نشریه
آب و خاک
(علوم و صنایع کشاورزی)

جلد ۴۰ شماره ۱
سال ۱۴۰۵

شماره پیاپی ۱۰۵

شاپا: ۴۷۵۷-۲۰۰۸

عنوان مقالات

تحلیل ردپای انرژی در تولید برنج، ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی (مطالعه موردی: سه شهرستان استان لرستان) ۳
فاطمه آزادپور- مسعود شاکرمی- سید یعقوب کریمی

بررسی تأثیر تنش کمبود رطوبت بر کارایی جذب و مصرف نور ارقام مختلف لوبیاقرمز (*Phaseolus vulgaris* L.) در یک اقلیم مدیترانه‌ای ۲۱
فاطمه پارساپور- فرزاد مندنی- غلامرضا محمدی

تحلیل چندمعیاره ضرایب تخلیه مجاز رطوبت خاک در مدیریت آبیاری چغندرقند: پیوند معیارهای عملکردی، فنی و اقتصادی ۴۱
رضا محمدی کیا

نقش باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد در کاهش تنش خشکی در گیاه گوجه‌فرنگی و ویژگی‌های زیستی خاک ۵۷
سهیلا ساسانی فر- علی بهشتی آل آقا- روح الله شریفی- صحبت بهرامی نژاد

افزایش کارایی سورگوم علوفه‌ای در پالایش خاک‌های آلوده به کادمیوم با رویکرد زیستی-شیمیایی ۷۳
فرزاد رستمی- حمیدرضا عیسوند- ماشااله دانشور- محسن سعیدی- سجاد رحیمی مقدم

تأثیر تغییر کاربری زمین بر مشخصه‌های ریشه و پویایی آنزیم‌های خاک در اکوسیستم خزری ۸۹
فاطمه حیدری- یحیی کوچ

آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

با شماره پروانه 21/2015 مورخه1368/4/11 و درجه علمی– پژوهشی شماره 26524 تاریخ 1373/10/19 از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد 40 شماره 1 بهار سال 1405

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

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

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

سردبیر: امیر فتوت — استاد- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

اعضای هیئت تحریریه:

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

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

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

پست الکترونیکی: jswa3@um.ac.ir

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

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

بسم الله الرحمن الرحیم

مندرجات

تحلیل ردپای انرژی در تولید برنج، ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی (مطالعه موردی: سه شهرستان استان لرستان) 3

فاطمه آزادپور - مسعود شاکرمی - سید یعقوب کریمی

بررسی تأثیر تنش کمبود رطوبت بر کارایی جذب و مصرف نور ارقام مختلف لوبیاقرمز (*Phaseolus vulgaris* L.) در یک اقلیم مدیترانه‌ای 21

فاطمه پارساپور - فرزاد مندنی - غلامرضا محمدی

تحلیل چندمعیاره ضرایب تخلیه مجاز رطوبت خاک در مدیریت آبیاری چغندرقند: پیوند معیارهای عملکردی، فنی و اقتصادی 41

رضا محمدی کیا

نقش باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد در کاهش تنش خشکی در گیاه گوجه‌فرنگی و ویژگی‌های زیستی خاک 57

سهیلا ساسانی فر - علی بهشتی آل آقا - روح الله شریفی - صحبت بهرامی نژاد

افزایش کارایی سورگوم علوفه‌ای در پالایش خاک‌های آلوده به کادمیوم با رویکرد زیستی-شیمیایی 73

فرزاد رستمی - حمیدرضا عیسوند - ماشااله دانشور - محسن سعیدی - سجاد رحیمی مقدم

تأثیر تغییر کاربری زمین بر مشخصه‌های ریشه و پویایی آنزیم‌های خاک در اکوسیستم خزری 89

فاطمه حیدری - یحیی کوچ

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 40, No. 1, Spring. 2026, p. 1-17

Energy Footprint Analysis in the Production of Rice, Forage Maize, and Potatoes (Case Study: Three Counties in Lorestan Province)

F. Azadpour [1], M. Shakarami [1*], S.Y. Karimi [1]
1- Department of Water Engineering, Lorestan University, Lorestan, Iran
(*- Corresponding Author Email: Shakarami.mas@lu.ac.ir)

Received: 15 October 2025
Revised: 06 June 2026
Accepted: 09 June 2026
Available Online: 09 June 2026

How to cite this article:
Azadpour, F., Shakarami, M., & Karimi, S.Y. (2026). Energy footprint analysis in the production of rice, forage maize, and potatoes (Case study: Three counties in Lorestan province). *Journal of Water and Soil, 40*(1), 1-17. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2026.95938.1505

Introduction

The agricultural sector's strong dependence on water and energy resources for ensuring food security for the growing global population amplifies the necessity of enhancing water and energy efficiency in agricultural products, while simultaneously maintaining the health of society and the environment. Sustainable provision of water and energy is one of the main challenges to development in all countries. Since the agricultural sector is one of the largest consumers of water and energy, any disruption in their supply can significantly impact agricultural production levels. Increasing efficiency and optimizing energy consumption management are key strategies for mitigating the environmental effects caused by food production processes. This approach not only creates economic benefits but also plays a crucial role in achieving the long-term sustainability of production systems through the conservation of fossil resources and reduction of air pollution. Consequently, extensive research has been focused on energy management. On the other hand, unsustainable use of agricultural inputs such as chemical fertilizers, pesticides, and fossil fuels leads to serious consequences, including global warming, biodiversity loss, and degradation of soil and air quality. Therefore, sustainable management of these inputs is essential and inevitable for maintaining environmental balance and achieving sustainable development. Thus, the challenges of food security and the need for sustainability of energy resources in modern agriculture have heightened the importance of assessing energy consumption efficiency. Energy footprint analysis serves as an effective tool for identifying high-consumption areas and providing managerial and technological solutions to improve energy efficiency in agricultural production.

Materials and Methods

This research was conducted with the aim of examining the personal characteristics of farmers, analyzing energy consumption, and assessing energy indicators in the cultivation of three major crops: rice, forage corn, and potatoes, in the districts of Dorud, Kuhdasht, and Azna, respectively, in Lorestan Province. Data were collected through questionnaires and face-to-face interviews with farmers and analyzed using statistical methods. The input energy indicators included chemical fertilizers, fuel, irrigation water, seeds, and human labor. The main sections of the questionnaires included: (I) general information about the farmer and the farm, such as age, education, work experience, and land area; (II) information regarding the amount of input consumption, including human labor, machinery, chemical inputs, fuel, irrigation water, and seeds; and (III) information regarding crop yield. The statistical population consisted of one thousand active farmers involved in rice production (in Dorud), forage corn (in Kuhdasht), and potatoes (in Azna). To determine the sample size, the Cochran formula was used with a confidence level of 95% and a margin of error of 7%. To calculate the energy equivalent of inputs and outputs, all production inputs and outputs were converted to energy equivalents in terms of megajoules per hectare (MJ/ha). In this research, indicators such as Energy Ratio, Net Energy Yield, Energy Efficiency, and Water Use Efficiency

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).
https://doi.org/10.22067/jsw.2026.95938.1505

were employed.

Results and Discussion

The findings indicated that the majority of farmers were in the age range of 40-50 years, with primary or high school education, and had a minimum of five years of farming experience. Their predominant crop was forage corn. The findings indicated that the highest input energy consumption was observed for potatoes, with 123048 MJ ha^{-1}, of which fuel energy accounted for 58.17%. It was followed by rice with 121117.09 MJ ha^{-1} (fuel energy share: 50%), and forage maize with 98644 MJ ha^{-1}, where 60.85% of the total energy input was derived from fuel consumption. After fossil fuels, agricultural machinery, with an average share of 30%, and chemical fertilizers, with an average of 10%, ranked nex. The energy share of irrigation water in rice was 11236.39 MJ ha^{-1} (9.28%), which was significantly higher compared to the other two crops.

Conclusion

Overall, the results revealed that potato had the highest total input energy (123048 MJ ha^{-1}) and output energy (151200 MJ ha^{-1}), while forage maize had the lowest input energy (98644 MJ ha^{-1}).

Keywords: Energy consumption, Energy productivity, Irrigation water, Lorestan province, Nitrogen fertilizer

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۴۰، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص. ۱۷-۱

تحلیل ردپای انرژی در تولید برنج، ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی (مطالعه موردی: سه شهرستان استان لرستان)

فاطمه آزادپور[۱]- مسعود شاکرمی[۱*]- سید یعقوب کریمی[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۹

چکیده

افزایش جمعیت و تقاضا برای غذا تغییراتی را در عملیات‌های کشاورزی و بالا رفتن مصرف نهاده‌هایی چون سوخت، برق، کودهای شیمیایی و سموم به همراه داشته است. این پژوهش به تحلیل و مقایسه مصرف آب و انرژی در تولید برنج، ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی در شهرستان‌های درود، کوهدشت و ازنا در استان لرستان در سال ۱۴۰۳ می‌پردازد. جامعه آماری شامل هزار کشاورز فعال در تولید این محصولات در شهرستان‌های مذکور بوده و حجم نمونه بر اساس فرمول کوکران (با سطح اطمینان ۹۵ درصد و میزان خطای ۷ درصد)، ۱۸۸ نفر برآورد گردید. مقایسه مصرف انرژی ورودی در محصولات سیب‌زمینی، برنج و ذرت علوفه‌ای نتایج متفاوتی را نشان داد به‌طوری‌که، سیب‌زمینی با ۱۲۳۰۴۸ مگاژول بر هکتار، بیشترین و ذرت علوفه‌ای با ۹۸۶۴۴ مگاژول، کمترین میزان مصرف انرژی را دارند. همچنین، ذرت علوفه‌ای با ۶۰/۸۵ درصد بالاترین وابستگی نسبی به انرژی سوخت را دارد، در حالی‌که این نسبت برای برنج ۵۰ درصد و سیب‌زمینی ۵۸/۱۷ درصد است. این یافته بر اهمیت تفکیک منابع انرژی برای درک بهتر الگوهای مصرف در محصولات مختلف تأکید دارد. مقایسه اجزای انرژی ورودی، حاکی از بالابودن سهم سوخت فسیلی در همه محصولات است؛ بیشترین درصد سوخت در ذرت علوفه‌ای (۶۰/۸۵ درصد) و بیشترین میزان عددی مربوط به سیب‌زمینی (۷۱۵۰۸۴/۰۹ مگاژول در هکتار) است. پس از سوخت فسیلی، ماشین‌آلات کشاورزی با متوسط سهم ۳۰ درصد و کودهای شیمیایی با میانگین ۱۰ درصد در رتبه‌های بعدی قرار دارند. از نظر مصرف انرژی آب آبیاری، برنج (۹/۲۸ درصد) و ذرت علوفه‌ای (۲/۰۶ درصد) به‌ترتیب بیشترین و کمترین میزان را دارند. نتایج فوق تأکید می‌نماید که ارتقاء کارایی مصرف انرژی در بخش کشاورزی کشور نیازمند راهکارهایی از جمله استفاده از فناوری‌های نوین آبیاری، اصلاح شیوه‌های مصرف نهاده‌ها، آموزش بهره‌برداران و توسعه کشاورزی پایدار و دانش‌بنیان است.

واژه‌های کلیدی: آب آبیاری، بهره‌وری انرژی، کود نیتروژنی، لرستان، مصرف انرژی

مقدمه

بخش کشاورزی به‌عنوان یکی از ارکان اصلی تأمین امنیت غذایی برای جمعیت رو به رشد جهان، وابستگی شدیدی به منابع حیاتی آب و انرژی دارد. این وابستگی، لزوم ارتقای بهره‌وری آب و انرژی در محصولات کشاورزی را هم‌زمان با حفظ سلامت جامعه و محیط‌زیست دوچندان می‌سازد (Faramzania *et al*., 2023). تأمین پایدار این دو نهاده، از چالش‌های اصلی توسعه در تمام کشورهاست؛ زیرا هر گونه اختلال در زنجیره تأمین آن‌ها می‌تواند به‌طور معنادار بر سطح تولیدات کشاورزی تأثیر بگذارد. از این رو، افزایش بهره‌وری و مدیریت بهینه مصرف انرژی، راهبردی کلیدی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از فرآیندهای تولید مواد غذایی و تحقق پایداری بلندمدت سیستم‌های تولیدی به شمار می‌رود. با این حال، استفاده ناپایدار از نهاده‌های کشاورزی، نظیر کودهای شیمیایی و سوخت‌های فسیلی، پیامدهای

۱- گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: Shakarami.mas@lu.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/jsw.2026.95938.1505

جدی همچون گرمایش جهانی، کاهش تنوع زیستی و تخریب کیفیت خاک و هوا به دنبال دارد که مدیریت آن‌ها امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است (Shahbazi *et al.*, 2025).

کشاورزی با سهمی حدود ۵ درصد از مصرف انرژی جهانی، عمدتاً از منابع تجدیدناپذیر، یکی از منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای (GGE) محسوب می‌شود. تعهدات بین‌المللی مانند توافق پاریس، لزوم بازنگری در فرآیندهای تولید این بخش را برای کاهش اثرات زیست‌محیطی ضروری می‌سازد (Platis *et al.*, 2019). تحلیل تولید کشاورزی از دیدگاه انرژی، با تبدیل تمام نهاده‌ها و خروجی‌ها به واحدهای انرژی، ابزاری قدرتمند برای ارزیابی بهره‌وری و پایداری فراهم می‌کند (Michos *et al.*, 2017; Platis *et al.*, 2019). بر اساس گزارش فائو، مصرف انرژی در یک اکوسیستم کشاورزی منجر به افزایش بهره‌وری و تقویت ایمنی محصول می‌شود (FAO, 2019). در اکوسیستم‌های کشاورزی، نیروی کار انسانی، سوخت‌های فسیلی، ماشین‌آلات، برق، آبیاری و مواد شیمیایی، به‌عنوان نهاده‌های مستقیم انرژی شناخته می‌شوند. علاوه بر این، انرژی مصرف‌شده برای تولید خود این نهاده‌ها (مانند انرژی نهفته در تولید کود و ماشین‌آلات) نیز باید در محاسبات لحاظ شود (Michos *et al.*, 2018). این انرژی مکمل به حداکثر رساندن خروجی (تولید) در هر هکتار کمک می‌کند (Taxidis *et al.*, 2015).

البته باید مدنظر داشت که مدیریت تولید کشاورزی، به‌دلیل ماهیت چندمتغیره، نیازمند ابزارهای کارآمد برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی است. اگرچه ابزارهای موجود، غالباً بر نهاده‌های شیمیایی متمرکزند، اما کمی‌سازی سهم انرژی ماشین‌آلات نیز یک گام ضروری است. اهمیت این موضوع در مطالعه موردی خاک‌ورزی آشکار شده است که در آن انتخاب ماشین‌آلات نامناسب سبب افزایش دو برابری هزینه انرژی شده است (Lampridi *et al.*, 2020).

امروزه یکی از مهمترین مباحث اکولوژیکی در بخش کشاورزی و توسعه پایدار، بررسی میزان انرژی تولید شده به ازای مقدار انرژی مصرف شده می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان گفت هر سیستم زراعی که بهره‌وری انرژی بالاتری داشته باشد، در جهت توسعه و کشاورزی پایدار حرکت و در مقابل نیز می‌تواند آثار زیان بار زیست‌محیطی و ناپایداری اکولوژیکی را به همراه داشته باشد (Jalilian *et al.*, 2023).

در سطح ملی، مطالعات متعدد به بررسی الگوهای مصرف انرژی در کشاورزی پرداخته‌اند. برآوردها نشان می‌دهد که میانگین عملکرد ذرت در کشور حدود ۶۱۶۷ کیلوگرم در هکتار بوده و برای تولید این میزان محصول، به‌طور متوسط ۵۵ گیگاژول انرژی در هر هکتار مصرف می‌شود. بیشترین سهم مصرف انرژی به کودهای شیمیایی و سوخت‌های فسیلی مربوط است (Mohammadi & Meysami 2021). تحلیل روند مصرف انرژی در بخش کشاورزی ایران، حاکی از افزایش ۳۲/۴ به ۳۷/۲گیگاژول بر هکتار طی دوره‌ی زمانی ۱۳۶۹ تا ۱۳۸۵ دارد، به‌طوری‌که نهاده‌های آب آبیاری (۴۰٪) و کودهای نیتروژنه (۲۸٪) به‌عنوان اصلی‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی شناسایی شده‌اند (Beheshti Tabar *et al.*, 2010). این الگو در مطالعات موردی دیگر در همدان و تجن نیز تکرار شده است؛ به‌طوری‌که در مزارع سیب‌زمینی استان همدان، مجموع انرژی ورودی برای عملکردی معادل ۲۸ تن در هکتار، ۹۲۲۹۶ مگاژول در هکتار گزارش شده است. در این تحقیق، کود نیتروژن (۳۹٪) و سوخت دیزل (۲۱٪) به‌عنوان مهم‌ترین منابع مصرف انرژی معرفی گردیدند. همچنین میزان سهم بذر، آب و کود آلی به‌ترتیب ۹،۷۸٪، ۷،۵٪ و ۶،۴٪ گزارش شده است (Rajabi Hamedani *et al.*, 2011). در مطالعه‌ای دیگر، با بررسی بهره‌وری فیزیکی آب و شاخص‌های انرژی در محصولات عمده‌ی کشاورزی دشت تجن گزارش گردید، انرژی ورودی برای محصول برنج ۵۹۳۲۵۶ MJ/ha، انرژی خروجی برای ذرت علوفه‌ای ۱۴۱۷۹۵ MJ/ha و بهره‌وری انرژی آن ۱،۰۱ kg/MJ بوده است. همچنین مشخص شد که نهاده‌های آب آبیاری، کود نیتروژن و سوخت بیشترین سهم انرژی مصرفی را داشته‌اند (Jafari Telokolaei *et al.*, 2024).

تحلیل میزان مصرف آب و انرژی و اثرات محیطزیستی تولید محصولات کشاورزی در دشت میاندربند استان کرمانشاه نشان‌دهنده ناکارامدی کشاورزی در این دشت و در نتیجه افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی به واسطه مصرف زیاد منابع است. کل مصرف انرژی در این منطقه تقریباً ۹۷۵۶۰۸ مگاژول در هکتار بود که سهم مصرفی انرژی ورودی سیب‌زمینی، ذرت علوفه‌ی و گوجه‌فرنگی در آن به‌ترتیب ۲۵، ۲۲ و ۱۵ درصد است (Karamian *et al.*, 2023).

نتایج مطالعه فان و همکاران (Fan *et al.*, 2020) نیز نشان داد در بخش کشاورزی ۷۰ درصد انرژی به‌صورت غیرمستقیم و ۳۰ درصد به‌صورت مستقیم مصرف می‌شود. در مطالعه‌ای که با هدف بررسی عملکرد و بهره‌وری محصول جو در اتیوپی انجام شد، نتایج نشان داد که میزان بهره‌وری آب در این محصول بین ۲/۰۱ تا ۲/۹۵ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد (Ararssa *et al.*, 2019). در بررسی مصرف انرژی در شالیزارهای مازنی مشخص شد، میزان انرژی مصرفی به‌منظور تولید برنج در هر هکتار حدود ۱۲۱۸۱ مگاژول است که کود و سوخت بیشترین سهم میزان انرژی ورودی را به خود اختصاص داده‌اند (Bockari-Gevao *et al.*, 2005).

تحلیل چرخه انرژی در سیستم‌های کشاورزی نشان می‌دهد که بیشترین سهم مصرف انرژی به‌ترتیب مربوط به آبیاری (۴۵ درصد)، ماشین‌آلات (۳۰ درصد) و نهاده‌های شیمیایی مانند کود و سموم (۲۵ درصد) است (Nabavi-Pelesaraei *et al.*, 2023). در این میان، سیستم‌های آبیاری به‌دلیل نیاز به پمپاژ و انتقال آب، بیشترین سهم را در مصرف انرژی دارند. لذا با توجه به مطالب بالا، در طی دهه‌های اخیر مهم‌ترین چالش‌های پیش‌روی کشاورزی مدرن، کاهش کارایی مصرف انرژی در طول زمان است. به‌طوری‌که در طول چهار دهه اخیر، با وجود

افزایش عملکرد در واحد سطح، کارایی مصرف انرژی در کشاورزی ایران حدود ۲۰ درصد کاهش یافته است (Mousavi Avval *et al.*, 2023). این روند نزولی عمدتاً ناشی از فرسودگی ماشین‌آلات کشاورزی، استفاده از روش‌های سنتی آبیاری و مصرف بی‌رویه نهاده‌های شیمیایی است. مضاعفاً در دهه‌های اخیر، افزایش قیمت حامل‌های انرژی و نگرانی‌های فزاینده درباره تغییرات اقلیمی، توجه محققان و سیاستگذاران را به موضوع بهره‌وری انرژی در بخش کشاورزی جلب کرده است.

در مجموع، نتایج پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که تفاوت در ساختار مصرف نهاده‌ها، سهم بالای انرژی‌های غیرتجدیدپذیر و اختلاف در شاخص‌های کارایی بین محصولات مختلف، ضرورت تحلیل دقیق‌تر مصرف آب و انرژی و ارزیابی شاخص‌های مرتبط با آن در نظام‌های زراعی ایران را برجسته می‌سازد. استان لرستان با دارا بودن شرایط اقلیمی متنوع، نقش مهم در تولید محصولات کشاورزی دارد. در این میان، تولید برنج، ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی بخش قابل‌توجهی از فعالیت‌های کشاورزی این استان را تشکیل می‌دهد. لذا ارزیابی ردپای انرژی در تولید این محصولات می‌تواند به شناسایی نقاط پر مصرف انرژی و ارائه راهکارهای مدیریتی پایدار کمک نماید. لذا پژوهش حاضر با تمرکز بر سه محصول کلیدی استان لرستان (برنج، ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی) به ارزیابی جامع ردپای انرژی در تولید این محصولات می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش با هدف تحلیل، مقایسه و ارزیابی مصرف آب و انرژی در تولید محصولات کشاورزی برنج ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی به ترتیب در شهرستان‌های درود، کوهدشت و ازنا در استان لرستان در سال ۱۴۰۳ انجام شد. در این راستا، میزان و الگوی مصرف انرژی و آب برای تولید هر هکتار بررسی و با یکدیگر مقایسه گردید. همچنین، شاخص‌های کمی مرتبط با کارایی انرژی و مصرف آب به‌منظور ارزیابی عملکرد این نظام‌های تولیدی محاسبه شد. علت انتخاب این سه شهرستان و همچنین تنوع محصولات مختلف، تفاوت‌های اقلیمی و الگوی کشت غالب در این مناطق است. به‌گونه‌ای که محصولات برنج، ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی به‌ترتیب نمایانگر محصولات زراعی برجسته شهرستان‌های درود، کوهدشت و ازنا می‌باشند.

محدوده جغرافیایی مطالعه

استان لرستان با مرکزیت شهر خرم‌آباد، با مساحت حدود ۲۸۱۵۷ کیلومتر مربع (۱/۷ درصد مساحت کشور) در ناحیه جنوب غربی ایران واقع شده است. این استان از نظر جغرافیایی بین ۴۶ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۱ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۳ دقیقه عرض شمالی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. بر اساس آخرین تقسیمات کشوری، استان لرستان دارای ۱۱ شهرستان، ۳۴ بخش، ۳۳ شهر، ۸۸ دهستان و ۳۰۸۴ آبادی دارای سکنه می‌باشد (سالنامه آماری ۱۴۰۰). اقلیم استان لرستان تحت تأثیر توده‌های هوایی مدیترانه‌ای قرار دارد. بر این اساس سه ناحیه آب و هوایی ۱) آب و هوای گرم و خشک جنوب، ۲) آب و هوای معتدل مرکزی، ۳) آب و هوای سرد شمالی در استان وجود دارد. در مجموع ۲۳ رودخانه دائمی در استان لرستان وجود دارد. کشکان، سیمره، سزار و بختیاری مهمترین رودخانه‌های استان هستند. میانگین دمای ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی استان ۱۶/۸۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میانگین بارندگی استان لرستان تقریباً ۵۴۹ میلی‌متر می‌باشد (سالنامه آماری ۱۴۰۰). مشخصات شهرستان‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه گردیده است. نقشه استان لرستان و پراکنش شهرستان‌های مذکور در شکل ۱ ارائه شده است.

جامعه آماری و نمونه‌گیری

جامعه آماری شامل هزار کشاورز فعال در تولید برنج (در شهرستان درود)، ذرت علوفه‌ای (در کوهدشت) و سیب‌زمینی (در ازنا) بود. برای تعیین حجم نمونه، از فرمول کوکران با سطح اطمینان ۹۵ درصد و میزان خطای ۷ درصد استفاده شد (Heidari Sultanabadi, 2022).

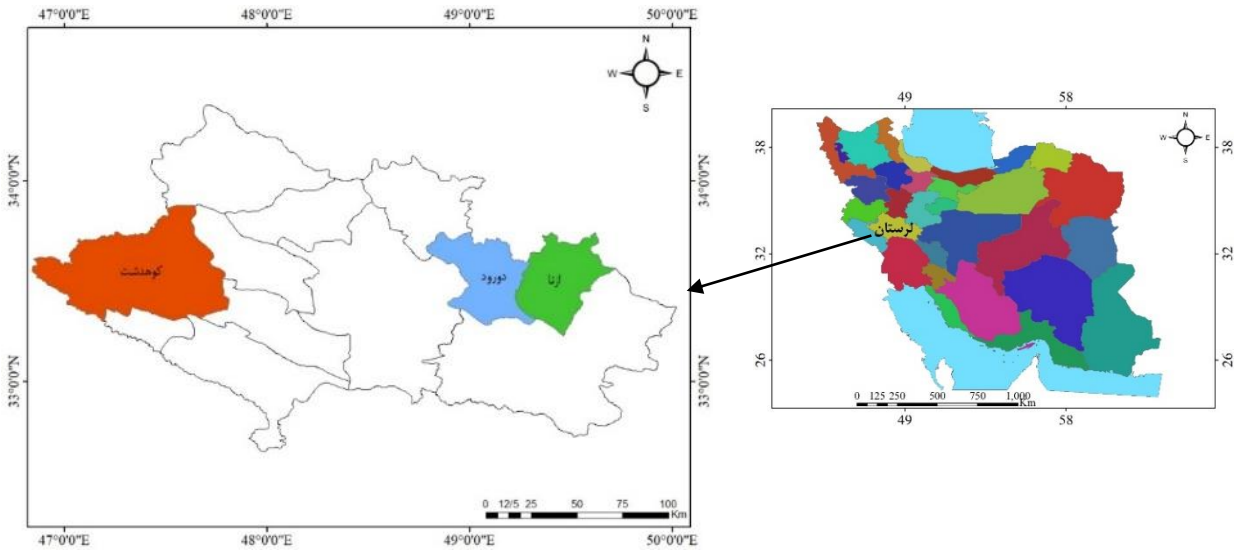
$$n = \frac{\frac{(z^2 \cdot p \cdot q)}{d^2}}{1+\frac{1}{N}(\frac{(z^2 \cdot p \cdot q)}{d^2}-1)} \qquad (۱$$

که: n حجم نمونه نهایی، z مقدار بحرانی توزیع نرمال، p نسبت برخورداری از صفت مورد مطالعه (اگر نامعلوم باشد، ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود)، q برابر است با 1−p، d خطای مجاز و N حجم نمونه آماری می‌باشد. بر اساس فرمول بالا ۱۸۸ کشاورز فعال در کشت برنج، سیب‌زمینی و ذرت علوفه‌ای به‌عنوان نمونه انتخاب و پرسشنامه‌ها توسط آنان تکمیل گردید.

جمع‌آوری داده‌ها: داده‌ها از طریق پرسشنامه‌های ساختار یافته و مصاحبه حضوری با کشاورزان جمع‌آوری شدند. بخش‌های اصلی پرسشنامه‌ها عبارتند از:

اطلاعات عمومی مربوط به کشاورز و مزرعه: شامل سن، تحصیلات، سابقه کار، وسعت زمین

اطلاعات مربوط به میزان مصرف نهاده‌ها: از جمله نیروی انسانی، ماشین‌آلات، نهاده‌های شیمیایی، سوخت، آب آبیاری و بذر و اطلاعات مربوط به عملکرد محصول



شکل ۱- موقعیت شهرستان‌های مورد مطالعه در ایران

Figure 1- The location of study area in Iran

جدول ۱- مشخصات شهرستان‌های مورد مطالعه

Table 1- Specifications of the studied counties

مشخصات Specifications	شهرستان County		
	دورود Doroud	کوهدشت Kohdasht	ازنا Azna
میانگین بارندگی سالانه Average annual rainfall (mm)	600	500	450
میانگین تبخیر سالانه Average annual evaporation (mm)	1800	2500	2000
جمعیت (برآورد ۱۴۰۲) Population (est. 2022)	50000 نفر	100000 نفر	60000 نفر
محصول اصلی کشاورزی Main agricultural product	برنج Rice	ذرت علوفه‌ای Fodder corn	سیب‌زمینی Potato
سطح زیر کشت محصول Area under crop (hectares)	1000	5000	2000
عملکرد محصول Crop yield (tons/hectare)	4	50	30
میانگین دمای سالانه Average Annual Temperature	15.2	17.5	14.8
نوع اقلیم (کپن) Köppen Climate Classification	Cas	Bsk	Cas
روش غالب آبیاری Dominant Irrigation Method	سنتی (غرقابی) Flood irrigation	تحت فشار (قطره ای/ بارانی) Pressurized (Sprinkler/Drip)	سنتی (کرتی) Basin irrigation
راندمان متوسط پمپاژ Average Pumping Efficiency	55%	75%	60%
عمق متوسط آب زیرزمینی (متر) Average Groundwater Depth	2.5	4	3
بافت خاک غالب Dominant soil texture	رسی با زهکش کم Clay texture with poor drainage	رسی شنی Sandy clay texture	لومی رسی Clay loam texture

روایی محتوایی پرسشنامه با استفاده از نظرسنجی از برخی کارشناسان اداره جهادکشاورزی استان لرستان و همچنین تعدادی از اعضای هیئت علمی دانشگاه لرستان انجام گرفت. پایایی پرسشنامه نیز با استفاده از ضریب آلفای کرونباخ در نرم‌افزار SPSS مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور سنجش همسانی درونی هر بُعد مفهومی، تحلیل پایایی به صورت تفکیکی برای هر دسته از سؤالات انجام شد. همچنین، سؤالات معکوس بازکدگذاری شدند تا جهت‌گیری پاسخ‌ها با سایر سؤالات همسو گردد. در مرحله بعد، همبستگی هر گویه با مجموع سؤالات بررسی شد و گویه‌هایی که شاخص مناسبی از همبستگی نشان ندادند، از تحلیل پایایی حذف شدند و در نهایت تعداد ۲۸ گویه باقی ماند. نتایج نشان داد که ضریب آلفای کرونباخ برابر با ۰/۸۳است که بیانگر همسانی درونی مناسب پرسشنامه می‌باشد.

محاسبه معادل انرژی نهاده‌ها و ستاده‌ها

جهت محاسبه معادل انرژی نهاده‌ها و ستاده‌ها، تمامی نهاده‌ها و ستاده‌های تولیدی به معادل انرژی برحسب مگاژول بر هکتار(MJ/ha) تبدیل شدند. ضرایب انرژی مورد استفاده برای هر نهاده و ستاده از منابع علمی معتبر (Ozkan *et al*., 2004; Singh *et al*., 2004) استخراج گردید. برای محاسبه انرژی خروجی، عملکرد محصول در ضرایب انرژی معادل آن ضرب گردید (Ozkan *et al*., 2004). معادل انرژی ورودی‌ها و خروجی‌ها در سیستم تولید برنج، ذرت و سیب‌زمینی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- معادل انرژی ورودی‌ها و خروجی‌ها برای تولید محصولات برنج، ذرت و سیب‌زمینی

Table 2- Energy equivalents for the production of rice, potato and corn products

عنوان Title	معادل انرژی Energy Equivalent (MJ)	منابع References
نیروی انسانی Labor energy (Work hour)	1.96	Singh *et al*., 2004
سوخت دیزل Diesel fuel (Litr)	31.56	Singh *et al*., 2004
ماشین‌آلات Machinery (Hour)	62.70	Singh *et al*., 2004
	بذر (کیلوگرم) Seed	
برنج Rice	14.70	Singh *et al*., 2004
سیب زمینی Potato	3.60	Singh *et al*., 2004
ذرت Corn	14.70	Singh *et al*., 2004
آب آبیاری Irrigation water (M^3)	1.02	Singh *et al*., 2004
	سموم Pesticide (kg)	
علف‌کش Herbicide	238.00	Singh *et al*., 2004
قارچ‌کش Fungicide	216.00	Singh *et al*., 2004
کود شیمیایی نیتروژن (کیلوگرم) Nitrogen fertilizes	66.14	Singh *et al*., 2004
	ستاده‌ها Output	
ذرت Corn	17.80	Singh *et al*., 2004
برنج Rice	14.70	Ozkan *et al*., 2004;
سیب‌زمینی Potato	3.60	Ozkan *et al*., 2004

در این پژوهش شاخص‌های نسبت انرژی (Energy Ratio)، بازده خالص انرژی، بهره‌وری انرژی و کارایی مصرف آب استفاده شده است که روابط آنها به شرح زیر است (Mohammadi *et al.*, 2008):

$$\text{نسبت انرژی} = \frac{\text{انرژی خروجی}}{\text{انرژی ورودی}} \quad (۲)$$

$$\text{بازده خالص انرژی} = \text{انرژی اخروجی} - \text{انرژی ورودی} \quad (۳)$$

$$\text{بهره‌وری انرژی} = \frac{\text{عملکرد محصول}}{\text{انرژی ورودی}} \quad (۴)$$

$$\text{کارایی مصرف انرژی آب} = \frac{\text{عملکرد محصول}}{\text{آب آبیاری}} \quad (۵)$$

تحلیل آماری

تحلیل داده‌های این پژوهش در دو مرحله با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ و Microsoft Excel 2019 انجام شد. در مرحله اول، داده‌های خام پس از وارد شدن به Excel، تحت فرآیند پاک‌سازی، سازماندهی و مدیریت اولیه قرار گرفتند. سپس داده‌های اصلاح‌شده به SPSSمنتقل گردیده و تحلیل‌های آماری شامل آمار توصیفی (میانگین، انحراف معیار، درصد فراوانی) با در نظر گرفتن ماهیت داده‌ها و فرضیات پژوهش در سطح ($p<0.05$) اجرا شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فردی و حرفه‌ای پاسخ‌دهندگان

از میان ۱۸۸ کشاورز پاسخ دهنده، ۹۲ نفر (۴۸/۹) بیش از ۲۰ سال سابقه فعالیت کشاورزی داشتند، ۷۸ نفر (۴۱/۳) دارای سابقه بین ۵ تا ۲۰ سال بودند و تنها ۱۸ نفر (۹/۸) کمتر از ۵ سال سابقه فعالیت داشتند (جدول ۳). این نتایج نشان‌دهنده‌ی تسلط کشاورزان با تجربه در ترکیب جامعه‌ی نمونه است.

جدول ۳- سابقه کشاورزی پاسخ دهندگان

Table 3- Respondents agricultural background

سابقه کشاورزی Agricultural background	درصد Percentage	تعداد Count
کمتر از ۵ سال Less than 5 years	9.8	18
بین ۵ تا ۲۰ سال Between 5 to 20 years	41.3	78
بیش از ۲۰ سال More than 20 years	48.9	92
جمع کل Total	100	188

توزیع کشت محصولات

از میان کشاورزانی که پرسشنامه این پژوهش را تکمیل کردند، ۴۴/۷ درصد زارعان ذرت علوفه ای ۲۹/۸ درصد برنج‌کار و ۲۵/۵ درصد سیب‌زمینی‌کار بودند. لازم به ذکر است که این نسبت‌ها صرفاً بر اساس جامعه پاسخ‌دهندگان به پرسشنامه به‌دست آمده و بیانگر ترکیب کل جمعیت کشاورزان منطقه نیست.

تحلیل مصرف انرژی در تولید محصولات کشاورزی

به‌منظور ارزیابی شاخص‌های انرژی در تولید سه محصول ذرت علوفه‌ای، برنج و سیب‌زمینی، انرژی ورودی نهاده‌های اصلی (آب آبیاری، کود نیتروژن، بذر و نیروی انسانی) محاسبه و تحلیل گردید. نتایج نشان داد، از بین محصولات، کشت سیب‌زمینی با مصرف ۱۲۳۰۴۸/۶۶ مگاژول بر هکتار بالاترین میزان انرژی ورودی را دارد. پس از آن، برنج با میزان انرژی ورودی ۱۲۱۱۱۷/۰۹۲۹ مگاژول بر هکتار در رتبه دوم و ذرت علوفه‌ای با ۹۸۶۴۴/۲۵۴ مگاژول بر هکتار دارای کمترین انرژی ورودی می‌باشد (جدول ۴).

سهم نهاده‌ها در مصرف انرژی

۱- آب آبیاری

سهم نهاده‌ی آب آبیاری در مصرف انرژی در کشت محصولات مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج این جدول مشاهده می‌گردد که انرژی مصرفی مرتبط با آب آبیاری در سه محصول مورد بررسی، نوسانات قابل‌توجهی را نشان داد. بیشترین (۱۱۲۳۶/۳۹۲۹ مگاژول در هکتار) میزان انرژی ورودی ناشی از آبیاری در کشت برنج مشاهده شد که معادل ۹/۲۸ درصد از کل انرژی ورودی بود.

جدول ٤- مصرف انرژی در کشت محصولات مورد مطالعه

Table 4- Energy consumption in the cultivation of studied crops

نهاده مصرف انرژی Energy consumption input	برنج Rice		ذرت علوفه‌ای Fodder corn		سیب‌زمینی Potato	
	میزان مصرف انرژی Energy consumption (MJ/ha)	درصد از کل Percentage of total	میزان مصرف انرژی Energy consumption (MJ/ha)	درصد از کل Percentage of total	میزان مصرف انرژی Energy consumption (MJ/ha)	درصد از کل Percentage of total
آب آبیاری Irrigation water	11236.39	9.28	2027.86	2.06	2550.00	2.07
سوخت Fuel	60543.31	50.00	60017.08	60.85	71584.09	58.17
ماشین‌آلات Machinery	40033.95	33.05	25204.50	25.55	32678.80	26.56
کود نیتروژن Nitrogen fertilizes	7252.14	5.96	9372.59	9.48	7810.00	6.35
سموم (علف‌کش‌ها، قارچ‌کش ها و غیره) Insecticides	1496.16	1.24	1506.27	1.53	1745.80	1.42
انرژی کارگری Labor energy	14.91	0.02	26.46	0.03	19.97	0.02
بذر Seed	540.23	0.45	489.50	0.50	6660.00	5.41
کل انرژی ورودی (برای یک هکتار) Total energy input	121117.10	100.00	98644.25	100.00	123048.66	100.00
کل انرژی خروجی (برای یک هکتار) Total energy output	55000.00	-	406250.00	-	151200.00	-

این امر بیانگر وابستگی شدید این محصول به منابع آب و انرژی فسیلی برای پمپاژ و انتقال آب است. در مقابل، سهم انرژی آب آبیاری در کشت سیب‌زمینی و ذرت به‌ترتیب ۲۵۵۰ مگاژول (معادل ۲/۰۷٪ کل انرژی ورودی) و ۲۰۲۸ م گاژول (م عادل ۲/۰۶٪ کل انرژی ورودی) می‌باشد. دلیل کمتر سهم انرژی آب آبیاری در کشت سیب‌زمینی و ذرت می‌تواند، به‌دلیل دوره رشد کوتاه‌تر، عمق کمتر آبیاری و کارایی بالاتر سیستم‌های آبیاری مکانیزه باشد (جدول ۴).

