعه، کربن آلی، میانگین قطر و انحراف معیار هندسی ذرات خاک قرار دارد (**جدول ۶**). اصغری و همکاران (*Asghari et al., 2024*) نیز گزارش نمودند مدل GEP با متغیرهای ورودی رطوبت خاک مزرعه، جرم مخصوص ظاهری نسبی و سیلت توانست PR خاک را در اراضی جنگلی، مرتعی و زراعی منطقه فندقلوی اردبیل با دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌های GEP برآورد نماید و مقادیر R^2 ، RMSE، ME و NS مدل مذکور به‌ترتیب برابر با ۰/۷۹، ۰/۹۱ MPa، ۰/۱۳ MPa و ۰/۶۳ در داده‌های آزمونی به‌دست آمد.

رتبه‌بندی مدل‌های GEP نیز همانند مدل NF (**جدول ۵**)، بر اساس پایین بودن NRMSE و بالا بودن NS انجام شد. بر مبنای آماره‌های مذکور در داده‌های آزمونی (**جدول ۶**)، دقیق‌ترین مدل GEP برای برآورد PR، مدل شماره ۱ با دو متغیر ورودی شامل جرم مخصوص ظاهری و شن از میان ۱۵ مدل GEP تعیین گردید. معادله ۴، رابطه ریاضی به‌دست آمده برای محاسبه PR توسط مدل GEP شماره ۱ را نشان می‌دهد:

$$PR = \tan(\cot(\log 4.898BD) + \tan(0.69)) + \left(\frac{-1.461sand^2}{BD} - sand^2 \right)^2 + \tan(\tan(\cot(sand))) \quad (4)$$

مقادیر آماره‌های R^2 ، NRMSE، ME و NS برای این مدل بر اساس داده‌های آموزشی به‌ترتیب برابر ۰/۵۰، ۰/۱۷، ۰/۰۱ MPa و ۰/۵۰ و داده‌های آزمونی برابر ۰/۵۱، ۰/۲۰، ۰/۱۳ MPa و ۰/۴۸ به دست آمد (**جدول ۶**) و این مدل دارای بالاترین ضریب تبیین در مقایسه با سایر مدل‌های GEP بود؛ اگرچه مقدار مثبت ME در داده‌های آزمونی (۰/۱۳ مگاپاسکال) بیانگر اندکی بیش‌برآوردی در تخمین PR خاک توسط مدل GEP شماره ۱ می‌باشد ولی در مقایسه با مقدار گزارش شده توسط شیخ‌زاده و همکاران (*Sheykhzadeh et al., 2016*) برای

جدول ۶- معیارهای ارزیابی مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) مقاومت فروری (PR) خاک
Table 6- Evaluation criteria for gene expression programming (GEP) models of PR

شماره Number	متغیرهای ورودی Input variables	آزمون Testing set				آموزش Training			
		R^2	NRMSE	ME (MPa)	NS	R^2	NRMSE	ME (MPa)	NS
1	BD, Sand	0.51	0.20	0.13	0.48	0.50	0.17	-0.01	0.50
2	BD, Sand, FWC	0.36	0.25	0.04	0.19	0.58	0.15	-0.02	0.58
3	BD, Sand, FWC, σ_g	0.38	0.23	0.25	0.31	0.58	0.16	0.02	0.57
4	BD, Silt	0.001	0.40	0.51	-1.03	0.50	0.17	-0.01	0.50
5	BD, Silt, FWC	0.34	0.24	0.07	0.26	0.55	0.16	0.01	0.55
6	BD, Silt, FWC, σ_g	0.48	0.21	0.27	0.45	0.60	0.15	0.02	0.60
7	FWC, d_g	0.33	0.23	0.33	0.28	0.56	0.16	-0.01	0.56
8	FWC, d_g , σ_g	0.34	0.24	0.45	0.24	0.61	0.15	0.03	0.61
9	FWC, d_g , σ_g , OC	0.49	0.21	0.41	0.41	0.58	0.15	0.03	0.58
10	FWC, TP	0.33	0.43	-0.23	-1.35	0.58	0.15	-0.04	0.58
11	FWC, TP, d_g	0.38	0.33	0.07	-0.36	0.62	0.15	0.01	0.62
12	TP, Sand	0.08	0.28	0.21	-0.05	0.50	0.17	0.13	0.49
13	TP, Sand, PD	0.34	0.23	0.22	0.30	0.45	0.18	-0.02	0.45
14	Sand, OC	0.22	0.25	0.21	0.19	0.31	0.20	-0.01	0.31
15	Sand, OC, Clay	0.20	0.25	0.29	0.17	0.45	0.18	0.01	0.45

NS: ضریب نش-ساتکلِف، NRMSE: ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده، ME: میانگین خطا، R^2 : ضریب تبیین. توصیف متغیرها در زیر **جدول ۱** آورده شده است.
 R^2 : coefficient of determination; NRMSE: normalized root mean square error; ME: mean error; NS: Nash-Sutcliff coefficient.
Variables description is available under Table 1.