مقدار انرژی آب در برنج حدود پنج برابر سایر محصولات بوده و از نظر درصدی نیز بیشترین سهم را در ترکیب انرژی ورودی برنج دارد. نتایج پژوهش حاضر با پژوهش‌های داخلی و بین‌المللی هم‌راستا است. در این زمینه حیدری (Heidari, 2011) در بررسی کارایی مصرف آب در استان‌های مختلف ایران، عملکرد پایین محصولات آب‌بر مانند برنج را نسبت به محصولاتی نظیر ذرت و سیب‌زمینی گزارش کرده است. در همین راستا، مطالعه منصوریان (Mansourian, 2005) نیز بر ارتباط مستقیم بین کاهش بهره‌وری مصرف منابع و تخریب زیست‌محیطی تأکید داشته و نشان داده است که استفاده ناکارآمد از منابع انرژی و آب منجر به ناپایداری کشاورزی می‌شود. در تحقیق دیگر پیمنتال و همکاران (Pimentel *et al.*, 2004) گزارش نمودند، در نظام‌های کشاورزی با آبیاری سطحی و راندمان پایین، آب به یکی از پرهزینه‌ترین نهاده‌ها از منظر انرژی تبدیل می‌شود. همچنین، مکئونن و هوکسترا (Mekonnen & Hoekstra, 2011) در برآورد ردپای آب محصولات کشاورزی جهانی، مصرف آب برنج را در صدر محصولات با ردپای بالای آب و انرژی معرفی کرده‌اند. در مقابل، محصولاتی مانند ذرت علوفه‌ای که نیاز آبی کمتر و راندمان بالاتری دارند، انرژی کمتری برای

آبیاری مصرف می‌کنند. در این تحقیق نیز مشاهده شد که سهم انرژی آب آبیاری در ذرت علوفه‌ای حدود یک‌سوم تا نصف سهم آن در برنج است. این یافته با نتایج پژوهش جلیلی و همکاران (Jalili *et al.*, 2016) همخوانی دارد. محققان اخیر گزارش نمودند، استفاده از سیستم‌های آبیاری نوین در ذرت، می‌تواند تا ۴۰ درصد مصرف انرژی آبی را کاهش دهد.

۲- سوخت

سهم نهاده‌ی سوخت در مصرف انرژی در کشت محصولات مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج این جدول مشاهده می‌گردد که سوخت مهم‌ترین نهاده از نظر سهم در کل انرژی ورودی سه محصول به شمار می‌آید. در ذرت علوفه‌ای، انرژی حاصل از سوخت برابر با ۶۰۰۱۷/۰۸ مگاژول در هکتار (معادل ۶۰/۸۵٪ انرژی ورودی) محاسبه شد که بیشترین درصد را در میان محصولات مورد بررسی را نشان می‌دهد. در سیب‌زمینی نیز مقدار مشابهی مشاهده شد؛ به‌طوری که انرژی ناشی از سوخت ۷۱۵۸۴/۰۹ مگاژول در هکتار (۵۸/۱۷٪ انرژی ورودی) برآورد شد. در کشت برنج این مقدار ۶۰۵۴۳/۳۱ مگاژول (۵۰٪ انرژی ورودی) بود که علی‌رغم سهم بالا، نسبت به سایر محصولات اندکی کمتر است (جدول ۴). میثمی و جلالی (Maysami & Jalali, 2020) نیز گزارش نمودند، در محصول گندم، از بین نهاده‌های مصرف انرژی، انرژی نهاده سوخت، بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. نتایج مشابهی توسط زاهدی و همکاران (Zahedi *et al.*, 2015) در خصوص بالا بودن سهم سوخت دیزلی در تولید سیب‌زمینی و چغندرقند و فابیانی و همکاران (Fabiani *et al.*, 2020) در تولید محصول گندم گزارش شده است.

۳- ماشین‌آلات

برنج با مجموع مصرف انرژی ماشین‌آلات ۴۰۰۳۳/۹۵ واحد، بیشترین میزان انرژی را در این بخش به خود اختصاص داده است. این مقدار بالا عمدتاً ناشی از مصرف قابل‌توجه انرژی ماشین‌آلات در مراحل آبیاری (۹۰۲۸۸ واحد) و خاک‌ورزی (۱۸۸۱ واحد) است که نشان‌دهنده وابستگی شدید سیستم تولید برنج به ماشین‌آلات سنگین و تخصصی در مدیریت آب و آماده‌سازی زمین است. در رتبه دوم، سیب‌زمینی با مجموع مصرف انرژی ماشین‌آلات ۳۲۶۷۸/۸ واحد قرار دارد. بیشترین سهم در این میزان مربوط به مرحله آبیاری (۱۸۰۵۷/۶ واحد) و پس از آن خاک‌ورزی (۷۵۲/۴ واحد) است. با وجود اینکه مصرف انرژی ماشین‌آلات در سیب‌زمینی کمتر از برنج است، اما همچنان نقش ماشین‌آلات در مراحل کلیدی کشت و نگهداری این محصول، به‌ویژه در تأمین آب مورد نیاز، قابل‌توجه است. کمترین میزان انرژی مصرفی ماشین‌آلات به ذرت اختصاص یافته است، با مجموع ۲۵۲۰۴/۵ واحد. این محصول عمدتاً در مراحل آبیاری (۲۴۰۷۶ واحد) و خاک‌ورزی (۶۲۷ واحد) بیشترین مصرف انرژی ماشین‌آلات را داشته است. ارقام پایین‌تر ذرت نسبت به دو محصول دیگر، نشان‌دهنده نیاز کمتر این محصول به عملیات سنگین ماشینی در مقایسه با برنج و سیب‌زمینی است (جدول ۴ و جدول ۵).

۴- کود نیتروژن

بیشترین سهم انرژی مربوط به کود در ذرت علوفه‌ای مشاهده شد، که با ۹۳۷۲/۵۸۹ مگاژول در هکتار (معادل ۹٪/۴۸ انرژی ورودی) بخش قابل‌توجهی از کل انرژی را تشکیل داد. در برنج و سیب‌زمینی این مقدار به‌ترتیب ۷۲۵۲/۱۴ مگاژول (معادل ۵/۹۶٪ انرژی ورودی) و ۷۸۱۰ مگاژول (معادل ۶/۳۵ ٪انرژی ورودی) محاسبه شد. بدین‌ترتیب، کودهای شیمیایی در مجموع حدود ۵ تا ۱۰ درصد کل انرژی ورودی مزارع موجود در این تحقیق را به خود اختصاص می‌دهند و از نظر اثرگذاری در رتبه‌ی سوم پس از سوخت و ماشین‌آلات قرار دارند (جدول ۴).

با توجه به نتایج بالا مشاهده می‌گردد که مقدار مطلق انرژی کود در ذرت از دو محصول دیگر بیشتر است و از نظر درصدی نیز نسبت به کل انرژی ورودی سهم بالاتری دارد. سهم انرژی معادل کود شیمیایی، به‌ویژه کود نیتروژن، نیز بخش عمده‌ای از انرژی ورودی را در محصولات مورد مطالعه به خود اختصاص که این امر، انرژی ورودی مزرعه را افزایش و بهره‌وری انرژی را کاهش می‌دهد (Sheikhzindin & Ghyasi, 2022). در کشت سیب‌زمینی، کودهای شیمیایی نیز سهم قابل‌توجهی در انرژی ورودی داشته‌اند. این محصول به‌ویژه در مراحل اولیه رشد، نیاز بالایی به تغذیه ازت و پتاس دارد. طبق یافته‌های این تحقیق، سهم انرژی معادل کود مصرفی در کشت سیب‌زمینی ۵/۹۶ درصد بوده که عمدتاً ناشی از مصرف بالای اوره و کودهای پتاسه است. مطالعه روی و همکاران (Roy *et al.*, 2006) نیز تأیید می‌کند که تولید و مصرف کود نیتروژن به‌تنهایی حدود ۱،۵ درصد از کل مصرف انرژی جهانی را به خود اختصاص می‌دهد. نتایج مطالعه تقی‌زاده و همکاران (Taghinazhad *et al.*, 2019) نشان داده که ۵۵ درصد سهم انرژی ورودی محصول گندم در اردبیل مربوط به انرژی غیرمستقیم (کود، سموم شیمیایی، بذر و ماشین‌آلات) است.

۵- سموم (آفت‌کش‌ها و علف‌کش‌ها و قارچ‌کش‌ها)

سهم نهاده‌ی سموم در مصرف انرژی در کشت محصولات مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج این جدول مشاهده می‌گردد که در ذرت علوفه‌ای، انرژی حاصل از مصرف سموم برابر با ۱۵۰۶/۲۶۸ مگاژول در هکتار (معادل ۱/۵۳ ٪ انرژی ورودی) است که این مقدار انرژی اندکی بالاتر از مصرف انرژی در سایر محصولات می‌باشد. در

سیب‌زمینی و برنج این مقادیر به‌ترتیب ۱۷۴۵/۸ مگاژول (معادل ۱/۴۲ ٪ انرژی ورودی) و ۱۴۹۶/۱۶ مگاژول (معادل ۱/۲۴ ٪ انرژی ورودی) برآورد گردید. این اختلاف اندک حاکی از مشابه بودن سطح مصرف سموم در بین محصولات است (جدول ۴).

۶- نیروی انسانی

سهم نیروی انسانی در مصرف انرژی در کشت محصولات مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج این جدول مشاهده می‌گردد که سهم انرژی نیروی انسانی در تولید هر سه محصول بسیار محدود و ناچیز بود که بیانگر سطح بالای مکانیزاسیون و وابستگی به انرژی‌های فسیلی است. در ذرت، انرژی متناظر با فعالیت انسانی ۲۶/۴۶ مگاژول در هکتار (معادل ۰/۰۳٪ انرژی ورودی)، در سیب‌زمینی ۱۹/۹۷ مگاژول (معادل ۰/۰۲ ٪ انرژی ورودی) و در برنج مگاژول (معادل ۰/۰۲ ٪ انرژی ورودی) محاسبه شد. این ارقام نشان می‌دهند، نقش مستقیم انسان در تأمین انرژی فیزیکی در فرآیند تولید در مزارع مورد مطالعه کمتر از یک‌دهم درصد کل انرژی ورودی است (جدول ۴). البته نباید فراموش کرد که نیروی کار انسانی در بسیاری از نظام‌های کشاورزی سنتی و نیمه‌مکانیزه همچنان نقش مهمی در انجام عملیات زراعی ایفا می‌کند. هر چند در تحقیق حاضر، سهم انرژی معادل نیروی کارگری نسبت به نهاده‌هایی مانند کود، سوخت یا آب آبیاری معمولاً پایین‌تر است، اما در محصولات خاصی نظیر برنج که به عملیات دستی بیشتری نیاز دارد، این سهم می‌تواند قابل توجه باشد.

۷- بذر

سهم بذر در مصرف انرژی در کشت محصولات مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج این جدول مشاهده می‌گردد که انرژی ورودی ناشی از بذر تفاوت آشکاری میان محصولات مورد بررسی نشان داد. در سیب‌زمینی، انرژی بذر ۶۶۶۰ مگاژول در هکتار (معادل ۵/۴۱٪ انرژی ورودی) بود که به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از سایر محصولات است. این امر ناشی از استفاده از غده‌های بذری سنگین با چگالی انرژی بالا در مقایسه با بذرهای خشک غلات است. در مقابل، در ذرت و برنج انرژی بذر به‌ترتیب ۴۸۹/۵ مگاژول (معادل ۰/۵٪ انرژی ورودی) و ۵۴۰/۲۳ مگاژول (معادل ۰/۴۵٪ انرژی ورودی) محاسبه شد که تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. به نظر می‌رسد، سهم بالای انرژی بذر در سیب‌زمینی، از دلایل مهم انرژی بالاتر این محصول نسبت به سایر محصولات است (جدول ۴).

در کشت برنج، میزان مصرف بذر نسبت به سیب‌زمینی کمتر است، اما با توجه به تفاوت در روش‌های کاشت (کشت مستقیم یا نشایی)، مقدار مصرف و به‌تبع آن انرژی معادل بذر، می‌تواند متغیر باشد. در برخی محصولات مانند کشت ذرت علوفه‌ای، به‌دلیل تراکم بوته استاندارد (به‌طور معمول بین ۲۵ تا ۴۰ کیلوگرم در هکتار) میزان بذر مصرفی پایین است. این موضوع با یافته‌های پژوهش محمدی و امیدی (Mohammadi & Omid, 2010) در مورد تولید ذرت در ایران مطابقت دارد، که در آن انرژی بذر در مقایسه با سایر نهاده‌ها مانند سوخت و کود شیمیایی کمترین سهم را به خود اختصاص داده بود.

نتایج حاصل از جدول ۵ نشان می‌دهد که برنج در اغلب مراحل، به‌ویژه در خاک‌ورزی (ماشین‌آلات ۱۸۸۱؛ سوخت ۹۴۶۸) و آبیاری (آب ۵۷۳۳/۶۹)، انرژی‌برترین محصول بوده و مصرف انرژی بالایی در بخش آب و ماشین‌آلات دارد. سیب‌زمینی در بخش بذر (۶۶۶۰) و مصرف سوخت آبیاری (۶۵۳۳۵/۸۹) بیشترین انرژی را به خود اختصاص داده و همین عامل سهم آن را در مصرف کل انرژی افزایش می‌دهد. ذرت به‌طور کلی کمترین انرژی مصرفی را در بیشتر مراحل زراعی دارد (مانند ماشین‌آلات در بخش خاک‌ورزی ۶۲۷)، هرچند در برخی بخش‌ها مانند کود نیتروژن (۹۳۷۲/۵۸۹) و نیروی کارگری (۷/۸۴) سهم بیشتری از مصرف را ثبت کرده است. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که نوع محصول، شیوه کاشت و نیازهای مدیریتی آن نقش مهمی در الگوی مصرف انرژی داشته و تحلیل این شاخص می‌تواند برای بهینه‌سازی سیستم‌های تولید و کاهش هزینه‌های انرژی اهمیت بالایی داشته باشد (جدول ۵).

شاخص‌های مهم انرژی برای محصولات مورد مطالعه

۱- نسبت انرژی (Energy ratio)

بررسی شاخص نسبت انرژی در سه محصول زراعی نشان داد که ذرت علوفه‌ای با مقدار ۴/۱۱، بالاترین نسبت انرژی را داراست. این مقدار بیانگر آن است که سهم انرژی خروجی نسبت به انرژی ورودی در ذرت بیشتر از سایر محصولات است. در سیب‌زمینی، نسبت انرژی برابر با ۱/۲۲ به‌دست آمد که بیانگر کارایی متوسط و مصرف نسبتاً بالا در بخش سوخت و بذر است. در مقابل، برنج با نسبت انرژی ۰/۴۵ کمترین میزان کارایی انرژی را در میان محصولات مورد مطالعه نشان داد (جدول ۶).

جدول ۵- مصرف انرژی در محصولات مورد مطالعه به تفکیک عملیات زراعی

Table 5- Energy consumption of the studied products, broken down by agricultural operation

نام عملیات زراعی Agricultural Operation	نام محصول زراعی Crop Name	انرژی ماشین‌آلات Machinery Energy	انرژی سوخت Fuel Energy	انرژی بذر Seed Energy	انرژی آب آبیاری Irrigation Water	انرژی کود نیتروژن Nitrogen Fertilizes	انرژی نیروی کارگری Labor Energy	انرژی سموم (علف‌کش‌ها، قارچ‌کش‌ها و غیره) Insecticides
خاک‌ورزی Tillage	برنج Rice	1881.00	9468.00	-	2239.20	-	3.92	-
	ذرت Corn	627.00	3156.00	-	-	-	7.84	-
	سیب‌زمینی Potato	752.40	3787.20	-	-	-	5.80	-
کاشت Planting	برنج Rice	250.80	789.00	540.23	3262.48	7252.14	2.94	-
	ذرت Corn	125.40	631.20	489.50	674.35	9372.59	5.88	-
	سیب‌زمینی Potato	175.50	820.60	6660.00	1203.78	7810.00	3.92	-
پمپاژ آب Water Pumping	برنج Rice	37620.00	48865.91	-	5733.69	-	2.52	-
	ذرت Corn	24076.00	54809.68	-	1352.00	-	5.88	-
	سیب‌زمینی Potato	31350.00	65335.89	-	1345.00	-	4.72	-
سمپاشی Pesticide	برنج Rice	94.05	158.00	-	1.02	-	1.96	1496.16
	ذرت Corn	156.70	473.40	-	1.53	-	2.94	1506.27
	سیب‌زمینی Potato	250.50	631.20	-	1.22	-	3.53	1745.80
برداشت Harvesting	برنج Rice	188.10	1262.40	-	-	-	3.57	-
	ذرت Corn	219.40	946.80	-	-	-	3.92	-
	سیب‌زمینی Potato	150.40	1009.20	-	-	-	2.00	-
						-		

جدول ٦- نسبت انرژی در محصولات مورد مطالعه

Table 6- Energy ratio of the studied crops

محصول Crop	انرژی ورودی (MJ/ha) Energy input	انرژی خروجی (MJ/ha) Energy output	نسبت انرژی Energy ratio
برنج Rice	121117.0929	55000	0.45
ذرت علوفه‌ای Forage corn	98644.254	406250	4.11
سیب‌زمینی Potato	123048.66	151200	1.22

جدول ۷- بازده خالص انرژی در محصولات مورد مطالعه

Table 7- Net energy efficiency in the studied crops

محصول Crop	انرژی ورودی (MJ/ha) Energy input	انرژی خروجی (MJ/ha) Energy output	بازده خالص انرژی (MJ/ha) Net energy yield (MJ/ha)
برنج Rice	121117.0929	55000	-66117.0929
ذرت علوفه‌ای Forage corn	98644.254	406250	307605.746
سیب‌زمینی Potato	123048.66	151200	28151.34

۲- بازده خالص انرژی (Net energy)

نتایج نشان داد که ذرت علوفه‌ای با بازده خالص انرژی ۳۰۷۶۰۵/۷۴۶ مگاژول در هکتار بالاترین عملکرد انرژی را در میان سه محصول دارد. این مقدار بیانگر کارایی بالای انرژی و تناسب مطلوب میان انرژی ورودی و خروجی دارد. بالا بودن بازده خالص انرژی در ذرت عمدتاً به‌دلیل عملکرد زیاد ماده‌ی خشک و ضریب انرژی بالای این محصول می‌باشد. در سیب‌زمینی، بازده خالص انرژی ۲۸۱۵۱/۳۴ مگاژول در هکتار محاسبه شد. این مقدار مثبت نشان‌دهنده‌ی تراز انرژی قابل قبول است، اگرچه شدت بالای مصرف سوخت و بذر باعث افزایش انرژی ورودی شده است. در مجموع، کارایی انرژی این محصول در سطح متوسط ارزیابی می‌شود. در مقابل، برنج با بازده خالص انرژی منفی ۶۶۱۱۷/۰۹۲۹ مگاژول در هکتار کمترین میزان را نشان داد (جدول ۷).

۳- بهره‌وری انرژی (Energy productivity)

در تحلیل بهره‌وری انرژی محصولات برنج، ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی، شاخص بهره‌وری انرژی به‌عنوان نسبت عملکرد محصول به انرژی ورودی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی به‌ترتیب دارای بهره‌وری انرژی ۰/۳۰ و ۰/۳۴ کیلوگرم محصول به ازای هر مگاژول انرژی ورودی هستند که بیانگر استفاده مؤثر و بهینه از انرژی مصرفی در تولید این محصولات است. در مقابل، برنج با بهره‌وری انرژی ۰/۰۲ کیلوگرم به ازای هر مگاژول انرژی ورودی، عملکرد پایین‌تری دارد (جدول ۸).

این یافته‌ها بیانگر آن است که ذرت و سیب‌زمینی از نظر بهره‌وری انرژی مشابه و حدود ده برابر کاراتر از برنج هستند. این الگو با نتایج پژوهش یوسفی و همکاران (Yousefi *et al.*, 2021) درخصوص برنج استان گیلان هم‌خوانی دارد. این محققان، نیز نسبت انرژی و بهره‌وری انرژی را به‌ترتیب ۰/۶۶ و ۰/۰۴گزارش کردند و کل انرژی موردنیاز برای تولید شلتوک برنج را ۸۸۰۶۴ MJ/ha برآورد نمودند که بخش عمده‌ای از آن (حدود ۵۳٪) مربوط به مصرف سوخت دیزل و ماشین‌آلات کشاورزی بود.

۴- کارایی مصرف انرژی آب (Water use energy efficiency, WUEE)

در بررسی کارایی مصرف آب در محصولات برنج، ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی، شاخص کارایی مصرف آب که نسبت عملکرد محصول به میزان انرژی معادل آب آبیاری است، به‌عنوان معیاری مهم برای ارزیابی بهره‌وری مصرف منابع آبی مورد توجه قرار گرفت (جدول ۸). نتایج نشان می‌دهد که سیب‌زمینی با میزان کارایی مصرف آب معادل ۱۶٫۴ کیلوگرم محصول به ازای هر مگاژول انرژی آبیاری، بیشترین کارایی انرژی آب را در بین ۳ محصول مطالعه شده در این تحقیق را دارد.

جدول ۸- بهره‌وری انرژی در محصولات مورد مطالعه

Table 8- Energy productivity of the studied crops

محصول Crop	انرژی ورودی (MJ/ha) Energy input	عملکرد محصول (kg/ha) Crop yield	بهره‌وری‌انرژی (MJ.kg) Energy efficiency (MJ.kg)
برنج Rice	121117.0929	3500	0.02
ذرت علوفه‌ای Forage corn	98644.254	30000	0.30
سیب‌زمینی Potato	123048.66	42000	0.34

جدول ۹- کارایی مصرف انرژی آب در محصولات مورد مطالعه

Table 9- Water-energy productivity efficiency in the studied crops

محصول Crop	انرژی معادل آب ابیاری (MJ/ha) Energy water irrigation	عملکرد محصول (kg/ha) Crop yield	کارایی مصرف آب (kg.MJ) Water consumption efficiency (kg.MJ)
برنج Rice	11236.39	3500	0.31
ذرت علوفه‌ای Forage corn	1924.63	30000	15.5
سیب‌زمینی Potato	2550	42000	16.4

پس از آن، ذرت علوفه ای با کارایی ۱۵،۵ کیلوگرم در هر مگاژول انرژی آب قرار دارد که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب در مصرف بهینه آب است. در مقابل، برنج با کارایی ۰/۳۱ کیلوگرم محصول به ازای هر مگاژول انرژی آبیاری، کمترین کارایی مصرف آب را دارد که می‌تواند به نیاز آبی بالاتر و روش‌های سنتی آبیاری این محصول نسبت داده شود (جدول ۹).

به‌عبارت دیگر، میزان کارایی مصرف آب در ذرت و سیب‌زمینی بیش از پنجاه برابر بیشتر از برنج بوده است. این یافته با مطالعات حسن‌زاده و مظاهری (Hasanzadeh & Mazaheri, 1996) و همچنین کوچکی و حسینی (Kuchaki & Hoseini, 1994) مطابقت دارد که کارایی انرژی محصولات زراعی را برای برنج پایین‌تر از سایر محصولات یعنی ۱/۳ kg/m³ گزارش کرده‌اند. تحلیل چرخه انرژی در سیستم‌های کشاورزی نشان می‌دهد که بیشترین سهم مصرف انرژی به‌ترتیب مربوط به آبیاری (۴۵ درصد)، ماشین‌آلات (۳۰ درصد) و نهاده‌های شیمیایی مانند کود و سموم (۲۵ درصد) است (Nabavi-Pelesaraei *et al.*, 2023). در این میان، سیستم‌های آبیاری به‌دلیل نیاز به پمپاژ و انتقال آب، بیشترین سهم را در مصرف انرژی دارند.

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف تحلیل، مقایسه و ارزیابی مصرف آب و انرژی در تولید محصولات کشاورزی برنج ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی به ترتیب در شهرستان‌های درود، کوهدشت و ازنا در استان لرستان انجام شد. در این راستا، میزان و الگوی مصرف انرژی و آب برای تولید هر هکتار بررسی و با یکدیگر مقایسه گردید. همچنین، شاخص‌های کمی مرتبط با کارایی انرژی و مصرف آب به‌منظور ارزیابی عملکرد این نظام‌های تولیدی محاسبه شد. نتایج نشان داد که از نظر شاخص‌های انرژی و کارایی بین محصولات برنج، ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی، تفاوت عددی قابل‌توجهی وجود دارد. مقدار کل انرژی ورودی در سیب‌زمینی، برنج و ذرت به‌ترتیب ۱۲۳۰۴۸/۶۶، ۱۲۱۱۱۷/۰۹۲۹ و ۹۸۶۴۴/۲۵۴ و انرژی خروجی این سه محصول به‌ترتیب ۱۵۱۲۰۰، ۵۵۰۰۰ و ۴۰۶۲۵۰ مگاژول در هکتار برآورد گردید. بر اساس این داده‌ها، بیشترین انرژی ورودی مربوط به سیب‌زمینی و بیشترین انرژی خروجی متعلق به ذرت علوفه‌ای است. مقایسه‌ی اجزای انرژی ورودی، نشان داد سوخت فسیلی بیشترین سهم را در همه‌ی محصولات به خود اختصاص داده است. اما بیشترین میزان درصد سوخت در ذرت علوفه‌ای با ۶۰/۸۵ درصد و بیشترین میزان عددی آن مربوط به سیب‌زمینی با ۷۱۵۸۴/۰۹ مگاژول در هکتار است. بعد از سوخت فسیلی، ماشین‌آلات با میانگین سهم حدود ۳۰ درصد در رتبه‌ی دوم و کودهای شیمیایی با میانگین حدود ۱۰ درصدی در رتبه سوم اجزای انرژی ورودی قرار دارد. از نظر مصرف انرژی مربوط به آب آبیاری، برنج با ۹/۲۸ درصد و ذرت علوفه‌ای با ۲/۰۶ درصد به‌ترتیب دارای بیشترین و کمترین میزان بودند. به‌طور کلی، مقایسه‌ی کمی شاخص‌ها نشان می‌دهد که ذرت علوفه‌ای در تمام معیارهای انرژی و کارایی در رتبه‌ی نخست قرار دارد. پس از آن، سیب‌زمینی با مقادیر میانی و برنج در تمامی شاخص‌ها دارای کمترین مقادیر عددی است. این تفاوت‌ها از نظر کمّی نشان می‌دهد که ساختار مصرف نهاده‌ها و ترکیب انرژی ورودی در سه محصول به‌طور معنی‌داری متفاوت است. این تحلیل‌ها تأکید می‌کنند که ارتقاء کارایی مصرف انرژی در بخش کشاورزی کشور نیازمند راهکارهایی از جمله استفاده از فناوری‌های نوین آبیاری، اصلاح شیوه‌های مصرف نهاده‌ها، آموزش بهره‌برداران و توسعه کشاورزی پایدار و دانش‌بنیان است.

References

1. Ararssa, A., Gebremariam, A., Mulat, W., & Mekonnen, M. (2019). Effects of irrigation management on yield and water productivity of barley (*Hordeum vulgare*) in the upper Blue Nile basin: Case study in northern Gondar. *Water Conservation Science and Engineering*. https://doi.org/10.1007/s41101-019-00071-8

2. Beheshti Tabar, I., Keyani, A., & Rafiee, S. (2010). Energy balance in Iran's agronomy sector (1990–2006). *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14,* 849–855. https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.024
3. Bockari-Gevao, S.M., Ismail, W.I., Yahya, A., & Wan, C. (2005). Energy consumption in lowland rice-based cropping system of Malaysia. *Songklanakarin Journal of Science and Technology, 27*(4), 819–826.
4. Fabiani, S., Vanino, S., Napoli, R., & Nino, P. (2020). Water-energy-food nexus approach for sustainability assessment at farm level: An experience from an intensive agricultural area in central Italy. *Environmental Science and Policy, 104*, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.10.008
5. Fan, X., Zhang, W., Chen, W., & Chen, B. (2020). Land–water–energy nexus in agricultural management for greenhouse gas mitigation. *Applied Energy, 265*, 114796. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114796
6. Faramzania, M., Akbari, M., & Heidari Sultanabadi, M. (2023). Water and energy productivity of onion crop in sprinkler and surface irrigation methods in some farms of Isfahan province. *Journal of Water and Soil Science, 27*(4), 131–142. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.47176/jwss.27.4.14833
7. Food and Agriculture Organization (FAO). (2019). *Agroforestry*. Available online: http://www.fao.org/forestry/agroforestry/80338/en/
8. Hasanzadeh, E., & Mazaheri, D. (1996). Assessment of energy balance in wheat, potato, and rice production in the Falavarjan region of Isfahan. In *Proceedings of the Iranian Congress of Agronomy and Plant Breeding*. Isfahan University of Technology, Isfahan. https://doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.5.15.69
9. Heidari Sultanabadi, M. (2022). Determination of energy production function in irrigated wheat of Isfahan province. *Energy Engineering and Management, 11*(1), 116–127. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22052/11.1.116
10. Heidari, N. (2011). Determination and evaluation of water use efficiency index for agricultural crops under farmers' management in the country. *Water and Irrigation Management Journal, 1*(2), 43–57. (In Persian with English abstract)
11. Jafari Telokolaei, M., Shahnazari, A., & Noori Khajeh Balagh, R. (2024). Analysis of physical water productivity and energy indices of major agricultural crops in the Tajan plain. *Journal of Water Research in Agriculture, 38*(1), 51–62. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/jwra.2023.363890.1016
12. Jalili, Kh., Moradi, H., & Bozorg Haddad, O. (2016). Investigating the effects of climate change on groundwater resources of the Islam Abad plain and optimizing land allocation. *Desert Ecosystem Engineering, 5*(11), 117–131. (In Persian with English abstract)
13. Jalilian, A., Jahansuz, M., Ghasemi Moteqadder, H., Arisi, S., & Moghaddam, M. (2023). Evaluation of energy indicators in sole, mixed, and agroforestry systems for okra production in Khuzestan province. *Iranian Journal of Crop Sciences, 16*(7–2), 17–20. (In Persian with English abstract)
14. Karamian, F., Mirakzadeh, A., & Azari, A. (2023). Analysis of water and energy consumption and environmental impacts of agricultural production in Miandarband plain of Kermanshah province. *Journal of Agroecology, 14*(4), 693–712.
15. Kuchaki, A., & Hoseini, M. (1994). *Energy efficiency in agricultural ecosystems*. Ferdowsi University of Mashhad Press, Mashhad.
16. Lampridi, M., Kateris, D., Sørensen, C., & Bochtis, D. (2020). Energy footprint of mechanized agricultural operations. *Energies, 13*(3), 769. https://doi.org/10.3390/en13030769
17. Mansourian, N. (2005). Investigation of energy productivity in the agricultural sector of Iran (A case study of Khorasan province). *Proceedings of the 5th Iranian Conference on Agricultural Economics*, Zahedan. (In Persian). Available at: https://civilica.com/?doc=49811
18. Maysami, M., & Jalali, A. (2020). Evaluation of energy input-output in wheat crop cultivation in agro-industry company of mazare novin Iranian (Agh Ghalla). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 30*(2), 333–346. (In Persian with English abstract)
19. Mekonnen, M.M., & Hoekstra, A.Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences, 15*(5), 1577–1600. https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011
20. Michos, M., Menexes, G., Kalburtji, K., Tsatsarelis, C., Anagnostopoulos, C., & Mamolos, A. (2017). Could energy flow in agro-ecosystems be used as a "tool" for crop and farming system replacement? *Ecological Indicators, 73*, 247–253. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.09.050

21. Michos, M., Menexes, G., Mamolos, A., Tsatsarelis, C., Anagnostopoulos, C., Tsaboula, A., & Kalburtji, K. (2018). Energy flow, carbon and water footprints in vineyards and orchards to determine environmentally favourable sites in accordance with Natura 2000 perspective. *Journal of Cleaner Production, 187*, 400–408. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.251
22. Mohammadi, A., & Omid, M. (2010). Economical analysis and relation between energy inputs and yield of greenhouse cucumber production in Iran. *Applied Energy, 87*(1), 191–196. https://doi.org/10.1016/j.apenergy. 2009.07.021
23. Mohammadi, A., Tabatabaeefar, A., Shahin, S., Rafiee, S., & Keyhani, A. (2008). Energy use and economical analysis of potato production in Iran a case study: Ardabil province. *Energy Conversion and Management, 49*(13), 3566–3570. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.07.003
24. Mohammadi, S., & Meysami, M.A. (2021). Energy consumption pattern in grain maize production in Iran. *Proceedings of National Conference on Agricultural Energy*. (In Persian with English abstract). https://civilica. com/doc/1585606
25. Mousavi-Avval, S.H., & Rafiee, S.H. (2023). Energy efficiency trends in Iranian agriculture: A historical analysis. *Journal of Cleaner Production, 382*, 135234. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135234
26. Nabavi-Pelesaraei, A., Abdi, R., & Rafiee, S. (2023). Climate change and energy use in agriculture: An integrated analysis. *Science of The Total Environment, 859*, 160252. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160252
27. Ozkan, B., Akcaoz, H., & Fert, C. (2004). Energy input–output analysis in Turkish agriculture. *Renewable Energy, 29*(1), 39–51. https://doi.org/10.1016/s0960-1481(03)00135-6
28. Pimentel, D., Berger, B., Filiberto, D., Newton, M., Wolfe, B., Karabinakis, E., ... & Nandagopal, S. (2004). Water resources: agricultural and environmental issues. *BioScience, 54*(10), 909–918. https://doi.org/10.1641/ 0006-3568(2004)054[0909:WRAAEI]2.0.CO;2
29. Rajabi Hamedani, S., Shabani, Z., & Rafiee, S. (2011). Energy inputs and crop yield relationship in potato production in Hamadan province of Iran. *Energy, 36*(11), 2367–2371. https://doi.org/10.1016/j.energy. 2011.01.013
30. Roy, R.N., Finck, A., Blair, G.J., & Tandon, H.L.S. (2006). *Plant nutrition for food security: A guide for integrated nutrient management*. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin, 16. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. https://doi.org/10.1017/s0014479706394537
31. Shahbazi, N., Majnoon Hosseini, N., Jahansuz, M.R., & Jalilian, A. (2025). Estimating effective inputs on energy and environmental indicators of grain corn and sweet corn production. *Iranian Journal of Crop Sciences, 35*(1), 356. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059.ijfcs.2025.389066.655124
32. Sheikhzindin, A., & Ghyasi, H. (2022). Assessment of water footprint and water use efficiency in rice production for sustainability. *Journal of Agricultural Knowledge and Sustainable Production, 33*(2), 207–225. (In Persian with English abstract)
33. Singh, G., Singh, S., & Singh, J. (2004). Optimization of energy inputs for wheat crop in Punjab. *Energy Conversion and Management, 45*(3), 453–465. https://doi.org/10.1016/s0196-8904(03)00155-9
34. Statistical Center of Iran. (2021). *Statistical Yearbook of Lorestan Province*. (In Persian). Available at: https://amar.org.ir
35. Taghinazhad, J., Vahedi, A., & Ranjbar, F. (2019). Economic assessment of energy consumption and greenhouse gas emissions from wheat production in Ardabil province. *Environmental Sciences, 17*(3), 137–150. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.29252/envs.17.3.137
36. Taxidis, E., Menexes, G., Mamolos, A., Tsatsarelis, C., Anagnostopoulos, C., & Kalburtji, K. (2015). Comparing organic and conventional olive groves relative to energy use and greenhouse gas emissions associated with the cultivation of two varieties. *Applied Energy, 149*, 117–124. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.128
37. Yousefi, Z., Vahedi, A., & Askari Bezaye, F. (2021). Energy consumption analysis and environmental impacts of rice production in Guilan province using life cycle assessment. *Agricultural Systems and Mechanization Research, 22*(78), 55–72. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/erams.2020.343427.1359
38. Zahedi, M., Eshghizadeh, H., & Mondani, F. (2015). Energy efficiency and productivity in potato and sugar beet production systems in Isfahan province. *Journal of Crop Production and Processing, 5*(17), 181–191. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.5.17.181

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 40, No. 1, Spring. 2026, p. 19-37

Studying the Effect of Moisture Deficit Stress on the Light Absorption and Use Efficiency of Different Red Bean Cultivars (*Phaseolus vulgaris* L.) in a Mediterranean Climate

F. Parsapour[1], F. Mondani[1*], Gh. Mohammadi[1]

1- Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran
(*- Corresponding Author Email: F.mondani@razi.ac.ir)

Received: 07 April 2026
Revised: 14 May 2026
Accepted: 01 June 2026
Available Online: 01 June 2026

How to cite this article:
Parsapour, F., Mondani, F., & Mohammadi, Gh. (2026). Studying the effect of moisture deficit stress on the light absorption and use efficiency of different red bean cultivars (*Phaseolus vulgaris* L.) in a Mediterranean climate. *Journal of Water and Soil, 40*(1), 19-37. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2026.98232.1537

Introduction

The common bean is an important legume cultivated by farmers in various regions using low-input practices. It originated in South and Central America and is now cultivated in all tropical and temperate regions worldwide. Asia accounts for 43% of global bean production, while the Americas (North, Central, and South America) account for 29%, and Africa for 26%. Bean seeds, containing approximately 22% protein, are a valuable alternative to animal protein sources. Iran is an arid and semi-arid country that faces the problem of resource shortages, especially water. Undoubtedly, modifying consumption patterns as well as optimizing the use of agricultural inputs will lead to increased food security.

Materials and Methods

The experiments were conducted at the research farm of the Campus of Agricultural and Natural Resources (34°, 19´ N, 47°, 50´ E and altitude 1320 m) of Razi University in the Kermanshah region, located in western Iran, over three years from 2021 to 2023. In terms of climatic divisions, this region is located in the temperate mountainous regions with a Mediterranean climate. The experiments were conducted in a split plot in a randomized complete block design with three replications. The treatments included irrigation water amount as the main factor (providing 100% of the water requirement, equivalent to 7300 m^3 ha^{-1} (IR100%), providing 80% of the water requirement, equivalent to 5840 m^3 ha^{-1} (IR80%), and providing 60% of the water requirement, equivalent to 4380 m^3 ha^{-1} (IR60%) for 2021. Because the amount of water required by the plant is determined according to climatic factors, the amounts of irrigation water in each treatment were determined as 6800, 5440, and 4080 m^3 ha^{-1} for 2022 and 7200, 5760, and 4320 m^3 ha^{-1} for 2023, respectively. Three common red bean cultivars, including Ofogh, Yaghoot, and Derakhshan, were also considered as secondary factors. The soil water status, leaf area index (LAI), light absorption, total dry weight (TDW), light use efficiency (LUE), and grain yield (GY) were measured.

Results and Discussion

The soil volumetric water content fluctuated as a function of the amount of water entering the soil (irrigation) and the amount of water leaving the soil (evaporation from the soil surface and transpiration by the plant). Soil volumetric water content varied in different irrigation treatments. Regardless of the red bean cultivars, the highest and lowest soil water content were observed in the IR100% and IR60% treatments during 2021-2023, respectively.

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).
https://doi.org/10.22067/jsw.2026.98232.1537

The volumetric soil water content also varied for the studied red bean cultivars during the experimental period. Regardless of irrigation treatments, the highest and lowest soil water content were observed for the Ofogh and Derakhshan cultivars, respectively. The Ofogh cultivar had a shorter growth period than the other cultivars, so it required less irrigation water. It seems that the Ofogh cultivar absorbed water from the soil more quickly in the early stages of growth, which led to a sharp decrease in soil moisture content. But at the end of the growing season, as the air gradually cooled, soil moisture content increased again due to a decrease in water absorption by the Ofogh cultivar. The Yaghoot cultivar required more irrigation water than the Ofogh cultivar due to its unlimited growth, and in the middle of its growth period, due to the greater development of leaves in the canopy, it absorbed more water from the soil, which led to a more severe decrease in soil moisture. The changes in soil water content for the Derakhshan cultivar were almost similar to the Yaghoot cultivar. Due to the longer growth period of Derakhshan cultivar compared to other cultivars, more irrigation water was absorbed by this cultivar, which led to a sharp decrease in soil volumetric water content at the end of the growth period. The results showed that soil moisture content varied significantly among irrigation treatments and cultivars. Severe water deficit stress reduced LAI, TDW, and GY. The highest LUE in the vegetative and reproductive stages for the Yaghoot cultivar compared to other cultivars were 1.36 and 0.54 g MJ^{-1}, respectively. In 2022, the evaluated traits were higher than in 2021 and 2023, due to the lower average temperature (27°C) during the growing season. Regardless of year, the highest grain yield (192.5 g m^{-2}) belonged to Ofogh cultivar under optimum irrigation conditions, and the lowest grain yield (80.9 g m^{-2}) belonged to Derakhshan cultivar in severe water stress conditions.

Conclusion

The results of this study showed a positive effect of irrigation on the light absorption and LUE of common bean cultivars. Severe water stress reduced the ability of the crop to maintain leaf area during the growth period. Finally, the reduction in light absorption, LUE, and the length of the bean growth period due to drought stress led to lower TDW and GY.

Keywords: Grain yield, Leaf area index, Soil volumetric moisture, Water deficit stress

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۴۰، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص. ۳۷-۱۹

بررسی تأثیر تنش کمبود رطوبت بر کارایی جذب و مصرف نور ارقام مختلف لوبیاقرمز (*Phaseolus vulgaris* L.) در یک اقلیم مدیترانه‌ای

فاطمه پارساپور[۱]- فرزاد مندنی[۱*]- غلامرضا محمدی[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۱

چکیده

نور یکی از مؤلفه‌های مهم رشد در گیاه بوده و تولید ماده خشک تابعی از نور جذب شده و کارایی مصرف نور است. به‌منظور بررسی تأثیر تنش کمبود رطوبت بر کارایی جذب و مصرف نور سه رقم لوبیا قرمز آزمایشی به‌صورت اسپلیت پلات بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی طی سه سال (۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲) اجرا شدند. تیمارها شامل آبیاری به‌عنوان عامل اصلی (۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی) و ارقام لوبیا قرمز (افق، یاقوت و درخشان) به‌عنوان عامل فرعی بود. جهت اعمال تیمارهای آبیاری حجم آب مصرفی با استفاده از روش تشتک تبخیر محاسبه شد. مقادیر آب آبیاری در هر تیمار به‌ترتیب ۶۸۰۰، ۵۴۴۰ و ۴۰۸۰ متر مکعب در هکتار برای سال ۱۴۰۱ و ۷۲۰۰، ۵۷۶۰ و ۴۳۲۰ متر مکعب در هکتار برای سال ۱۴۰۲ تعیین شد. نتایج نشان داد محتوای حجمی رطوبت خاک در تیمارهای آبیاری و ارقام مورد بررسی تغییرات متفاوتی داشت. تنش شدید رطوبت باعث کاهش شاخص سطح برگ، وزن خشک کل و عملکرد دانه شد. بالاترین کارایی مصرف نور در مرحله رویشی و زایشی برای رقم یاقوت در مقایسه با سایر ارقام به‌ترتیب به میزان ۱/۳۶، ۰/۵۴ گرم بر مگاژول بود. در سال ۱۴۰۱ در مقایسه با سال‌های دیگر به علت پائین‌تر بودن میانگین دمای طول دوره رشد (۲۷ درجه سانتی‌گراد)، صفات اندازه‌گیری شده مقادیر بالاتری داشتند. صرف‌نظر از سال، بالاترین عملکرد دانه (۱۹۲/۵ گرم در متر مربع) متعلق به رقم افق در شرایط آبیاری مطلوب و پائین‌ترین عملکرد دانه (۸۰/۹ گرم در متر مربع) متعلق به رقم درخشان در شرایط تنش شدید رطوبت بود. بطورکلی رقم افق باتوجه‌به فرم بوته ایستاده و زودرسی علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف آب، به‌دلیل عملکرد بالاتر، مناسب مناطقی است که با کمبود آب مواجه هستند.

واژه‌های کلیدی: تنش کم‌آبی، رطوبت حجمی خاک، شاخص سطح برگ، عملکرد دانه

مقدمه

لوبیا از جمله مهم‌ترین حبوباتی است که توسط کشاورزان در مناطق مختلف با استفاده از کم‌ترین نهاده‌ها کشت می‌گردد. منشأ آن آمریکای جنوبی و مرکزی است که امروزه در تمام مناطق گرمسیری و معتدل کشت می‌شود. حدود ۴۳ درصد از تولید جهانی لوبیا را قاره آسیا، ۲۹ درصد قاره آمریکا (آمریکای شمالی، مرکزی و جنوبی) و ۲۶ درصد را قاره آفریقا به خود اختصاص می‌دهند (FAOSTAT, 2025; Uebersax *et al.*, 2022). بذور لوبیا با داشتن حدود ۲۲ درصد پروتئین جایگزین مناسبی برای پروتئین حیوانی است (Bayat *et al.*, 2020). کشور ایران یکی از کشورهای خشک و نیمه‌خشک جهان است که با مشکل کمبود منابع به‌خصوص آب مواجه هست. بی شک اصلاح الگوی مصرف و همچنین استفاده بهینه نهاده‌های کشاورزی منجر به افزایش امنیت غذایی می‌شود (Mousavi *et al.*, 2020). میانگین بارندگی ایران حدود ۲۵۰ میلی‌متر است که این مقدار بسیار پایین‌تر از میانگین بارندگی جهان (۸۶۰ میلی‌متر) است (Kaboli *et al.*, 2021). در چنین شرایطی استفاده از روش‌های مدیریتی که بتواند بدون کاهش

۱- گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: F.mondani@razi.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/jsw.2026.98232.1537

یا با کاهش اندکی در عملکرد، میزان مصرف آب در بخش کشاورزی را کاهش دهد، ضروری است. بنابراین کم آبیاری انتخاب یک راهبرد بهینه و برتر برای استفاده از آب تحت شرایط کمبود آب بوده که در عین‌حال ممکن است سبب کاهش حداقلی کمیت و کیفیت محصول نیز شود (Sun *et al.*, 2023). بر اساس آخرین آمار موجود، در ایران در سال زراعی ۱۴۰۳- ۱۴۰۲ سطح زیر کشت لوبیا حدود ۸۷ هزار هکتار و میزان تولید نیز حدود ۲۰۸ هزار تن در سال بوده است، سطح زیر کشت و میزان تولید لوبیا در استان کرمانشاه در همین سال به‌ترتیب ۶۹ هکتار و ۱۶۸ تن گزارش شده است که نشان می‌دهد علی‌رغم اهمیت اکولوژیک این محصول و نیاز آن در سبد غذایی خانوار به شدت رو به کاهش است (MJA, 2024).

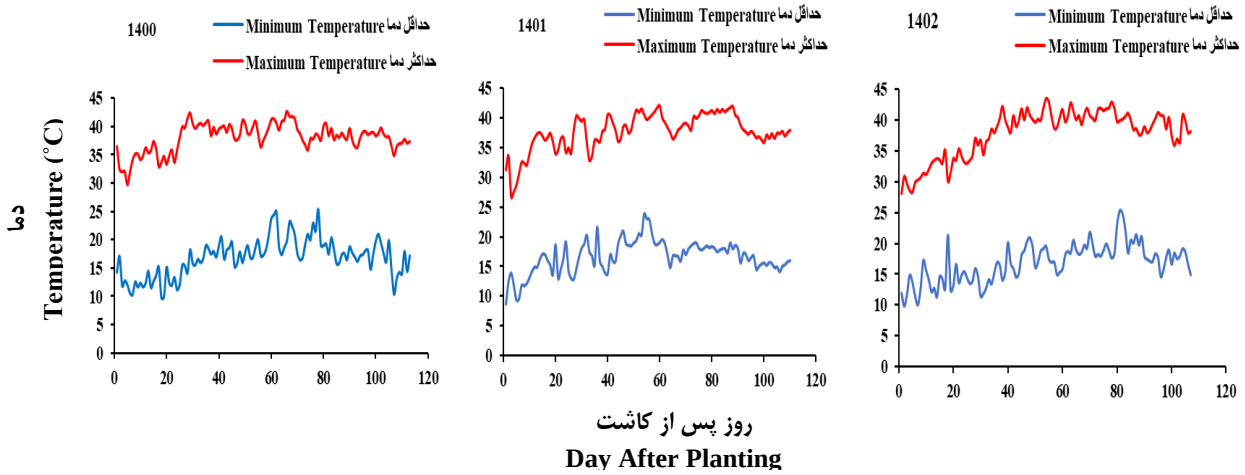
کمبود منابع آب منجر به افزایش هزینه‌های تولید کشاورزی و کاهش عرضه غذا به میزان قابل‌توجه شده و از این طریق امنیت غذایی جمعیت جهان را در معرض خطر قرار داده است (Chieb & Gachomo, 2023). در پژوهشی با هدف ارزیابی ژنوتیپ‌های لوبیا در شرایط تنش خشکی، نشان داده شد که عملکرد دانه تحت‌تأثیر تنش خشکی قرار گرفت، به‌طوری‌که با افزایش شدت تنش میزان آن کاهش یافت (Tahmasebi & Mohammadi-Dehbalaee, 2019). در مطالعه‌ای دیگر نیز مشخص شد که تنش خشکی منجر به کاهش عملکرد دانه لوبیا شد (Androcioli *et al.*, 2020). باوجود اینکه تکنولوژی‌های نوین قادر به توزیع مناسب آب و افزایش راندمان مصرف، جهت جلوگیری از هدررفت آب شده‌اند، با این‌حال کاشت گیاهان مقاوم به خشکی راه‌حل مناسب‌تری برای مناطقی با کمبود آب است (Toscano *et al.*, 2019). بنابراین، یکی از عوامل مهم در افزایش عملکرد لوبیا، انتخاب رقم متحمل به خشکی است. در توسعه برنامه اصلاحی تولید ارقام کارآمد از نظر مصرف آب در شرایط تنش خشکی، شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم لوبیا بسیار اهمیت دارد. همچنین ارقامی که در شرایط تنش خشکی، عملکرد بالاتری دارند و به آبیاری مطلوب نیز واکنش خوبی نشان می‌دهند، مطلوب‌ترین ژنوتیپ‌ها هستند، زیرا قادرند پتانسیل عملکرد بالای خود را در طیف گسترده‌ای از شرایط آب قابل‌دسترس خاک حفظ کنند (Ghanbari, 2022). علاوه بر ویژگی‌های ژنتیکی ارقام، مدیریت‌های زراعی از جمله رژیم آبیاری قادر است صفاتی نظیر ساختار تاج‌پوشش گیاهی، کارایی مصرف نور و تولید ماده خشک را به شدت تحت‌تأثیر قرار دهد (Ahmadi *et al.*, 2018).

نور یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی است که منبع نامحدودی از انرژی زیستی را برای گیاه فراهم می‌آورد و شدّت و کیفیّت آن می‌تواند رشد و نمو گیاهان را تحت‌تأثیر قرار دهد (Li & Mathews, 2016). بنابراین، یکی از پیش‌شرط‌های لازم برای رسیدن به تولید حداکثر، تأمین شرایط مطلوب جهت استفاده از نور به‌منظور تولید مواد فتوسنتزی با بالاترین کارایی است (Beheshti *et al.*, 2002). از بین عوامل مدیریتی، میزان نور موجود در محیط تحت کنترل زارع نیست و به فصل سال، عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا و ترکیبات اتمسفر منطقه بستگی دارد. اما میزان جذب تشعشع توسط گیاه وابسته به شاخص سطح برگ، دوام سطح برگ و آرایش مکانی اندام‌های هوایی گیاه هست (Tohidi *et al.*, 2012). کمبود آب خاک، تولید ماده خشک گیاهان را به‌دلیل کاهش جذب تشعشع فعّال فتوسنتزی ناشی از کاهش شاخص سطح برگ، پژمردگی برگ‌ها و در نهایت پیری زودرس برگ‌ها و همچنین کاهش کارایی تبدیل نور جذب شده به ماده خشک تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (Earl & Davis, 2003). در بین ویژگی‌های ذکر شده، کارایی مصرف نور از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا تغییرات بسیار ناچیز در میزان آن منجر به اثرات فراوانی بر تولید ماده خشک گیاه می‌شود. بنابراین، محاسبهٔ کارایی مصرف نور روشی مؤثّر و کارآمد برای کمی‌کردن تجمّع ماده خشک است که به‌صورت افزایش ماده خشک به‌ازای جذب هر واحد نور تعریف می‌شود و اغلب به‌صورت شیب رگرسیونی خطّی زیست‌توده در مقابل نور جذب شده تجمّعی محاسبه می‌شود (Bai *et al.*, 2016). در شرایطی که کمبود آب و مواد غذایی وجود نداشته باشد در غیاب مشکل آفات و بیماری‌ها، تولیدات گیاهی یک رابطه خطی با مقدار تابش تجمعی دریافتی دارند و تابش فعال فتوسنتزی جذب شده مهم‌ترین عامل رشد گیاه است (Tohidi *et al.*, 2012). در مطالعه‌ای گزارش شد که تنش کمبود رطوبت باعث کاهش کارایی مصرف نور و عملکرد دانه لوبیا شد (Rashidi *et al.*, 2022). بنابراین باتوجه‌به کمبود شدید منابع آبی در اکثر مناطق کشور ایران و اهمیت لوبیا در سبد خانوارها به‌ویژه اقشار کم‌درآمد جامعه، این پژوهش با اهداف ۱) بررسی وضعیت رطوبت خاک طی دوره رشد محصول در شرایط تیمارهای آبیاری، ۲) تعیین تأثیر سطوح مختلف آبیاری بر جذب و کارایی مصرف نور و ۳) ارزیابی تأثیر کمبود رطوبت بر میزان عملکرد دانه ارقام مختلف لوبیاقرمز اجرا شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

آزمایش‌ها در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی (عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۴ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۵۰ دقیقه شرقی و ارتفاع از سطح دریا ۱۳۲۰ متر) دانشگاه رازی در منطقه کرمانشاه واقع در غرب ایران طی سه سال از ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲ اجرا شد. این منطقه از نظر تقسیمات اقلیمی جز مناطق معتدل کوهستانی با اقلیم مدیترانه‌ای قرار دارد. روند تغییرات دمای محل مطالعه در طول فصل رشد گیاه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- روند تغییرات حداقل و حداکثر دمای روزانه در منطقه کرمانشاه در طول دوره رشد لوبیا قرمز در سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲ (سازمان هواشناسی کرمانشاه. www.kermanshahmet.ir)

Figure 1- Temperature changes in Kermanshah during the growth period in 1400 to 1402 (Kermanshah Meteorological Organization. www.kermanshahmet.ir)

جدول ۱- مجموع بارندگی ماهیانه (بر حسب میلی‌متر) در منطقه کرمانشاه طی سال‌های آزمایش

Table 1- Monthly cumulative precipitation (mm) in the Kermanshah region during experiment years

ماه Month	سال Year		
	1400	1401	1402
فروردین Farvardin	4.4	10.5	90.5
اردیبهشت Ordibehesht	7.3	81.2	59.2
خرداد Khordad	0.1	0	16.7
تیر Tir	0	0	0
مرداد Mordad	0	0	0
شهریور Shahrivar	0	0	0
مهر Mehr	0	0	14.4
آبان Aban	39.2	18.5	30.0
آذر Azar	29.7	11.7	7.1
دی Dae	7.1	54.4	64.8
بهمن Bahman	82.6	39.5	40.1
اسفند Esfand	20.9	22.1	54.0
جمع کل Total	191.3	237.9	376.8

آزمایشات به‌صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شدند. تیمارها شامل میزان آب آبیاری به عنوان عامل اصلی (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی، معادل ۷۳۰۰ متر مکعب در هکتار ($IR_{100\%}$)، تأمین ۸۰ درصد نیاز آبی، معادل ۵۸۴۰ متر مکعب در هکتار ($IR_{80\%}$) و تأمین ۶۰ درصد نیاز آبی، معادل ۴۳۸۰ متر مکعب در هکتار (IR60%) برای سال ۱۴۰۰) بود. چون میزان آب مورد نیاز گیاه با توجه به عوامل اقلیمی تعیین می‌شود، بنابراین مقادیر آب آبیاری در هر تیمار به‌ترتیب ۶۸۰۰، ۵۴۴۰ و ۴۰۸۰ متر مکعب در هکتار برای سال ۱۴۰۱ و ۷۲۰۰، ۵۷۶۰ و ۴۳۲۰ متر مکعب در هکتار برای سال ۱۴۰۲ تعیین شد. اطلاعات مربوط به میزان مجموع بارش‌های ماهیانه در جدول ۱ نشان داده شده است. در نهایت میزان آبی که در هر تیمار در اختیار گیاه قرار داده شده، مجموعه آب آبیاری و آب ناشی از بارندگی بود.

ارقام رایج لوبیاقرمز شامل افق، یاقوت و درخشان نیز به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شد. منشاء رقم افق کشور کلمبیا است. ویژگی‌های این رقم شامل کلاس بین‌المللی Morado، فرم بوته ایستاده، مناسب برای برداشت مکانیزه، زودرس، متوسط دوره رشد و نمو ۸۵ روز، مقاوم به آفت کنه دونقطه‌ای و بیماری‌های ویروسی، بازار پسندی مطلوب، تحمل بالا در برابر تنش خشکی و مناسب برای کاشت در مناطق با سرمای زودهنگام پاییزه است. منشاء رقم یاقوت کشور ایران بوده و دارای ویژگی‌هایی نظیر کلاس تجاری بین‌المللی Red Mexican، فرم بوته ایستاده رشد نامحدود، مناسب برای برداشت مکانیزه، متوسط دوره رشد و نمو ۸۷ روز، مقاوم به آفت کنه دو نقطه‌ای و بیماری‌های ویروسی، بازارپسندی عالی، تحمل بالا در برابر خشکی و مناسب مناطق معتدل و سرد است. منشاء رقم درخشان نیز کشور کلمبیا است. این رقم دارای مشخصاتی نظیر فرم بوته ایستاده، متوسط دوره نمو ۱۱۰ روز، حساس به آفت کنه دو نقطه‌ای و علف‌های هرز، مناسب مناطق معتدل و سرد و کلاس بین‌المللی Morado است. بذور استفاده شده از مرکز تحقیقات ملی لوبیای خمین تهیه شد (MANRRAC, 2021).

به‌منظور آماده‌سازی زمین، شخم و دیسک در اول خرداد برای هر سه سال زراعی انجام شد. قبل از انجام آزمایش به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک مکان پژوهش، نمونه‌برداری به‌صورت تصادفی انجام و به آزمایشگاه منتقل شد (جدول ۲). نیتروژن به میزان ۳۰ کیلوگرم در هکتار از منبع کود اوره در مرحله سه برگی و پتاسیم به میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار از منبع سولو پتاس در زمان غلاف بستن استفاده شد. همه بذرها قبل از کاشت با سم مانکوزب به نسبت دو در هزار ضدعفونی گردید. هر کرت فرعی دارای ۷ ردیف کاشت به طول چهار متر بود. فاصله ردیف‌ها ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بذور روی ردیف‌ها ۱۰ سانتی‌متر بود. بذرها با دست و در عمق پنج سانتی‌متر خاک کشت شدند. در هر سه سال تاریخ کاشت ۵ خرداد بود. تراکم نهایی مزرعه ۲۰ بوته در متر مربع در نظر گرفته شد.

اولین آبیاری بلافاصله بعد از کاشت و آبیاری‌های بعدی متناسب با تیمارهای مربوطه بر اساس شرایط محیطی و نیاز آبی گیاه هر چهار تا هفت روز یک‌بار انجام گردید. تیمار تنش خشکی در مرحله سه برگی لوبیا اعمال شد و تا مرحله بلوغ فیزیولوژیک گیاه نیز ادامه داشت. حجم آب مصرفی مورد نیاز در هر مرحله از آبیاری جهت اعمال تیمارهای آبیاری با استفاده از تشتک تبخیر کلاس A محاسبه و تبخیر روزانه از تشتک اندازه‌گیری شد. سپس بر اساس ضریب تشتک و ضریب گیاهی، حجم آب مصرفی مورد نیاز در هر مرحله از آبیاری از روابط زیر تعیین شد (Alizadeh & Kamali, 2007a).

$$ETo = Kpan \times Epan \qquad (۱)$$

در اینجا، ETo: تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع (میلی‌متر در روز)، Epan: میزان تبخیر از تشت تبخیر است و Kpan: ضریب تشت تبخیر (میلی‌متر در روز) است که بستگی به وضعیت استقرار تشت و محیط اطراف آن دارد و مقدار آن بین ۰/۵ تا ۰/۸۵ متغیر است (Alizadeh, 2013).

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری

Table 2- Physicochemical properties of the soil at the exprimental site in 0-30 cm

سال Year	عمق Depth (cm)	بافت texture	ماده آلی Organic matter (%)	کربن آلی Organic carbon (%)	درصد نیتروژن Total nitrogen (%)	هدایت الکتریکی Electrical conductivity (dS m^{-1})	فسفر Phosphor (mg.kg^{-1})	پتاسیم Potassium (mg.kg^{-1})	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	شن Sand (%)	شاخص واکنش pH
2021	0-30	رسی سیلتی Silty clay	1.00	1.16	0.12	0.83	11.40	440.00	42.00	44.20	13.80	7.75
2022	0-30	رسی سیلتی Silty clay	1.05	2.00	0.24	0.50	13.86	297.00	44.00	46.00	10.00	7.60
2023	0-30	رسی سیلتی Silty clay	1.10	1.44	0.14	0.41	6.26	211.00	44.00	46.00	10.00	7.46

ضریب گیاهی لوبیا ۰/۱۵ در اوایل رشد (از زمان کاشت تا نزدیک به زمان برقراری پوشش گیاهی ۱۰ درصد)، ۱/۱۵ در اواسط رشد (از زمان پوشش گیاهی ۱۰ درصد تا زمان رسیدن محصول) و ۰/۲۶ در مرحله برداشت (از زمان شروع رسیدن محصول تا برداشت یا پلاسیدگی کامل گیاه) لحاظ گردید (Alamdari, 2018). از طریق ضرب کردن ضریب گیاهی در مقادیر روزانه تبخیر و تعرق پتانسیل، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی روزانه محاسبه شد (Alen *et al.*, 1998).

$$ETc = Kc \times ETo \qquad (۲)$$

در اینجا، Kc ضریب گیاهی و ETc تبخیر و تعرق واقعی گیاه (میلی‌متر در روز) است. با جمع‌کردن تبخیر و تعرق واقعی روزانه بین دو مرحله آبیاری، نیاز خالص آبیاری برای تیمار تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی به‌دست آمد. نیاز آبیاری سایر تیمارها نیز به‌عنوان ضریبی از نیاز آبیاری تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی محاسبه شد. آبیاری به‌صورت قطره‌ای انجام و حجم آب ورودی به کرت‌ها نیز با کنتور اندازه‌گیری شد. برای تعیین محتوی آب خاک به روش حجمی، در فواصل زمانی بین دو آبیاری مقداری از خاک هر کرت فرعی از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری برداشت و توزین شد. سپس نمونه‌ها در داخل آون در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و پس از ۴۸ ساعت نمونه از آون خارج و دوباره وزن شد. محتوی آب خاک از طریق معادله زیر تعیین شد (Hillel, 2004).

$$\Theta g = \frac{mwet - mdry}{mdry} \qquad (۳)$$

در اینجا، Θg: محتوی آب حجمی (جرم آب در هر جرم خاک خشک)، mwet: جرم آب موجود در خاک (جرم مرطوب)، mdry: جرم کل خاک خشک شده در آون (جرم خشک) است.

اندازه‌گیری صفات گیاهی

اندازه‌گیری‌ها شامل نمونه‌برداری‌های تخریبی و نهایی بود. نمونه‌گیری‌های تخریبی از بخشی از هر کرت فرعی که به این منظور در نظر گرفته شده بود بصورت کاملا تصادفی و با رعایت اثرات حاشیه‌ای هر ۱۰ روز یک‌بار تا مرحله بلوغ فیزیولوژیکی، انجام شد. در هر مرحله از نمونه‌برداری، سه بوته از هر کرت انتخاب و صفات اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک و سپس توزین شدند. برای اندازه‌گیری شاخص سطح برگ از نرم‌افزار J-Microvision استفاده شد (Hajishabani *et al.*, 2020).

به‌منظور اندازه‌گیری میزان نور روزانه خورشیدی برای عرض جغرافیایی کرمانشاه، ابتدا داده‌های ساعات آفتابی روزانه از ایستگاه هواشناسی کرمانشاه دریافت شد و با استفاده از روش گودریان و وانلار (Goudrian & Van Laar, 1993) میزان نور روزانه بالای کانوپی محاسبه گردید. سپس میزان نور جذب شده با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (Mondani *et al.*, 2019).

$$I_{abs} = I_0 \times (1 - P) \times (1 - e^{-K \times LAI}) \qquad (۴)$$

در اینجا، Iabs: نور جذب شده توسط کانوپی (مگاژول بر متر مربع)، I0: نور رسیده به بالای کانوپی (مگاژول بر متر مربع)، P: ضریب انعکاس نور و K: ضریب خاموشی نور که به‌ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۶۷ در نظر گرفته شد (Tsubo *et al.*, 2001) و LAI: شاخص سطح برگ روزانه بود. برای برآورد شاخص سطح برگ روزانه نیز از رابطهٔ زیر استفاده شد (Mondani *et al.*, 2019).

$$LAI = \frac{a + b \times 4 \times \left(e^{\left(-\left(\frac{x-c}{d}\right)\right)}\right)}{\left(1 + e^{\left(-\left(\frac{x-c}{d}\right)\right)}\right)^2} \qquad (۵)$$

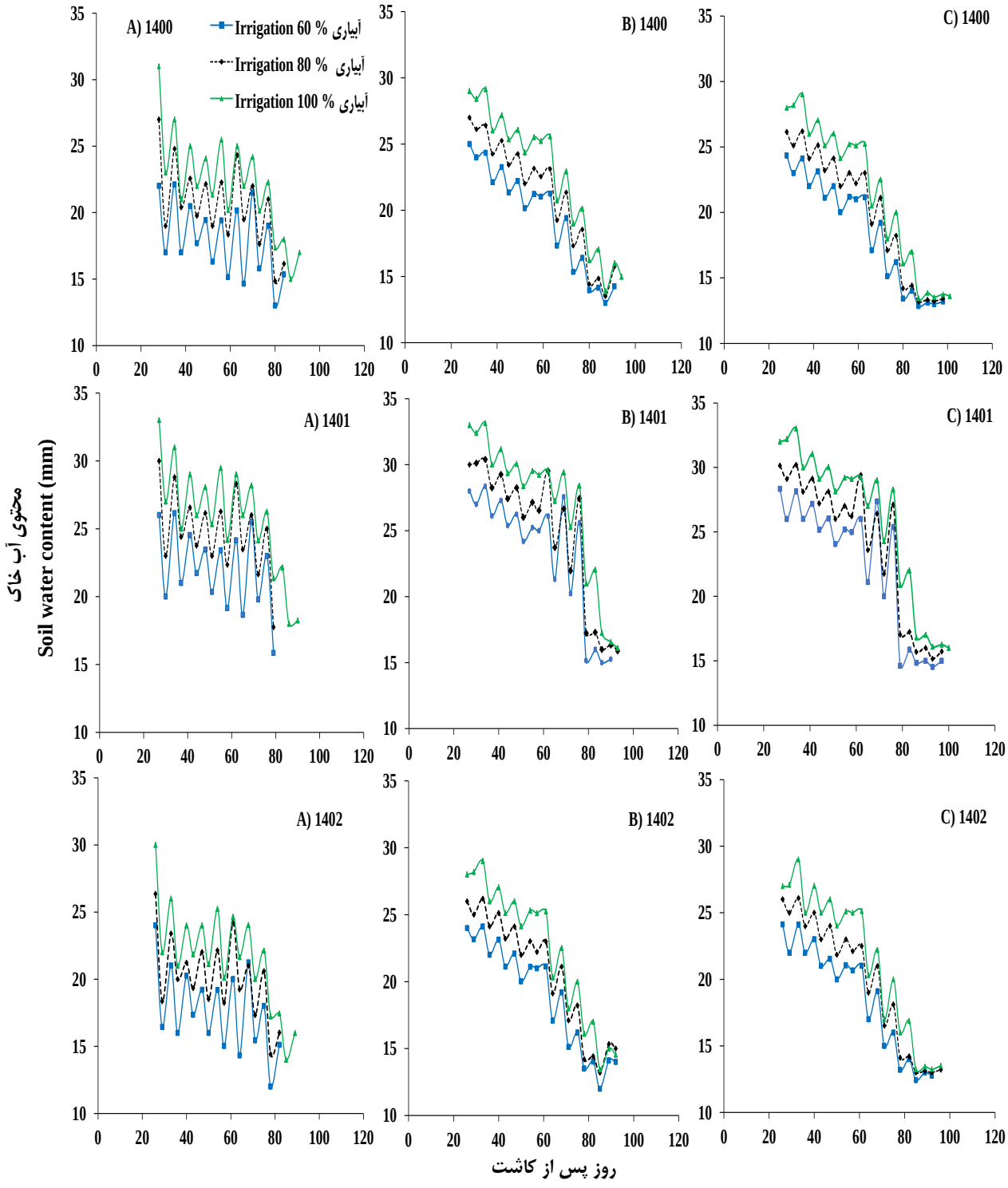
در اینجا، a: عرض از مبدأ، b: زمان رسیدن به حداکثر LAI، c: حداکثر LAI، d: نقطه عطف منحنی و c: روزهای پس از کاشت است. برای محاسبه وزن خشک کل روزانه (TDW) بر حسب گرم در متر مربع نیز از رابطه زیر استفاده شد (Mondani *et al.*, 2019).

$$TDW = \frac{a}{(1 + e \times (b^{(x-c)})} \qquad (۶)$$

در اینجا، a: حداکثر تجمع وزن خشک کل (گرم بر متر مربع)، b: زمانی که منحنی وزن خشک کل وارد مرحله خطی می‌شود (روز پس از کاشت)، c: سرعت رشد نسبی و x : زمان برحسب روز پس از کاشت است. کارایی مصرف نور برحسب مگاژول بر گرم، از طریق محاسبه شیب‌خط رگرسیون بین وزن خشک کل (گرم بر متر مربع) و میزان نور جذب شده تجمعی (مگاژول بر متر مربع) در دو مرحله رویشی و زایشی لوبیا قرمز برای هر تیمار محاسبه شد. در زمان رسیدگی فیزیولوژیک گیاه نیز از بخشی از هر کرت فرعی که به این منظور لحاظ شده بود از مساحت یک متر مربع برداشت صورت گرفت و پس خشک شدن بوته‌ها در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد آون به‌مدت ۷۲ ساعت عملکرد دانه اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل آماری

به‌منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۰ استفاده شد، به این صورت که ابتدا از نرمال بودن داده‌ها اطمینان حاصل گردید، تجزیه واریانس داده‌ها توسط رویه GLM انجام و سپس از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار جهت مقایسه میانگین‌ها استفاده شد. جهت برازش مدل‌های تجربی لجستیک پیک (معادله ۵) و لجستیک (معادله ۶) از نرم‌افزار Slidwrite نسخه ۷/۰۱ و برای رسم نمودارها، از نرم‌افزار Excel استفاده شد.



شکل ۲- تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری بر محتوای آب خاک ارقام لوبیا قرمز. A: افق، B: یاقوت، C: درخشان

Figure 2- The effect of different irrigation treatments on the soil water content of red bean cultivars. A: Ofogh, B: Yaghoot, C: Derakhshan

نتایج و بحث

وضعیت آب خاک

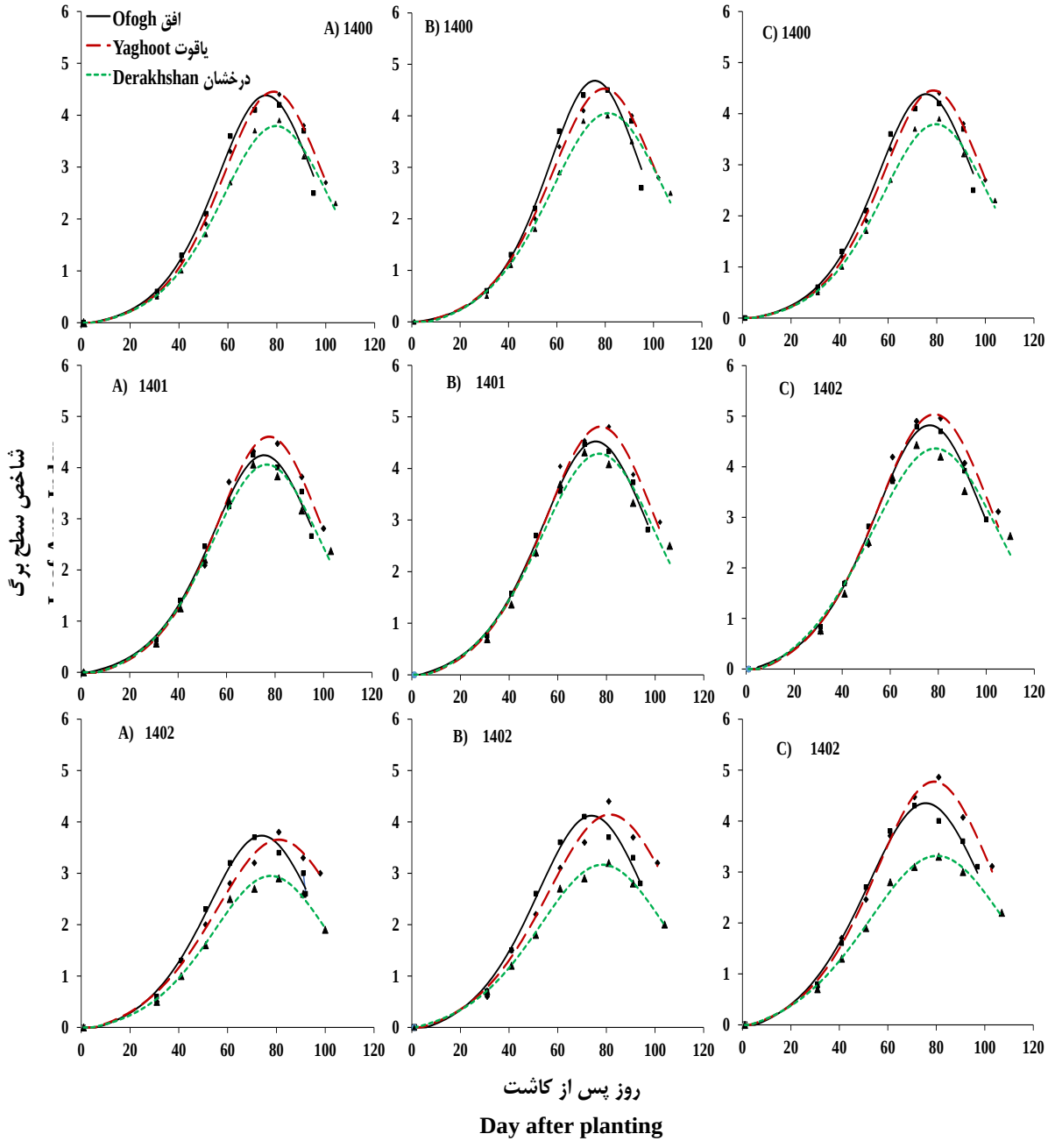
محتوای حجمی آب خاک به‌عنوان تابعی از میزان آب وارد شده به خاک (بارندگی (جدول ۱) و آبیاری) و میزان آب خارج شده از خاک (تبخیر از سطح خاک و تعرق توسط گیاه) در نوسان بود. محتوای حجمی آب خاک در تیمارهای مختلف آبیاری تغییرات متفاوتی نشان داد (شکل ۲). صرف‌نظر از ارقام مورد بررسی، بیشترین و کمترین میزان محتوی حجمی آب خاک به‌ترتیب در تیمارهای آبیاری مطلوب (۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه) و تنش کمبود آب (۶۰ درصد نیاز آبی گیاه) طی سال‌های ۱۴۰۰، ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ مشاهده شد. محتوی حجمی آب خاک در طی دوره آزمایش برای ارقام مورد بررسی نیز متفاوت بود (شکل ۲). صرف‌نظر از تیمارهای آبیاری بیشترین و کمترین محتوی حجمی آب خاک به‌ترتیب برای رقم افق و درخشان مشاهده شد. رقم افق نسبت به ارقام دیگر دوره رشد کوتاه‌تری داشت، بنابراین میزان آب آبیاری کمتری نیاز داشت. به نظر می‌رسد که رقم افق در مراحل اولیهٔ رشد، آب را سریع‌تر از خاک جذب کرد که منجر به کاهش شدید میزان رطوبت خاک گردید. اما در انتهای دوره رشد به‌مرور که هوا خنک‌تر شد، میزان رطوبت خاک نیز دوباره به علت کاهش میزان جذب آب توسط رقم افق افزایش یافت (شکل ۲). رقم یاقوت به‌دلیل رشد نامحدودبودن نسبت به رقم افق به آب آبیاری بیشتری نیاز داشت و در اواسط دوره رشد خود به علت توسعه بیشتر برگ‌ها در کانوپی میزان آب بیشتری از خاک جذب کرد که منجر به کاهش شدیدتر رطوبت خاک شد (شکل ۲). تغییرات محتوی حجمی آب خاک در شرایط کشت رقم درخشان تقریباً مشابه رقم یاقوت بود. با توجه به طول دوره رشد بیشتر رقم درخشان در مقایسه با دیگر ارقام مورد بررسی میزان آب آبیاری بیشتری نیز نیاز داشت، که به همین دلیل در انتهای دوره رشد محتوی حجمی آب خاک به علت جذب بیشتر آب توسط این رقم به شدت کاهش یافت (شکل ۲).

میزان رطوبت موجود در منطقهٔ ریشه گیاه عامل اصلی ایجاد تنش کمبود آب در گیاهان است، بنابراین با آگاهی دقیق از محتوی حجمی رطوبت خاک، می‌توان از آسیب رسیدن به گیاه تحت شرایط تنش خشکی جلوگیری نمود و حداکثر بهره‌وری را به‌دست آورد. از طرفی دیگر انتخاب رقم پرمحصول و متحمّل به تنش‌های غیرزنده نیز از عوامل مهم در افزایش عملکرد است (Ghanbari, 2022). نتایج نشان داد که با افزایش شدت تنش خشکی، محتوی حجمی رطوبت خاک کاهش یافت و در بین ارقام مورد بررسی بیشترین میزان رطوبت توسط رقم افق جذب شد. رقم افق دارای طول دوره رشد کوتاه‌تری در مقایسه با سایر ارقام بود. به نظر می‌رسد رقم افق که جزو ارقام پر محصول نیز محسوب می‌شود به‌دلیل داشتن سیستم ریشه‌ای گسترده‌تر و رشد سریع‌تر با سرعت بیشتری آب را از لایه‌های عمیق‌تر خاک جذب می‌کند و همین موضوع باعث می‌شود که ارقام زودرس معمولاً به تنش‌های محیطی مانند خشکی و دماهای بالا مقاوم‌تر باشند. این ویژگی می‌تواند منجر به کاهش نیاز آبی و افزایش عملکرد شود. قانع پور و همکاران (Ghanepour *et al.*, 2012) گزارش کردند که رقم افق به‌دلیل سیستم ریشه‌ای خاص خود، در مقایسه با دیگر ارقام برتری دارد. این ریشه‌ها با تغییر الگوی تخصیص ماده خشک به بخش زیرزمینی باعث افزایش رشد، جذب آب و حفظ محتوی آب بالاتر در برگ‌ها شده و در نتیجه افزایش عملکرد رخ می‌دهد. بنابراین این ویژگی به رقم افق کمک می‌کند تا در شرایط کمبود آب همچنان رشد کند و به تنش خشکی سازگار شود. نتایج این بررسی همچنین نشان داد که محتوی حجمی آب خاک در شرایط تیمارهای مورد بررسی در سال ۱۴۰۱ بیشتر از سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۲ بود (شکل ۲). این موضوع ممکن است به علت پایین‌تر بودن میانگین دمای طول دوره رشد گیاه در سال ۱۴۰۱ در مقایسه با سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۲ باشد (شکل ۱) که منجر به تخلیه آهسته‌تر و کمتر رطوبت حجمی خاک گردید. دمای محیط از جمله عوامل مؤثر بر میزان محتوی حجمی رطوبت خاک است. در مناطقی با متوسط دمای بالاتر در طول دوره رشد گیاه، سرعت و میزان تبخیر آب از سطح خاک افزایش می‌یابد.

شاخص سطح برگ

نتایج نشان داد تغییرات شاخص سطح برگ لوبیا قرمز در شرایط تیمارهای مورد بررسی و طی سال‌های مختلف دارای روند مشابهی بود (شکل ۳). با پیشرفت زمان، شاخص سطح برگ روند افزایشی داشت و پس از رسیدن به حداکثر میزان خود که در زمان گلدهی بود، روند کاهشی پیدا کرد (شکل ۳). با افزایش شدت تنش کمبود رطوبت شاخص سطح برگ در ارقام مختلف نیز کاهش یافت. حداکثر شاخص سطح برگ برای رقم یاقوت در تیمار آبیاری مطلوب، تنش ملایم و تنش شدید به‌ترتیب ۴/۹۶، ۴/۸۱ و ۴/۳۲ بود. برای رقم افق این مقادیر به‌ترتیب ۴/۷۹، ۴/۴۷ و ۴/۲۵ به‌دست آمد و برای رقم درخشان به ترتیب ۴/۴۳، ۴/۳۱ و ۴/۰۶ محاسبه شد. بیش‌ترین میزان شاخص سطح برگ رقم یاقوت در حدود ۸۱ روز پس از کاشت و در شرایط آبیاری کامل به میزان ۴/۹۶ مشاهده شد (شکل ۳) و پایین‌ترین میزان شاخص سطح برگ نیز مربوط به رقم درخشان که در حدود ۸۱ روز پس از کاشت و در شرایط تنش شدید خشکی به میزان ۲/۹۰ مشاهده شد (شکل ۳). صرف‌نظر از تیمارهای آبیاری و ارقام مقادیر شاخص سطح برگ لوبیا در سال ۱۴۰۱ نسبت به سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۲ بیشتر بود. دمای حداقل، حداکثر و میانگین روزانه به‌ترتیب، ۱۶/۸، ۳۷/۹ و ۲۷/۴ درجه سانتی‌گراد برای سال ۱۴۰۰، ۱۶/۶، ۳۷/۴ و ۲۷/۰ درجه

سانتی‌گراد برای سال ۱۴۰۱ و ۱۷/۲، ۳۸/۷ و ۲۷/۹ درجه سانتی‌گراد برای سال ۱۴۰۲ بود. در دماهای پایین‌تر در مقایسه با دماه‌های بالا به علت کاهش میزان تنفس نگهداری بافت‌های مختلف گیاه، میزان فتوسنتز خالص افزایش می‌یابد. نتایج پژوهشی دیگر نیز نشان داد زمانی که میانگین دمای هوا در دوره گلدهی لوبیا به ۲۷/۷ درجه سانتی‌گراد رسید سبب اختلال در فرآیند تلقیح و عدم تولید بذر و در نتیجه کاهش عملکرد شد (Khadivar *et al.*, 2025). به نظر می‌رسد پایین‌تر بودن میانگین دمای طول دوره رشد گیاه در سال ۱۴۰۱ در مقایسه با سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۲ منجر به افزایش تولیدات فتوسنتزی انتقال یافته برای ساخت برگ‌ها و در نتیجه افزایش شاخص سطح برگ گردید.