ارزیابی مدل‌های جنگل تصادفی (RF) در برآورد مقاومت فروروی (PR) خاک

پانزده مدل جنگل تصادفی (RF) با ترکیب متغیرهای ورودی به کار رفته در مدل‌های MLR (جدول ۳)، NF (جدول ۵) و GEP (جدول ۶)، برای تخمین مقاومت فروروی (PR) خاک طراحی گردید. مقادیر آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطا (ME) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) برای ارزیابی عملکرد مدل‌های RF از نظر دقت برآورد PR در جدول ۷ آورده شده است. برای درجه‌بندی و مقایسه دقت مدل‌های RF در تخمین PR، همانند دو مدل هوشمند قبلی از معیار پایین بودن آماره NRMSE و بالا بودن آماره NS استفاده شد؛ بر این اساس، مدل RF شماره ۱۱ در داده‌های آزمونی (جدول ۷) با سه متغیر ورودی شامل رطوبت خاک، مزرعه، تخلخل کل و میانگین هندسی قطر ذرات خاک توانست PR را با خطای پایین و دقت بالا در مقایسه با سایر مدل‌های RF برآورد

نماید؛ مقادیر R^2 ، NRMSE، ME و NS این مدل برای داده‌های آموزشی به ترتیب برابر ۰/۹۴، ۰/۰۶، ۰/۰۱ MPa و ۰/۰۳ و برای داده‌های آزمونی به ترتیب برابر ۰/۵۸، ۰/۲۰، ۰/۳۱ MPa و ۰/۵۰ به دست آمد (جدول ۷). مطابق آماره‌های NRMSE و NS در سری آزمون، عملکرد مدل RF شماره ۱۱ به ترتیب با کارکرد مناسب و قابل قبول ارزیابی می‌شود (Waseem et al., 2017). معادله رگرسیونی مدل ۱۱ در جدول ۳ نیز بیانگر آن است که هر سه متغیر ورودی با علامت منفی وارد مدل گردیدند و اهمیت متغیر میانگین هندسی قطر ذرات خاک در برآورد PR به علت داشتن ضریب رگرسیون بالاتر به مراتب بیشتر از متغیرهای رطوبت خاک مزرعه و تخلخل کل می‌باشد. در درجات بعدی، به ترتیب مدل RF شماره ۷ (NRMSE = 0.20 و NS = 0.47) با دو متغیر ورودی شامل رطوبت خاک مزرعه و میانگین قطر هندسی ذرات خاک و مدل RF شماره ۹ (NRMSE = 0.20 و NS = 0.47) با چهار متغیر ورودی شامل رطوبت خاک مزرعه، کربن آلی، میانگین قطر و انحراف معیار هندسی ذرات قرار دارد (جدول ۷).

جدول ۷- معیارهای ارزیابی مدل‌های جنگل تصادفی (RF) مقاومت فروروی (PR) خاک

Table 7- Evaluation criteria for random forest (RF) models of PR

شماره Number	Input variables متغیرهای ورودی	آزمون Testing set				آموزش Training			
		R^2	NRMSE	ME (MPa)	NS	R^2	NRMSE	ME (MPa)	NS
1	BD, Sand	0.26	0.25	0.11	0.21	0.94	0.07	-0.03	0.92
2	BD, Sand, FWC	0.46	0.21	0.18	0.44	0.94	0.06	-0.01	0.93
3	BD, Sand, FWC, σ_g	0.43	0.29	0.28	-0.04	0.95	0.06	-0.02	0.94
4	BD, Silt	0.33	0.24	0.08	0.30	0.94	0.07	-0.02	0.93
5	BD, Silt, FWC	0.43	0.22	0.18	0.41	0.94	0.06	-0.02	0.93
6	BD, Silt, FWC, σ_g	0.41	0.22	0.25	0.38	0.95	0.06	-0.01	0.94
7	FWC, d_g	0.51	0.20	0.27	0.47	0.93	0.07	-0.02	0.92
8	FWC, d_g , σ_g	0.45	0.22	0.35	0.39	0.94	0.06	-0.04	0.93
9	FWC, d_g , σ_g , OC	0.53	0.20	0.26	0.47	0.95	0.06	-0.04	0.94
10	FWC, TP	0.42	0.23	0.38	0.35	0.93	0.07	-0.01	0.92
11	FWC, TP, d_g	0.58	0.20	0.31	0.50	0.94	0.06	-0.01	0.93
12	TP, Sand	0.33	0.24	0.30	0.29	0.92	0.08	-0.03	0.90
13	TP, Sand, PD	0.33	0.24	0.27	0.29	0.94	0.07	-0.02	0.92
14	Sand, OC	0.08	0.28	0.30	0.01	0.89	0.09	-0.06	0.87
15	Sand, OC, Clay	0.27	0.25	0.30	0.23	0.92	0.08	-0.02	0.90

NS: ضریب نش-ساتکلیف، NRMSE: ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده، ME: میانگین خطا، R^2 : ضریب تبیین. توصیف متغیرها در زیر جدول ۱ آورده شده است.

R^2 : coefficient of determination; NRMSE: normalized root mean square error; ME: mean error; NS: Nash-Sutcliffe coefficient. Variables description is available under Table 1.