شکل ۳- تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری بر شاخص سطح برگ ارقام لوبیا قرمز، A: آبیاری ۶۰ درصد، B: آبیاری ۸۰ درصد، C: آبیاری ۱۰۰ درصد

Figure 3- The effect of different irrigation treatments on the leaf area index of red bean cultivars. A: Irrigation 60%, B: Irrigation 80% , C: Irrigation 100%

تنش خشکی سبب کاهش تعداد برگ می‌شود که در نتیجه منجر به کاهش شاخص سطح برگ می‌شود (Hu *et al.*, 2013). نتایج نشان داد که در مراحل اولیه رشد لوبیاقرمز، تفاوت چندانی بین شاخص سطح برگ در تیمارهای آبیاری وجود نداشت. به نظر می‌رسد گیاه به‌دلیل استقرار اولیه و سطح برگ پایین در مراحل اولیه، رشد کندی داشته و افزایش وزن خشک در این دوره نسبت به زمان ناچیز بود. در مراحل ابتدای رشد بیشتر ترکیبات فتوسنتزی تولید شده توسط ارقام لوبیا قرمز صرف تولید برگ‌ها با هدف بسته شدن هر چه زودتر کانوپی شد. اما با گذشت زمان در تیمارهای تنش ملایم و شدید خشکی به علت محتوی حجمی رطوبت خاک پایین‌تر در مقایسه با تیمار آبیاری مطلوب توسعه شاخص سطح برگ نیز با سرعت کمتری اتفاق افتاد. گیاهان تحت شرایط تنش خشکی شاخص سطح برگ خود را از طریق لوله‌کردن برگ‌ها، پیری و ریزش زودهنگام آن‌ها کاهش می‌دهند (Seetseng, 2008). کاهش شاخص سطح برگ می‌تواند منجر به کاهش تعرق و در نتیجه جذب کمتر رطوبت خاک گردد که باعث مقاوت گیاه به تنش خشکی می‌شود. پاگتر و همکاران (Pagter *et al.*, 2005) گزارش کردند که در شرایط تنش خشکی، شاخص سطح برگ از طریق کاهش اندازه و تعداد برگ‌های جدید و همچنین ریزش برگ‌های مسن‌تر کاهش یافت. آثار سوء ناشی از تنش خشکی بر رشد و نمو و عملکرد لوبیا، بستگی به زمان وقوع تنش، شدّت تنش، مرحله نموی و ژنوتیپ گیاه دارد (Cortes *et al.*, 2012). محققین دیگر نیز کاهش شاخص سطح برگ را تحت شرایط تنش خشکی گزارش کردند (Nohong & Nompo, 2015; Mahpara *et al.*, 2014).

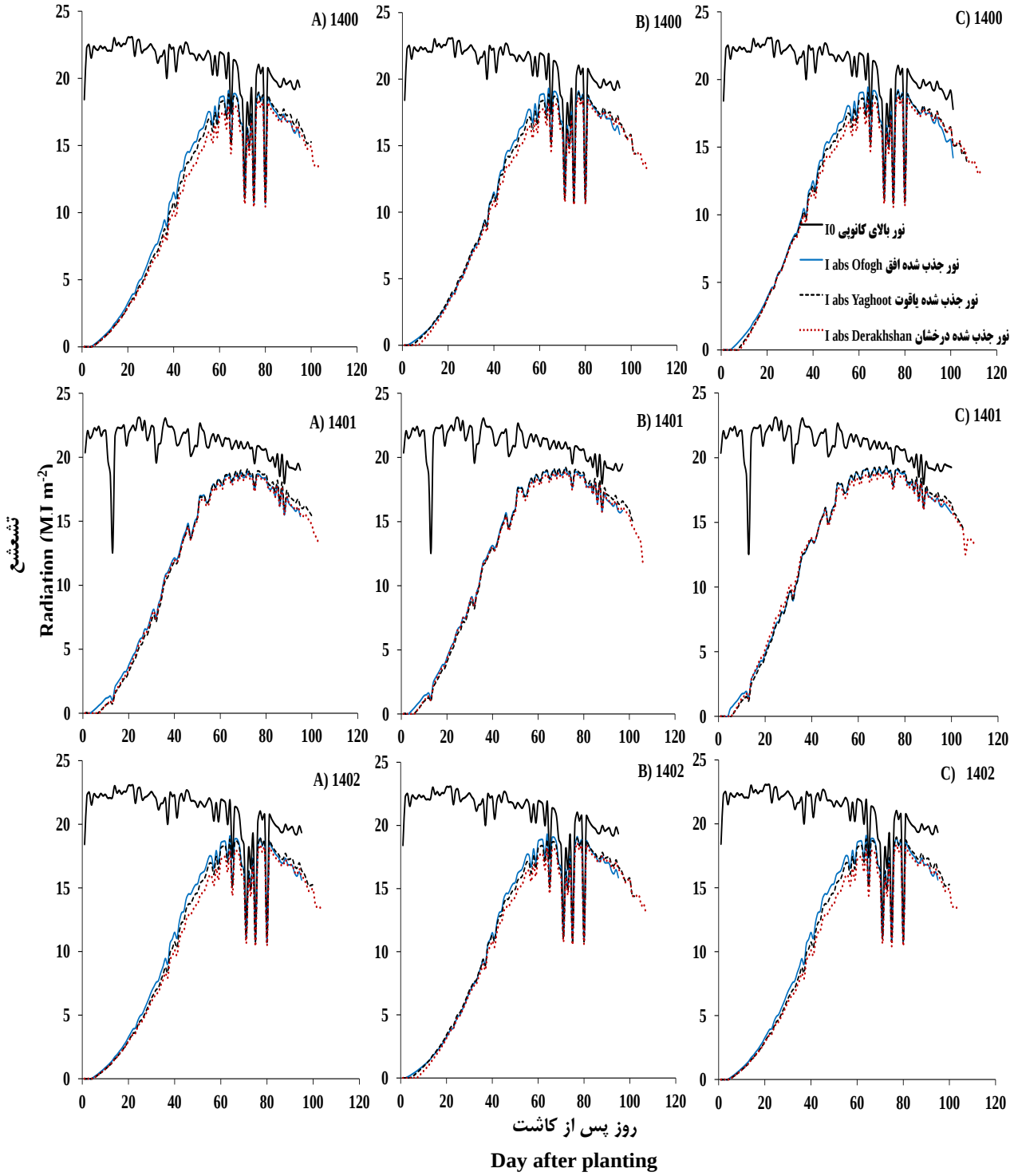
جذب نور

روند جذب نور از روند تغییرات شاخص سطح برگ تبعیت کرد، به‌طوری‌که در مراحل اولیه رشد به‌دلیل پایین بودن شاخص سطح برگ و عدم پوشش کامل سطح زمین، جذب نور نیز کم بود (شکل ۴). متناسب با افزایش شاخص سطح برگ، نور جذب شده به‌تدریج در تمام تیمارهای مورد بررسی افزایش یافت و در زمان گلدهی به حداکثر میزان خود رسید و سپس به علت ریزش برگ‌ها و بهم خوردن ساختار کانوپی تا پایان دوره رشد روند نزولی در پی گرفت. نتایج نشان داد که روند جذب نور در بین تیمارهای مورد ارزیابی تفاوت چندانی نداشت، با این حال با افزایش شدت تنش خشکی میزان نور جذب شده توسط کانوپی لوبیا قرمز کاهش یافت. میانگین سه ساله این بررسی برای میزان نور جذب شده تجمعی رقم درخشان در تیمار آبیاری مطلوب، تنش ملایم و تنش شدید به‌ترتیب، ۱۴۱۰/۹، ۱۳۰۹/۶ و ۱۲۱۴/۷ مگاژول در متر مربع برای رقم یاقوت به‌ترتیب، ۱۳۵۲/۹، ۱۲۶۹/۶ و ۱۱۸۷/۹ مگاژول در متر مربع و برای رقم افق به‌ترتیب، ۱۲۷۶/۱، ۱۱۹۶/۳ و ۱۱۱۷/۲ مگاژول در متر مربع بود. بیش‌ترین (۱۴۱۰/۹ مگاژول در متر مربع) و کمترین (۱۰۳۵/۸ مگاژول در متر مربع) میزان نور جذب شده تجمعی به‌ترتیب مربوط به رقم درخشان در شرایط آبیاری کامل و شرایط تنش شدید خشکی بود (شکل ۴).

مقدار نور جذب شده توسط ارقام مورد بررسی در سال ۱۴۰۱ بیشتر از سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۲ بود. به نظر می‌رسد میزان نور جذب شده تجمعی توسط کانوپی رقم درخشان نسبت به ارقام دیگر به‌دلیل تفاوت‌های ژنتیکی و همچنین زاویه قرارگیری برگ‌ها بیشتر بود. برگ‌های رقم درخشان به گونه‌ای قرار گرفتند (مثلا عمود بر جهت تابش) که باعث جذب بیشتر و بهتر نور وارد شده به کانوپی گردید که منجر به استفاده کاراتر از نور و افزایش کارایی مصرف نور شد. در تحقیقی دیگر گزارش شده است که میزان جذب نور رقم دیررس ۷۰۴ C.S از سایر ارقام بیشتر بود (Tohidi *et al.*, 2012)، این موضوع توسط پژوهشگران دیگر نیز گزارش شده است (Shibles & Weber, 1995).

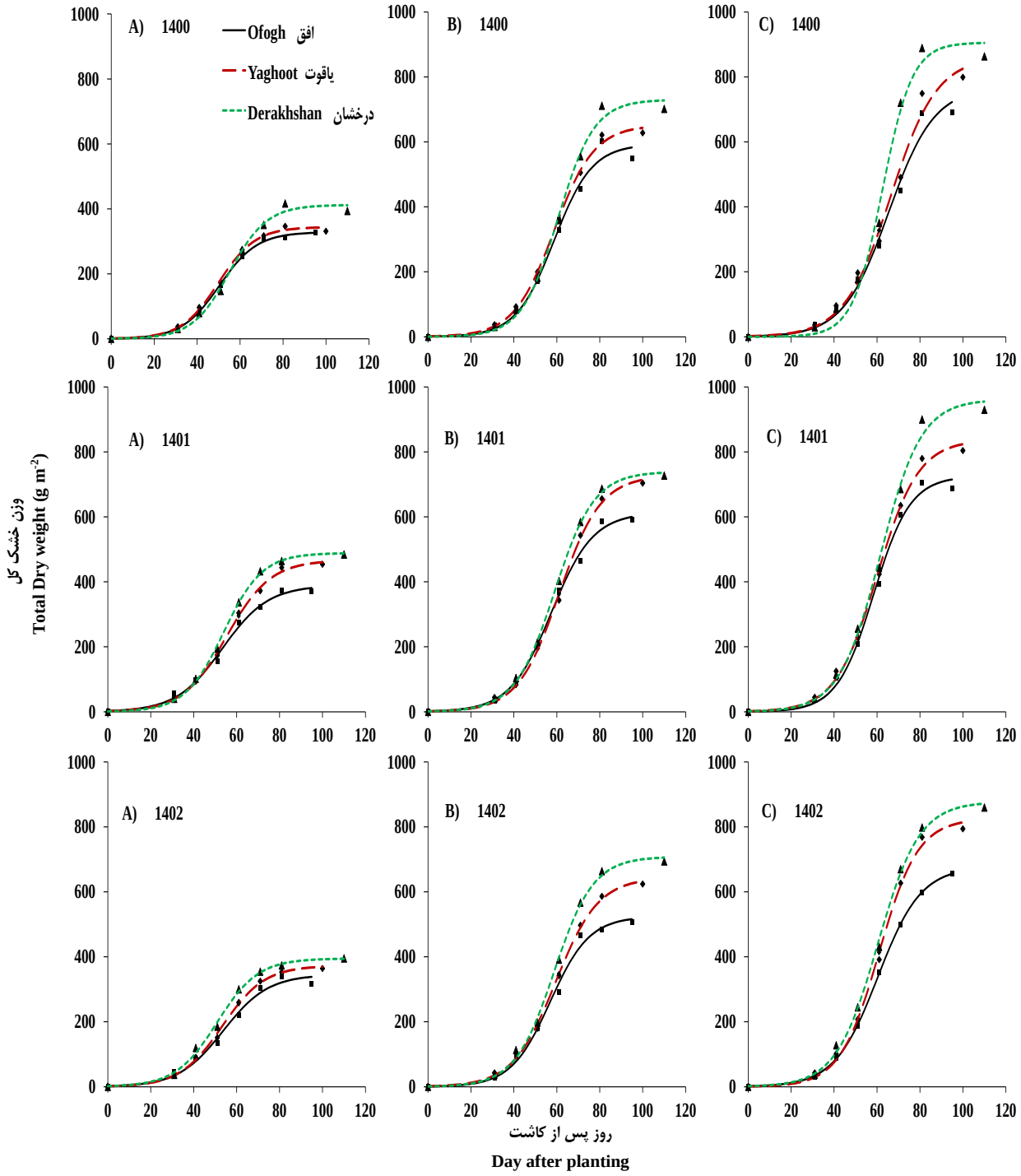
وزن خشک کل

نتایج نشان داد که در ابتدای دوره رشد به‌دلیل کوچک بودن بوته ها تفاوت معنی‌داری بین سطوح مختلف آبیاری و ارقام لوبیاقرمز از نظر روند افزایش وزن خشک کل مشاهده نشد (شکل ۵). اما با گذشت زمان وزن خشک کل وارد دوره رشد خطی خود شد و سپس در حدود ۹۵ تا ۱۱۰ روز پس از کاشت به حداکثر میزان خود رسید. صرف‌نظر از ارقام لوبیا قرمز، با افزایش شدت تنش خشکی حداکثر وزن خشک کل نیز کاهش یافت. تغییرات وزن خشک کل در بین ارقام مورد بررسی از نظر حداکثر میزان و زمان رسیدن به حداکثر میزان نیز متفاوت بود (شکل ۵). میانگین حداکثر وزن خشک کل طی سه سال آزمایش برای رقم افق در تیمار آبیاری مطلوب، تنش ملایم و تنش شدید به‌ترتیب، ۶۳۳/۳، ۵۴۸/۳ و ۳۳۸/۵ گرم بر متر مربع، برای رقم یاقوت به‌ترتیب، ۷۹۹/۱، ۶۵۲/۱ و ۳۸۳/۱ گرم بر متر مربع و برای رقم درخشان نیز به ترتیب، ۸۴۴/۱، ۷۰۷/۵ و ۴۲۴/۲ گرم بر متر مربع بود. نتایج نشان داد که بیش‌ترین میزان وزن خشک کل مربوط به رقم درخشان و در شرایط آبیاری کامل به میزان ۸۸۴/۱ گرم بر متر مربع و کمترین آن مربوط به رقم افق در شرایط تنش شدید کم آبی به میزان ۳۳۸/۵ گرم بر متر مربع مشاهده شد (شکل ۵).



شکل ٤- تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری بر میزان جذب تشعشع خورشیدی ارقام لوبیا قرمز، A: آبیاری ٦٠ درصد، B: آبیاری ٨٠ درصد، C: آبیاری ١٠٠ درصد

Figure 4- The effect of different irrigation treatments on the solar radiation absorption of red bean cultivars. A: Irrigation 60%, B: Irrigation 80%, C: Irrigation 100٪



شکل ۵- تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری بر وزن خشک کل ارقام لوبیا قرمز، A: آبیاری ٦٠ درصد، B: آبیاری ۸۰ درصد، C: آبیاری ۱۰۰ درصد

Figure 5- The effect of different irrigation treatments on the total dry weight of red bean cultivars of, A: Irrigation 60%, B: Irrigation 80%, C: Irrigation 100٪

وزن خشک کل ارقام مورد بررسی در سال ۱۴۰۱ بیشتر از سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۲ بود. در طول دوره رشد ارقام لوبیا قرمز وزن خشک کل در تیمار آبیاری مطلوب (۱۰۰ درصد نیاز آبی) نسبت به دیگر تیمارهای آبیاری بطور معنی‌داری بالاتر بود و در شرایط تنش کمبود آب شدید (۶۰ درصد نیاز آبی)، وزن خشک کل به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت. زمانی‌که آب عامل محدودکننده است، گیاهان به علت پایین بودن شاخص سطح برگ، نور کم‌تری نیز جذب کرده و در نتیجه تولید ماده خشک نیز کاهش می‌یابد. از طرفی تنش کمبود آب باعث تغییر ساختمان کانوپی گیاه، الگوی انتشار نور درون کانوپی و در نهایت کارایی مصرف نور می‌شود. تنش خشکی، تولید ماده خشک گیاهان را به علّت کاهش جذب تشعشع فعّال فتوسنتزی ناشی از کاهش سطح برگ، پژمردگی، جمع‌شدن پهنک و در نهایت پیری زودرس برگ‌ها و همچنین کاهش کارایی تبدیل نور جذب شده به ماده خشک تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (Earl & Davis, 2003). در مطالعه‌ای دیگر نیز مشخص شد که کاهش محتوی حجمی آب خاک منجر به کاهش اندازه و تعداد برگ‌ها و در نتیجه کاهش تولید ماده خشک گردید (Li *et al.*, 2006).

کارایی مصرف نور

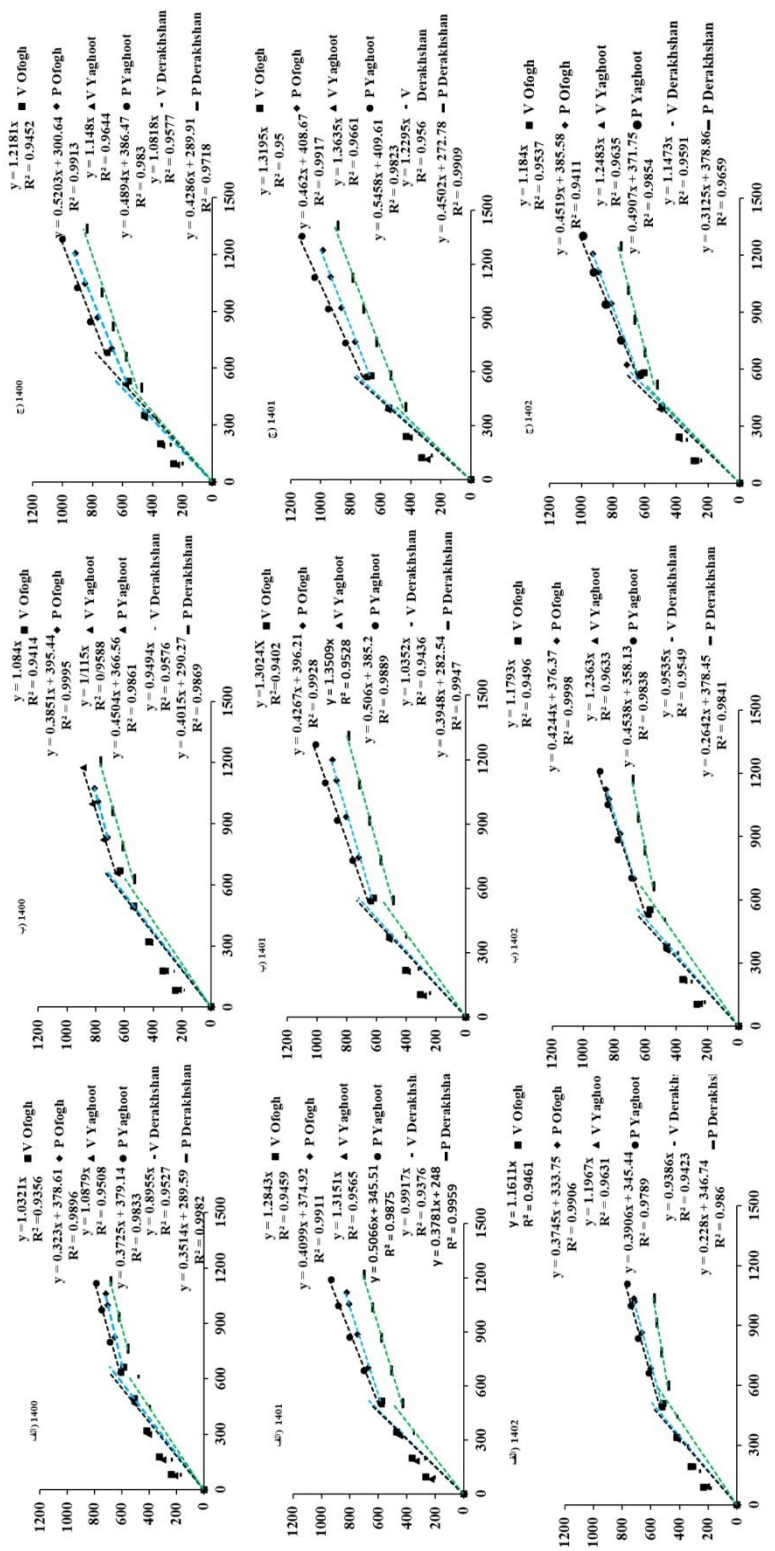
صرف‌نظر از ارقام لوبیا قرمز، با افزایش شدت تنش‌خشکی میزان کارایی مصرف نور کاهش یافت (شکل ۶). نتایج نشان داد کارایی مصرف نور لوبیاقرمز طی فاز رویشی بیشتر از فاز زایشی در هر سه سال آزمایش بود. حداکثر کارایی مصرف نور برای رقم یاقوت در تیمار آبیاری مطلوب، تنش ملایم و تنش شدید به‌ترتیب ۱/۳۶، ۱/۳۵ و ۱/۳۱گرم بر مگاژول بود. برای رقم افق این مقادیر به‌ترتیب ۱/۳۱، ۱/۳۰ و ۱/۲۸ گرم بر مگاژول به‌دست آمد و برای رقم درخشان به‌ترتیب ۱/۲۲، ۱/۰۳ و ۰/۹۹گرم بر مگاژول بود. تولید زیست‌توده در شرایط بدون تنش توسط مقدار تشعشع جذب شده تجمعی به‌وسیله سایه‌انداز گیاهی و کارایی مصرف نور مشخص می‌شود (Monteith, 1994). بالاترین کارایی مصرف نور برای رقم یاقوت به میزان ۱/۳۶ گرم بر مگاژول در شرایط آبیاری مطلوب مشاهده شد (شکل ۶، ج) و همچنین پایین‌ترین میزان کارایی مصرف نور مربوط به رقم درخشان در شرایط اعمال تنش شدید آبی به میزان ۰/۸۹ گرم بر مگاژول مشاهده شد (شکل ۶، الف). صرف‌نظر از تیمارهای آبیاری و ارقام مقادیر کارایی مصرف نور در سال ۱۴۰۱ بیشتر از سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۲ بود.

کارایی مصرف نور مفیدترین پارامتر برای تخمین تولید محصولات است و برای گونه‌های مختلف یا شرایط متداول در یک ناحیه بر تولید محصولات زراعی ثابت نیست. ارقام مختلف لوبیاقرمز کارایی مصرف نور متفاوتی داشتند، به نظر می‌رسد این تفاوت ناشی از اختلاف در تجمع ماده خشک ناشی از کارایی فتوسنتزی ارقام در سطوح مختلف تأمین نیاز آبی باشد. تحت شرایط آبیاری مطلوب (۱۰۰ درصد نیاز آبی)، در رقم یاقوت بیشترین کارایی مصرف نور مشاهده شد. این نتیجه نشان می‌دهد که رقم یاقوت در استفاده از نور و تولید ماده خشک بهتر عمل می‌کند. در تحقیقی دیگر گزارش شد که در شرایط تنش خشکی، هم میزان نور جذب شده و هم ماده خشک تولیدی کاهش یافت (Emam & Niknezhad, 2004). این کاهش باعث می‌شود که آب کمتری در دسترس گیاه قرار گیرد و به سبب آن رشد سلول‌ها و در نتیجه، سطح برگ گیاه هم نیز کم‌تر شود. همچنین هرچه نسبت ماده خشک تولیدی به نور جذب شده کم‌تر باشد، کارایی مصرف نور کم‌تر می‌شود. کاهش کارایی نور در شرایط تنش شدید آبی (۶۰ درصد نیاز آبی)، در همه ژنوتیپ‌های لوبیا چیتی نیز گزارش شده است (Karimzadeh *et al.*, 2018).

عملکرد دانه

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری و رقم و برهمکنش آنها بر عملکرد دانه لوبیاقرمز معنی‌دار بود (جدول ۳). با افزایش شدت تنش خشکی عملکرد دانه ارقام مورد بررسی بطور معنی‌داری کاهش یافت. بیشترین عملکرد دانه مربوط به رقم افق در شرایط آبیاری کامل و کمترین آن مربوط به رقم درخشان در شرایط تنش شدید خشکی مشاهده بود (جدول ۴). عملکرد دانه ارقام مورد بررسی در سال ۱۴۰۱ بیشتر از سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۲ بود. نتایج نشان داد رقم افق عملکرد دانه بالاتری نسبت به ارقام دیگر داشت که احتمالاً به‌دلیل جذب میزان بیشتری از محتوی رطوبت حجمی خاک و در نتیجه تولید ترکیبات فتوسنتزی بالاتری باشد. به نظر می‌رسد تنش خشکی، سبب کاهش محتوی رطوبت حجمی خاک شده که این عوامل باعث آسیب‌رسانی به بافت‌های گیاه، کاهش فتوسنتز و در نتیجه کاهش تولید ماده خشک و همچنین عملکرد دانه گردید.

عملکرد دانه ارقام افق، یاقوت و درخشان در تیمار آبیاری ۶۰ درصد در مقایسه با تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد به‌ترتیب، ۵۵، ۵۳ و ۵۶ درصد کاهش یافت. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد میزان کاهش عملکرد دانه در بین ارقام مورد بررسی تقریباً مشابه یکدیگر بود که این موضوع در نتیجه برش‌دهی ارقام در هر سطح آبیاری نیز تائید گردید (جدول ۳). در مطالعه‌ای دیگر اعمال تنش خشکی در مقایسه با تیمار آبیاری مطلوب در رقم کوشا منجر به کاهش ۶۰/۴ درصدی و در ژنوتیپ COS16 منجر به کاهش ۵۶/۹ درصدی عملکرد دانه لوبیا قرمز شد (Mohammadi *et al.*, 2018). تنش کمبود رطوبت یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی محدود کننده عملکرد گیاهان زراعی است که تحت‌تأثیر اثرات متقابل میان ژنوتیپ (خصوصیات ارقام)، محیط (شرایط اقلیم و خاک) و مدیریت مزرعه است (Arvin *et al.*, 2018).



شکل ۶- تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری بر کارایی مصرف نور ارقام مختلف لوبیا قرمز: الف: آبیاری ۶۰٪، ب: آبیاری ۸۰٪، ج: آبیاری ۱۰۰٪ و: رویشی، پ: زایشی

Figure 6- The effect of different irrigation treatments on the efficiency of radiation consumption of different Cultivars of red bean

A: Irrigation 60%, B: Irrigation 80%, C: Irrigation 100%, V: Vegetative, P: Productive

جدول ۳- تجزیه واریانس عملکرد دانه لوبیا قرمز تحت تأثیر آبیاری و ارقام مختلف طی سال‌های ۱۴۰۰-۱۴۰۲

Table 3- Variance analysis of red bean grain yield under the influence of irrigation and different cultivars during 1400—1402

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean squares
سال Year (Y)	2	30881**
خطا Error (Y)	6	1740
آبیاری Irrigation (I)	2	95313*
آبیاری× سال Y × I	4	2074^{ns}
خطای آبیاری Error I (Y)	12	1466
ارقام Cultivars (C)	2	144637**
رقم × آبیاری I × C	4	5428**
تکرار× سال Y × B	4	3280**
رقم × آبیاری× سال Y × I × C	8	1531 ^{ns}
خطای کل Total Error	36	841
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)		8.84

برش‌دهی برهمکنش ارقام در هر سطح آبیاری

Interaction slicing of cultivars in every level of irrigation

آبیاری Irrigation	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean squares
60%	2	1234**
80%	2	1341**
100%	2	1167**

^{ns}، * و **: به‌ترتیب نشان‌دهنده اختلاف غیرمعنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد هستند.

^{ns}, * and ** show non-significant difference, significant difference at the 5 and 1% probability levels, respectively.

بر اساس مطالعات به‌عمل‌آمده، عامل تنش کمبود آب به‌تنهایی سبب کاهش ۵۰ درصد از عملکرد دانه محصولات زراعی باتوجه به تفاوت در زمان، شدت تنش و ارقام در جهان است (Heidari & Karami, 2014). مهم‌ترین شاخص انتخاب ارقام تحت شرایط تنش کمبود آب، افزایش عملکرد دانه است. باتوجه‌به اینکه تولید دانه تحت‌تأثیر عوامل محیطی و ژنتیکی زیادی قرار دارد، بنابراین انتخاب ارقام تحت شرایط تنش دشوار است (Debaeke & Abdellah, 2004). کاهش عملکرد دانه در اثر محدودیت آب توسط محققین دیگر نیز گزارش شده است (Teran & Singh, 2002).

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان‌دهنده تأثیر مثبت آبیاری بر کارایی جذب و مصرف نور ارقام لوبیاقرمز بود. صرف‌نظر از سال در شرایط آبیاری مطلوب، تنش ملایم و تنش شدید، میانگین شاخص سطح برگ در مرحله گلدهی به‌ترتیب ۴/۹۶، ۴/۸۱ و ۴/۲۵ بود. تنش شدید آب، توانایی بوته‌ها را برای حفظ سطح برگ در طول دوره رشد کاهش داد. صرف‌نظر از سال و ارقام مورد بررسی نور جذب شده تجمعی در تیمار آبیاری مطلوب، تنش ملایم و تنش شدید، به تدریج کاهش یافت، اما این کاهش شدید نبود. با توجه به این نکته که نور جذب شده وابسته به میزان شاخص سطح برگ گیاه است و پس از بسته شدن تاج پوشش گیاه، عملا افزایش شاخص سطح برگ تأثیری بر میزان جذب نور گیاه ندارد، بنابراین این نتیجه دور از ذهن نبود. بالاترین وزن خشک کل و کارایی مصرف نور به‌ترتیب متعلق به رقم درخشان و رقم یاقوت بود. تنش خشکی از طریق کاهش طول دوره رشد لوبیا منجر به کاهش جذب نور، کارایی مصرف نور و تولید ماده خشک شد. تولید ماده خشک

و عملکرد دانه لوبیاقرمز رابطه نزدیکی باقابلیت دسترسی به رطوبت خاک داشت.

جدول ٤- اثرات برهمکنش آبیاری و رقم بر عملکرد دانه لوبیا قرمز

Table 4- Effects of interaction of irrigation and cultivar on red bean grain yield

آبیاری Irrigation	رقم Cultivar	عملکرد Yield (g/m^{-2})
60%	افق Ofogh	86.8^{f}
	یاقوت Yaghoot	82.9^{fg}
	درخشان Derakhshan	80.9^{g}
80%	افق Ofogh	164.9^{d}
	یاقوت Yaghoot	154.2^{e}
	درخشان Derakhshan	148.4^{e}
100%	افق Ofogh	192.5^{a}
	یاقوت Yaghoot	177.5^{c}
	درخشان Derakhshan	183.4^{b}

حروف مشابه نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار است

Similar letters indicate no significant difference

اگرچه تولید وزن خشک رقم درخشان بیشتر از سایر ارقام بود، اما به نظر می‌رسد انتقال ترکیبات فتوسنتزی بیشتر به سمت دانه‌ها توسط رقم افق تحت شرایط اقلیم مورد مطالعه منجر به بالاتر بودن عملکرد دانه این رقم گردید. عملکرد دانه ارقام افق، یاقوت و درخشان در تیمار آبیاری ۶۰ درصد در مقایسه با تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد به‌ترتیب، ۵۵، ۵۳ و ۵۶ درصد کاهش یافت که نشان می‌دهد میزان کاهش عملکرد دانه در بین ارقام مورد بررسی تقریباً مشابه یکدیگر است. در بین ارقام مورد بررسی کمترین طول دوره نموی متعلق به رقم افق و بیشترین آن متعلق به رقم درخشان بود. با این حال رقم افق علی‌رغم طول دوره نموی کوتاه‌تر دارای عملکرد دانه بالاتری بود، که این موضوع به‌ویژه در مناطقی که با کمبود آب آبیاری مواجه هستند یا در مناطقی که طول دوره رشد در آنجا کوتاه‌تر است، می‌تواند تأثیر مطلوبی بر بهبود میزان تولید داشته باشد. از یافته‌های این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که با انتخاب رژیم آبیاری مناسب در مزارع لوبیا می‌توان به ساختار مناسب کانوپی دست‌یافت که وضعیت مطلوبی را برای بهبود شاخص‌های رشد، استفاده کارآمد از منابع محیطی مانند تابش و در نهایت افزایش تولید فراهم می‌کند. گیاه لوبیا از نظر واکنش به سطوح تنش خشکی بسته به نوع رقم متفاوت بود. براین‌اساس انتخاب رقم افق باتوجه‌به فرم بوته ایستاده و زودرسی علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف آب، در مناطقی که به‌دلیل سرمای زودهنگام پائیزه امکان کاشت لوبیا وجود ندارد مناسب‌تر بوده و می‌تواند عملکرد قابل‌قبولی را ارائه دهد. باتوجه‌به حساسیت شدید گیاه لوبیاقرمز به شرایط کمبود آب ضروری است پژوهش‌های بیشتری روی ارقام مختلف لوبیا در شرایط مختلف آب و هوایی در کشور انجام شود.

سپاسگزاری

از مزرعه تحقیقاتی و آزمایشگاهی دانشگاه رازی به خاطر فراهم کردن امکانات و حمایت‌های علمی لازم، صمیمانه تشکر می‌شود.

References

1. Ahmadi, M., Mondani, F., Khorramivafa, M., Mohammadi, G., & Shirkhani, A. (2018). Evaluation of Nitrogen uptake and productivity of maize cultivars (*Zea mays* L.) under Kermanshah climate conditions. *Journal of*

Agroecology, *10*(1), 234-247. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jag.v10i1.56935
2. Alamdari, E. (2018). The effect of deficit irrigation on yield and physiological traits of bean cultivars. *Plant Production Technology*, *18*(1), 47-61. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22084/ppt.2018.9633.1537
3. Alizadeh, A. (2013). *The principles of applied hydrology*. Imam-Reza University.
4. Alizadeh, A., & Kamali, Gh. (2007a). *Water requirements of plants*. Astan Ouds Razavi Press. First edition. pp 228.
5. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration*: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. pp 56.
6. Androcioli, L.G., Zeffa, D.M., Alves, D.S., Tomaz, J.P., & Moda-Cirino, V. (2020). Effect of water deficit on morpho-agronomic and physiological traits of common bean genotypes with contrasting drought tolerance. *Water*, *12*, 1-13. https://doi.org/10.3390/w12010217
7. Arvin, P., Vafa bakhsh, J., & Mazaheri, D. (2018). Study of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) and drought on physiological traits and ultimate yield of cultivars of oilseed rape (*Brassica* spp. L.). *Journal of Agroecology*, *9*(4), 1208-1226. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/JAG.V9I4.61808
8. Bai, Z., Mao, S., Han, Y., Feng, L., Wang, G., & Yang, B. (2016). Study on light interception and biomass production of different cotton cultivars. *Plos One*. *11*(5), 1-17. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156335
9. Bayat, N., Ghanbari, A.A., & Bayramzade, V. (2020). Nanopriming a method for improving crop plants performance: a case study of red beans. *Jornal of Plant Nutrition*. *1*(44), 141-151. https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1806304
10. Beheshti, A., Koochaki, A., & Nassiri Mahallati, M. (2002). The effect of planting pattern on light interception and radiation use efficiency in canopy of three maize cultivars. *Seed and Plant*, *18*(4), 417-431. (In Persian with English abstract). https://10.22092/spij.2017.110754
11. Chieb, M., & Gachomo, E.W. (2023). The role of plant growth promoting rhizobacteria in plant drought stress responses. *BMC Plant Biology*, *23*(1), 407. https://doi.org/10.1186/s12870-023-04403-8
12. Cortes, A.J., Thiis, D., Chavarro, C., Madrinan, S., & Blair, M.W. (2012). Nucleotide diversity patterns at the drought-related DREB2 encoding genes in wild and cultivated common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Theoretical and Applied Genetics*, *125*, 1069-1085. https://doi.org/10.1007/s00122-012-1896-5
13. Debaeke, P., & Abdellah, A. (2004). Adaptation of crop management to water limited environments. *European Journal of Agronomy*, *21*(4), 433-446. https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.07.006
14. Earl, H.J., & Davis, R.F. (2003). Effect of drought stress on leaf and whole canopy radiation use efficiency and yield of maize. *Agronomy Journal*, *95*, 688-696. https://doi.org/10.2134/agronj2003.6880
15. Emam, Y., & Niknezhad, M. (2004). *An introduction to crop physiology*. Shiraz University Press.
16. FAOSTAT. (2025). The Food and Agricultural Organization of the United Nations: The statistical database. https://doi.org/10.32614/cran.package.faostat
17. Ghanbari, A.A. (2022). Grain yield efficiency index, a criterion for selecting the best bean genotypes in drought stress conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *4*, 63-71. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/IJFCS.2020.302878.654721
18. Ghanepour, S., Shakiba, M.R., Tourchi, M., Ostan, Sh., & Ghanbari, A.A. (2012). Interaction of soil Zn and moisture supply on root growth, relative water content, and stomatal conductance of two common bean cultivars. 12th Iranian Congress of Agricultural Sciences and Plant Breeding.
19. Goudriaan, J., & Van Laar, H.H. (1993). *Modelling potential crop growth processes*. Kluwer Academic Press.
20. Hajishabani, H., Mondani, F., & Bagheri, A. (2020). Simulation effects of sowing date on growth and yield of rainfed chickpea (*Cicer arientinum* L.) by CROPGRO-CHICKPEA model. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *18*, 197-212. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/gsc.v18i2.82684
21. Heidari, M., & Karami, V. (2014). Effects of different mycorrhiza species on grain yield, nutrient uptake and oil content of sunflower under water stress. *Journal of the Saudi Society of Agricultura Sciences*, *13*(1), 9-13. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2012.12.002
22. Hillel, D. (2004). *Introduction to Environmental Soil Physics*. Academic Press.
23. Hu, W.H., Yan, X.H., Xiao, Y.A., Zeng, J.J., Qi, H.J., & Ogweno, J.O. (2013). 24-Epibrossinosteriod alleviate drought-induced inhibition of photosynthesis in Capsicum annum. *Scientia Horticulturae*, *150*, 232-237. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.11.012
24. Kaboli, S., Hekmatzadeh, A.A., Darabi, H., & Torabi Haghighi, A. (2021). Variation in physical characteristics of rainfall in Iran, determined using daily rainfall concentration index and monthly rainfall percentage index. *Theoretical and Applied Climatology*, *144*, 507-520. https://doi.org/10.1007/s00704-021-03553-9
25. Karimzadeh, H.A., Nezami, A., Kafi, M., & Taddayon, M.R. (2017). Effect of deficit irrigation on yield and yield components of pinto bean genptypes in Shahrekord. *Iranian Journal of Pulses Research*, *8*(1), 113-126. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/ijpr.v8i1.49118
26. Kermanshah Meteorological Organization. (2025). www.kermanshahmet.ir

27. Li, F.W., & Mathews, S. (2016). Evolutionary aspects of plant photoreceptors. *Journal Plant Research*, *129*, 115-122. https://doi.org/10.1007/s10265-016-0785-4
28. Khadivar, J., Avarseji, Z., Alamdari, E.G., & Naeemi, M. (2025). Effect of planting dates and different weed management on yield and morphological traits of pinto bean (*Phaseolus vulgaris*). *Applied Research of Plant Ecophysiology*, *9*, 138-150. http://arpe.gonbad.ac.ir/article-1-457-fa.html
29. Li, R., Baum, M., Grando, M., & Ceccarelli, S. (2006). Evaluation of chlorophyll content and fluorescence parameters as indicators of drought tolerance in barley. *Agricultural Sciences in China*, *5*(10), 751-757. https://doi.org/10.1016/s1671-2927(06)60120-x
30. Mahpara, S., Hussain, T., & Farooq, J. (2014). Drought tolerance studies in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Cercetari Agronomice in Moldova*, *4*(160), 133-140. https://doi.org/10.1515/cerce-2015-0011
31. Markazi Agricultural and Natural Resourcrs Reserch and Education Cernter. 2021. http://manrrc.ir
32. Mondani, F., Khani, K., Jalali Honarmand, S., & Saeidi, M. (2019). Evaluating effects of plant growthpromoting rhizobacteria on the radiation use efficiency and yield of soybean (*Glycine max*) under water deficit stress condition. *Agricultural Water Management*, *213*, 707-713. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.11.004
33. Monteith, J.L. (1994). Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, *9*, 747-766. https://doi.org/10.2307/2401901
34. Mousavi, A., Ardalan, A., Takian, A., Ostadtaghizadeh, A., Naddafi, K., & Massah Bavani, A. (2020). Climate change and health in Iran: a narrative review. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, *18*, 367–378. https://doi.org/10.1007/s40201-020-00462-3
35. Mohammadi, M., Tavakoli, A., Pouryousef, M., & Mohseni Fard, E. (2018). The effect of epibrassinolide on growth and seed yield of bean under optimal irrigation and drought stress conditions. *Crops Improvement*, *20*, 595-608. https://doi.org/10.1071/cp18424
36. Nohong, B., & Nompo, S. (2015). Effect of water stress on growth, yield, proline and soluble sugars contents of Signal grass and Napier grass species. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture*, *9*(5), 14-21.
37. Ministry of Jihad-e-Agriculture of Iran (MJA). 2024. Agricultural Jihad Organization of Kermanshah Province. https://agrodl.ir/statistics/
38. Pagter, M., Bragato, C., & Brix, H. (2005). Tolerance and physiological responses of fragmites australits to water deficit. *Aquatic Botany*, *81*, 285-299. https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2005.01.002
39. Rashidi, Z., Bannayan Aval, M., Azizi, Kh., & Nasiri Mahallati, M. (2022). Effect of drought stress on yield and yield components and radiation use efficiency of three types of red, white and pinto beans. *Journal of Plant Production Research*, *29*(3), 143-164. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.1007/s42106-026-00423-0
40. Seetseng, K.A. (2008). Effect of water application and plant density on canola (*Brassica napus* L.) in the free state. M.S. thesis, University of the Free State Bloemfontei. https://doi.org/10.17159/wsa/2023.v49.i2.3965
41. Shibles, R.M., & Weber, C.R. (1995). Leaf area, solar radiation interception and dry matter production by soybeans. *Crop Science*, *5*, 575-577. https://doi.org/10.2135/cropsci1965.0011183X000500060027x
42. Sun, R., Ma, J., Sun, X., Zheng, L., & Guo, J. (2023). Responses of the leaf water physiology and yield of grapevine via different irrigation strategies in extremely arid areas. *Sustainability*, *15*(2887), 1-15. https://doi.org/10.3390/su15042887
43. Tahmasebi, Z., & Mohammadi-Dehbalaee, H. (2019). Evaluation of black bean genotypes (*Phaseolus vulgaris* L.) under drought stress conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *12*, 197-207. (In Persian). https://doi.org/10.22077/escs.2018.1223.1249
44. Teran, H., & Singh, S.P. (2002). Comparison of sources and lines selected for drought resistance in common bean. *Crop Science*, *42*(1), 64-70. https://doi.org/10.2135/cropsci2002.6400
45. Tohidi, M., Nadery, A., Siadat, S., & Lak, S. (2012). Variables productivity of light interception in grain maize hybrids at various amount of nitrogen. *World Appled Science Journal*, *16*(1), 86-93.
46. Toscano, S., Ferrante, A., & Romano, D. (2019). Response of Mediterranean ornamental plants to drought stress. *Horticulturae*, *5*(1), 6. https://doi.org/10.3390/horticulturae5010006
47. Tsubo, M., Walker, S., & Mukhala, E. (2001). Comparisons of radiation use efficiency of mono/intercropping system with different row orientation. *Field Crops Research*, *71*, 17-29. https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00142-3
48. Uebersax, M.A., Cichy, K.A., Gomez, F.E., Porch, T.G., Heitholt, J., Osorno, J.M., Kamfwa, K., Snapp, S. S., & Bales, S. (2022). Dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) as a vital component of sustainable agriculture and food security—A review. *Legume Science*, *5*(1), 1-13. https://doi.org/10.1002/leg3.155

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 40, No. 1, Spring. 2026, p. 39-55

Multi-Criteria Analysis of Allowable Soil Moisture Depletion Coefficients in Sugar Beet Irrigation Management: Linking Functional, Technical, and Economic Criteria

R. Mohammadikia[1*]

1- On-Farm Water Management Department, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: rmswri@gmail.com)

Received: 04 May 2026
Revised: 23 June 2026
Accepted: 14 July 2026
Available Online: 14 July 2026

How to cite this article:
Mohammadikia, R. (2026). Multi-criteria analysis of allowable soil moisture depletion coefficients in sugar beet irrigation management: Linking functional, technical, and economic criteria. *Journal of Water and Soil*, *40*(1), 39-55. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2026.98569.1538

Introduction

Water scarcity, as one of the main challenges in the agricultural sector, especially in arid and semi-arid regions, has doubled the necessity of optimizing water use in the production of strategic crops such as sugar beet. Determining an optimal irrigation pattern that can simultaneously meet performance, technical, and economic objectives requires a comprehensive and multi-dimensional approach. Traditional evaluation methods, which often focus on one or a limited number of indicators, are unable to provide a complete picture of the trade-offs between different criteria. In this regard, Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods, with their capability to simultaneously and compromisingly evaluate quantitative and qualitative indicators, are considered effective tools for prioritizing management options. This research aimed to evaluate the effects of different levels of management allowable depletion (MAD) on functional, technical, and economic indicators in a sugar beet irrigation system. Given water resource limitations and the need to optimize agricultural water use, determining the appropriate MAD level can significantly enhance crop productivity and profitability. The study employed the VIKOR (VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) multi-criteria decision-making method to select the best irrigation treatment. This investigation was conducted within the context of increasing global water scarcity and the critical need for sustainable agricultural practices. Efficient irrigation management is paramount for ensuring food security and the economic viability of farming operations. By systematically analyzing the trade-offs between water conservation, crop yield, and economic returns under varying soil moisture regimes, this study provides a comprehensive framework for informed decision-making. The application of the VIKOR method is particularly suited to this problem, as it facilitates the identification of a balanced compromise solution that reconciles potentially conflicting objectives inherent in agricultural water management, thereby offering a robust scientific basis for optimizing sugar beet irrigation strategies in water-limited environments.

Materials and Methods

Integrated Methodology Section (Final Version): This experiment employed a randomized complete block design (RCBD) to systematically evaluate the impact of irrigation treatments. The study was conducted at the experimental field of the Soil and Water Research Institute in Karaj, Iran. Three distinct levels of management allowable depletion (MAD), specifically 40%, 60%, and 80%, were applied as the main treatments, each replicated four times to ensure statistical reliability and account for field variability. A comprehensive dataset was collected, encompassing key agronomic and economic indicators: crop evapotranspiration (ETc), root yield, water

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)
https://doi.org/10.22067/jsw.2026.98569.1538

productivity (WP), energy productivity, and relevant economic metrics. For the statistical analysis of the data derived from the randomized complete block design, analysis of variance (ANOVA) was utilized. This analysis was conducted to examine the statistical significance of observed differences among the various irrigation treatments for each measured trait. In cases where the treatment effect was significant, Duncan's multiple range test at the 5% probability level was used to separate the means. To assess the reliability of the results and investigate the sensitivity of the final ranking to potential variations in criterion weights or data fluctuations, a sensitivity analysis based on Monte Carlo simulation was also performed. In this analysis, by introducing controlled random variations to the input parameters of the VIKOR model, the stability and robustness of the final ranking of the options were evaluated. The VIKOR multi-criteria decision-making method was subsequently applied to this integrated dataset. This method was chosen for its proven efficacy in handling complex decisions involving conflicting and non-commensurable criteria, allowing for the identification of a compromise ranking that best satisfies all evaluation parameters under the given experimental conditions. The integration of results from the analysis of variance, mean comparison tests, and Monte Carlo sensitivity analysis with the output of the VIKOR method provided a robust and multidimensional analytical framework for deriving valid and applicable conclusions.

Results and Discussion

The results demonstrated that the MAD=60% (T2) treatment optimally balanced root yield, WP, energy productivity, and benefit-cost ratio, emerging as the superior option. In the first year, this treatment achieved a VIKOR index (Q=0.2971), a root yield of 36.35 t/ha, and a WP of 5.07 kg/m^3. In the second year, it recorded a VIKOR index (Q=0.1463), a root yield of 45.4 t/ha, and a WP of 5.8 kg/m^3, confirming its superiority. To ensure the reliability of the results, a Monte Carlo sensitivity analysis was performed. This analysis confirmed the stability of the MAD=60% treatment, with probabilities of 85.94% (first year) and 100% (second year). These findings indicate that MAD=60% performs consistently under varying conditions.

Conclusion

The study concludes that MAD=60% is the optimal irrigation strategy for sugar beet cultivation under normal water resource conditions, excelling in functional, technical, and economic performance. These findings can guide farmers and policymakers in improving water management and crop efficiency.

Acknowledgments

The authors would like to thank the staff of the Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran, for their assistance in fieldwork and data collection.

Keywords: Decision matrix, Moisture stress, Monte Carlo method, Sensitivity analysis, Water resources management

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۴۰، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص. ۵۵-۳۹

تحلیل چندمعیاره ضرایب تخلیه مجاز رطوبت خاک در مدیریت آبیاری چغندرقند: پیوند معیارهای عملکردی، فنی و اقتصادی

رضا محمدی‌کیا[1*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۳

چکیده

کمبود آب به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی در بخش کشاورزی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ضرورت بهینه‌سازی مصرف آب در تولید محصولات استراتژیک مانند چغندرقند را دوچندان کرده است. تعیین الگوی آبیاری بهینه که بتواند همزمان اهداف عملکردی، فنی و اقتصادی را تأمین کند، نیازمند رویکردی جامع و چندبعدی است. روش‌های سنتی ارزیابی که اغلب بر یک یا چند شاخص محدود متمرکزند، قادر به ارائه تصویری کامل از تبادلات بین معیارهای مختلف نیستند. در این راستا، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) با قابلیت درنظرگیری همزمان و سازشی شاخص‌های کمی و کیفی، ابزاری کارآمد برای اولویت‌بندی گزینه‌های مدیریتی محسوب می‌شوند. روش ویکور (VIKOR) به‌عنوان یکی از روش‌های سازشی معتبر، با محاسبه نزدیکی هر گزینه به راه‌حل ایده‌آل، امکان انتخاب گزینه‌ای را فراهم می‌کند که بیشترین رضایت گروهی را در بین معیارهای متعارض به ارمغان آورد. بنابراین، پژوهش حاضر با به‌کارگیری این روش نوین، به ارزیابی تأثیر ضرایب مختلف تخلیه مجاز رطوبت خاک (MAD) بر سیستم آبیاری چغندرقند می‌پردازد. این پژوهش طی دو سال زراعی در مزرعه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور (کرج) انجام شد. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار آبیاری بر اساس ضرایب درصد تخلیه مجاز رطوبت خاک (MAD=٪۴۰، MAD=٪۶۰ و MAD=٪۸۰) و در چهار تکرار اجرا گردید. داده‌های مربوط به تبخیر–تعرق، عملکرد ریشه، بهره‌وری آب، انرژی و شاخص اقتصادی جمع‌آوری و مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که تیمار با ۶۰ درصد تخلیه رطوبت خاک با ایجاد تعادل بهینه بین معیارهای عملکردی (عملکرد ریشه و بهره‌وری آب)، فنی (بهره‌وری انرژی) و اقتصادی (نسبت سود به هزینه)، به‌عنوان گزینه برتر در شرایط نرمال منابع آب شناسایی شد. در سال اول، این تیمار با شاخص ویکور (Q=۰/۲۹۷۱) و در سال دوم با شاخص ویکور (Q=۰/۱۴۶۳) در رتبه اول قرار گرفت. این تیمار در سال اول با عملکرد ۳۶/۳۵ تن در هکتار و بهره‌وری آب ۵/۰۷ کیلوگرم بر متر مکعب و در سال دوم با عملکرد ۴۵/۴ تن در هکتار و بهره‌وری آب ۵/۸ کیلوگرم بر متر مکعب، تعادل مناسبی بین معیارهای عملکردی و اقتصادی ایجاد نمود. تحلیل حساسیت با روش مونت کارلو نیز پایداری این برتری را با احتمال ۸۵/۹۴ درصد در سال اول و ۱۰۰% درصد در سال دوم تأیید کرد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل حساسیت، تنش رطوبتی، روش مونت کارلو، ماتریس تصمیم، مدیریت منابع آب

مقدمه

چغندرقند (*Beta vulgaris* L.) یکی از محصولات استراتژیک و اقتصادی در کشاورزی ایران و جهان است که نقش مؤثری در تأمین شکر و فرآورده‌های صنعتی دارد. با افزایش جمعیت و محدودیت منابع آب و انرژی، مدیریت بهینه این منابع به یک چالش اساسی در تولید پایدار محصولات کشاورزی تبدیل شده است. مصرف ناکارآمد آب آبیاری منجر به هدررفت منابع محدود آبی و کاهش پایداری سیستم‌های کشاورزی می‌شود، در حالی‌که بهره‌وری انرژی پایین نیز هزینه‌های تولید را افزایش داده و اثرات زیست‌محیطی منفی ایجاد

۱- گروه مدیریت آب در مزرعه، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO)، کرج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: rmswri@gmail.com)

https://doi.org/10.22067/jsw.2026.98569.1538

می‌کند (Seydan & Mansouri, 2019a; Smith & Jones, 2010). افزون بر این، نوسان قیمت نهاده‌ها (از جمله انرژی، کود و آب) و نیز تغییرات بازده اقتصادی تولید، ضرورت توجه همزمان به معیارهای فنی و اقتصادی را دوچندان می‌کند؛ به‌گونه‌ای که دستیابی به تصمیم‌های پایدار در سطح مزرعه، نیازمند ارزیابی توأم عملکرد زیست‌محیطی، کارایی منابع و سودمندی اقتصادی است. در این راستا، بهره‌وری آب[1] (WP)، به‌عنوان نسبت عملکرد محصول به میزان آب مصرفی، یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی توانایی سیستم‌های تولید در تبدیل آب به محصول به شمار می‌رود و نقش مهمی در مدیریت پایدار منابع آب دارد (Seydan & Mansouri, 2019b). مطالعات متعدد داخلی و بین‌المللی نشان داده‌اند که روش‌های مختلف آبیاری، زمان‌بندی و مقدار آبیاری و مدیریت تغذیه آب و کود، تأثیر قابل توجهی بر بهره‌وری آب چغندرقند دارند. به‌عنوان مثال، استفاده از آبیاری قطره‌ای، نه تنها موجب افزایش عملکرد محصول، بلکه کاهش مصرف آب و جلوگیری از هدررفت منابع آبی می‌شود (Nasiri *et al*., 2014a; Nasiri *et al*., 2014b; Yousefi, 2015).

همچنین، مطالعات نشان داده‌اند که تنظیم آبیاری بر اساس نیاز واقعی گیاه و اعمال کسری آب در مراحل حساس رشد می‌تواند بهره‌وری آب را بهبود بخشد و همزمان اثرات منفی ناشی از تنش‌های آبی را کاهش دهد (Caliskan & Caliskan, 2010; El Hamdi *et al*., 2017b). تحقیقات بین‌المللی نیز بیانگر آن است که ترکیب آبیاری قطره‌ای با تکنیک‌های مدیریت تغذیه آب و کود، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک، موجب افزایش بهره‌وری آب و بهبود کیفیت محصول می‌شود (Balta *et al*., 2021). این یافته‌ها بر اهمیت طراحی مناسب برنامه آبیاری و انتخاب سیستم بهینه تأکید می‌کنند؛ امری که از منظر اقتصادی نیز می‌تواند با کاهش اتلاف منابع و مدیریت بهتر نهاده‌ها، زمینه افزایش درآمد و بهبود وضعیت اقتصادی تولیدکننده را فراهم کند. از سوی دیگر، بهره‌وری انرژی[2] (EP) به‌عنوان نسبت انرژی خروجی محصول به مجموع انرژی ورودی‌های مصرف‌شده (شامل انرژی مربوط به کود، بذر، آب آبیاری و ماشین‌آلات)، یکی از معیارهای کلیدی برای سنجش کارایی کلی مصرف انرژی در سیستم‌های کشاورزی است (Arjeh *et al*., 2019). مطالعات نشان داده‌اند که چغندرقند نسبت به بسیاری از محصولات دیگر، انرژی بیشتری را به شکل قابل استفاده در محصول بازمی‌گرداند و به همین دلیل می‌تواند شاخص قابل اعتمادی برای ارزیابی عملکرد مدیریتی، اقتصادی و محیط‌زیستی سیستم‌های زراعی باشد (Asgharipour *et al*., 2012; Yousefi & Mahdavi Damghani, 2015). علاوه بر شاخص‌های فنی مانند بهره‌وری آب و انرژی، سودمندی اقتصادی نیز به‌عنوان یک معیار تصمیم‌گیری مهم، نشان می‌دهد که آیا بهینه‌سازی مصرف آب و انرژی به افزایش منافع مزرعه منجر می‌شود یا صرفاً بهبودهای فنی بدون پشتوانه اقتصادی ایجاد می‌گردد. سودمندی اقتصادی معمولاً از طریق شاخص‌هایی نظیر تغییرات هزینه‌های تولید، میزان درآمد حاصل از عملکرد، و نسبت منافع به هزینه‌ها سنجیده می‌شود. از آنجاکه بسیاری از نهاده‌ها به‌ویژه آب، سوخت پمپ‌ها و نهاده‌های انرژی‌بر مانند کود بخش مهمی از هزینه‌ها را تشکیل می‌دهند، کاهش مصرف یا بهینه‌سازی آن‌ها می‌تواند همزمان بهره‌وری منابع و وضعیت مالی تولید را بهبود دهد. بنابراین بررسی همزمان معیارهای بهره‌وری آب، بهره‌وری انرژی و سودمندی اقتصادی می‌تواند تصویر واقع‌بینانه‌تری از اثربخشی تیمارهای مختلف آبیاری ارائه دهد. در همین چارچوب، بهره‌وری انرژی در کنار بهره‌وری آب و سودمندی اقتصادی امکان تحلیل جامع منابع آب و انرژی و تصمیم‌گیری بهینه در مدیریت آبیاری را فراهم می‌کند (Topak *et al*., 2010a). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که بهینه‌سازی مصرف انرژی از طریق کاهش انرژی ورودی‌های غیرضروری و انتخاب سیستم‌های آبیاری کارآمد، می‌تواند بهره‌وری انرژی را ۱۵ تا ۳۰ درصد افزایش دهد و همزمان اثرات زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت و کود را کاهش دهد (Caliskan & Caliskan, 2010; Balta *et al*., 2021). افزون بر جنبه‌های محیط‌زیست، این بهینه‌سازی‌ها می‌توانند هزینه‌های تولید را نیز کاهش دهند و بدین‌ترتیب، سودآوری فعالیت کشاورزی را تقویت کنند؛ به همین دلیل، بررسی همزمان شاخص‌های عملکردی، فنی و اقتصادی برای برنامه‌ریزی پایدار و مدیریت منابع ضروری است. پژوهش‌های انجام شده در ایران نشان داده‌اند که ترکیب روش‌های مختلف آبیاری و مدیریت کود و آب می‌تواند تأثیر چشمگیری بر هر دو شاخص بهره‌وری آب و انرژی داشته باشد (Piri & Mobaraki, 2021). همچنین، تحقیقات بین‌المللی در اروپا و آمریکا نشان می‌دهند که آبیاری قطره‌ای و برنامه‌ریزی دقیق آبیاری در شرایط مختلف اقلیمی باعث افزایش بهره‌وری آب و انرژی در چغندرقند می‌شود (Smith & Jones, 2010; Yousefi, 2015; El Hamdi *et al*., 2017a). این یافته‌ها اهمیت بررسی دقیق تیمارهای مختلف آبیاری و تحلیل کمی شاخص‌های عملکردی را برجسته می‌سازد؛ به‌ویژه زمانی که هدف، انتخاب بهترین گزینه از میان چند تیمار با توجه به اثرات همزمان بر منابع و اقتصاد مزرعه باشد. با توجه به اهمیت همزمان بهره‌وری آب، بهره‌وری انرژی و سودمندی اقتصادی در ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[3] (MCDM) مانند ویکور[4] (VIKOR) در تحقیقات کشاورزی و منابع آب بسیار رایج شده است. مطالعات بین‌المللی نشان داده‌اند که ویکور و سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در رتبه‌بندی سیستم‌های آبیاری، انتخاب

1- Water Productivity
2- Energy Productivity
3- Multiple Criteria Decision Making
4- VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje

بهترین تیمارهای کود و آب و مقایسه عملکرد محصولات مؤثر هستند (Mardani *et al.*, 2015a; Wang *et al.*, 2020). همچنین، پژوهش‌های داخلی نشان می‌دهد که استفاده از ویکور و تحلیل حساسیت می‌تواند به تصمیم‌گیری بهینه و پایدار در مدیریت آبیاری کمک کند (Piri & Mobaraki, 2021). به‌منظور مدیریت منابع آب و انرژی و نیز ارتقای پیامدهای اقتصادی تولید، این مطالعه با هدف ارزیابی اثر تیمارهای مختلف مدیریت آبیاری بر بهره‌وری آب، بهره‌وری انرژی و سودمندی اقتصادی در چغندرقند با استفاده از روش تحلیل چندمعیاره انجام شد. نتایج این تحقیق می‌تواند راهنمای عملی برای تصمیم‌گیری در مدیریت آبیاری چغندرقند و بهبود کارایی منابع آب و انرژی همراه با افزایش منافع اقتصادی تولیدکننده باشد.

مواد و روش‌ها

محل اجرای آزمایش

این پژوهش طی دو سال زراعی متوالی (۱۳۹۸-۱۳۹۶) در مزرعه‌ی تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور واقع در کرج انجام گرفت. این مزرعه در موقعیت جغرافیایی، ۳۵ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه طول شرقی واقع است. طبق طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، منطقه از اقلیم گرم و خشک برخوردار است که با تابستان‌های خشک و گرم و زمستان‌های سرد مشخص می‌شود (Metekan *et al.*, 2012). داده‌های اقلیمی بلندمدت برای دوره ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۱ نشان می‌دهند که دمای بیشینه در تابستان به حدود ۳۷ درجه سانتی‌گراد و دمای کمینه در زمستان به نزدیک یک درجه سانتی‌گراد می‌رسد، که نوسانات حرارتی قابل توجه منطقه را منعکس می‌کند (Iran Meteorological Organization, 2021).

ویژگی‌های خاک و آب محل پژوهش

نمونه‌های خاک از دو عمق (۳۰-۰ سانتی‌متر و ۶۰-۳۰ سانتی‌متر) برداشت شد تا خصوصیات فیزیکی و شیمیایی تعیین شود. لایه سطحی خاک دارای هدایت الکتریکی، کربن آلی و نیتروژن کل بیشتری نسبت به زیرسطح بود، در حالی که فسفر و پتاسیم قابل جذب با افزایش عمق کاهش یافت (جدول ۱). این الگو اهمیت مدیریت لایه‌های سطحی خاک در جذب مواد غذایی و آب را نشان می‌دهد.

کیفیت آب آبیاری برای کشت چغندرقند مناسب آب کمتر از حد آستانه ۷ دسی‌زیمنس بر متر برای چغندرقند بود و نشان‌دهنده عدم وجود مشکل شوری در آبیاری این محصول بود (Ayers & Westcot, 1985). آب دارای اسیدیته نزدیک به خنثی، هدایت الکتریکی پایین و غلظت کاتیون‌ها در محدوده مجاز بود (جدول ۲). نسبت مناسب کلسیم، منیزیم و سدیم، خطر شوری و سدیمی شدن را کاهش داده و از سلامت خاک و رشد گیاه پشتیبانی می‌کند.

طرح آزمایشی

آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD) با سه تیمار آبیاری و چهار تکرار انجام شد. انتخاب این طرح و تعداد تکرارها بر اساس اصول طراحی آزمایش‌های مزرعه‌ای و به‌منظور کنترل تغییرات محیطی و افزایش دقت مقایسه تیمارها صورت گرفت. در طرح بلوک‌های کامل تصادفی، تعداد تکرارها مقدار ثابتی نداشته و متناسب با شرایط مزرعه، میزان ناهمگنی محیط و دقت مورد نیاز پژوهش تعیین می‌شود (Petersen, 1994; Hinkelmann & Kempthorne, 2008; Gomez & Gomez, 1984). تیمارهای آبیاری بر اساس ضرایب مختلف حد مجاز تخلیه رطوبت قابل استفاده خاک[1] (MAD) شامل ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد تعریف شدند.

[1] Management Allowable Depletion

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1- Soil physical and chemical properties

عمق خاک Soil depth (cm)	بافت خاک Soil texture	پتاسیم (K) (ppm)	فسفر (P) (ppm)	نیتروژن (N) (%)	کربنات کلسیم معادل $CaCO_3$ (%)	ماده آلی (OC) (%)	اسیدیته (pH)	هدایت الکتریکی (EC) ($dS\ m^{-1}$)	نقطه پژمردگی (PWP) (w/w %)	ظرفیت زراعی (FC) (w/w %)	جرم مخصوص ظاهری Bulk density ($g\ cm^{-3}$)
0-30	Loam	230	7.2	0.06	12	0.55	7.7	0.72	9.5	19.2	1.52
30-60	Loam	220	6.8	0.05	16	0.41	7.8	0.58	8.5	18.8	1.58

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی آب آبیاری

Table 2- Irrigation water chemical properties

اسیدیته (pH)	نسبت جذب سدیم (SAR)	هدایت الکتریکی (EC) ($dS\ m^{-1}$)	سولفات SO_4^{2-}	کلراید Cl^-	بی‌کربنات HCO_3^-	منیزیم Mg^{2+}	کلسیم Ca^{2+}	سدیم Na^+
			($meq\ L^{-1}$)					
7.5	0.35	0.56	0.6	0.7	3.3	0.2	3.9	0.5

عملیات زراعی

عملیات خاک‌ورزی، کوددهی و آماده‌سازی مزرعه بر اساس نتایج آزمون خاک و مطابق با توصیه‌های کارشناسی انجام گرفت. پس از آماده‌سازی زمین، هر سال، چغندرقند رقم «شکوفا» در ردیف‌هایی با فاصله ۶۰ سانتی‌متر و تراکم ۸۰ هزار بوته در هکتار کشت شد. بذرها به‌صورت متراکم کشت شدند و پس از مرحله جوانه‌زنی، عملیات تنک‌کردن انجام شد به‌گونه‌ای که فاصله نهایی بین گیاهان در محدوده ۲۵ تا ۳۵ سانتی‌متر تنظیم گردید. مقدار بذر مصرفی ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار بود. کودهای پایه شامل فسفر و پتاسیم به میزان توصیه‌شده بر اساس آزمون خاک و قبل از کاشت به خاک افزوده شد و کود ازته به صورت سرک در مراحل حساس رشد گیاه اعمال گردید. مرحله اول شامل ۴۰ کیلوگرم در هکتار در زمان ۶-۴ برگی برای کمک به رشد رویشی برگ و افزایش فتوسنتز بود. مرحله دوم ۳۰ کیلوگرم در هکتار در زمان ۱۰-۸ برگی برای توسعه ریشه و برگ و مرحله سوم ۳۰ کیلوگرم در هکتار قبل از توسعه کامل ریشه و غده برای افزایش عملکرد کمی و کیفی محصول داده شد. آبیاری مزرعه به‌صورت منظم و بر اساس برنامه تعریف‌شده انجام شد. عملیات کنترل علف‌های هرز، مبارزه با آفات و بیماری‌ها طبق دستورالعمل‌های فنی صورت گرفت تا رشد مطلوب گیاه فراهم گردد. برداشت محصول در زمان رسیدگی کامل انجام شد و سپس برای مراحل بعدی آزمایش‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی آماده‌سازی گردید.

تعیین تبخیر-تعرق چغندرقند در مدیریت‌های مختلف آبیاری

تبخیر–تعرق واقعی چغندرقند (ETa) بر اساس روش ارائه‌شده توسط آلن و همکاران (Allen *et al.*, 1998) محاسبه شد. در این روش، ابتدا آب قابل استفاده گیاه[1] (TAW) از اختلاف بین ظرفیت زراعی[2] (FC) و نقطه پژمردگی دائم[3] (PWP) در هر متر خاک محاسبه شد:

$$TAW=FC-PWP \quad (۱)$$

سپس مقدار آب سهل الوصول[4] (RAW) بر اساس رابطه زیر تعیین شد:

$$RAW= p*TAW \quad (۲)$$

p معادل ضرایب تخلیه مجاز رطوبت خاک (MAD) تیمارهای آبیاری در نظر گرفته شد.

زمان آبیاری

به‌منظور تعیین زمان آبیاری، رطوبت خاک در طول فصل رشد با استفاده از دستگاه نوترون‌متر در دو عمق ۰–۳۰ و ۳۰–۶۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری شد. قرائت‌های رطوبتی به‌طور منظم انجام گرفت و میزان آب قابل استفاده خاک در ناحیه مؤثر ریشه (۰ تا ۶۰ سانتی‌متر) محاسبه

1- Total Available Water
2- Field Capacity
3- Permanent Wilting Point
4- Readily Available Water

گردید. در هر تیمار، زمانی که میزان تخلیه رطوبت قابل استفاده خاک به حدود ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد می‌رسید، آبیاری انجام می‌شد (Allen *et al.*, 1998; Michael, 2008).

عمق آبیاری و حجم آب آبیاری ناخالص

مقدار آب مورد نیاز در هر نوبت آبیاری بر اساس کسری رطوبت خاک نسبت به ظرفیت زراعی[1] (SMD) در عمق مؤثر ریشه از رابطه (۳) به‌دست آمد:

$$In = (FC - \theta) * Z_r \quad (۳)$$

که در آن: In عمق خالص آب آبیاری (mm)، FC رطوبت حجمی خاک در ظرفیت زراعی ($mm\ m^{-1}$)، θ رطوبت حجمی خاک قبل از آبیاری ($mm\ m^{-1}$)، و Zr عمق مؤثر ریشه (m) بود.

حجم ناخالص آب آبیاری، پس از تعیین عمق خالص آبیاری از رابطه آلن و همکاران (Allen *et al.*, 1998)، برای هر تیمار آبیاری بر اساس جبران کامل کسری رطوبت تا رسیدن خاک به سطح ظرفیت زراعی در ناحیه ریشه با استفاده از کنتور حجمی اندازه‌گیری شد. مطابق روش اجرایی آزمایش، پس از محاسبه عمق خالص آبیاری برای ناحیه ریشه، عملیات آبیاری توسط پمپ شروع شد و جریان آب اعمالی تا زمانی ادامه یافت که عمق آب کاربردی متناظر با نیاز خالص ریشه تأمین گردید. سیستم آبیاری بصورت تیپ (Tape) بود.

زمانی که کسری رطوبت خاک (SMD) در عمق مؤثر ریشه از مقدار آب سهل الوصول (RAW) فراتر رفت، ضریب تنش آبی خاک (Ks) با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید.

$$Ks = (TAW-Dr)/(TAW-RAW) \quad (۴)$$

در نهایت تبخیر–تعرق واقعی گیاه از رابطه زیر به‌دست آمد:

$$ETa = Ks * ETc \quad (۵)$$

که در آن (ETa) تبخیر–تعرق واقعی گیاه، (Ks) ضریب تنش آبی و (ETc) تبخیر–تعرق گیاه در شرایط بدون تنش می‌باشد. این روش امکان ارزیابی اثر سطوح مختلف محدودیت آب بر تبخیر–تعرق واقعی چغندرقند را فراهم کرد (Allen *et al.*, 1998).

تعیین تبخیر–تعرق پتانسیل چغندرقند در لایسیمتر

تعیین تبخیر–تعرق پتانسیل چغندرقند (ETc) با استفاده از لایسیمتر زهکش‌دار و بر اساس روش بیلان آب انجام شد. پیش از کاشت، لایسیمترها به‌طور کامل آبیاری و تا حد اشباع رسانده شدند و پس از تخلیه آب اضافی، رطوبت خاک به وضعیت ظرفیت زراعی تنظیم گردید تا شرایط اولیه یکنواخت در تمامی واحدهای آزمایشی ایجاد شود.

تبخیر–تعرق گیاه از رابطه بیلان آب زیر محاسبه شد:

$$ETc=I+R-D-\Delta S \quad (۶)$$

که در آن I عمق آب آبیاری (mm)، R بارش (mm)، D زه‌آب خروجی از لایسیمتر (mm) و ΔS تغییرات ذخیره رطوبتی خاک در عمق مؤثر ریشه (mm) می‌باشد.

تغییرات ذخیره رطوبتی خاک بر اساس اختلاف رطوبت حجمی خاک بین ابتدای و انتهای هر دوره و عمق توسعه ریشه محاسبه شد.

$$\Delta S= Z_r(\theta_f - \theta_i) \quad (۷)$$

آبیاری لایسیمتر به‌صورت دستی و روزانه انجام شد تا رطوبت خاک در محدوده نزدیک به ظرفیت زراعی حفظ شده و از بروز تنش آبی جلوگیری گردد.

با توجه به مدیریت دقیق آبیاری و حفظ رطوبت خاک در شرایط نزدیک به ظرفیت زراعی، تغییرات ذخیره رطوبتی خاک (ΔS) در اغلب دوره‌های رشد ناچیز بود. با این حال، به‌منظور افزایش دقت محاسبات و کاهش اثر نوسانات کوتاه‌مدت در اجزای بیلان آب، کلیه مؤلفه‌های معادله بیلان شامل آبیاری، بارش، زه‌آب خروجی و تغییرات ذخیره رطوبتی خاک به‌صورت هفتگی تجمیع و تبخیر–تعرق پتانسیل بر اساس مقیاس زمانی هفتگی محاسبه گردید. این رویکرد موجب کاهش خطای اندازه‌گیری و افزایش پایداری برآورد تبخیر–تعرق در طول فصل رشد شد.

داده‌های بارش از ایستگاه هواشناسی مشکین‌دشت اخذ و در محاسبات لحاظ شد. با توجه به عمق لایسیمتر نسبت به عمق توسعه ریشه، ناحیه زیر ریشه به‌عنوان مخزن ذخیره هیدرولوژیک عمل کرده و تنها در دوره‌های آبیاری، زه‌آب محدودی ایجاد شد که به‌طور منظم جمع‌آوری و در بیلان آب منظور گردید.

به‌منظور تعیین عمق مؤثر ریشه چغندرقند، با فرض عمق نهایی ریشه برابر با ۰/۶ متر، تغییرات توسعه ریشه در طول فصل رشد بر اساس مراحل فنولوژیک گیاه مطابق منابع فائو در نظر گرفته شد (Doorenbos & Kassam, 1979; Allen *et al.*, 1998). بر این اساس، در مرحله ابتدایی رشد عمق مؤثر ریشه برابر با ۳۰ درصد، در مرحله توسعه و میانی رشد برابر با ۶۰ درصد و در مرحله پایانی رشد برابر با ۱۰۰ درصد عمق نهایی فرض گردید. این رویکرد امکان برآورد پویای ظرفیت نگهداری آب در ناحیه توسعه ریشه و محاسبه دقیق‌تر نیاز آبی گیاه را فراهم نمود.

بهره‌وری آب

بهره‌وری آب (WP) عملکرد ریشه و عملکرد قند خالص بر اساس رابطه زیر محاسبه شد:

[1] Soil Moisture Depletion

$$WP = \frac{Y}{ET_a} \quad (۸)$$

که در آن WP بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، Yعملکرد محصول (کیلوگرم در هکتار) و ETa تبخیر–تعرق واقعی در طول دوره رشد (متر مکعب در هکتار) است (Doorenbos & Kassam, 1979).

بهره‌وری انرژی

به‌منظور ارائه تحلیلی عمومی و مستقل از مدیریت کشاورزان، تحلیل انرژی به ورودی‌های اصلی و کم‌نوسان محدود شد. در این راستا، تنها انرژی آب آبیاری به‌عنوان انرژی ورودی و انرژی عملکرد ریشه به‌عنوان انرژی خروجی تیمارهای آزمایشی در نظر گرفته شد. سایر نهاده‌های انرژی نظیر نیروی انسانی، سوخت، ماشین‌آلات و سموم به‌دلیل وابستگی به مدیریت فردی کشاورزان و ایجاد نوسان، از تحلیل انرژی حذف گردیدند.

انرژی ورودی به سیستم زراعی (Ein) از حاصل‌ضرب حجم آب آبیاری ناخالص در ضریب انرژی آب از رابطه زیر محاسبه گردید (Hatirli *et al.*, 2006):

$$E_{in}=V_i*C_i \quad (۹)$$

که در آن:

E_{in}: انرژی ورودی به سیستم زراعی ($MJ\ ha^{-1}$)

Vi: حجم آب آبیاری ناخالص ($m^3\ ha^{-1}$)

Ci: ضریب انرژی نهاده ($MJ\ m^{-3}$)

انرژی ورودی برای آب آبیاری، ۰/۶۳ $MJ\ m^{-3}$ در نظر گرفته شد که این مقدار بیانگر انرژی مصرفی برای استخراج، پمپاژ و انتقال آب در سیستم‌های آبیاری است (Ozkan *et al.*, 2004; Rafiee *et al.*, 2010).

انرژی خروجی (E_{out})، انرژی حاصل از عملکرد ریشه بود که از رابطه زیر محاسبه گردید (Hatirli *et al.*, 2006):

$$E_{out} = 0.23 * Y * C_p \quad (۱۰)$$

که در آن:

۰/۲۳= درصد ماده خشک

E_{out}: انرژی کل خروجی از سیستم زراعی ($MJ\ ha^{-1}$)

Y: عملکرد ریشه تر ($kg\ ha^{-1}$)

C_p: انرژی نهفته در هر کیلوگرم ماده خشک چغندرقند که ۱۶/۸ مگاژول در هر کیلوگرم است (Hülsbergen *et al.*, 2001).

انرژی خروجی محصول چغندرقند، بر اساس ارزش حرارتی زیست‌توده و با استفاده از ضریب انرژی تقریبی ۱۶/۸ $MJ\ kg^{-1}$ ماده خشک محاسبه شد (Demirbas, 2004; Kitani, 1999).

پس از محاسبه انرژی ورودی (E_{in}) و خروجی (E_{out})، بهره‌وری انرژی (EP) از نسبت انرژی خروجی (انرژی تولیدی دانه) به انرژی ورودی (آب آبیاری) از رابطه زیر محاسبه شد. مقادیر بالاتر از یک نشان‌دهنده کارایی مطلوب سیستم زراعی بود (جدول ۳).

$$EP=E_{out}/E_{in} \quad (۱۱)$$

تحلیل اقتصادی

تحلیل اقتصادی پژوهش بر اساس نسبت منفعت به هزینه (B/C Ratio) انجام شد. هزینه کل هر تیمار شامل دو بخش اصلی بود: هزینه‌های ثابت کشت (کود، بذر، ماشین‌آلات و نیروی انسانی) به مبلغ ۳۰۰ میلیون ریال در هکتار و هزینه آب مصرفی با نرخ مصوب ۴۰۰ ریال به ازای هر مترمکعب. درآمد حاصل از فروش ریشه چغندرقند نیز با قیمت تضمینی ۵۲۰۰۰ ریال برای هر کیلوگرم محاسبه گردید. کلیه قیمت‌ها و هزینه‌ها مطابق دستورالعمل‌های رسمی جهاد کشاورزی و تعرفه‌های مصوب سال زراعی ۱۴۰۳–۱۴۰۲ در نظر گرفته شد.