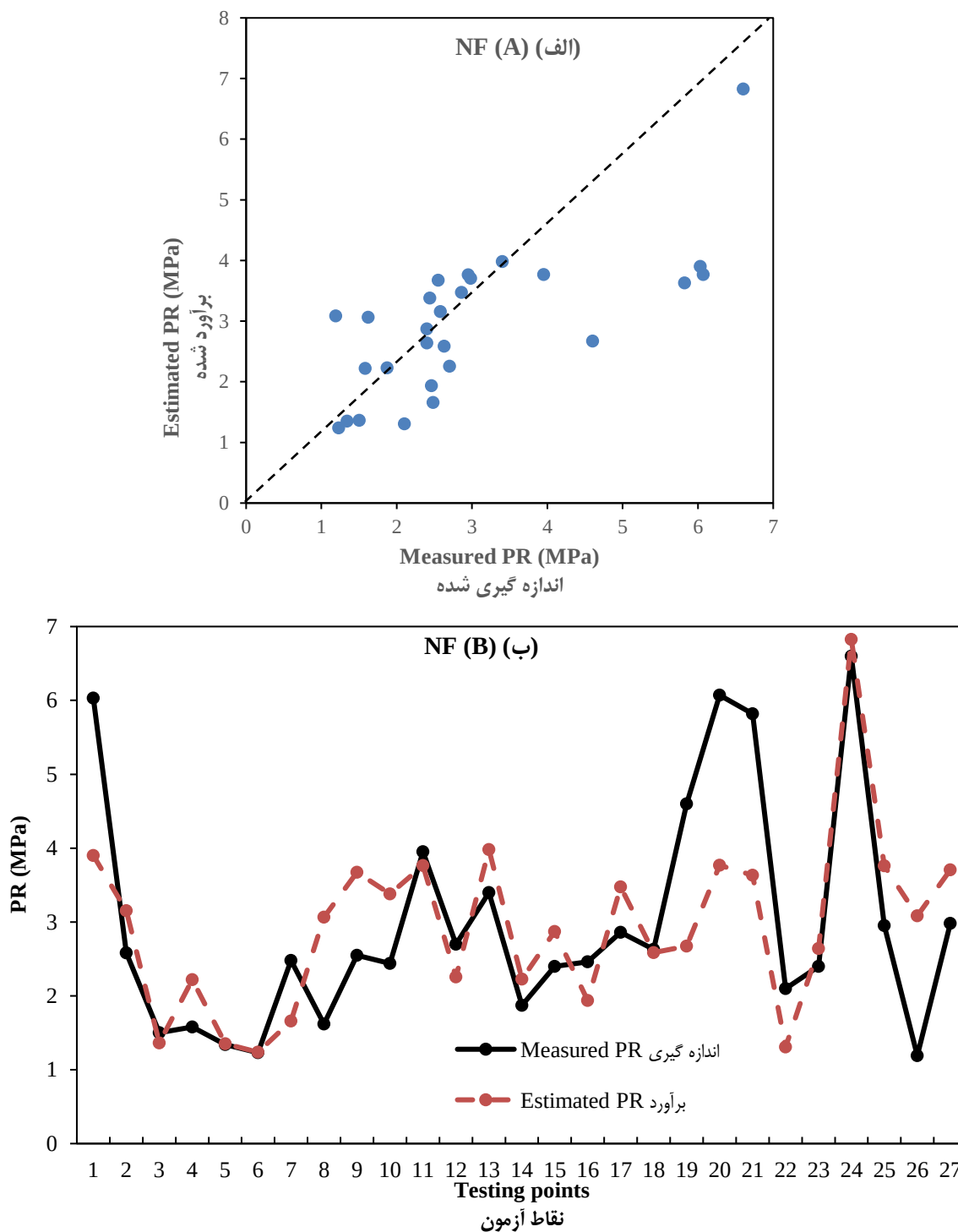
شکل ۳ (الف)، شکل ۴ (الف) و شکل ۵ (الف) به ترتیب پراکنش داده های اندازه‌گیری و برآورد شده PR حول محور ۱:۱ بر اساس بهترین مدل NF (مدل شماره ۲ در جدول ۵)، بهترین مدل GEP (مدل شماره ۱ در جدول ۶) و بهترین مدل RF (مدل شماره ۱۱ در جدول ۷) در سری آزمون نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها مشاهده می‌شود که برای مقادیر بزرگتر مقاومت فروروی خاک، خطای (اختلاف مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده) هر سه روش هوشمند به کار رفته در پژوهش، بالاتر است؛ شاید دلیل این قضیه را بتوان به تعداد اندک داده های با مقادیر بزرگ PR در این تحقیق نسبت داد که موجب گردید آموزش مدل‌ها در این محدوده ($PR > 4 \text{ MPa}$) به خوبی انجام نگیرد. مقادیر بزرگ PR معمولاً در رطوبت‌های پایین و یا فشردگی بالای خاک اتفاق می‌افتد که ممکن است باعث بروز خطای ابزاری در سنجش میزان مقاومت فروروی خاک نیز گردد. همچنین مشاهده می‌شود که پراکندگی داده‌ها اطراف خط ۱:۱ در بهترین مدل NF نسبت به بهترین مدل‌های GEP و RF کمتر است. بنابراین می‌توان چنین استنباط نمود که در پژوهش حاضر، مدل نروفازی در برآورد PR از روی متغیرهای زود یافت خاک به علت استفاده از روابط غیر خطی پیچیده، در مقایسه با دو مدل هوشمند دیگر نسبتاً دقیق‌تر عمل نموده است. حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2018) نیز به برتری نسبی روش نروفازی در مقایسه با سایر روش‌های هوشمند در برآورد مقاومت فروروی خاک دست یافتند. اصغری و همکاران (Asghari et al., 2024) نیز گزارش نمودند روش شبکه عصبی مصنوعی به علت به کارگیری روابط غیرخطی پیچیده در مقایسه با مدل هوشمند برنامه‌ریزی بیان ژن و مدل رگرسیون سستی توانست مقاومت فروروی خاک را در منطقه فندقلوی اردبیل با دقت بالایی برآورد نماید. با عنایت به اندک بودن تعداد تحقیقات انجام شده در زمینه به کارگیری مدل‌های هوشمند در برآورد مقاومت فروروی خاک، امکان مقایسه دقیق نتایج میسر نشد.