تجزیه آماری

با توجه به تفاوت‌های شرایط محیطی بین دو سال آزمایش و برای ارزیابی دقیق‌تر اثرپذیری صفات مورد مطالعه از این نوسانات، داده‌های مربوط به هر سال زراعی به‌صورت جداگانه مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. این تصمیم مبتنی بر نتایج اولیه آزمون تجزیه واریانس مرکب بود که وجود اثر متقابل معنی‌دار بین فاکتور سال و تیمارهای آزمایشی را برای صفات نشان داد. تجزیه و تحلیل اولیه داده‌ها نشان داد که از بین سه صفت اصلی مورد بررسی، اثر متقابل سال در تیمار برای تبخیر –تعرق در سطح یک درصد و بهره‌وری آب در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. با توجه به این یافته و همچنین اهمیت ارزیابی پایداری تیمارها در شرایط محیطی متفاوت، تصمیم بر آن شد تا کلیه داده‌ها چه برای صفات دارای اثر متقابل معنی‌دار و چه برای صفات فاقد آن به‌صورت سال به سال ارائه شوند. این رویکرد، یکنواختی در ارائه نتایج را حفظ کرده و امکان مقایسه جامع‌تر الگوی پاسخ گیاه در هر سال را برای خواننده فراهم می‌کند. تجزیه واریانس جداگانه برای هر سال نیز انجام گرفت. محاسبات مربوط به تحلیل‌های آماری در نرم‌افزار SAS انجام شد.

رتبه‌بندی تیمارها به روش تحلیل چندمعیاره

به‌منظور تکمیل تحلیل آماری و ارائه یک ارزیابی جامع‌تر از عملکرد تیمارهای آبیاری، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره ویکور استفاده شد (Opricovic, 1998). این روش‌ها امکان رتبه‌بندی همزمان تیمارها را بر اساس معیارهای مختلف فراهم می‌کند. ماتریس تصمیم (جدول ۴) برای هر سال به‌صورت مستقل و بر اساس میانگین هر تیمار تشکیل شد؛ به‌طوری‌که سطرها بیانگر تیمارها و ستون‌ها معیارهای ماتریس تصمیم بود. معیارها شامل تبخیر –تعرق، عملکرد ریشه، بهره‌وری آب ریشه، بهره‌وری انرژی و ارزش اقتصادی ریشه تولیدی با فرض

وزن‌دهی یکسان برای تمامی معیارها (وزن هر معیار ۲۰ درصد) بودند. تبخیر –تعرق بعنوان معیار منفی (کمتر بهتر) و چهار شاخص دیگر به‌عنوان معیارهای سودی (بیشتر بهتر) در نظر گرفته شدند.

جدول ۳- انرژی ورودی و خروجی سیستم زراعی

Table 3- Input and output energy coefficients

سال Year	تیمار Treatment	حجم آب آبیاری (ورودی) Irrigation water volume (Input) ($m^3\ ha^{-1}$)	عملکرد ریشه (خروجی) Root Yield (Output) ($kg\ ha^{-1}$)	انرژی ورودی Ein ($MJ\ ha^{-1}$)	انرژی خروجی (Eout) ($MJ\ ha^{-1}$)	بهره‌وری انرژی (EP)
اول First	T1	10383	41350	654.13	159776.40	244.27
	T2	8739	36350	550.56	140456.40	255.09
	T3	5968	26680	375.98	103091.50	274.25
دوم Second	T1	11094	47680	698.92	184235.50	263.58
	T2	9539	45400	600.96	175425.60	291.91
	T3	6188	34350	389.84	132728.40	340.67

جدول ٤- ماتریس تصمیم‌گیری تحلیل چندمعیاره

Table 4- Multi-criteria decision-making (MCDM) decision matrix

سال Year	گزینه‌ها Alternatives	تبخیر –تعرق Evapotranspiration ($m^3\ ha^{-1}$) (-)	عملکرد ریشه Root yield ($ton\ ha^{-1}$) (+)	بهره‌وری آب Water Productivity ($kg\ m^{-3}$) (+)	بهره‌وری انرژی Energy Productivity (MJ per MJ) (+)	نسبت منفعت به هزینه (BCR) (+)
اول First	T1	8514	41.35	4.86	244.27	7.16
	T2	7166	36.35	5.07	255.09	6.29
	T3	4894	26.68	5.45	274.25	4.62
دوم Second	T1	9097	47.68	5.24	263.58	8.25
	T2	7822	45.40	5.80	291.91	7.86
	T3	5074	34.35	6.78	340.67	5.95

در این روش، بهترین و بدترین مقادیر هر معیار تعیین و مجموع فا صله‌های نرمال شده وزنی (S_i) و حداکثر فا صله وزنی (R_i) برای هر تیمار از روابط زیر محاسبه گردید:

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \qquad (۱۲)$$

$$R_i = MAX_j \left[w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right] \qquad (۱۳)$$

که در آن f_j^*: بهترین مقدار معیار j، f_j^-: بدترین مقدار معیار j، f_{ij}: مقدار معیار j برای گزینه i، w_j: وزن معیار j و n: تعداد معیارها است.

سپس شاخص ویکور[1] (Q_i) به‌عنوان معیار نهایی رتبه‌بندی، با در نظر گرفتن وزن استراتژی توافقی (v=۰/۵) محاسبه شد. تیمار دارای کمترین مقدار Q به‌عنوان گزینه برتر معرفی گردید.

$$Q_i = v\left(\frac{S_i - S^*}{S^- - S^*}\right) + (1-v)\left(\frac{R_i - R^*}{R^- - R^*}\right) \qquad (۱۴)$$

که در آن: $S^*=Min_i\ S_i$ ،$S^-=Max_i$ ،$R^*=Min_i\ R_i$ ،$R^-=Max_i$ R_i و v= وزن استراتژی حداکثر مطلوبیت گروهی است.

تحلیل پایداری و عدم‌قطعیت رتبه‌بندی تیمارها با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو

در این مطالعه، برای ارزیابی پایداری نتایج حاصل از روش ویکور تحت عدم‌قطعیت، از تحلیل مونت‌کارلو استفاده شد. این تحلیل با هدف بررسی تأثیر تغییرات پارامتر تصمیم‌گیری v بر رتبه‌بندی تیمارها انجام گرفت. برای بررسی عدم‌قطعیت در فرآیند تصمیم‌گیری، پارامتر v که نشان‌دهنده تعادل بین معیارهای گروهی (S) و فردی (R) در روش

1- VIKOR Index

ویکور است، به‌صورت تصادفی در بازه ۰/۲ تا ۰/۷ تولید شد. سپس برای هر مقدار تصادفی v، الگوریتم ویکور اجرا و مقدار شاخص سازش‌پذیری (Q) برای هر تیمار محاسبه گردید. این فرآیند در قالب شبیه‌سازی مونت‌کارلو با تعداد ۱۰۰۰۰ تکرار برای هر سال زراعی انجام شد. در هر تکرار، رتبه‌بندی تیمارها بر اساس مقدار Q تعیین و جایگاه هر تیمار ثبت گردید. در نهایت، فراوانی قرارگیری هر تیمار در رتبه‌های اول، دوم و سوم محاسبه و به‌صورت احتمال (نسبت وقوع) گزارش شد. تمامی محاسبات با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون (Python) انجام شد و برای تولید اعداد تصادفی از توزیع یکنواخت در بازه تعیین‌شده استفاده گردید. نتایج به‌دست‌آمده به منظور ارزیابی پایداری تصمیم‌گیری و حساسیت رتبه‌بندی نسبت به تغییرات پارامتر v مورد تحلیل قرار گرفت.

نتایج و بحث

آنالیز واریانس و مقایسه میانگین

بر اساس نتایج آنالیز واریانس سال اول (جدول ۵) اثر تیمارهای آبیاری بر بهره‌وری آب عملکرد ریشه در سطح پنج درصد و بر تبخیر–تعرق و عملکرد ریشه در سطح یک درصد معنی‌دار بود. جدول ۶ مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح پنج درصد را نشان می‌دهد.

نتایج مقایسه میانگین داده‌های تبخیر–تعرق نشان داد هر یک از تیمارهای آبیاری در گروه‌های مختلف قرار دارند. در تیمار آبیاری با ضریب تخلیه مجاز رطوبتی ۴۰ درصد، مقدار تبخیر–تعرق گیاه چغندرقند ۸۵۱/۴ میلی‌متر و در تیمار آبیاری با ضریب تخلیه مجاز رطوبتی ۶۰ درصد مقدار تبخیر–تعرق گیاه چغندرقند ۷۱۶/۶ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. در تیمار آبیاری با ضریب تخلیه مجاز رطوبتی ۸۰ درصد و با افزایش شدت تنش آبی، مقدار تبخیر–تعرق گیاه چغندرقند به ۴۸۹/۴ میلی‌متر کاهش یافت.

جدول ۵- تجزیه واریانس صفات کمی و کیفی چغندرقند (سال اول)

Table 5- Analysis of variance for quantitative and qualitative traits of sugar beet (first year)

منابع تغییرات (Sources of variation)	درجه آزادی (Degrees of freedom)	بهره‌وری آب ریشه Root water productivity	تبخیر–تعرق Evapotranspiration	عملکرد ریشه Root yield
		MS□		
بلوک (Block)	3	0.04	26.10	1.68
تیمار (Treatment)	2	0.36 *	133886/80 **	222.63 **
خطا (Error)	6	0.06	99.42	2.37
CV%		4.95	1.45	4.43

MS□: میانگین مربعات

ns، *، **: به‌ترتیب معرف عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح یک و پنج درصد

MS: Mean Squares

ns, **, and * indicate non-significant, significant at 1%, and significant at 5% levels, respectively

جدول ٦- مقایسه میانگین صفات کمی و کیفی چغندرقند بر اساس آزمون دانکن در سطح پنج درصد (سال اول)

Table 6- Comparison of mean quantitative and qualitative traits of sugar beet based on Duncan's test at the 5% level (first year)

تیمار Treatment	بهره‌وری آب ریشه Root water productivity ($kg\ m^{-3}$)	تبخیر–تعرق Evapotranspiration (mm)	عملکرد ریشه Root yield ($ton\ ha^{-1}$)
T1	4.86 b	851.40 a	41.35 a
T2	5.07 ab	716.60 b	36.35 b
T3	5.45 a	489.40 c	26.68 c

بررسی توزیع داده‌ها با استفاده از نمودار جعبه‌ای جان توکی نشان داد که دامنه تراکم داده‌ها، چولگی و حداقل و حداکثر تبخیر–تعرق در تیمارهای مختلف متفاوت است. در تیمار T2 همگنی داده‌ها بیشتر از سایر تیمارها و پراکندگی داده‌ها در آن دو طرفه و چولگی آن بیشتر از دو تیمار دیگر بود. دامنه تغییرات تبخیر–تعرق در تیمار T3 بیشتر از سایر تیمارهای آبیاری بود.

تیمارهای آبیاری از نظر عملکرد ریشه در گروه‌های آماری مختلف قرار داشتند و تیمار T1 نسبت به تیمارهای دیگر برتری نشان داد. میانگین عملکرد ریشه در تیمارهای آبیاری به‌ترتیب ۴۱/۳۵، ۳۶/۳۵ و ۲۶/۶۸ تن در هکتار بود. توزیع داده‌های عملکرد ریشه بین تیمارهای

آبیاری به‌خوبی نشان داد که با اعمال تنش، عملکرد در تیمارهای مختلف کاهش یافته است. دامنه میان چارکی داده‌ها (IQR) نشان داد که همگنی داده‌ها در تیمار T1 بیشتر از سایر تیمارها و در تیمارT2 نسبت به دو تیمار دیگر، پراکندگی در داده‌ها زیاد و دامنه تغییرات آن بزرگ بود. میانه داده‌ها نشان داد میزان چولگی داده‌ها در تیمارهای آبیاری کم و واریانس یا انحراف استاندارد در داده‌ها وجود داشت بود و نشان داد در همه تیمارها، میزان پراکندگی داده‌های بزرگ بیشتر از داده‌های کوچک بود.

مقایسه میانگین داده‌های بهره‌وری آب نشان داد در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای آبیاری وجود دارد. تیمار T3 در گروه آماری a و تیمار T1 در گروه آماری b قرار گرفت. تیمار T2 در گروه ab و مشترک با تیمارهای T1 و T3 قرار گرفت. بیشترین بهره‌وری آب در تیمار T3 با میانگین تولید ۲۶/۶۸ تن ریشه به ازاء مصرف ۴۸۹۴ متر مکعب آب در هکتار ۵/۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب بود. بنابراین نتایج نشان می‌دهد کاهش مصرف آب از ۸۵۱۴ متر مکعب در تیمار T1 به ۷۱۶۶ متر مکعب در هکتار در تیمار T2 و از ۷۱۶۶ متر مکعب در هکتار در تیمار T2 به ۴۸۹۴ متر مکعب در هکتار در تیمار T3تأثیر معنی‌داری در بهره‌وری آب عملکرد ریشه نداشت. بررسی توزیع جعبه‌ای داده‌های بهره‌وری آب نشان داد در تیمار T3پراکندگی داده‌ها زیاد و همگنی داده‌ها کمتر از سایر تیمارها بود. پراکندگی داده‌ها دو طرفه و دامنه تغییرات آن بزرگ بود و میانه داده‌ها نشان داد چولگی در تیمار T1 تقریباً صفر و دو تیمار دیگر دارای چولگی می‌باشند.

نتایج آنالیز واریانس در سال دوم (جدول ۷) نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری بر تبخیر–تعرق و بهره‌وری آب عملکرد ریشه در سطح یک درصد معنی‌دار بود. اما اثر تیمارهای آبیاری بر عملکرد ریشه معنی دار نبود. مقایسه میانگین داده‌ها در سطح پنج درصد با استفاده از آزمون دانکن انجام شد (جدول ۸).

جدول ۷- تجزیه واریانس صفات کمی و کیفی چغندرقند (سال دوم)

Table 7- Analysis of variance for quantitative and qualitative traits of sugar beet (second year)

منابع تغییرات (Sources of variation)	درجه آزادی (Degrees of freedom)	بهره‌وری آب ریشه Root water productivity	تبخیر–تعرق Evapotranspiration	عملکرد ریشه Root yield
		MS□		
بلوک (Block)	3	0.11	39.15	2.30
تیمار (Treatment)	2	2.41 **	169018.42 **	203.20 ns
خطا (Error)	6	0.08	74.40	2.52
CV %		4.68	1.18	3.73

□MS: میانگین مربعات

ns، *، **: به‌ترتیب معرف عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح یک و پنج درصد

MS: Mean Squares

ns, **, and * indicate non-significant, significant at 1%, and significant at 5% levels, respectively

جدول ۸- مقایسه میانگین صفات کمی و کیفی چغندرقند بر اساس آزمون دانکن در سطح پنج درصد (سال دوم)

Table 8- Comparison of mean quantitative and qualitative traits of sugar beet based on Duncan's test at the 5% level (second year)

تیمار Treatment	بهره‌وری آب ریشه Root water productivity ($kg\ m^{-3}$)	تبخیر–تعرق Evapotranspiration (mm)	عملکرد ریشه Root yield ($ton\ ha^{-1}$)
T1	5.24 c	909.70 a	47.68 a
T2	5.80 b	782.20 b	45.40 a
T3	6.78 a	507.40 c	34.35 a

نتایج مقایسه میانگین داده‌های تبخیر–تعرق نشان داد هر یک از تیمارها در گروه‌های مختلف قرار دارند. در تیمار آبیاری با ضریب تخلیه مجاز رطوبتی ۴۰ درصد، مقدار تبخیر–تعرق ۹۰۹/۷ میلی‌متر و در مدیریت آبیاری با ضریب تخلیه مجاز رطوبتی ۶۰ درصد مقدار تبخیر–تعرق ۷۸۲/۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. در تیمار آبیاری با ضریب تخلیه مجاز رطوبتی ۸۰ درصد و با افزایش تنش آبی، مقدار تبخیر–تعرق گیاه به ۵۰۷/۴ میلی‌متر کاهش یافت. توزیع جعبه‌ای داده‌ها در تیمار T1، نشان داد در این تیمار، پراکندگی داده‌ها زیاد و همگنی داده‌ها کمتر از سایر تیمارها بود. پراکندگی داده‌های تیمارها دو طرفه و دامنه تغییرات آن کوچک و چولگی آن صفر بود.

تیمارهای آبیاری از نظر عملکرد ریشه در یک گروه آماری قرار داشتند و مقدار آن در تیمار T1 (۴۷/۶۸ تن در هکتار) نسبت به تیمارهای دیگر بیشتر بود. میانگین عملکرد ریشه در تیمار T2 و T3 به ترتیب ۴۵/۴ و ۳۴/۳۵ تن در هکتار به‌دست آمد. دامنه میان چارکی

داده‌های عملکرد ریشه (IQR) نشان داد که همگنی داده‌ها در تیمار T1 بیشتر از سایر تیمارها بود. در تیمار T3 نسبت به دو تیمار دیگر، پراکندگی در داده‌ها زیاد و دامنه تغییرات آن بزرگ است. میانه داده‌ها نشان داد میزان چولگی داده‌ها در تیمارهای آبیاری کم بود اما واریانس یا انحراف استاندارد در داده‌ها مشاهده شد.

از نظر بهره‌وری آب عملکرد ریشه، تیمار T3 در گروه آماری a و تیمار T2 در گروه آماری b و تیمار T1 در گروه آماری c قرار گرفت. بیشترین بهره‌وری آب (۶/۷۸ کیلوگرم ریشه به ازاء هر متر مکعب آب) مربوط به تیمار T3 با میانگین تولید ۳۴/۳۵ تن ریشه به ازاء مصرف ۵۰۷۴ متر مکعب در هکتار بود. توزیع جعبه‌ای داده‌های بهره‌وری آب نشان داد در تیمار T3 پراکندگی داده‌ها زیاد و همگنی داده‌ها کمتر از سایر تیمارها است، در این تیمار، پراکندگی داده‌ها دو طرفه و دامنه تغییرات آن بزرگ است. میانه داده‌ها نشان داد چولگی در تیمار T1 تقریباً صفر و در دو تیمار دیگر چولگی جزئی وجود داشت.

نتایج این تحقیق با مطالعات پیشین در مورد تأثیر تنش آبی بر عملکرد و بهره‌وری آب در چغندرقند همخوانی دارد. همان‌طور که توسط محققان متعددی گزارش شده است (Brown *et al.*, 1987; Shrestha *et al.*, 2010)، تنش خشکی به‌ویژه در مراحل اولیه رشد، منجر به کاهش عملکرد ریشه می‌گردد. با این حال، یافته کلیدی پژوهش حاضر و مطالعات مشابه نشان می‌دهد که مدیریت آبیاری به‌صورت کم‌آبیاری کنترل‌شده می‌تواند بهره‌وری آب را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. در این تحقیق، تیمار با بیشترین محدودیت آبی (تخلیه رطوبتی ۸۰ درصد) با وجود کاهش مصرف آب و تبخیر و تعرق، بالاترین بهره‌وری آب را برای عملکرد ریشه و قند خالص به ثبت رساند. این نتیجه با گزارش‌های محققانی که بهبود بهره‌وری آب را تحت استراتژی‌های کم‌آبیاری تأیید کرده‌اند، هم‌خوانی کامل دارد (Jensen *et al.*, 2014; Topak *et al.*, 2010b). بنابراین، اگرچه کاهش حجم آب آبیاری ممکن است عملکرد نهایی را تحت تأثیر قرار دهد، اما به‌عنوان یک راهکار عملی در شرایط کمبود آب، افزایش بهره‌وری آب را در پی خواهد داشت که حاکی از تخصیص بهینه‌تر منابع آب در واحد تولید است.

زمان‌بندی و عمق آبیاری در تیمارهای مختلف آبیاری

با توجه به اینکه زمان و عمق آبیاری بر اساس پایش رطوبت خاک و رسیدن به آستانه‌های ضرایب تخلیه مجاز رطوبتی خاک (MAD) تعیین می‌شد، فاصله و عمق آبیاری در طول فصل رشد ثابت نبود. با این حال، تعداد آبیاری‌های انجام‌شده در سال اول برای تیمارهای T1، T2 و T3 به‌ترتیب ۳۵، ۲۳ و ۱۷ نوبت و در سال دوم به‌ترتیب ۳۲، ۲۰ و ۱۵ نوبت بود. بر این اساس، میانگین عمق آب آبیاری در هر نوبت در سال اول به‌ترتیب ۲۹/۷، ۳۸ و ۳۵/۱ میلی‌متر و در سال دوم به‌ترتیب ۳۴/۷، ۴۷/۷ و ۴۱/۳ میلی‌متر محاسبه شد.

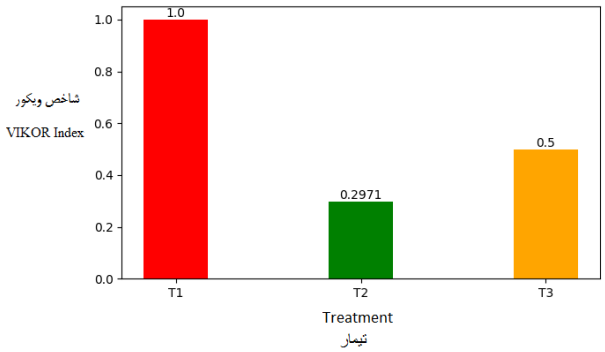
ارزش اقتصادی محصول تولیدی (ریشه چغندرقند)

نتایج تحلیل اقتصادی دو سال پژوهش نشان داد که تیمار T1 با نسبت منفعت به هزینه ۷/۱۶ در سال اول و ۸/۲۵ در سال دوم، همواره بالاترین بازده اقتصادی را داشته و مطلوب‌ترین گزینه اقتصادی محسوب می‌شود. تیمار T2 با نسبت‌های ۶/۲۹ و ۷/۸۶ در جایگاه دوم قرار گرفت، در حالی‌که تیمار T3 با نسبت‌های ۴/۶۲ و ۵/۹۵ کمترین بازده را نشان داد و از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیست. علی‌رغم برتری فنی تیمار T2 در بهره‌وری آب، تیمار T1 از لحاظ اقتصادی برتر است. این موضوع لزوم ایجاد توازن بین اهداف فنی (بهره‌وری آب) و اقتصادی (بازده مالی) را از طریق تحلیل چندمعیاره در انتخاب تیمار آبیاری بهینه نشان می‌دهد.

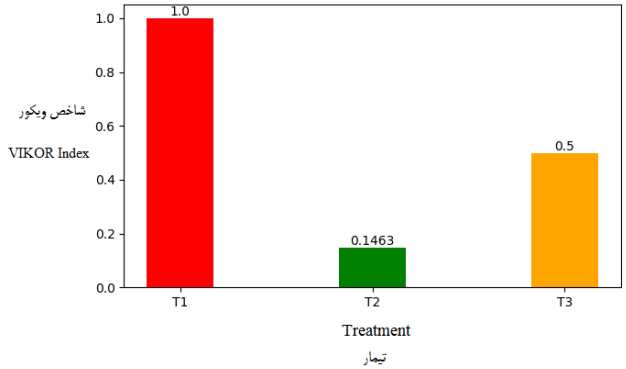
رتبه‌بندی تیمارهای آبیاری

در سال اول، مقادیر شاخص سازش‌پذیری (Q) نشان داد که تیمار T2با مقدار ۰/۲۹۷۱ در رتبه اول قرار گرفت، در حالی که تیمار T3 با مقدار ۰/۵ در رتبه دوم و تیمار T1 با مقدار ۱ در رتبه سوم جای گرفتند (شکل ۱). بررسی همزمان شاخص‌های S و R نشان می‌دهد که تیمار T2نه‌تنها از نظر عملکرد تجمعی معیارها (S=۰/۵۱۸۸) وضعیت مطلوب‌تری نسبت به T1 دارد، بلکه در مقایسه با T3 نیز توانسته است سطح قابل قبولی از تعادل بین کارایی کلی و حداقل نارضایتی فردی (R=۰/۱۲۸۸) برقرار کند. اگرچه تیمار T3 کمترین مقدار S (برابر ۰/۴) را دارد که بیانگر عملکرد مناسب در برخی معیارهاست، اما مقدار نسبتاً بالاتر R (برابر ۰/۲) نشان می‌دهد که در حداقل یکی از معیارها فاصله قابل‌توجهی از وضعیت ایده‌آل دارد؛ موضوعی که باعث شده در رتبه دوم قرار گیرد. در مقابل، تیمار T1 با مقادیر بالاتر S و R (به‌ترتیب ۰/۶ و ۰/۲) بیانگر عملکرد ضعیف‌تر در اکثر معیارها بوده و در نتیجه در رتبه سوم جای گرفته است. در مجموع، نزدیکی نسبی مقادیر Q بین T2 و T3حاکی از آن است که در سال اول، تمایز بین گزینه‌های برتر چندان شدید نبوده و رقابت محدودی میان این دو تیمار وجود داشته است.

در سال دوم نیز الگوی کلی رتبه‌بندی مشابه سال اول اما با شدت و وضوح بیشتر تکرار شد (شکل ۲). تیمار T2 با مقدار Q برابر با ۰/۱۴۶۳ در رتبه اول قرار گرفت و فاصله آن با سایر تیمارها به‌طور محسوسی افزایش یافت. این تیمار علاوه بر داشتن مقدار پایین‌تر S (۰/۴۵۸۵) نسبت به T1، از نظر شاخص R نیز در سطح مطلوب‌تری (۰/۱۳۶۶) قرار دارد که نشان‌دهنده عملکرد متوازن‌تر آن در تمامی معیارهاست. در مقابل، تیمار T3 با وجود داشتن کمترین مقدار S (۰/۴)، به‌دلیل مقدار بالاتر R (۰/۲) توانسته به رتبه اول دست یابد و در جایگاه دوم باقی مانده است.



شکل ۱- رتبه‌بندی تیمارها (سال اول)
Figure 1- Ranking of treatments (Year 1)



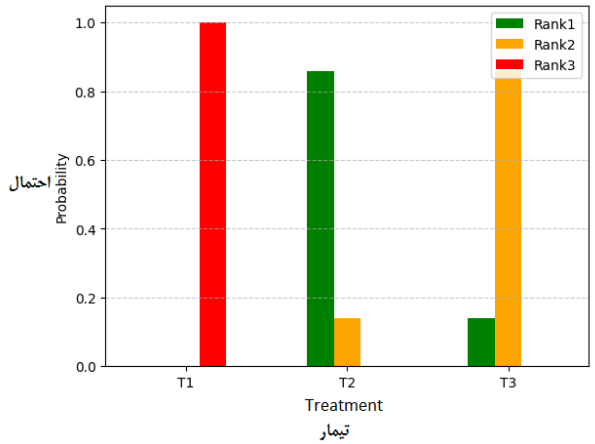
شکل ۲- رتبه‌بندی تیمارها (سال دوم)
Figure 2- Ranking of treatments (Year 2)

تیمار T1 نیز مشابه سال قبل، با بالاترین مقادیر S و R (۰/۶ و ۰/۲) در رتبه سوم قرار گرفت که بیانگر ناکارآمدی نسبی آن در ترکیب معیارهای مورد بررسی است. نکته قابل توجه در سال دوم، افزایش فاصله بین مقدار Q تیمار برتر (T2) و سایر تیمارهاست که نشان‌دهنده تقویت برتری این تیمار و کاهش هم‌پوشانی عملکردی بین گزینه‌ها می‌باشد. ثبات مقدار Q در تیمارهای حدی (T1 و T3) نشان‌دهنده پایداری ساختار رتبه‌بندی و عدم تغییر الگوی نسبی عملکرد بین سال‌های زراعی است. مقدار Q=۱ برای T1 ناشی از قرارگیری همزمان این تیمار در بدترین وضعیت نسبت به معیارهای S و R بوده و بیانگر انحراف کامل آن از نقطه ایده‌آل می‌باشد.

در مجموع، مقایسه نتایج دو سال نشان می‌دهد که اگرچه ترتیب رتبه‌بندی تیمارها (T2 > T3 > T1) در هر دو سال یکسان است، اما شدت برتری تیمار T2 در سال دوم بیشتر از سال اول بوده است. این امر حاکی از آن است که شرایط محیطی یا مدیریتی در سال دوم موجب افزایش کارایی نسبی این تیمار شده و تمایز آن را نسبت به سایر گزینه‌ها برجسته‌تر کرده است. بنابراین، تیمار T2 نه‌تنها از نظر مقدار شاخص Q در هر دو سال به‌عنوان گزینه برتر معرفی می‌شود، بلکه از منظر پایداری عملکرد و تعادل بین معیارهای مختلف نیز می‌تواند به‌عنوان یک گزینه قابل اتکا برای توصیه در شرایط مشابه در نظر گرفته شود. تیمار T2 در مقایسه با T1 موجب کاهش ۱۶ درصدی مصرف آب شد، در حالی که کاهش عملکرد ناچیزی (کمتر از ۱۰ درصد) داشت. از سوی دیگر، تیمار T3 اگرچه بالاترین بهره‌وری آب (۵/۴۵ و ۶/۷۸ کیلوگرم بر متر مکعب در سال‌های اول و دوم) و بهره‌وری انرژی (۲۷۴/۲۵ و ۳۴۰/۶۷ مگاژول بر مگاژول) را نشان داد، اما به‌دلیل کاهش ۳۵ درصدی عملکرد و کاهش سودآوری اقتصادی، تنها در شرایط کمبود شدید آب قابل توصیه است.

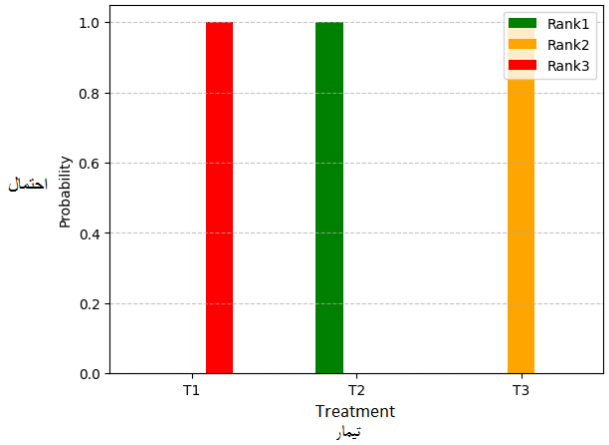
تحلیل حساسیت مونت کارلو

به‌منظور سنجش پایداری نتایج و ارزیابی میزان حساسیت رتبه‌بندی نسبت به تغییرات پارامتر v، شبیه‌سازی مونت‌کارلو با ۱۰۰۰۰ تکرار اجرا شد. در سال اول (شکل ۳)، نتایج نشان داد که تیمار T2 در ۸۵/۹۴ درصد تکرارها رتبه اول را کسب کرده و در ۱۴/۰۶ درصد موارد در جایگاه دوم قرار گرفته است. در مقابل، تیمار T3 عمدتاً در رتبه دوم و در بخشی از تکرارها در رتبه اول ظاهر شده است، در حالی‌که تیمار T1در تمامی تکرارها در رتبه سوم باقی مانده است. این الگو حاکی از آن است که اگرچه T2 به‌عنوان گزینه غالب شناخته می‌شود، اما در برخی حالات ناشی از تغییر مقدار v، جابجایی محدودی میان آن و T3 رخ می‌دهد؛ موضوعی که بیانگر حساسیت نسبی رتبه‌های برتر به ترجیحات تصمیم‌گیرنده است. در سال دوم (شکل ۴)، وضعیت کاملاً متفاوتی مشاهده شد و نتایج از ثبات بسیار بالای رتبه‌بندی حکایت داشت. به‌گونه‌ای که تیمار T2 در تمام تکرارها (۱۰۰ درصد) در جایگاه نخست قرار گرفت و هیچ تغییری در رتبه آن ثبت نشد. همچنین، تیمار T3همواره در رتبه دوم و تیمار T1 در رتبه سوم قرار داشتند، بدون آن که جابجایی میان آن‌ها رخ دهد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که رتبه‌بندی در این سال نسبت به تغییرات پارامتر v کاملاً غیرحساس بوده و از پایداری کامل برخوردار است؛ بنابراین، انتخاب تیمار T2 به‌عنوان گزینه برتر در این شرایط، نتیجه‌ای قطعی و قابل اتکا محسوب می‌شود.



شکل ۳- شبیه‌سازی مونت کارلو امتیازهای روش ویکور (سال اول)

Figure 3- Monte Carlo simulation of VIKOR scores (Year 1)



شکل ٤- شبیه‌سازی مونت کارلو امتیازهای روش ویکور (سال دوم)

Figure 4- Monte Carlo simulation of VIKOR scores (Year 2)

نتایج تحلیل مونت‌کارلو نشان داد که پایداری رتبه‌بندی در روش ویکور به شرایط سال زراعی و میزان عدم‌قطعیت وابسته است. در سال اول، وجود رقابت نزدیک بین تیمارهای T2 و T3 و تغییر احتمالی رتبه‌ها تحت تأثیر پارامتر v بیانگر حساسیت نسبی مدل به وزن‌دهی بین معیارهای گروهی و فردی است. این رفتار با مطالعات پیشین در حوزه تصمیم‌گیری چندمعیاره هم‌راستا است، به‌طوری‌که تغییر در وزن معیارها و پارامترهای تصمیم‌گیری می‌تواند منجر به تغییر در رتبه‌بندی نهایی شود و نتایج ذاتاً دارای ماهیت حساس به عدم‌قطعیت هستند (Opricovic & Tzeng, 2004; Mardani *et al.*, 2015b).

در مقابل، سال دوم نشان‌دهنده یک ساختار تصمیم‌گیری کاملاً پایدار و مقاوم در برابر تغییرات پارامتر v بود، به‌طوری‌که یک تیمار (T2) در تمام سناریوهای مونت‌کارلو به‌عنوان گزینه برتر شناسایی شد. این یافته با نتایج مطالعاتی که بر پایداری روش ویکور در شرایط اختلاف واضح بین گزینه‌ها تأکید دارند همخوانی دارد. در این مطالعات نشان داده شده است که زمانی‌که فاصله عملکردی بین گزینه‌ها در معیارهای کلیدی افزایش یابد، روش‌های ویکور و سایر روش‌های تحلیل چندمعیاره به سمت نتایج پایدار و همگرا حرکت می‌کنند (Liao & Xu, 2013; Kahraman *et al.*, 2014).

همچنین استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌عنوان ابزار تحلیل عدم‌قطعیت در تصمیم‌گیری چندمعیاره، در مطالعات اخیر به‌عنوان رویکردی مؤثر برای ارزیابی پایداری و مقاومت یک مدل یا نتیجه در برابر تغییرات و عدم‌قطعیت‌ها نتایج معرفی شده است. این روش امکان بررسی طیف گسترده‌ای از سناریوهای احتمالی را فراهم می‌کند و نقش مهمی در اعتبارسنجی تصمیم‌های حاصل از مدل‌های تحلیل چندمعیاره دارد (Zavadskas *et al.*, 2014; Senvar *et al.*, 2016).

در همین راستا، پژوهش‌های کاربردی در حوزه کشاورزی و منابع آب نیز نشان داده‌اند که ترکیب تحلیل چندمعیاره با تحلیل‌های تصادفی می‌تواند به درک بهتر رفتار سیستم تحت شرایط عدم‌قطعیت کمک کند (Mardani *et al.*, 2017).

به‌طور کلی، مقایسه نتایج این مطالعه با پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که روش ویکور در شرایط عدم‌قطعیت متوسط می‌تواند منجر به رقابت بین گزینه‌های نزدیک شود، در حالی‌که در شرایط اختلاف عملکرد مشخص‌تر، یک گزینه غالب و پایدار شناسایی می‌شود. بنابراین، استفاده از تحلیل مونت‌کارلو در کنار روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره نقش مهمی در افزایش اعتبار و قابلیت اعتماد نتایج در سیستم‌های کشاورزی تحت عدم‌قطعیت دارد.

در مجموع، مقایسه دو سال نشان می‌دهد که سطح اطمینان در تصمیم‌گیری طی سال دوم به‌مراتب بیشتر از سال اول است. در حالی که در سال اول نوعی هم‌پوشانی عملکردی میان T2 و T3 مشاهده می‌شود، در سال دوم تمایز بین تیمارها کاملاً شفاف و بدون ابهام است. این تفاوت بیانگر آن است که شرایط سال دوم منجر به شکل‌گیری ساختاری پایدارتر در فرآیند تصمیم‌گیری شده و نقش تحلیل مونت‌کارلو را در آشکارسازی میزان اعتبار و قابلیت اعتماد نتایج روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، به‌ویژه در مواجهه با عدم‌قطعیت‌های رایج در مطالعات کشاورزی، برجسته می‌سازد.

در آنالیز واریانس، تفاوت معنی‌دار تیمارهای سطوح تخلیه مجاز رطوبت خاک نشان داد که تغییر سطح آبیاری اثر واقعی و آماری بر پاسخ‌های زراعی و انرژی دارد. همین الگوی تفاوت در تحلیل چندمعیاره نیز بازتاب یافت؛ به‌گونه‌ای که تیمار T3 در شاخص‌های منفرد برتری مشخصی داشت، اما تیمار T2 به‌دلیل تعادل نسبی بین معیارها، جایگاه

مطلوب‌تری کسب کرد. این همگرایی نشان می‌دهد که نتایج تحلیل چندمعیاره صرفاً حاصل یک تکنیک ریاضی نیست، بلکه بر پایه تفاوت‌های واقعی مشاهده‌شده در داده‌های آزمایشی استوار است. بنابراین، تحلیل چندمعیاره در این پژوهش نه تنها مکمل آنالیز واریانس بوده، بلکه با تلفیق هم‌زمان اثرات چند شاخص معنی‌دار، چارچوب تصمیم‌گیری کاربردی‌تری برای انتخاب سطح بهینه آبیاری ارائه کرده است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که مدیریت آبیاری نقش مهمی در ایجاد تعادل میان عملکرد محصول، بهره‌وری منابع و بازده اقتصادی چغندرقند در شرایط نیمه‌خشک دارد. در میان تیمارهای بررسی‌شده، آبیاری مبتنی بر تخلیه ۶۰ درصد رطوبت قابل دسترس خاک توانست مناسب‌ترین تعادل را میان حفظ تولید، افزایش بهره‌وری آب و انرژی و سودآوری اقتصادی ایجاد کند. همچنین نتایج روش ویکور و تحلیل عدم قطعیت مونت‌کارلو پایداری این راهبرد را در مقایسه با سایر تیمارها تأیید کرد. از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به اجرای آزمایش در یک منطقه و طی دو سال زراعی و همچنین عدم بررسی اثرات بلندمدت مدیریت آبیاری بر ویژگی‌های خاک و رشد ریشه اشاره کرد. بنابراین، تعمیم نتایج به سایر شرایط اقلیمی و خاکی نیازمند مطالعات تکمیلی است. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، راهبردهای آبیاری در مناطق مختلف اقلیمی و در ترکیب با ارقام متحمل به خشکی، سامانه‌های نوین آبیاری و مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه مورد ارزیابی قرار گیرند تا راهکارهای مؤثرتری برای مدیریت پایدار آب در تولید چغندرقند ارائه شود.