به طور کلی با توجه به نتایج جداول ۳، ۵، ۶ و ۷ می‌توان گفت که متغیرهای ورودی BD، FWC، Sand، Silt، TP و dg از مهمترین متغیرهای زود یافت در افزایش کارایی همه مدل‌ها از نظر برآورد مقاومت فروروی خاک در منطقه مورد مطالعه هستند؛ در مقابل، متغیرهای ورودی OC، PD، Clay و σ_g اهمیت کمتری از خود نشان داده‌اند. این نتایج با یافته‌های محققان قبلی مانند بیات و همکاران (Bayat et al., 2008) و اصغری و همکاران (Asghari et al., 2024) در یک راستا می‌باشد.

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که بهترین مدل ($R^2 = 0.58$) در روش هوشمند جنگل تصادفی (مدل شماره ۱۱ در جدول ۷) در تحقیق حاضر نسبت به همان مدل ($R^2 = 0.49$) در روش رگرسیون سنتی (Sheykhzadeh et al., 2016) از دقت بالاتری برخوردار است همچنین براساس آماره ME، روش جنگل تصادفی ($ME = 0.31$) در مقایسه با روش رگرسیون خطی چندگانه ($ME = 0.34$) دارای بیش‌برآوردی کمتری می‌باشد.

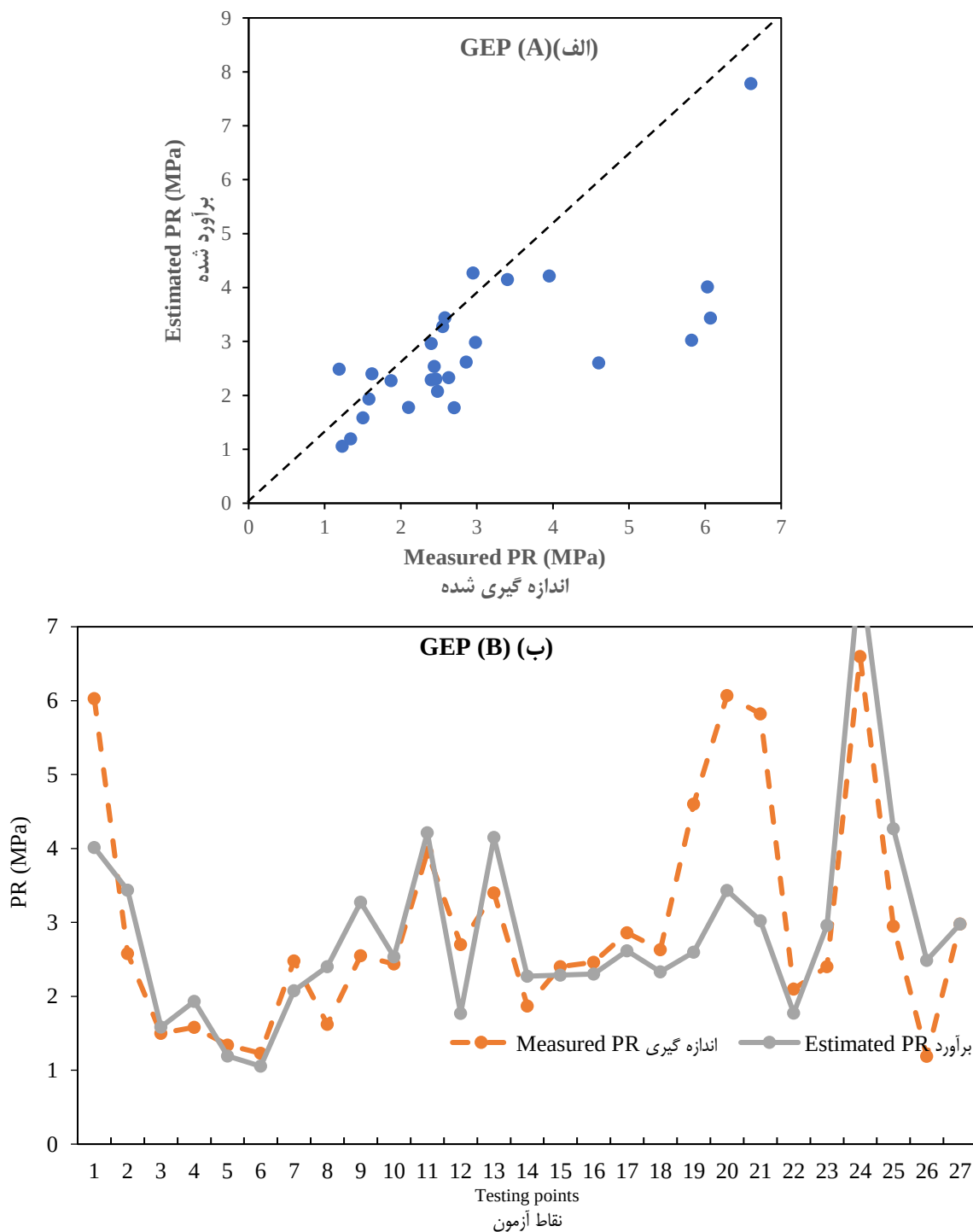
مقایسه عملکرد مدل‌های نروفازی، برنامه‌ریزی بیان ژن و جنگل تصادفی در برآورد مقاومت فروروی خاک

مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده مقاومت فروروی (PR) خاک بر اساس ۲۷ داده در مرحله آزمون برای بهترین مدل نروفازی (NF)، برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و جنگل تصادفی (RF) به ترتیب در شکل ۳ (ب)، شکل ۴ (ب) و شکل ۵ (ب) به طور مقایسه‌ای آورده شده است. با توجه به مقادیر آماره‌های ارزیابی ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و ضریب نش-ساتکیف (NS) برای بهترین مدل NF (مدل شماره ۲ در جدول ۵) با سه متغیر ورودی شامل جرم مخصوص ظاهری، شن و رطوبت خاک مزرعه، بهترین مدل GEP (مدل شماره ۱ در جدول ۶) با دو متغیر ورودی شامل جرم مخصوص ظاهری و شن و بهترین مدل RF (مدل شماره ۱۱ در جدول ۷) با سه متغیر ورودی شامل رطوبت خاک مزرعه، تخلخل کل و میانگین هندسی قطر ذرات خاک، از نظر برآورد PR در سری آزمون مشاهده می‌شود که بهترین مدل NF به دلیل داشتن مقدار NS بالا (۰/۵۱) و NRMSE پایین (۰/۱۹) در مقایسه با بهترین مدل GEP ($NRMSE = 0.20$ و $NS = 0.48$) و بهترین مدل RF ($NRMSE = 0.20$ و $NS = 0.50$) دارای دقت بیشتر و خطای کمتر در برآورد PR می‌باشد. همچنین می‌توان گفت بهترین مدل RF نسبت به بهترین مدل GEP (به دلیل داشتن NS نسبتاً بالاتر) قادر است PR را با دقت مناسبی تخمین بزند. مطابق درجه‌بندی واسیم و همکاران (Waseem et al., 2017) و وان و همکاران (Wan et al., 2023) می‌توان بیان نمود که در این پژوهش در بین مدل‌های پانزده‌گانه NF (جدول ۵)، GEP (جدول ۶) و RF (جدول ۷)، مدل شماره ۳ (شامل ۴ متغیر ورودی رطوبت خاک مزرعه، جرم مخصوص ظاهری، شن و میانگین هندسی قطر ذرات خاک) در روش NF به دلیل داشتن کوچکترین مقدار آماره NS و بالاترین مقدار آماره NRMSE، دارای ضعیف‌ترین عملکرد در برآورد مقاومت فروروی (PR) خاک در اراضی دشت اردبیل می‌باشد. در



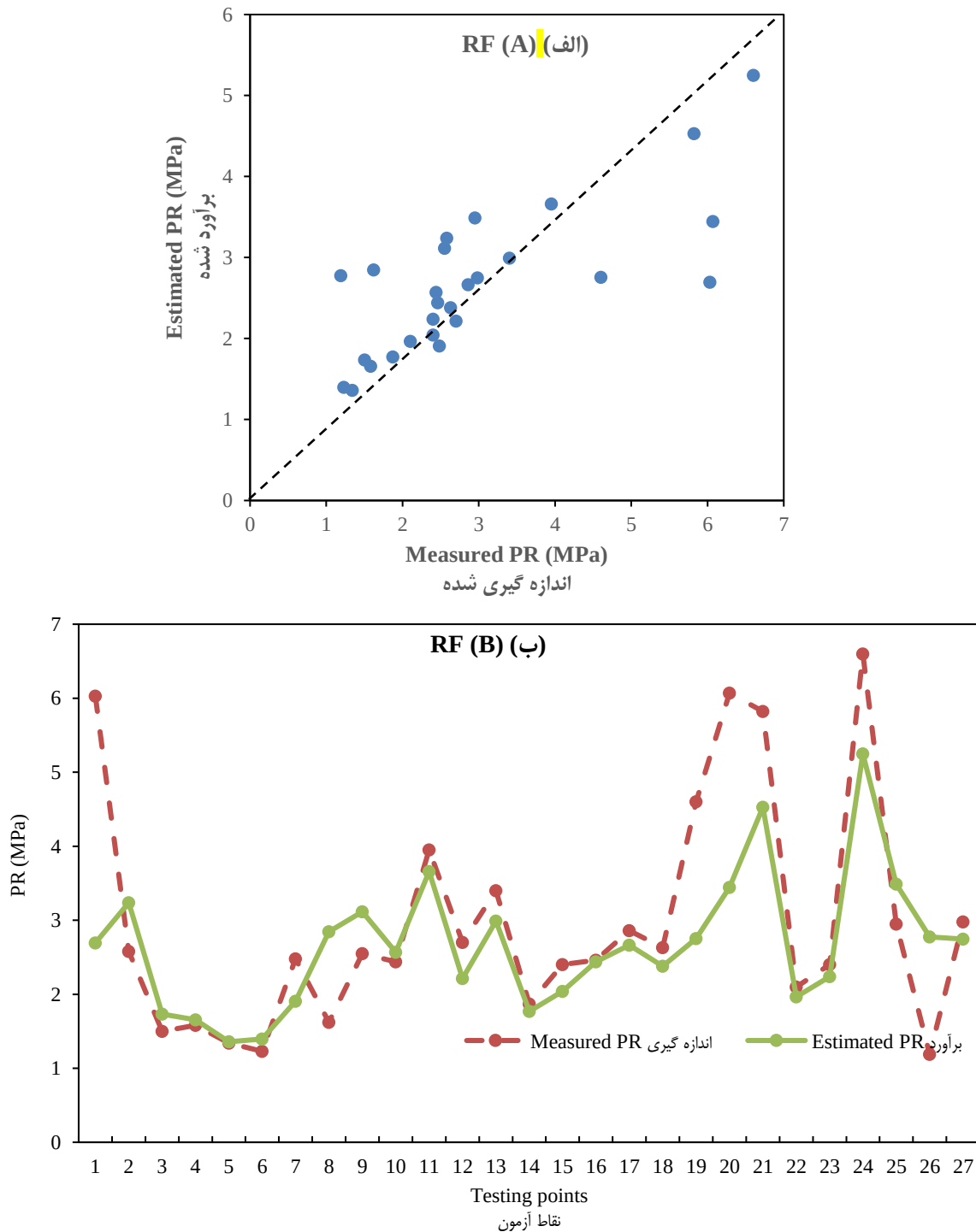
شکل ۳- پراکنش حول محور ۱:۱ (الف) و مقایسه (ب) مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده مقاومت فروروی خاک (PR) با استفاده از بهترین مدل نروفازی (NF) بر اساس داده‌های آزمونی (n=27)
اطلاعات مربوط به مدل و متغیرهای ورودی در جدول ۵ آورده شده است.