References

1. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://doi.org/10.32614/cran.package.meto
2. Arjeh, E., Mohammadi, A., & Karami, M. (2019). Energy use efficiency and sustainability assessment in sugar beet production under different agronomic practices. *Renewable Agriculture and Food Systems*, *34*(4), 320–330. https://doi.org/10.1017/S1742170519000015
3. Asgharipour, M.R., Mondani, F., & Riahinia, S. (2012). Energy use efficiency and economic analysis of sugar beet production system in Iran: A case study in Khorasan Razavi province. *Energy*, *44*(1), 1078–1084. https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.023
4. Ayers, R.S., & Westcot, D.W. (1985). *Water quality for agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29, Rev. 1. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://doi.org/10.18356/942430a9-en
5. Balta, A., Yazar, A., & Öztürk, H. (2021). Improvement of water saving and economic productivity based on sugar content of sugar beet using linear move sprinkler irrigation. *Agricultural Water Management*, *255*, 106989. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106989
6. Brown, K.F., Messem, A.B., Dunham, R.J., & Biscoe, P.V. (1987). *Effect of drought on growth and water use of sugar beet*. *The Journal of Agricultural Science*, *109*(3), 421–435. https://doi.org/10.1017/S0021859600081636
7. Caliskan, S., & Caliskan, M.E. (2010). Evaluation of irrigation methods and water quality on sugar beet yield and water use efficiency. *Agricultural Water Management*, *97*(2), 357–362. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.10.010
8. Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, *30*(2), 219–230. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.10.004
9. Doorenbos, J., & Kassam, A.H. (1979). *Yield response to water*. FAO Irrigation and Drainage Paper 33. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
10. El Hamdi, E., El Amrani, A., & Boufaroua, M. (2017a). Effect of deficit irrigation on sugar beet yield and water use efficiency in semi-arid conditions. *Sugar Tech*, *19*(6), 583–590. https://doi.org/10.1007/s12355-017-0512-3
11. El Hamdi, K., Benkouider, M., & El Gharras, H. (2017b). Effect of deficit irrigation on sugar beet productivity and water use efficiency. *Sugar Tech*, *19*(5), 477–485. https://doi.org/10.1007/s12355-017-0521-0
12. Gomez, K.A., & Gomez, A.A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
13. Hatirli, S.A., Ozkan, B., & Fert, C. (2006). Energy inputs and crop yield relationship in greenhouse tomato production. *Renewable Energy*, *31*(4), 427–438. https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.04.007
14. Hinkelmann, K., & Kempthorne, O. (2008). *Design and analysis of experiments: Volume 1, Introduction to experimental design* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
15. Hülsbergen, K.-J., Feil, B., & Lippert, C. (2001). Energy equivalents for harvested sugar beets and other farm outputs. *Plant, Soil and Environment*, *67*(3), 137–146. https://doi.org/10.17221/615/2020 PSE
16. Iran Meteorological Organization. (2021). Long-term climatic data for Karaj region (1992–2021). Tehran, Iran.
17. Jensen, C.R., Ørum, J.E., Pedersen, S.M., Andersen, M.N., Plauborg, F., Liu, F., & Jacobsen, S.E. (2014). A short

overview of measures for securing water resources for irrigated crop production. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *200*(5), 333-343. https://doi.org/10.1111/jac.12067
18. Kahraman, C., Kaya, I., & Cebi, S. (2014). A comparative analysis of MCDM methods. *Expert Systems with Applications*, *41*(7), 3265–3277. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.12.010
19. Kitani, O. (Ed.). (1999). *CIGR handbook of agricultural engineering, Vol. V: Energy and biomass engineering*. American Society of Agricultural and Biological Engineers. https://doi.org/10.13031/2013.36416
20. Liao, H., & Xu, Z. (2013). Extension of VIKOR for multi-criteria decision-making problems under uncertainty. *Expert Systems with Applications*, *40*(5), 1624–1631. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.09.007
21. Mardani, A., Jusoh, A., Nor, K.M., Zavadskas, E.K., & Cavallaro, F. (2015a). Multiple criteria decision-making techniques and their applications. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, *28*(1), 516–549. https://doi.org/10.1080/1331677x.2015.1075139
22. Mardani, A., Jusoh, A., Zavadskas, E.K., & Khalifah, Z. (2017). Sustainable decision-making in agriculture using MCDM methods. *Sustainability*, *9*(6), 1–25. https://doi.org/10.3390/su9061000
23. Mardani, A., Jusoh, A., Zavadskas, E.K., Khalifah, Z., & Cavallaro, F. (2015b). Multiple criteria decision-making techniques and their applications– a review of the literature from 2000 to 2014. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, *28*(1), 516–571. https://doi.org/10.1080/1331677x.2015.1075139
24. Metekan, M. (2012). *Climatic classification of Iran based on Domarten system*. [Publisher/Journal if available].
25. Michael, A.M. (2008). Irrigation: Theory and practice (2nd ed.). Vikas Publishing House.
26. Nasiri-Mahallati, M., Kuchaki, A., & Zare Feizabadi, E. (2014a). Effects of irrigation levels and nitrogen fertilizer on water use efficiency and water productivity of sugar beet and other crops. *Journal of Agricultural Ecology*, *6*(2), 187–198. https://doi.org/10.22067/jag.v6i2.39361
27. Nasiri-Mahallati, M., Kuchaki, A., & Zare Feizabadi, S. (2014b). Water use efficiency of sugar beet under different irrigation methods. *Irrigation Science*, *32*, 123–134. https://doi.org/10.1007/s00271-014-0432-1
28. Opricovic, S. (1998). *Multicriteria optimization of civil engineering systems* [Doctoral dissertation, Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade].
29. Opricovic, S., & Tzeng, G.H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, *156*(2), 445–455. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1
30. Ozkan, B., Akcaoz, H., & Fert, C. (2004). Energy input–output analysis in Turkish agriculture. *Renewable Energy*, *29*(1), 39–51. https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00135-6
31. Petersen, R.G. (1994). *Agricultural field experiments: Design and analysis*. CRC Press.
32. Piri, H., & Mobaraki, M. (2021). Water footprint and water productivity assessment of major crops under different irrigation regimes in Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, *27*(6), 103–120. https://doi.org/10.22069/jwsc.2021.18398.3399
33. Rafiee, S., Mousavi Avval, S.H., & Mohammadi, A. (2010). Modeling and sensitivity analysis of energy inputs for apple production in Iran. *Energy*, *35*(8), 3301–3306. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.015
34. Senvar, O., Tuzkaya, G., & Kahraman, C. (2016). Fuzzy VIKOR method and Monte Carlo simulation in decision-making. *Applied Soft Computing*, *45*, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.04.012
35. Seydan, M.M., & Mansouri, H. (2019a). Assessment of water productivity in sugar beet cultivation under drip and conventional irrigation systems in Hamedan province. *Journal of Agricultural Ecology*, *11*(2), 673–686. https://doi.org/10.22067/jag.v11i2.68593
36. Seydan, M., & Mansouri, S. (2019b). Effects of irrigation management on sugar beet water use efficiency. *Agricultural Water Management*, *213*, 872–879. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.015
37. Shrestha, N., Geerts, S., Raes, D., Horemans, S., Soentjens, S., Maupas, F., & Clouet, P. (2010). Yield response of sugar beets to water stress under Western European conditions. *Agricultural Water Management*, *97*(2), 346–350. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.10.005
38. Smith, J., & Jones, R. (2010). Effects of irrigation regimes on sugar beet yield and water productivity in Europe. *European Journal of Agronomy*, *32*(3), 187–194. https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.07.004
39. Topak, H., Kaya, C., & Genç, A. (2010a). Energy use efficiency of sugar beet under different irrigation levels. *Energy*, *35*(9), 3684–3690. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.05.007
40. Topak, R., Süheri, S., & Acar, B. (2010b). Comparison of energy usage of different irrigation regimes in sugar beet production in a semi arid region. *Energy*, *35*(12), 5464–5471. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.06.018
41. Wang, Y., Zhang, L., & Li, J. (2020). Application of TOPSIS and multi-criteria decision-making for irrigation management. *Water*, *12*(7), 1902. https://doi.org/10.3390/w12071902
42. Yousefi, M., & Mahdavi Damghani, A. (2015). Water, nitrogen and energy use efficiency in major crop production systems in Iran. *Advances in Plants and Agriculture Research*, *2*(3), 126–129. https://doi.org/10.15406/apar.2015.02.00050
43. Yousefi, S. (2015). Optimizing irrigation management for sugar beet to improve productivity and water efficiency. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *141*(5), 04014078. https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-

4774.0000826

44. Zavadskas, E.K., Turskis, Z., & Kildienė, S. (2014). State of art surveys of MCDM methods. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, *13*(2), 491–516. https://doi.org/10.3846/20294913.2014.892037

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 40, No. 1, Spring. 2026, p. 57-71

The Role of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria in Reducing Drought Stress in Tomato Plants and Soil Biological Characteristics

S. Sasanifar[1], A. Beheshti Ale Agha[1*], R. Sharifi[2], S. Bahraminejad[3]

1- Department of Soil Science, Razi University, Kermanshah, Iran
(*- Corresponding Author Email: beheshtiali97@gmail.com)
2- Department of Plant Protection, Razi University, Kermanshah, Iran
3- Department of Plant Production Engineering and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran

Received: 01 April 2025
Revised: 08 June 2026
Accepted: 10 June 2026
Available Online: 10 June 2026

How to cite this article:
Sasanifar, S., Beheshti Ale Agha, A., Sharifi, R., & Bahraminejad, S. (2026). The role of plant growth-promoting rhizobacteria in reducing drought stress in tomato plants and soil biological characteristics. *Journal of Water and Soil*, *40*(1), 57-71. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2026.92848.1477

Introduction

Background and objectives**:** Drought stress is one of the most significant abiotic stressors, recognized as a major constraint on agricultural plant growth and productivity worldwide. It adversely affects soil physicochemical properties and plant physiological processes, altering soil microbial dynamics. Drought stress reduces crop yields and degrades soil health in arid and semi-arid regions, where water scarcity is a critical challenge. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) have emerged as a sustainable and eco-friendly strategy to enhance plant resilience against abiotic stresses, including drought. These beneficial microorganisms improve nutrient uptake, stimulate phytohormone production, and enhance stress tolerance mechanisms in plants, thereby mitigating the negative impacts of water deficit. Considering that most of the regions of Iran are located in arid and semi-arid climates and taking into account the advantages of plant growth-promoting rhizobacteria in reducing stress compared to other physical and chemical methods, this research investigated the effect of plant growth-promoting rhizobacteria on reducing drought stress in the tomato plant and biological characteristics of the soil.

.

Materials and Methods

A greenhouse experiment was conducted in a randomized complete block design (RCBD) with four replications. Experimental treatments included four levels of drought stress (40, 60, 80, and 100% of FC) and five bacterial strains: B19 (*Lysinibacillus sphaericus*), B60 (*Bacillus* sp.), B103 (*Lysibacillus* sp.), B124 (*Achromobacter* sp.), and GB03 (*Bacillus subtilis*). A control treatment (without bacteria and drought stress) was also considered. To apply the treatments, 4 kg pots were prepared using soil passed through a 4 mm sieve. Nutrient Broth (NB) medium was used for cultivation to enhance the bacterial population. The bacteria were grown under controlled conditions at 30°C with continuous shaking at 120 rpm for 36 hours to ensure optimal growth. After incubation, a bacterial suspension with a concentration of 10^9 CFU/mL was prepared in sterile distilled water. Tomato seedlings' roots were then immersed in this suspension for 20 minutes to ensure proper colonization before being transplanted into the potted soil. A control treatment (non-inoculated seedlings) was also included in the experiment for comparative analysis. To ensure the establishment of the plants, all the pots were irrigated for 3 to 4 weeks. The desired drought stress was applied during the cultivation period by measuring soil moisture using the gravimetric method. In this method, the weight of the pots was measured every day, and irrigation was performed immediately after the soil moisture decreased. This method of applying treatments continued daily for three months. The greenhouse temperature was 25°C and the lighting period was 12 hours. The characteristics of the number of flowers, fresh weight of the aerial part and roots, stomatal resistance, fresh weight of the fruit, 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://doi.org/10.22067/jsw.2026.92848.1477

the amount of the free proline content of the leaves were measured. In addition, soil biological characteristics, including organic carbon mineralization, microbial biomass carbon, substrate-induced respiration (SIR), and metabolic quotient (qCO_2) after plant harvesting, were determined in the soil. Before performing the analysis of variance (ANOVA), the normality of the data was tested. In this study, Duncan's 5% probability level test was used for mean comparisons, Excel software was used for graphing, and SAS 9.4 was employed for data analysis.

Results

The results of this study showed that all five bacterial strains used caused significant increases in the fresh weight of the shoot, the number of flowers, and the fruit weight. The amount of free proline in the leaves increased significantly compared to the control treatment (no inoculation). The results showed that the value of stomatal resistance had a significant decrease compared to the control treatment (no inoculation). Also, the used strains improved the quality of soil biological characteristics, so that basal respiration, substrate-induced respiration (SIR), and microbial biomass carbon had a significant increase, but the metabolic quotient (qCO_2) showed a significant decrease compared to the control treatment (no inoculation). Among the five strains used, three strains, B19, B60, and B103 showed the greatest effect in reducing the effects of drought stress.

Conclusion

Various stressful conditions, including the moisture stress prevailing in Iran's agriculture, cause a decrease in the growth and yield of agricultural products; therefore, the use of inoculants containing microorganisms, including plant growth-promoting rhizobacteria, whose activity has been proven to improve stress conditions, is essential.

Keywords: Metabolic quotient, Microbial biomass carbon, Microbial respiration, Proline, Yield

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۴۰، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص. ۷۱-۵۷

نقش باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد در کاهش تنش خشکی در گیاه گوجه‌فرنگی و ویژگی‌های زیستی خاک

سهیلا ساسانی فر[۱]- علی بهشتی آل آقا[۱*]- روح الله شریفی[۲]- صحبت بهرامی نژاد[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰

چکیده

تنش خشکی از جمله تنش‌های فیزیکی است که به‌عنوان مهم‌ترین عامل محدودکننده رشد و تولید گیاهان زراعی در اکثر نقاط جهان شناخته شده است. تنش خشکی نه تنها ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و رشد گیاه را دگرگون می‌کند، بلکه بر ویژگی‌های زیستی خاک نیز تأثیر می‌گذارد. با توجه به این‌که بیشتر مناطق ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته و با در نظر گرفتن مزیت‌های باکتری‌های محرک رشد در کاهش تنش‌ها در مقایسه با سایر روش‌ها، در این پژوهش تأثیر باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد در کاهش تنش خشکی در گیاه گوجه‌فرنگی و ویژگی‌های زیستی خاک بررسی شد. آزمایشی گلخانه‌ای به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل چهار سطح تنش خشکی شامل ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه و پنج سویه باکتری شامل B19 (*Lysinibacillus sphaericus*)، B60 (*Bacillus* sp.)، B103 (*Lysibacillus* sp.)، B124 (*Achromobacter* sp.) و GB03 (*Bacillus subtilis*) بودند. همچنین یک تیمار شاهد (بدون باکتری و بدون تنش خشکی) نیز در نظر گرفته شد. به‌منظور اعمال تیمارها، گلدان‌های ۴ کیلوگرمی با استفاده از خاک زراعی عبور داده شده از الک ۴ میلی‌متر آماده شدند. ریشه‌های نشای گوجه‌فرنگی قبل از انتقال به گلدان‌های اصلی با توجه به تیمار مربوطه با باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد به مدت ۲۰ دقیقه آغشته و سپس نشاءها به گلدان اصلی انتقال داده شدند. به‌منظور اطمینان از استقرار گیاه، همه گلدان‌ها به‌مدت ۳ الی ۴ هفته آبیاری شدند. در ادامه دوره کشت، با اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش وزنی، تنش خشکی مورد نظر اعمال شد. ویژگی‌های تعداد گل، وزن تر بخش هوایی و ریشه، مقاومت روزنه‌ای، وزن تر میوه و مقدار پرولین آزاد برگ اندازه‌گیری شدند. همچنین ویژگی‌های زیستی خاک شامل معدنی شدن کربن آلی، کربن زیست‌توده میکروبی، تنفس برانگیخته و کسر متابولیک پس از برداشت گیاهان در خاک تعیین شدند. نتایج این مطالعه نشان داد که هر پنج سویه باکتری استفاده شده، باعث افزایش معنادار وزن تر اندام هوایی، تعداد گل و وزن میوه شدند. مقدار پرولین آزاد در برگ افزایش معناداری نسبت به تیمار شاهد (عدم تلقیح) داشت. نتایج نشان داد، مقدار مقاومت روزنه‌ای کاهشی معنادار، نسبت به تیمار شاهد (عدم تلقیح) داشت. همچنین سویه‌های استفاده شده باعث بهبود کیفیت ویژگی‌های بیولوژیک خاک شدند، به‌طوری‌که تنفس پایه، تنفس برانگیخته و کربن زیست‌توده میکروبی افزایشی معنی‌داری داشتند، اما کسر متابولیک کاهشی معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد (عدم تلقیح) نشان داد. از بین پنج سویه به کار گرفته شده، سه سویه B19، B60 و B103 بیشترین تأثیر را در کاهش اثرات تنش خشکی نشان دادند. شرایط تنشی مختلف از جمله تنش رطوبتی حاکم بر کشاورزی ایران، موجب کاهش رشد و عملکرد محصولات کشاورزی می‌شود، بنابراین استفاده از مایه تلقیح حاوی ریز جانداران از جمله باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد که فعالیت آن‌ها در بهبود شرایط تنش به اثبات رسیده، دارای اهمیت فراوان است.

واژه‌های کلیدی: تنفس میکروبی، پرولین، کربن زیست‌توده میکروبی، کسر متابولیک، عملکرد

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
(*- نویسنده مسئول: beheshtiali97@gmail.com)
۲- گروه گیاه‌پزشکی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۳- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

https://doi.org/10.22067/jsw.2026.92848.1477

مقدمه

ایران یکی از کشورهایی است که با میانگین بارندگی سالیانه نزدیک ۲۴۰ میلی‌متر، یک‌سوم میانگین ریزش‌های سالیانه جهانی را برخوردار می‌باشد (Nouri & Homaee, 2020). به همین دلیل بررسی پیامدهای تنش خشکی بر گیاه از اهمیت بالایی برخوردار است. تنش‌های غیر زیستی بیشترین آسیب را برای گیاهان دارند، از جمله مخرب‌ترین تنش‌هایی که گیاهان را از سطح فیزیولوژیکی تا مولکولی تحت تأثیر قرار می‌دهند، تنش خشکی است که رشد و عملکرد گیاهان زراعی را محدود می‌کند. تخمین زده می‌شود که تنش خشکی ممکن است باعث از دست دادن ۵۰ درصد عملکرد در گیاهان زراعی شود (Kasim *et al.*, 2013).

تنش خشکی پتانسیل فشاری و اسمزی گیاه را مختل کرده و موجب کاهش عملکرد طبیعی گیاه می‌شود. خشک‌سالی همچنین باعث ایجاد تنش ثانویه می‌شود. استرس اکسیداتیو که می‌تواند باعث آسیب به پروتئین‌ها، لیپیدها و اسید نوکلئیک در گیاهان شود و می‌تواند پراکسیداسیون لیپیدی را آغاز کند (Nair *et al.*, 2008). تنش خشکی باعث کاهش کیفیت مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی و در نتیجه کاهش رشد و عملکرد محصول می‌شود (Abdelaal *et al.*, 2021). یکی از اولین واکنش‌های گیاهی که در معرض خشکی قرار می‌گیرد، بسته شدن روزنه‌ها و کاهش غلظت دی اکسید کربن و فتوسنتز است که به‌طور بالقوه منجر به مرگ گیاه تحت تنش شدید می‌شود (Siddiqui *et al.*, 2015).

باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه (PGPR[1]) نقش مهمی در افزایش رشد گیاه از طریق مکانیسم‌های مختلف ایفا می‌کند. روش عمل PGPR که باعث رشد گیاه می‌شود شامل افزایش تحمل به تنش غیر زیستی در گیاهان، قابل دسترس کردن مواد مغذی برای جذب آسان توسط گیاه، تولید تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه، سیدروفورها، ترکیبات آلی فرار و آنزیم حفاظتی مانند کیتیناز و گلوکاناز برای پیشگیری از بیماری‌های گیاهی (García-Fraile *et al.*, 2015) می‌باشد. با این حال، نحوه عمل PGPR های مختلف بسته به نوع گیاهان میزبان متفاوت است (Dey *et al.*, 2004).

یکی دیگر از تأثیرات عمده PGPR بر گیاهان تحت شرایط تنش غیر زیستی، بهبود وضعیت آب برگ، به‌ویژه در شرایط تنش شوری و خشکی است (Naveed *et al.*, 2014). سارما و سایکا (Sarma & Saikia, 2014) گزارش کردند که سویه *Pseudomonas aeruginosa* رشد گیاه ماش را در شرایط خشک‌سالی بهبود بخشید. توانایی گیاهان در استفاده از آب برای رشد به روزنه آن‌ها بستگی دارد. روزنه روی برگ گیاه برای متعادل کردن محتوای آب در برگ و جذب آب توسط ریشه عمل می‌کند. نوید و همکاران (Naveed *et al.*, 2014) گزارش کردند که رسانایی روزنه‌ای برگ در گیاهان تلقیح شده با PGPR نسبت به گیاهان تلقیح شده با PGPR در شرایط خشکی بیشتر بود و از مقاومت بیشتری در شرایط تنش خشکی بهره‌مند بودند. یافته‌های هر دو مطالعه ثابت می‌کند که گیاهان تلقیح شده با PGPR تمایل به بهبود کارایی مصرف آب در گیاهان دارند.

عباسی و همکاران (Abbasi *et al.*, 2020) بیان کردند که تلقیح باکتری‌های PGPR کارایی مصرف آب، زیست‌توده ریشه و اندام هوایی، محتوای نسبی آب برگ و شاخص پایداری غشا را بهبود بخشید و در نتیجه اثر نامطلوب تنش خشکی را در گیاهان گندم و گوجه‌فرنگی کاهش داد.

باکتری *P. fluorescens DR7* با بهبود رطوبت خاک در ناحیه ریشه، موجب افزایش رشد گیاه ارزن دم‌روباهی تحت تنش خشکی شد (Niu *et al.*, 2018). همچنین، تأثیر تنش خشکی بر رشد ذرت در حضور باکتری‌های محرک رشد گیاه شامل *P. putida*، *Azospirillum lipoferum*، *P. fluorescens P1* و *P. fluorescens P8* بررسی شد و نتایج نشان داد که تلقیح با این باکتری‌ها موجب افزایش رشد گیاه در شرایط خشکی نسبت به گیاهان شاهد گردید (Khan & Bano, 2019). تحقیقات میناکشی و همکاران (Meenakshi *et al.*, 2019) نیز تأیید کرد که سویه‌های باکتریایی اندوفیت MKA2، MKA3 و MKA4 تنش خشکی را در گیاهان گندم کاهش می‌دهند. استفاده از سویه باکتری محرک رشد گیاه *B. subtilis SF48* رشد و محتوای نسبی آب برگ را در گیاهان گوجه‌فرنگی در شرایط تنش خشکی در مقایسه با گیاهان شاهد افزایش داد (Gowtham *et al.*, 2020).

سینگ و جا (Singh & Jha, 2017)، باکتری *Stenotrophomonas maltophilia SBP-9* را با گیاه گندم تلقیح و مشاهده کردند که به‌طور قابل‌توجهی پارامترهای رشد گیاه، مانند طول ساقه، طول ریشه، وزن تر، وزن خشک و محتوای کلروفیل را افزایش یافت. هوانگ و همکاران (Huang *et al.*, 2015) دریافتند که تلقیح *Bacillus subtilis*، *Bacillus atrophaeus* و *Bacillus pumilus* به‌طور قابل‌توجهی باعث رشد ذرت و گوجه‌فرنگی می‌شود.

باکتری‌های PGPR در خاک می‌تواند pH خاک را تحت تأثیر قرار دهد، به افزایش زیست‌توده گیاه کمک کند، فعالیت آنزیم‌ها را افزایش دهد و فرآیند معدنی شدن کربن و نیتروژن آلی را بهبود بخشد (Sarfraz *et al.*, 2019). نتایج کوساینوا و قیزیل‌کایا (Kussainova & Kızılkaya, 2021) نشان داد که در صورت وجود مقادیر کافی ماده

1- Plant growth-promoting rhizobacteria

آلی در خاک با تلقیح میکروبی خاک، کربن آلی افزایش می‌یابد. در این مطالعه بیشترین تنفس برانگیخته خاک در تلقیح با سویه *Amycolatopsis* همراه با کاه و کلش گندم به‌دست آمد. این نشان می‌دهد که معدنی شدن مواد آلی و تولید دی اکسید کربن میکروبی در خاک بیشتر در تلقیح با سویه *Amycolatopsis* به‌دست می‌آید. به‌طور مشابه، مطالعات انجام شده توسط رویی و همکاران (Rui *et al.*, 2016) و میزوا–هستک و همکاران (Mierzwa-Hersztek *et al.*, 2018)، نشان دادند که تنفس میکروبی خاک با افزودن مواد آلی به خاک یا تلقیح میکروبی افزایش قابل‌توجهی دارد. با توجه به این نکته که کشور ایران در یک منطقه خشک و نیمه‌خشک قرار داشته و مسئله خشکی و کم‌آبی همواره یکی از مهم‌ترین مشکلاتی است که کشاورزان با آن مواجه هستند، پیدا کردن راهکارهایی برای کاهش تنش خشکی و مقاوم کردن گیاهان (از جمله گوجه‌فرنگی)، از مهم‌ترین دغدغه‌های محققان و کشاورزان است.

اگرچه اثر برخی باکتری‌های محرک رشد در کاهش تنش خشکی در مطالعات پیشین گزارش شده است، اما اطلاعات مستندی درباره کارایی سویه‌های مشخص مورد استفاده در این پژوهش (*Lysinibacillus sphaericus* B19، *Achromobacter* sp. B124، *Bacillus* sp. B60، *Lysibacillus* sp. B103 و *Bacillus subtilis* GB03) در گیاه گوجه‌فرنگی و به‌ویژه از منظر ویژگی‌های زیستی خاک وجود نداشت. نوآوری این پژوهش در ارزیابی هم‌زمان اثر این سویه‌ها بر پاسخ‌های فیزیولوژیکی گوجه‌فرنگی (مانند پرولین، مقاومت روزنه‌ای و اجزای عملکرد) و ویژگی‌های زیستی خاک (شامل تنفس میکروبی، کربن زیست‌توده و کسر متابولیک) است. این رویکرد با هدف تبیین نقش هر سویه در بهبود عملکرد و پایداری سامانه گیاه–خاک تحت تنش خشکی انجام شد و نتایج حاصل می‌تواند زمینه‌ساز توسعه فناوری‌های زیستی سازگار با اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک باشد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد در کاهش اثرات تنش خشکی در گیاه گوجه‌فرنگی و تأثیر بر ویژگی‌های زیست خاک، در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی اجرا شد. خاک مورد مطالعه از اراضی دیم پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی به‌صورت یک نمونه مرکب تصادفی تهیه شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در پژوهش در جدول ۱ نشان داده شده است. این آزمایش، به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار و در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. فاکتورهای بررسی شده شامل، چهار سطح تنش خشکی ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه (FC) و پنج سویه‌های باکتری شامل *Lysinibacillus sphaericus* B19، *Achromobacter* sp. B124، *Bacillus* sp. B60، *Lysibacillus* sp. B103 و *Bacillus subtilis* GB03 بودند. تیمار شاهد (بدون باکتری) نیز برای بررسی تیمارها در نظر گرفته شد.

سویه *Bacillus subtilis* GB03 از پروفسور Choong-Min Ryu، پژوهشگاه علوم زیستی و بیوتکنولوژی کره جنوبی تهیه شد که نقش آن در بهبود رشد گیاهان مختلف در شرایط تنش شوری اثبات شده است (Han *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2008). سایر سویه‌ها از کلکسیون باکتری‌های گروه گیاه‌پزشکی دانشگاه رازی تهیه شدند و قادر به افزایش صفات رشدی گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط غیر تنش بودند (Amani-Mehr, 2016).

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1- Physical and chemical characteristics of the soil

ویژگی Characteristics		واحد Unit	مقدار Value
Sampling depth	عمق نمونه‌برداری	cm	0-30
Soil Texture	کلاس بافت خاک	–	Silty Clay Loam
OC	کربن آلی	٪	2.20
pH	واکنش خاک	–	7
CEC	ظرفیت تبادل کاتیونی	$cmol_c\ kg^{-1}$	14
EC	هدایت الکتریکی	$dS\ m^{-1}$	0.4
$CaCO_3$	آهک	٪	26.70
Na	سدیم محلول خاک	$meq\ L^{-1}$	0.14
Ca	کلسیم محلول خاک	$meq\ L^{-1}$	1.60

همچنین به‌منظور شناسایی مؤثرترین ریزوباکتری‌ها در بهبود رشد گوجه‌فرنگی، ابتدا پیش‌آزمایشی به‌صورت غربال اولیه انجام شد. در این مرحله، ده جدایه باکتریایی شامل *Bacillus megaterium* (P2)، *Bacillus* sp. (B60)، *Lysinibacillus sphaericus* (B19)، *Pseudomonas geniculate* (B11)، *Bacillus subtilis* (GB03)، *Bacillus* sp. (D4)، *Bacillus pumilus* (INR7)، *Lysibacillus* sp. (B103) و *Stenotrophomonas maltophilia* (B71) و *Achromobacter* sp. (B124) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با پنج تکرار بررسی شدند. صفات رشدی نظیر وزن خشک ساقه و ریشه، ارتفاع ساقه و طول ریشه پس از یک ماه اندازه‌گیری و سویه‌های دارای بیشترین اثر در افزایش رشد گیاه به‌عنوان جدایه‌های برتر انتخاب گردیدند.

در ادامه، برای ارزیابی نقش جدایه‌های منتخب در القای مقاومت به خشکی، آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار و در شرایط گلخانه‌ای اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل چهار سطح تنش خشکی (۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه) و شش تیمار باکتریایی شامل پنج سویه منتخب (*Lysinibacillus sphaericus* B19، *Bacillus* sp. B60، *Lysibacillus* sp. B103، *Achromobacter* sp. B124 و *Bacillus subtilis* GB03) به‌همراه تیمار شاهد (بدون تلقیح باکتری) بودند. این طراحی امکان بررسی دقیق اثر سویه‌های منتخب در بهبود تحمل خشکی و پایداری سیستم گیاه–ریزوسفر را فراهم ساخت. در این پژوهش از گیاه گوجه‌فرنگی رقم کارون که از شرکت روژین تاک تهیه شده بود استفاده شد. برای اعمال تیمارها، گلدان‌ها با ۴ کیلوگرم خاک که از الک ۴ میلی‌متری عبور داده شده بود، پر شدند.

برای افزایش جمعیت باکتری از محیط کشت مغذی NB[1] استفاده شد. کشت باکتری‌ها در شیکر انکوباتور با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه و به‌مدت ۳۶ ساعت انجام گرفت. از سویه‌های باکتری، سوسپانسیونی با فراوانی 10^9 CFU/ml در آب مقطر استریل آماده شد و ریشه‌های نشاء گوجه‌فرنگی برای ۲۰ دقیقه در سوسپانسیون قرار داده و در خاک گلدان کشت شدند (Amiri et al., 2018). تیمار شاهد نیز در آزمایش در نظر گرفته شد. برای اطمینان از استقرار کامل گیاه، تمامی گلدان‌ها به‌مدت چهار هفته به‌صورت منظم آبیاری شدند. پس از این دوره، تنش خشکی بر اساس درصدهای مختلف ظرفیت مزرعه شامل ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد اعمال گردید. ظرفیت مزرعه به روش وزنی تعیین شد؛ به‌طوری‌که گلدان‌های حاوی خاک پس از اشباع کامل و زهکشی ۲۴ ساعته وزن‌کشی شدند و اختلاف وزن خاک مرطوب و خشک به‌عنوان رطوبت در حد ظرفیت مزرعه در نظر گرفته شد. با توجه به ظرفیت مزرعه ۲۹ درصد وزنی و استفاده از ۴ کیلوگرم خاک خشک در هر گلدان، مقدار آب لازم برای رسیدن به ظرفیت مزرعه کامل (۱۰۰ درصد) برابر با ۱۱۶۰ میلی‌لیتر محاسبه شد. بر این اساس، مقادیر آب اولیه در تیمارهای ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت مزرعه به‌ترتیب ۹۲۸، ۶۹۶ و ۴۶۴ میلی‌لیتر تعیین و اعمال گردید. در طول دوره آزمایش، وزن گلدان‌ها به‌صورت روزانه اندازه‌گیری می‌شد و بر اساس میزان کاهش وزن، آب مورد نیاز برای حفظ سطح رطوبت تنظیم‌شده به هر گلدان اضافه گردید (Dane & Topp, 2020). همچنین برای کنترل و اطمینان از ثبات رطوبت در طول دوره رشد گیاه، از دستگاه رطوبت‌سنج مدل PMS-714 استفاده گردید. این روش اعمال تیمارها به‌مدت سه ماه به‌صورت روزانه ادامه یافت. دمای گلخانه ۲۵ درجه سانتی‌گراد و طول دوره روشنایی ۱۲ ساعت بود. کاربرد تنش تا زمان، برداشت گیاهان انجام شد و ویژگی‌های تعداد گل، وزن تر بخش هوایی و ریشه، مقاومت روزنه‌ای برگ با استفاده از یک porometer قابل‌حمل و بر اساس روش مونتیث و همکاران (Monteith *et al.*, 1965) اندازه‌گیری شد. این دستگاه با سنجش سرعت عبور بخار آب از سطح روزنه‌ها، مقاومت انتشار بخار در روزنه‌های برگ را محاسبه می‌کند. اندازه‌گیری‌ها در ساعات میانی روز و بر روی برگ‌های کاملاً توسعه‌یافته انجام شد تا شرایط نور و دما یکنواخت باشد. وزن تر میوه و مقدار پرولین آزاد برگ (Bates *et al.*, 1973) اندازه‌گیری شدند. در خاک کشت شده پس از برداشت گیاهان، تنفس میکروبی خاک (Anderson, 1982) برای هفت هفته، کربن زیست‌توده میکروبی به روش گازدهی با کلروفورم و خوابانیدن (به‌مدت ۱۰ روز) (Horwath & Paul, 1994) و تنفس برانگیخته (SIR) (Alef & Nannipieri, 1995) اندازه‌گیری شدند. همچنین کسر متابولیکی (qCO_2) (Suman *et al.*, 2006) با داده‌های به‌دست آمده محاسبه شد. قبل از تجزیه واریانس داده‌ها، آزمون نرمال بودن داده‌ها انجام شد. در این تحقیق برای مقایسه میانگین از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد و برای رسم نمودارها از نرم‌افزار اکسل استفاده شد و همچنین برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SAS 9.4 استفاده گردید.

نتایج و بحث

ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گوجه‌فرنگی

تأثیر تیمارهای آزمایشی بر وزن تر بخش هوایی و ریشه گیاه گوجه‌فرنگی در جدول ۲ نشان داده شده است. اثرات متقابل باکتری و تنش خشکی در سطح احتمال ۱ درصد بر وزن تر بخش هوایی معنی‌دار بود ولی تأثیری بر وزن تر ریشه گیاه نداشت (جدول ۲). بیشترین وزن‌تر

1- Nutrient Broth

اندام هوایی (۳۴/۵۰ گرم در گلدان) مربوط به سویه‌های *L. sphaericus* B19 و *Lysibacillus* sp. B103 در رطوبت ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه و کمترین وزن تر اندام هوایی (۱۲/۵۰ گرم) مربوط به تیمار شاهد آزمایش (عدم تلقیح باکتری) در رطوبت ۴۰ درصد رطوبت مزرعه بود. سویه *L. sphaericus* B19 در سطح خشکی ۴۰ درصد رطوبت مزرعه نیز توانست وزن تر را ۸۴ درصد افزایش دهد.

نتایج نشان داد که تنش خشکی موجب کاهش معنی‌دار وزن تر اندام هوایی در گیاه گوجه‌فرنگی شده است. نتایج پژوهش‌های متعدد بیانگر حساسیت بیشتر بخش هوایی گیاه نسبت به تنش خشکی است. نتایج فعالیت پژوهشی محققین در این رابطه نشان داده است که در اثر تنش خشکی تعداد روزنه‌ها کاهش یافته و تبخیر و تعرق کم و در نتیجه فتوسنتز نیز کم شده و این موضوع باعث کاهش وزن اندام‌های هوایی گیاه می‌شود (Yadav *et al.*, 2020). سهاران و نهرا (Saharan & Nehra, 2011) دلیل کاهش وزن خشک و تر اندام هوایی و در کل رشد گیاه گوجه‌فرنگی را در شرایط تنش خشکی، پلاسمولیز شدن سلول‌های گیاهی، بسته شدن روزنه‌ها (به‌منظور جلوگیری از تبخیر و تعرق) و در نتیجه کاهش فتوسنتز و افزایش تنفس نوری می‌داند. در چنین شرایطی میزان اتیلن در گیاه نیز افزایش می‌یابد. با کاهش رطوبت، رشد قسمت‌های هوایی بیش از ریشه کاهش می‌یابد. تنش، ابتدا از قسمت‌های هوایی گیاه شروع می‌شود و اندام هوایی گیاه بیش از ریشه در معرض تنش قرار می‌گیرد. همچنین از آنجا که زیست‌توده ریشه‌ها کمتر از قسمت هوایی گیاهان است، کمبود آب بر ریشه‌ها، کمتر از قسمت‌های هوایی گیاهان تأثیر می‌گذارد (Eziz *et al.*, 2017). پژوهشگران دیگر نیز گزارش کرده‌اند که تنش آبی باعث کاهش وزن اندام هوایی در گیاه می‌شود و این مورد در گیاهان ماش، نخود، سویا، کلزا، پنبه، لوبیا، یونجه و شبدر زیرزمینی گزارش شده است (Farooq *et al.*, 2012). تحت شرایط کم‌آبی، نفوذ ریشه به اعماق خاک کاهش یافته و در نتیجه وزن تر و خشک گیاه نیز کم می‌شود (Kou *et al.*, 2022).

تأثیر تیمارهای آزمایشی بر وزن تر میوه و تعداد گل گیاه گوجه‌فرنگی در جدول ۲ نشان داده شده است. اثرات متقابل باکتری و تنش خشکی در سطح احتمال ۱ درصد بر وزن تر میوه گوجه‌فرنگی و بر تعداد گل گیاه گوجه‌فرنگی در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). کاربرد هر پنج سویه باکتری، موجب افزایش وزن تر میوه گوجه‌فرنگی در برابر تیمار شاهد (عدم تلقیح) شد. به‌طوری‌که بیشترین وزن میوه (۶۲/۰۰ گرم در گلدان) مربوط به تیمار *Bacillus* sp. B60 در ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه و کمترین وزن میوه (۱۴/۰۰ گرم در گلدان) مربوط به تیمار شاهد در تنش ۴۰ درصد رطوبت مزرعه بود (جدول ۳).

جدول ۲- تجزیه واریانس تیمارهای تنش خشکی و تلقیح باکتری بر ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گوجه‌فرنگی

Table 2- Variance analysis of drought stress and bacterial inoculation treatments on morphological and physiological characteristics of tomato

منابع تغییرات Sources of variation	df	میانگین مربعات Mean of squares					
		وزن تر اندام هوایی Shoot wet weight	وزن تر ریشه Root wet weight	وزن میوه Fruit weight	تعداد گل Flower No.	مقاومت روزنه‌ای Stomatal resistance	پرولین آزاد برگ Leaf-free proline
تکرار Rep	3	11.50 *	7.00 **	36.60 ns	3.50 **	52.70 **	0.32 ns
باکتری Bacteria	5	377.00 **	22.00 **	561.40 **	21.30 **	284 **	6.50 **
خشکی Drought	3	401.00 **	16.00 **	15.20 ns	60.30 **	2232 **	13.50 **
باکتری × خشکی Bacteria× Drought	15	15.00 **	0.61 ns	227.00 *	1.20 **	93.70 **	1.10 **
خطای آزمایشی Error	72	3.50	1.00	44.50	0.41	6.60	0.36
درصد ضریب تغییرات CV (%)	–	9.50	7.50	8.80	10.50	12.50	7.80

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

**and * significant at 1% and 5% and ns, not significant respectively

جدول ۳- مقایسه میانگین ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گوجه‌فرنگی تحت تیمارهای تنش خشکی و تلقیح باکتری

Table 3- Comparison of average morphological and physiological characteristics of tomato under drought stress and bacterial inoculation treatments

صفات گیاهی Plant characteristics	تنش خشکی Drought stress	تیمار باکتری Bacterial strain					
		شاهد Control	*Lysinibacillus sphaericus* B19	*Bacillus* sp. B60	*Lysibacillus* sp. B103	*Achromobacter* sp. B124	*Bacillus subtilis* GB03
وزن تر اندام هوایی Shoot Wet Weight (g/pot)	40% FC	12.50 j	23.00 de	19.30 fg	18.50 fg	14.20 ij	18.50 fgh
	60% FC	13.00 j	23.50 de	20.50 ef	23.60 de	16.40 hi	20.50 ef
	80% FC	16.00 hi	26.60 c	23.00 de	27.20 bc	17.20 ghi	23.40 de
	100% FC	16.20 hi	34.50 a	29.60 b	34.50 a	23.00 de	24.80 cd
وزن میوه Fruit Weight (g/pot)	40% FC	14.00 g	18.00 g	16.00 g	15.00 g	16.00 g	16.50 g
	60% FC	16.00 g	38.00 bcde	19.00 g	17.00 fg	18.00 g	23.00 efg
	80% FC	18.00 g	40.00 bcd	32.00 cdef	32.00 cdef	20.00 fg	29.00 defg
	100% FC	25.00 fg	49.00 abc	62.00 a	45.00 bcd	41.00 bcd	27.00 fg
تعداد گل No. of flower	40% FC	3.00 k	3.20 k	3.20 k	3.20 k	3.70 jk	5.00 hi
	60% FC	3.20 k	5.50 fghi	4.50 ij	3.50 k	4.70 i	6.50 def
	80% FC	3.50 k	6.20 efg	5.20 ghi	5.00 hi	6.50 def	8.50 ab
	100% FC	5.20 ghi	8.00 bc	7.00 de	7.50 cd	7.00 de	9.00 a
مقاومت روزنه‌ای Stomatal resisance sec) ($mmol/m^2$)	40% FC	87.00 a	63.00 cde	64.00 cd	74.00 b	75.00 b	65.00 c
	60% FC	60.00 def	46.00 m	59.00 efgh	53.00 ijkl	59.00 efg	57.00 fghi
	80% FC	57.00 fghi	54.00 hijk	50.00 klm	57.00 fghi	56.00 fghi	55.00 ghij
	100% FC	53.00 ijkl	51.00 jklm	39.00 n	51.00 jklm	49.00 lm	49.00 lm
پرولین آزاد برگ Leaf-free proline (µmol/g)	40% FC	2.20 ghi	4.80 ab	5.20 a	3.70 cd	3.80 cd	5.30 a
	60% FC	1.90 hi	3.60 cd	3.60 cde	3.60 cde	3.50 cde	4.00 bc
	80% FC	1.80 i	3.30 cdefg	3.30 cdefg	3.30 cdef	3.40 cdef	3.10 cdefg
	100% FC	1.70 i	3.20 cdefg	3.20 cdefg	3.10 cdefg	3.20 cdefg	3.00 cdefg

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

In each column, means with similar letters are not significantly different in probability level of 5%, from the Duncan's multiple range tests.