Figure 3- Distribution around the 1:1 axis (A) and comparison (B) of estimated and measured values of soil penetration resistance (PR) using the best NF model based on testing data (n=27)
Table 5 provides detailed information about model and input variables.



شکل ۴- پراکنش حول محور ۱:۱ (الف) و مقایسه (ب) مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده مقاومت فروروی خاک (PR) با استفاده از بهترین مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) بر اساس داده‌های آزمونی (n=27)
اطلاعات مربوط به مدل و متغیرهای ورودی در جدول ۵ آورده شده است.

Figure 4- Distribution around the 1:1 axis (A) and comparison (B) of estimated and measured values of soil penetration resistance (PR) using the best gene expression programming (GEP) model based on testing data (n=27)
Table 5 provides detailed information about model and input variables.

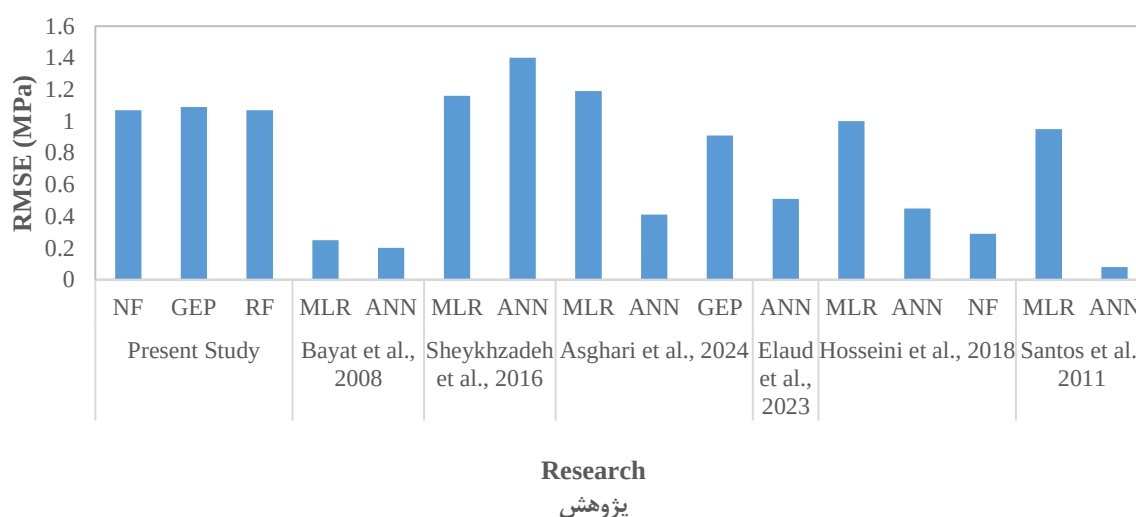


شکل ۵- پراکنش حول محور ۱:۱ (الف) و مقایسه (ب) مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده مقاومت فروروی خاک (PR) با استفاده از بهترین مدل جنگل تصادفی (RF) بر اساس داده‌های آزمونی (n=27)

اطلاعات مربوط به مدل و متغیرهای ورودی در جدول ۵ آورده شده است.

Figure 5- Distribution around the 1:1 axis (A) and comparison (B) of estimated and measured values of soil penetration resistance (PR) using the best random forest (RF) model based on testing data (n=27)

Table 5 provides detailed information about model and input variables.



شکل ۶- مقایسه مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در چند پژوهش گذشته با مطالعه حاضر برای برآورد مقاومت فروروی خاک (PR) با استفاده از مدل‌های مختلف پژوهش

Figure 6- Comparison of root mean square error (RMSE) values in some pervious researches with present study for estimating soil penetration resistance (PR) using different models

متغیرهای ورودی ۱۵ مدل رگرسیون خطی چندگانه ایجاد شده توسط شیخزاده و همکاران (Sheykhzadeh et al., 2016) شامل شن، سیلت، رس، میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات، جرم مخصوص ظاهری و حقیقی، تخلخل کل، رطوبت خاک مزرعه و کربن آلی خاک به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که مقاومت فروروی (PR) دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار با جرم مخصوص ظاهری و سیلت و همبستگی منفی و معنی‌دار با رطوبت خاک مزرعه و کربن آلی می‌باشد. ارزیابی و مقایسه مدل‌ها بر پایه آماره RMSE در داده‌های آزمونی نشان داد که هر سه روش هوشمند (مقادیر RMSE از ۱/۰۷ تا ۱/۰۹ مگاپاسکال) به کار رفته در این پژوهش در مقایسه با روش رگرسیون خطی چندگانه (مقدار RMSE برابر با ۱/۱۶ مگاپاسکال) مورد استفاده توسط شیخزاده و همکاران (Sheykhzadeh et al., 2016) توانستند مقاومت فروروی (PR) خاک را با خطای نسبتاً کمتری برآورد نمایند. نتایج بهترین مدل‌ها در هر سه روش هوشمند نیز بیانگر آن است که جرم مخصوص ظاهری، شن، رطوبت خاک مزرعه و میانگین هندسی قطر ذرات خاک، مناسب‌ترین متغیرهای ورودی در برآورد PR خاک در منطقه مورد مطالعه هستند. همچنین جرم مخصوص ظاهری به علت داشتن بیشترین مقدار ضریب رگرسیون، از اهمیت نسبی بالاتری نسبت به سایر متغیرهای ورودی در تخمین مقاومت فروروی خاک منطقه مورد مطالعه برخوردار می‌باشد. در بین سه مدل هوشمند مورد استفاده، مدل NF به علت داشتن آماره نش ساتکلیف (NS) بالاتر و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) پایین‌تر، دارای دقت بیشتری در برآورد PR می‌باشد. همچنین مدل RF در مقایسه با مدل GEP توانست عملکرد نسبتاً بهتری در برآورد PR از خود نشان دهد.

با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود میزان خطای مدل‌های رگرسیونی و هوشمند به کار رفته در پژوهش‌های مختلف برای برآورد مقاومت فروروی (PR) خاک به علت تعداد متفاوت نمونه‌ها، شرایط اقلیمی و توپوگرافیکی منطقه مورد مطالعه و نیز خطای ابزاری در سنجش مقاومت فروروی خاک یکسان نمی‌باشد. مقایسه مقادیر RMSE (براساس داده‌های مرحله آزمون) در برآورد مقاومت فروروی (PR) خاک نشان می‌دهد (شکل ۶) که بهترین مدل نروفازی (NF)، برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و جنگل تصادفی (RF) به کار رفته در تحقیق حاضر در مقایسه با مدل رگرسیونی خطی چندگانه (MLR) در پژوهش‌های شیخزاده و همکاران (Sheykhzadeh et al., 2016) و نیز اصغری و همکاران (Asghari et al., 2024) از خطای کمتری برخوردار بوده و مناسب‌تر است در حالی که هر سه مدل هوشمند به کار رفته در پژوهش حاضر نسبت به مدل‌های رگرسیونی و هوشمند استفاده شده در سایر پژوهش‌ها مانند بیات و همکاران (Bayat et al., 2008)، سانتوس و همکاران (Santos et al., 2011)، حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2018) و الایود و همکاران (Elaoud et al., 2023) دارای خطای (RMSE) بالاتری از نظر برآورد PR بوده و مناسب‌تر نیستند.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر از سه مدل هوشمند نروفازی (NF)، برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و جنگل تصادفی (RF) برای برآورد مقاومت فروروی (PR) خاک‌های زراعی دشت اردبیل استفاده گردید. برای این منظور،

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی از سایر مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین مانند یادگیری عمیق و ماشین بردار پشتیبان نیز در برآورد PR در منطقه مورد مطالعه استفاده گردد.

References

- 1- Asghari, Sh., Hasanpour Kashani, M., & Shahab Arkhazloo, H. (2024). Modeling soil penetration resistance using regression, artificial neural network and gene expression programming. *Journal of Soil and Water*, 38(2), 269-283. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/JSW.2024.86792.1385>
- 2- Bayat, H., Neyshabouri, M.R., & Hajabbasi, M. (2008). Comparing neural networks, linear and nonlinear regression techniques to model penetration resistance. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 32, 425-433.
- 3- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45, 5-32.
- 4- Elaoud, A., Hassen, H.B., Jalel, R., Salah, N.B., Masmoudi, A., & Masmoudi, A. (2023). Machine learning approach for predicting soil penetration resistance under different moisture conditions. *Journal of Terramechanics*, 110, 39-45. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.08.002>
- 5- Ferreira, C. (2006). Gene Expression Programming: Mathematical modeling by an artificial intelligence. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, p. 478.
- 6- Ghorbani, M.A., Deo, R.C., Kashani, M.H., Shahabi, M., & Ghorbani, S. (2019). Artificial intelligence-based fast and efficient hybrid approach for spatial modeling of soil electrical conductivity. *Soil and Tillage Research*, 186, 152-164. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.09.012>
- 7- Hosseini, M., Movahedi Naeini, S.A.R., Dehghani, A.A., & Zeraatpisheh, M. (2018). Modeling of soil mechanical resistance using intelligent methods. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 18(4), 939-951. <https://doi.org/10.4067/s0718-95162018005002702>
- 8- Kozak, E., Pachepsky, Y.A., Sokolowski, S., Sokolowska, Z., & Stepniewski, W. (1996). A modified number-based method for estimating fragmentation fractal dimensions of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 60, 1291-1297. <https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000050002x>
- 9- Lowery, B., & Morrison, J.E. (2002). *Soil penetrometer and penetrability*. In: Dane J.H., & Topp GC (eds.). *Methods of soil analysis, part 4. Physical methods*. Madison (WI): Soil Science Society of America, 363-388. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c16>
- 10- Parsaie, F., Farrokhi Firouzi, A., Davari, M., & Taghizadeh-Mehrjardi, R. (2025). Digital mapping of soil penetration resistance and shear strength using machine learning algorithms in the Kilane watershed, Kurdistan province. *Journal of Range & Watershed Management*, 78(1), 124-143. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2024.381733.1783>
- 11- Santos, F.L., De Jesus, V.A.M., & Valente, D.S.M. (2012). Modeling of soil penetration resistance using statistical analyses and artificial neural networks. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 34, 219-224. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v34i2.11627>
- 12- Sheykhzadeh, G.R., Asghari, Sh., & Mesri Gundoshmian, T. (2016). Estimating penetration resistance in agricultural soils of Ardabil plain using artificial neural network and regression methods. *Water and Soil*, 30(3), 941-954. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/JSW.V30I3.42235>
- 13- Shiri, J., Keshavarzi, A., Kisi, O., & Karimi, S. (2017). Using soil easily measured parameters for estimating soil water capacity: Soft computing approaches. *Computers and Electronics in Agriculture*, 141, 327-339. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.08.012>
- 14- Singh, V.K., Kumar, D., Kashyap, P.S., Singh, P.K., Kumar, A., & Singh, S.K. (2020). Modelling of soil permeability using different data driven algorithms based on physical properties of soil. *Journal of Hydrology*, 580(124223). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124223>
- 15- Unal, I., Kabaş, O., & Sozer, S. (2024). Comparison of two different artificial neural network models for prediction of soil penetration resistance. *Journal of Agricultural Engineering*, 55(1), 79-86. <https://doi.org/10.4081/jae.2023.1550>
- 16- Warrick, A.W. (2002). *Soil Physics Companion*. CRC Press. 247p.
- 17- Wan, H., Qi, H., & Shang, S. (2023). Estimating soil water and salt contents from field measurements with time domain reflectometry using machine learning algorithms. *Agricultural Water Management*, 285, 108364. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108364>
- 18- Waseem, M., Mani, N., Andiego, G., & Usman, M. (2017). A review of criteria of fit for hydrological models. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(11), 1765-1772.

Contents

Spatiotemporal Analysis of Groundwater Quality Changes: A Case Study of the Bahabad Aquifer, Yazd Province, Iran	111
H. Sarvi Sadrabad- H.R. Moradi- H.R. Sadeghi- A. Zare Chahouki	
Comparison of Parametric and Empirical Approaches for Assessing Tunnel Excavation Impacts on Spring Discharge: A Case Study of the Hezarmasjed Water Conveyance Tunnel	127
A. Saberinasr, F. Ghatrani-nejad, M. Dashti Barmaki	
Numerical Investigation of the Effect of Increasing the Geometric Dimensions of the Horizontal Drain on the Performance and Stability of the Nahand Earth Dam	153
T. Omidpour Alavian, E. Asadi, M. Soltani Setoobadi, E. Hematvand	
Effects of Tillage Systems on Soil Physical, Chemical, and Biological Properties under Durum Wheat Cultivation	181
A. Beheshti Ale Agha, H.R. Chaghazardi	
Evaluation of the Role of Plant Growth-promoting Bacteria in Improving Nutrient Content and Reducing Nitrate Accumulation in Spinach	211
N. Enayatizamir, N. Rangzan, M. Mokfi	
Comparison of the Performance of Neuro-fuzzy, Gene Expression Programming and Random Forest Models in Estimating Soil Penetration Resistance	227
H.A. Abdoraza, Sh. Asghari, M. Hasanpour Kashani, H. Shahab Arkhazloo	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 40

No. 2

Summer, 2026

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	Tabriz 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).



Vol. 40 No. 2

2026

Journal of **Water and Soil** (Agricultural Science and Technology)

ISSN:2008-4757

Contents

- Spatiotemporal Analysis of Groundwater Quality Changes: A Case Study of the Bahabad Aquifer, Yazd Province, Iran.....** 111
H. Sarvi Sadrabad- H.R. Moradi- H.R. Sadeghi- A. Zare Chahouki
- Comparison of Parametric and Empirical Approaches for Assessing Tunnel Excavation Impacts on Spring Discharge: A Case Study of the Hezarmasjed Water Conveyance Tunnel** 127
A. Saberinasr, F. Ghatrani-nejad, M. Dashti Barmaki
- Numerical Investigation of the Effect of Increasing the Geometric Dimensions of the Horizontal Drain on the Performance and Stability of the Nahand Earth Dam** 153
T. Omidpour Alavian, E. Asadi, M. Soltani Setoobadi, E. Hematvand
- Effects of Tillage Systems on Soil Physical, Chemical, and Biological Properties under Durum Wheat Cultivation.....** 181
A. Beheshti Ale Agha, H.R. Chaghazardi
- Evaluation of the Role of Plant Growth-promoting Bacteria in Improving Nutrient Content and Reducing Nitrate Accumulation in Spinach** 211
N. Enayatizamir, N. Rangzan, M. Mokfi
- Comparison of the Performance of Neuro-fuzzy, Gene Expression Programming and Random Forest Models in Estimating Soil Penetration Resistance.....** 227
H.A. Abdoraza, Sh. Asghari, M. Hasanpour Kashani, H. Shahab Arkhazloo