پنج سویه باکتری تلقیح شده با ریشه، باعث افزایش معنی‌دار تعداد گل نسبت به شاهد شده‌اند. به‌طوری‌که بیشترین تعداد گل (۹/۰۰ گل در بوته) مربوط به تیمار باکتری *Bacillus subtilis* GB03 در تنش ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه و کمترین تعداد گل (۳/۰۰ گل در بوته) مربوط به تیمار شاهد (عدم تلقیح باکتری) در تنش ۴۰ درصد رطوبت مزرعه بود (جدول ۳). تیمار باکتری *Bacillus subtilis* GB03 در تنش‌های مختلف رطوبتی، اختلاف معنی‌داری را با تیمار شاهد و سایر تیمارهای تلقیح نشان دادند. بوته‌های گوجه‌فرنگی تلقیح شده با باکتری *Bacillus subtilis* GB03 زودتر از چهار سویه دیگر به گل نشستند.

گیاه گوجه‌فرنگی درست بعد از نشاکاری، در دوره گلدهی و شکل-گیری میوه، به کمبود آب حساس می‌باشد، به‌طوری‌که کمبود آب در گام گلدهی سبب ریزش گل‌ها می‌شود. در تنش‌های رطوبتی در گیاه گوجه‌فرنگی، اندازه انرژی که صرف جذب آب از خاک توسط گیاه می‌شود افزایش می‌یابد که این کار موجب افزایش تنفس و کاهش ارتفاع و عملکرد گیاه می‌شود (Branson *et al*., 1967). کاهش آب آبیاری به اندازه ۲۵ و ۵۰ درصد رطوبت مزرعه به‌ترتیب موجب کاهش عملکرد گیاه به اندازه ۲۹/۳۰ و ۴۰/۶۰ درصد شده است (Norjo *et al*., 2001). کاهش گسترش ریشه یکی از عوامل اصلی کاهش عملکرد گوجه‌فرنگی در شرایط خشکی است. در شرایط تنش، رشد ریشه‌ها کاهش پیدا می‌کند و رشد آن‌ها فقط به لایه‌های بالایی خاک محدود می‌شود (Egea *et al*., 2022).

استفاده از باکتری‌های محرک رشد گیاهی، به گونه قابل‌توجهی از کاهش محصول در شرایط تنش خشکی جلوگیری می‌کند و موجب افزایش عملکرد می‌شود. بر اساس مطالعات مختلف، تلقیح با باکتری‌های محرک رشد در شرایط تنش خشکی موجب افزایش عملکرد محصولات زراعی شده است؛ به‌گونه‌ای که در گوجه‌فرنگی تا حدود ۲/۸ درصد، در ذرت بین ۱۰ تا ۳۰ درصد، و در گندم و جو حدود ۴۰ درصد افزایش عملکرد نسبت به تیمار شاهد (بدون تلقیح) گزارش

گردیده است (Najafvand *et al.*, 2007; Zahir *et al.*, 2004). در مورد تأثیر باکتری‌های محرک رشد روی گیاه سرخال گل (*Echinacea purpurea* L.) در شرایط تنش خشکی، می‌توان گفت که این باکتری‌ها موجب آزادسازی هورمون‌های گیاهی از جمله جیبرلیک اسید و اکسین می‌شوند (Vikram, 2007) که در نتیجه فرآیند رشد ریشه (Galleguillos *et al.*, 2000) دسترسی و جذب عناصر غذایی از جمله فسفر و نیتروژن (Narula *et al.*, 2000) را افزایش داده و در نتیجه موجب افزایش ارتفاع و تعداد گل‌ها در بوته می‌شود. در پژوهشی دیگر، کاربرد باکتری‌های افزاینده رشد در گیاه ذرت در شرایط تنش خشکی توانست تعداد دانه را از ۴۱۴/۰۸ به ۴۸۶/۱۶ عدد افزایش دهد که احتمالاً از طریق تأثیر در فاکتورهای مختلف رشد و جذب عناصر غذایی ضروری بوده است (Mohammadi *et al.*, 2015).

تجزیه واریانس تیمارهای آزمایشی بر میزان مقاومت روزنه‌ای نشان دهنده تأثیر تیمار خشکی و باکتری در سطح احتمال یک درصد بود (جدول ۲). با افزایش تنش خشکی از سطح ۱۰۰ تا ۴۰ درصد رطوبت مزرعه، مقاومت روزنه‌ای روند افزایشی از خود نشان داد. استفاده از هر پنج سویه باکتری ریزوسفری محرک رشد باعث کاهش مقاومت روزنه‌ای (افزایش هدایت روزنه‌ای) در گیاه گوجه‌فرنگی شد. (جدول ۳). بیشترین کاهش مقاومت روزنه‌ای (۳۹/۰۰ مول بر متر مربع بر ثانیه) مربوط به سویه *Bacillus* sp. B60 در تنش خشکی ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه و بیشترین مقاومت روزنه‌ای (۸۷/۰۰ مول بر متر مربع بر ثانیه) مربوط به تیمار شاهد (عدم تلقیح) در تنش ۴۰ درصد رطوبت مزرعه بود. به عبارتی دیگر؛ بیشترین مقدار هدایت روزنه‌ای مربوط به سویه *Bacillus* sp. B60 بود.

در مطالعه حاضر میزان مقاومت روزنه‌ای با افزایش تنش خشکی افزایش پیدا کرد. در گونه‌های زراعی، عملکرد نسبتاً کم معمولاً با کاهش فتوسنتز در نتیجه بسته شدن روزنه‌ها ناشی از تنش خشکی شدید یا طولانی‌مدت مرتبط است (Mafakheri *et al.*, 2010). علاوه بر این، بسته شدن روزنه در اثر خشک‌سالی می‌تواند آنابولیسم و تجمع مواد غذایی در میوه‌ها را محدود کند که می‌تواند شکل‌گیری طعم‌های مطلوب را مختل کند (Sánchez-Rodríguez *et al.*, 2010). نتایج تحقیقات محمودیان و همکاران (Mohammadian *et al.*, 2001) نشان داد که اثر رژیم رطوبتی بر مقاومت روزنه‌ای در سطح یک درصد معنی‌دار است و بیشترین مقدار مقاومت روزنه‌ای در حداکثر تنش خشکی و کمترین مقدار آن، در تیمار آبیاری کامل مشاهده شد. بانیک و همکاران (Banik *et al.*, 2016) گزارش نمودند؛ که وقوع تنش خشکی در دو مرحله آغازش غده و غده بندی در سیب‌زمینی باعث کاهش معنی‌دار در پتانسیل آب برگ و افزایش معنی‌دار در مقاومت روزنه‌ای این گیاه می‌گردد.

در آزمایش حاضر به‌کارگیری هر پنج سویه باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد باعث افزایش هدایت روزنه‌ای (کاهش مقاومت روزنه‌ای) شد. در تحقیق منافی و همکاران (Manafi *et al.*, 2012) روی لوبیای قرمز تحت شرایط تنش خشکی، گزارش شد که کاربرد باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد از جنس *Rhizobium* موجب بهبود جذب آب توسط گیاه و افزایش محتوای رطوبت نسبی برگ گردید. این امر باعث شد روزنه‌ها برای مدت طولانی‌تری باز بمانند، فتوسنتز با کارایی بیشتری انجام گیرد و در نهایت عملکرد گیاه افزایش یابد. جباری و خالق‌نژاد (Jabbari & Khaleghnezhad, 2014) در بررسی اثر دو سویه ریزوبیوم و باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد بر گیاه نخود گزارش کردند؛ که هدایت روزنه‌ای در وضعیت تنش خشکی نسبت به آبیاری، ۹۱ درصد کاهش داشت. رستم کیا و همکاران (Rostamikia *et al.*, 2016) نشان دادند؛ که در شرایط تنش خشکی، در نتیجه، تلقیح دو گونه باکتری *Pseudomonas putida* و *Bacillus subtilis* با گیاه *Corylus avellana*، سرعت فتوسنتز، سرعت تعرق، هدایت روزنه‌ای و کارایی مصرف آب افزایش یافته است و همین امر باعث شده تا تیمارهای باکتری بتوانند بر عملکرد اندام‌های هوایی گیاه مذکور تأثیر مثبتی داشته باشند.

با توجه به نتایج جدول ۲، اثر متقابل تنش خشکی و تلقیح باکتری در سطح احتمال یک درصد بر میزان پرولین آزاد برگی معنی‌دار شد. تنش خشکی باعث افزایش میزان غلظت پرولین هم در گیاهان تلقیح شده با سویه‌های باکتری و هم در گیاهان شاهد شد با این تفاوت که میزان پرولین در گیاهان تلقیح شده با سویه‌های باکتری بیشتر بود (جدول ۳). بیشترین میزان غلظت پرولین آزاد در برگ (۵/۳۰ میکرومول بر گرم) مربوط به تیمار با سویه B. *subtilis* GB03 در تنش خشکی ۴۰ درصد رطوبت مزرعه و کمترین میزان غلظت پرولین آزاد برگ (۱/۷۰ میکرومول برگرم) مربوط به تیمار شاهد (بدون تلقیح باکتری) و ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه بود (جدول ۳).

توزیع پرولین در درون و بیرون سلول، نقش مهمی در مقاومت اسمزی بافت‌های مختلف نسبت به تنش‌ها ایفا می‌کند. در شرایط کمبود آب، سنتز پرولین اغلب از گلوتامیک اسید در سیتوزول و کلروپلاست سلول‌های گیاهی اتفاق می‌افتد، بنابراین پرولین در سیتوزول تجمع یافته تا توزیع آب به درون سلول انجام شود. در شرایط نرمال، پرولین به اندامک‌ها به‌ویژه واکوئل انتقال می‌یابد و درصورتی که گیاه تحت شرایط تنش خشکی قرار گیرد پرولین از واکوئل به سیتوزول انتقال می‌یابد (Trovato *et al.*, 2019).

افزایش غلظت پرولین تحت شرایط تنش خشکی در برنج (Lum *et al.*, 2014)، گوجه‌فرنگی (Khan *et al.*, 2015) و فلفل تند (Anjum *et al.*, 2012) نیز گزارش شده است؛ بنابراین گیاهانی که تحت تنش خشکی قرار می‌گیرند، مقدار زیادی از منابع کربن و نیتروژن

خود را صرف سنتز تنظیم‌کننده‌های اسمزی از قبیل پرولین می‌کنند تا بتوانند فشار تورژسانس سلول‌های خود را حفظ نمایند (Tourajzadeh *et al.*, 2024).

ویژگی‌های زیستی خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل تنش خشکی و تلقیح باکتری بر ویژگی‌های زیستی خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). با افزایش تنش خشکی، تنفس خاک کاهش پیدا کرد. تلقیح با هر یک از پنج سویه باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد موجب افزایش تنفس خاک شد. به‌طوری‌که بیشترین میزان تنفس خاک مربوط به سویه‌های *Achromobacter* sp. B124، *L. sphaericus* B19 و *Bacillus* sp. B60 در تنش خشکی ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه و کمترین میزان تنفس خاک (۵/۲۰ میلی‌گرم دی اکسید کربن در کیلوگرم خاک) مربوط به تیمار شاهد (عدم تلقیح باکتری) در تنش خشکی ۴۰ درصد رطوبت مزرعه بود (جدول ۵).

اغلب، کاهش ویژگی‌های زیستی در خاک‌های تحت انواع تنش‌ها از جمله تنش شوری و تنش خشکی به افزایش پتانسیل اسمزی و سمیت یون‌های فراوان نسبت داده شده است (Vafadar *et al.*, 2017). در توجیه کاهش تنفس خاک پس از تنش خشکی می‌توان گفت در شرایط افزایش شدت و دامنهٔ تنش، ریز جانداران قادر به بردباری شرایط نبوده و دچار ناهنجاری فیزیولوژیک می‌شوند و در نتیجه تنفس خاک کاهش می‌یابد (Zeng *et al.*, 2013). تنفس و زیست‌توده میکروبی تحت تأثیر در دسترس بودن کربن آلی در خاک هستند و هر عاملی که موجب افزایش مقدار کربن آلی خاک شود، این دو فاکتور را نیز افزایش می‌دهد (Nahidan & Nourbakhsh, 2009).

بیشترین تنفس برانگیخته خاک (۴۰/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) در تلقیح ریشه با سویه *Bacillus* sp. B60 در تنش خشکی ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه مشاهده شد و کمترین تنفس برانگیخته خاک (۵/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) نیز در تیمار بدون تلقیح ریشه با باکتری در تنش خشکی ۴۰ درصد رطوبت مزرعه اندازه‌گیری شد که با سایر تنش‌های خشکی بدون تلقیح ریشه تفاوت معنی‌داری داشت (جدول ۵). جالب است که در بیشترین تنش خشکی (۴۰ درصد رطوبت مزرعه) سویه *L. sphaericus* B19 به‌عنوان بهترین سویه توانست، تنفس را از ۵/۵ (تیمار شاهد) به ۲۷/۸۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک افزایش دهد. این سویه توانایی بالایی در تولید سیدروفور، اکسین، تثبیت نیتروژن و حلالیت پتاسیم، فسفر و سیلیکات‌ها دارد (Martinez-Sergio & Jenny, 2018; Naureen *et al.*, 2017).

کاهش تنفس برانگیخته در شرایط افزایش تنش، به این دلیل است که با افزایش خشکی جمعیت فعال میکروبی کاهش می‌یابد و کاهش رشد گیاه تأثیر شدیدی بر کاهش فعالیت میکروبی در این خاک‌ها دارد (Boyerahmadi *et al.*, 2010). در پژوهش دیگری که بر روی تنش شوری که نتایج زیان‌بار آن شباهت زیادی به تنش خشکی دارد، قول‌لر و همکاران (Gollar *et al.*, 2008) نشان دادند که شوری موجب کاهش معنی‌دار تنفس برانگیخته در خاک تحت کشت شبدر گردید.

جدول ٤- تجزیه واریانس تنش خشکی و تلقیح باکتری بر ویژگی‌های زیستی خاک

Table 4- Analysis of variance on the effect of drought stress and bacterial strains on soil biological characteristics

منابع تغییرات Sources of variation	df	میانگین مربعات Mean squares			
		تنفس پایه خاک Basal respiration	تنفس برانگیخته Substrate-induced respiration	کربن زیست‌توده میکروبی Microbial Biomass Carbon	کسر متابولیک Metabolic quotient
تکرار Rep	3	0.51 **	1398.00 ns	511.50 ns	0.0002 ns
باکتری Bacteria	5	1239.00 **	708317.00 **	559223.00 **	0.04 **
خشکی Drought	3	3084.00 **	122720.00 **	742915.00 **	0.01*
باکتری × خشکی Bacteria× Drought	15	133.40 **	45732.00 **	42159.00 **	0.002 **
خطای آزمایشی Error	72	2.40	93.70	76.80	0.0006
درصد ضریب تغییرات CV (%)	–	15.80	14.50	22.40	2.30

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

**and * significant at 1% and 5% and ns, not significant, respectively

سطوح مختلف تنش خشکی تأثیر متفاوت و معنی‌داری بر مقدار کربن زیست‌توده میکروبی خاک داشتند. با افزایش خشکی، کربن زیست‌توده میکروبی روند کاهشی نشان داد، به‌طوری‌که سطح خشکی ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه بیشترین (۲۲۸/۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) و سطح خشکی ۴۰ درصد رطوبت مزرعه کمترین (۸۴/۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) مقدار کربن زیست‌توده میکروبی را داشتند. با افزایش تنش خشکی فراوانی ریز جانداران خاک کاهش یافته و کارایی متابولیک آن‌ها کمتر می‌شود. افزودن باکتری به خاک منجر به افزایش اندازه کربن زیست‌توده میکروبی در خاک شد. به‌طوری‌که در تیمارهای حاوی باکتری تفاوت معنی‌داری با تیمار بدون باکتری داشت. تیمار با سویه *Bacillus* sp. B60 با میانگین ۹۰۹ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بیشترین اندازه را به خود اختصاص داد (جدول ۵). این سویه در همه سطوح تنش خشکی جزء سویه‌های برتر بود.

در این پژوهش مقدار کربن زیست‌توده میکروبی با افزایش تنش خشکی با کاهش همراه بود که می‌تواند به از بین رفتن توده عظیمی از ریز جانداران حساس به خشکی، به‌ویژه بعضی از باکتری‌ها نسبت داده شود. کربن زیست‌توده میکروبی به شدت تحت تأثیر فراوانی ریز جانداران قرار دارد چرا که آن‌ها نه تنها قادر به ذخیره مواد غذایی هستند بلکه در چرخه عناصر غذایی و مواد آلی در خاک دخیل بوده و نقش مهمی در تجزیه ترکیبات پیچیده و آزاد کردن ترکیبات ساده مثل دی‌اکسیدکربن دارند و افزایش آن‌ها در خاک مایه افزایش کربن زیست‌توده میکروبی می‌شود (Jafari *et al*., 2013). رضائی و رئیسی(Rezaie & Raiesi, 2016) نشان دادند با کاهش رطوبت از ۷۰ به ۳۰ درصد رطوبت مزرعه، تنفس خاک و کربن زیست‌توده میکروبی کاهش معنی‌دار یافتند. آروناچالام و آروناچالام (Arunachalam & Arunachalam, 2000) نیز در بررسی‌های خود دریافتند؛ با افزایش رطوبت در خاک کربن زیست‌توده میکروبی افزایش می‌یابد.

کسر متابولیک در تنش خشکی با ۴۰ درصد رطوبت مزرعه از ۰/۰۴۰۶ به ۰/۰۶۱۹ افزایش یافت (جدول ۵). با افزایش تنش خشکی، فراوانی ریز جانداران خاک کاهش می‌یابد در نتیجه qCO_2 افزایش می‌یابد. نتایج ارائه شده در جدول ۵ نشان داد که در همه سطوح خشکی، تلقیح باکتری با ریشه گیاه منجر به کاهش کسر متابولیکی در برابر تیمار شاهد شد.

جدول ۵- آزمون میانگین پیامدهای متقابل خشکی و تیمارهای باکتری بر ویژگی‌های زیستی خاک

Table 5- Mean comparison on the effect of drought and bacterial strains interactions on soil biological factors

ویژگی زیستی خاک Soil biological characteristics	تنش خشکی Drought stress	تیمار باکتری Bacterial strain					
		شاهد Control	*Lysinibacillus sphaericus* B19	*Bacillus* sp. B60	*Lysibacillus* sp. B103	*Achromobacter* sp. B124	*Bacillus subtilis* GB03
تنفس پایه خاک Basal respiration (mg C-CO_2/kg)	40% FC	5.20 j	12.48 d	14.36 bc	6.93 hi	11.90 d	5.90 ij
	60% FC	7.10 hi	13.24 cd	14.8 b	10.11 e	12.00 d	6.10 ij
	80% FC	7.70 gh	16.86 a	14.96 b	10.20 e	15.10 b	8.40 fg
	100% FC	9.20 ef	16.92 a	16.55 a	12.44 d	17.00 a	10.17 e
تنفس برانگیخته Substrate-induced respiration (mg C/kg)	40% FC	5.50 p	27.83 d	20.17 g	7.30 o	12.80 jk	10.80 lm
	60% FC	8.25 no	31.17 c	22.00 f	15.58 i	18.30 h	12.75 jk
	80% FC	19.17 mn	31.25 c	25.97 e	16.50 hi	20.39 fg	12.80 jk
	100% FC	11.00 kl	34.83 b	40.30 a	17.40 hi	25.67 e	13.75 j
کربن زیست‌توده میکروبی Microbial biomass carbon (mg/kg)	40% FC	84.40 k	296.00 hij	448.00 fg	398.00 gh	237.00 ij	348.00 ghi
	60% FC	114.00 k	593.00 de	646.00 de	613.00 de	348.00 ghi	367.00 ghi
	80% FC	224.00 j	599.00 de	844.00 ab	685.00 cd	412.00 fg	548.00 ef
	100% FC	228.00 j	775.00 bc	909.00 a	696.00 cd	846.00 ab	896.00 a
کسر متابولیک Metabolic quotient	40% FC	0.06 a	0.04 c	0.03 d	0.02 e	0.05 b	0.02 e
	60% FC	0.06 a	0.02 e	0.02 e	0.02 e	0.03 d	0.02 e
	80% FC	0.03 d	0.01 f	0.01 f	0.01 f	0.04 c	0.02 e
	100% FC	0.04 c	0.02 e	0.01 f	0.03 ij	0.02 e	0.01 f

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

In each column, means with similar letters are not significantly different in probability level of 5%, from the Duncan's multiple range tests.

بیشترین کسر متابولیک (۰/۰۶۱۹) در تیمار بدون تلقیح باکتری در تنش خشکی ۴۰ درصد رطوبت مزرعه و کمترین کسر متابولیک

(۰/۰۱۱۵) در تنش خشکی ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه با تلقیح باکتری *Bacillus subtilis* مشاهده شد. این سویه در سطوح بالای تنش خشکی نیز توانست به‌خوبی qCO_2 را کاهش دهد. افزایش کسر متابولیکی (qCO_2) در این پژوهش می‌تواند وابسته به این حقیقت باشد که؛ هنگامی‌که جمعیت ریز جانداران خاک تحت تنش خشکی باشد، کربن بیشتری از راه تنفس خاک از دست رفته و کمتر وارد فرآیندهای بیوسنتزی و رشد ریز جانداران می‌شود و در پی آن، میزان کسر متابولیکی در خاک بیشتر می‌شود (Wong *et al*., 2008). افزایش فراوانی باکتری‌ها در خاک موجب افزایش کربن زیست‌توده میکروبی شده و در پی آن از بالا رفتن ضریب متابولیکی جلوگیری می‌کند (Anderson & Domsch, 1993).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تلقیح باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد، اثرات منفی تنش خشکی را در گوجه‌فرنگی به‌طور مؤثری کاهش می‌دهد. افزایش معنی‌دار وزن تر اندام هوایی، تعداد گل و وزن میوه در تمامی تیمارهای تلقیح‌شده بیانگر بهبود همزمان رشد رویشی و زایشی گیاه تحت شرایط محدودیت رطوبتی است. افزایش پرولین آزاد برگ و کاهش مقاومت روزنه‌ای نیز نشان‌دهنده ارتقای وضعیت فیزیولوژیکی و بهبود تحمل گیاه در برابر تنش خشکی می‌باشد. افزایش شاخص‌های زیستی خاک شامل تنفس پایه، تنفس القاشده با سوبسترا و کربن زیست‌توده میکروبی، همراه با کاهش ضریب متابولیکی (qCO_2)، نشان داد که تلقیح باکتریایی سبب افزایش کارایی متابولیکی جامعه میکروبی و پایداری بیشتر سامانه خاک–گیاه شده است. در میان سویه‌های مورد بررسی، B19 (*Lysinibacillus sphaericus*)، B60 (*Bacillus* sp.) و B103 (*Lysibacillus* sp.) بیشترین کارایی را در بهبود همزمان پاسخ‌های گیاه و ویژگی‌های زیستی خاک نشان دادند. مجموع این یافته‌ها نشان می‌دهد که نوآوری اصلی پژوهش در روشن‌سازی نقش فرآیندهای زیستی وابسته به خاک در افزایش تحمل گیاه به خشکی از طریق سویه‌های مشخص باکتریایی است. بدین‌ترتیب، استفاده هدفمند از این سویه‌ها می‌تواند رویکردی پایدار و سازگار با محیط‌زیست برای مدیریت تنش خشکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک باشد. انجام مطالعات مزرعه‌ای و بررسی پایداری اثرات این سویه‌ها، گام ضروری بعدی برای توسعه و تجاری‌سازی کودهای زیستی مقاوم به تنش است.

References

1. Abbasi, S., Sadeghi, A., & Safaie, N. (2020). Streptomyces alleviate drought stress in tomato plants and modulate the expression of transcription factors ERF1 and WRKY70 genes. *Scientia Horticulturae*, *265*, 109206. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109206
2. Abdelaal, K., Elafry, M., Abdel-Latif, I., Elshamy, R., Hassan, M., & Hafez, Y. (2021). Pivotal role of yeast and ascorbic acid in improvement the morpho-physiological and yield characters of two wheat cultivars under water deficit stress in calcareous soil. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, *50*(2), 12710. https://doi.org/10.15835/nbha50212710
3. Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press.
4. Amani-Mehr, M. (2016). *Biological control of tomato damping-off caused by Pythium aphanidermatum with rhizobacteria isolated from tomato rhizosphere* Razi University].
5. Amiri, S., Nosrati, I., Mohammadi, G.R., Kahrizi, D., & Sharifi, R. (2018). Rye (*Secale cereale* L.) and plant probiotics interaction on control of branched broomrape (*Phelipanche ramose*) on tomato (*Solanum lycopersicum*) Sivand and Super strain B cultivars. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *28*(1), 139-149. http://sustainagriculture.tabrizu.ac.ir/article_7348_12fd57bc1bcd0f0060361b4a84a36448.pdf
6. Anderson, J.P. (1982). Soil respiration. In A. L. Page, R. H. Miller, & D. R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties* (pp. 831-871). American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c41
7. Anderson, T.H., & Domsch, K.H. (1993). The metabolic quotient for CO_2 (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, *25*(3), 393-395. https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90140-7
8. Anjum, S.A., Farooq, M., Xie, X.-y., Liu, X.-j., & Ijaz, M.F. (2012). Antioxidant defense system and proline accumulation enables hot pepper to perform better under drought. *Scientia Horticulturae*, *140*, 66-73. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.03.028
9. Arunachalam, A., & Arunachalam, K. (2000). Influence of gap size and soil properties on microbial biomass in a subtropical humid forest of north-east India. *Plant and Soil*, *223*(1-2), 187-195. https://doi.org/10.1023/A:1004828221756
10. Banik, P., Zeng, W., Tai, H., Bizimungu, B., & Tanino, K. (2016). Effects of drought acclimation on drought stress resistance in potato (*Solanum tuberosum* L.) genotypes. *Environmental and Experimental Botany*, *126*, 76-89. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.01.008

11. Bates, L.S., Waldren, R., & Teare, I. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, *39*, 205-207. https://doi.org/10.1007/BF00018060
12. Boyerahmadi, M., Raiesi, F., & Mohammadi, J. (2010). Influence of different salinity levels on some microbial indices in the presence and absence of plant's living roots [Research]. *Journal of Water and Soil Science*, *14*(51), 103-115. http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-1211-fa.html
13. Branson, F., Miller, R.F., & McQueen, I. (1967). Geographic distribution and factors affecting the distribution of salt desert shrubs in the United States. *Journal of Range Management*, 287-296. https://doi.org/10.2307/3895974
14. Dane, J.H., & Topp, C.G. (Eds.). (2020). *Methods of soil analysis, Part 4: Physical methods*. John Wiley & Sons.
15. Dey, R., Pal, K., Bhatt, D., & Chauhan, S. (2004). Growth promotion and yield enhancement of peanut (*Arachis hypogaea* L.) by application of plant growth-promoting rhizobacteria. *Microbiological Research*, *159*(4), 371-394. https://doi.org/10.1016/j.micres.2004.08.004
16. Egea, I., Estrada, Y., Flores, F.B., & Bolarín, M.C. (2022). Improving production and fruit quality of tomato under abiotic stress: Genes for the future of tomato breeding for a sustainable agriculture. *Environmental and Experimental Botany*, *204*, 105086. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105086
17. Eziz, A., Yan, Z., Tian, D., Han, W., Tang, Z., & Fang, J. (2017). Drought effect on plant biomass allocation: A meta- analysis. *Ecology and Evolution*, *7*(24), 11002-11010. https://doi.org/10.1002/ece3.3630
18. Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A., & Siddique, K. (2012). Drought stress in plants: an overview. In *Plant responses to drought stress: From morphological to molecular features* (pp. 1-33). https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0_1
19. Galleguillos, C., Aguirre, C., Barea, J.M., & Azcon, R. (2000). Growth promoting effect of two *Sinorhizobium meliloti* strains (a wild type and its genetically modified derivative) on a non-legume plant species in specific interaction with two arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Science*, *159*(1), 57-63. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(00)00321-6
20. García-Fraile, P., Menéndez, E., & Rivas, R. (2015). Role of bacterial biofertilizers in agriculture and forestry. *Aims Bioengineering*, *2*(3), 183-205. https://doi.org/10.3934/bioeng.2015.3.183
21. Gollar, A.M., Raiese, F., & Nadian, H. (2008). Salinity and phosphorus interactions on growth, yield and nutrient uptake by berseem clover (*Trifolium alexandrinum* L.). *Journal of Agronomic Researchs of Iran*, *22*(2), 217-223.
22. Gowtham, H., Singh, B., Murali, M., Shilpa, N., Prasad, M., Aiyaz, M., Amruthesh, K., & Niranjana, S. (2020). Induction of drought tolerance in tomato upon the application of ACC deaminase producing plant growth promoting rhizobacterium Bacillus *subtilis* Rhizo SF 48. *Microbiological Research*, *234*, 126422. https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126422
23. Han, Q.Q., Lu, X.P., Bai, J.P., Qiao, Y., Pare, P.W., Wang, S.M., Zhang, J.L., Wu, Y.N., Pang, X.P., Xu, W.B., & Wang, Z.L. (2014). Beneficial soil bacterium *Bacillus subtilis* (GB03) augments salt tolerance of white clover. *Front Plant Science*, *5*, 525. https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00525
24. Horwath, W.R., & Paul, E.A. (1994). Microbial biomass. In D. R. Buxton (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 2: Microbiological and biochemical properties* (pp. 753-773). SSSA Book Series. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.2.c36
25. Huang, X.F., Zhou, D., Guo, J., Manter, D., Reardon, K., & Vivanco, J. (2015). *Bacillus* spp. from rainforest soil promote plant growth under limited nitrogen conditions. *Journal of Applied Microbiology*, *118*(3), 672-684. https://doi.org/10.1111/jam.12720
26. Jabbari, F., & Khaleghnezhad, V. (2014). Consideration of some biofertilizers effect on water relations and gas exchange of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under irrigated and rainfed conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *45*(1), 53-64. https://doi.org/10.22059/ijfcs.2014.51026
27. Jafari, S., Chorom, M., Enayatizamir, N., & Motamedi, H. (2013). Evaluating the effects of *Bacillus subtilis* and *Corynebacterium glutamicum* on soil microbial indexes in different levels of salinity. *Journal of Agricultural Engineering*, *35*(2), 55-70. http://agrieng.scu.ac.ir/article_10008_479a5e5bdd9d9962623c76e0805f1152.pdf
28. Kasim, W.A., Osman, M.E., Omar, M.N., Abd El-Daim, I.A., Bejai, S., & Meijer, J. (2013). Control of drought stress in wheat using plant-growth-promoting bacteria. *Journal of Plant Growth Regulation*, *32*, 122-130. https://doi.org/10.1007/s00344-012-9283-7
29. Khan, N., & Bano, A. (2019). Exopolysaccharide producing rhizobacteria and their impact on growth and drought tolerance of wheat grown under rainfed conditions. *PLoS One*, *14*(9), e0222302. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222302
30. Khan, S.H., Arsalan Khan, A.K., Uzma Litaf, U.L., Shah, A.S., Khan, M.A., Muhammad Bilal, M.B., & Ali, M.U. (2015). Effect of drought stress on tomato cv. Bombino. *Journal of Food Processing and Technology*, *6*(7). https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000465
31. Kou, X., Han, W., & Kang, J. (2022). Responses of root system architecture to water stress at multiple levels: A meta-analysis of trials under controlled conditions. *Front Plant Science*, *13*, 1085409. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1085409

32. Kussainova, M., & Kızılkaya, R. (2021). The effect of inoculation with amycolatopsis strains on yield and nutrient content of wheat (*Triticum Aestivum* L.) and soil microbiological properties. *Research Square*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-814356/v1
33. Lum, M., Hanafi, M., Rafii, Y., & Akmar, A. (2014). Effect of drought stress on growth, proline and antioxidant enzyme activities of upland rice. *The Journal of Animal and Plant Sciences*, *24*(5), 1487-1493.
34. Mafakheri, A., Siosemardeh, A., Bahramnejad, B., Struik, P., & Sohrabi, Y. (2010). Effect of drought stress on yield, proline and chlorophyll contents in three chickpea cultivars. *Australian Journal of Crop Science*, *4*(8), 580-585.
35. Manafi, H., Aliasgharzad, N., Neyshabouri, M., & Rejali, F. (2012). Tolerance to water deficit stress in tomato inoculated with Arbuscular Mycorrhizal fungi. *Water and Soil Science*, *22*(2), 1-17.
36. Martinez-Sergio, A., & Jenny, D. (2018). *Lysinibacillus sphaericus* plant growth promoter bacteria and lead phytoremediation enhancer with *Canavalia ensiformis*. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, *37*(1), 276-282. https://doi.org/10.1002/ep.12668
37. Meenakshi, Annapurna, K., Govindasamy, V., Ajit, V., & Choudhary, D. (2019). Mitigation of drought stress in wheat crop by drought tolerant endophytic bacterial isolates. *Vegetos*, *32*(4), 486-493. https://doi.org/10.1007/s42535-019-00060-1
38. Mierzwa-Hersztek, M., Klimkowicz-Pawlas, A., & Gondek, K. (2018). Influence of poultry litter and poultry litter biochar on soil microbial respiration and nitrifying bacteria activity. *Waste and Biomass Valorization*, *9*, 379-389. https://doi.org/10.1007/s12649-017-0013-z
39. Mohammadi, M., Malakouti, M., Khavazi, K., Rejali, F., & Davoodi, M. (2015). The effect of bio-fertilizer and chemical fertilizers (phosphate and zinc) on yield and yield components of two cultivars of bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Water and Soil*, *29*(1), 176-187. https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.28483
40. Mohammadian, R., Khoyi, F.R., Rahimian, H., Moghadam, M., Ghassemi-Golezani, K., & Sadeghian, S.Y. (2001). The effects of early season drought on stomatal conductance, leaf-air temperature difference and proline accumulation in sugar beet genotypes. *Journal of Agricultural Science and Technology*, *3*(3), 181-192.
41. Monteith, J., Szeicz, G., & Waggoner, P. (1965). The measurement and control of stomatal resistance in the field. *Journal of Applied Ecology*, *2*(2), 345-355. https://doi.org/10.2307/2401484
42. Nahidan, S., & Nourbakhsh, F. (2009). The effect of organic carbon managment on some biological factors of soil. 15th Soil Science Congress,
43. Nair, A.S., Abraham, T., & Jaya, D. (2008). Studies on the changes in lipid peroxidation and antioxidants in drought stress induced cowpea (*Vigna unguiculata* L.) varieties. *Journal of Environmental Biology*, *29*(5), 689-691.
44. Najafvand, S., Najafvand, S., Khaleghi, S.S., & Alemzadeh, N. (2007). The effect of biological fertilizer Nitroxin on tomato seedling growth factors. 5th Horticulture Congress Shiraz, Iran.
45. Narula, N., Kumar, V., Behl, R.K., Deubel, A., Gransee, A., & Merbach, W. (2000). Effect of P- solubilizing *Azotobacter chroococcum* on N, P, K uptake in P- responsive wheat genotypes grown under greenhouse conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *163*(4), 393-398. https://doi.org/10.1002/1522-2624(200008)163:4%3C393::AID-JPLN393%3E3.0.CO;2-W
46. Naureen, Z., Ur Rehman, N., Hussain, H., Hussain, J., Gilani, S., K. Al Housni, S., Mabood, F., Khan, A., Farooq, S., Abbas, G., & Al-Harrasi, A. (2017). Exploring the potentials of *Lysinibacillus sphaericus* ZA9 for plant growth promotion and biocontrol activities against phytopathogenic fungi. *Frontiers in Microbiology*, *8*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01477
47. Naveed, M., Hussain, M.B., Zahir, Z.A., Mitter, B., & Sessitsch, A. (2014). Drought stress amelioration in wheat through inoculation with *Burkholderia phytofirmans* strain PsJN. *Plant Growth Regulation*, *73*, 121-131. https://doi.org/10.1007/s10725-013-9874-8
48. Niu, X., Song, L., Xiao, Y., & Ge, W. (2018). Drought-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria associated with foxtail millet in a semi-arid agroecosystem and their potential in alleviating drought stress. *Frontiers in Microbiology*, *8*, 2580. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02580
49. Norjo, A., Zomorodi, S., & Amami, A. (2001). The effect of diffrent irrigation level on tomato. First National Confrence on Mitigation of Water Crises, Zabol, Iran.
50. Nouri, M., & Homaee, M. (2020). Drought trend, frequency and extremity across a wide range of climates over Iran. *Meteorological Applications*, *27*(2), e1899. https://doi.org/10.1002/met.1899
51. Rezaie, R., & Raiesi, F. (2016). Effect of superabsorbent polymers on soil microbial respiration and biomass under drought stress condition. *Journal of Soil Biology*, *3*(2), 151-162. https://doi.org/10.22092/sbj.2016.105966
52. Rostamikia, Y., Tabari Kouchaksaraei, M., Asgharzadeh, A., & Rahmani, A. (2016). The effect of plant growth-promoting Rhizobacteria on growth and physiological characteristics of *Corylus avellana* seedlings. *Ecopersia*, *4*(3), 1471-1479. https://doi.org/10.18869/modares.ecopersia.4.3.1471
53. Rui, Y., Murphy, D.V., Wang, X., & Hoyle, F.C. (2016). Microbial respiration, but not biomass, responded linearly to increasing light fraction organic matter input: Consequences for carbon sequestration. *Scientific Reports*, *6*(1), 35496. https://doi.org/10.1038/srep35496

54. Saharan, B., & Nehra, V. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria: a critical review. *Life Science and Medical Research*, *21*(1), 1-30.
55. Sánchez-Rodríguez, E.N., Nava-Salazar, S., Morán, C., Romero-Arauz, J.F., & Cerbón-Cervantes, M.A. (2010). Estado actual de la preeclampsia en México: de lo epidemiológico a sus mecanismos moleculares. *Revista de Investigación Clínica*, *62*(3), 252-260.
56. Sarfraz, R., Hussain, A., Sabir, A., Ben Fekih, I., Ditta, A., & Xing, S. (2019). Role of biochar and plant growth promoting rhizobacteria to enhance soil carbon sequestration-A review. *Environmental Monitoring and Assessment*, *191*(251), 1-13. https://doi.org/10.1007/s10661-019-7400-9
57. Sarma, R.K., & Saikia, R. (2014). Alleviation of drought stress in mung bean by strain *Pseudomonas aeruginosa* GGRJ21. *Plant and Soil*, *377*, 111-126. https://doi.org/10.1007/s11104-013-1981-9
58. Siddiqui, M.H., Al-Khaishany, M.Y., Al-Qutami, M.A., Al-Whaibi, M.H., Grover, A., Ali, H.M., Al-Wahibi, M.S., & Bukhari, N.A. (2015). Response of different genotypes of faba bean plant to drought stress. *International Journal of Molecular Sciences*, *16*(5), 10214-10227. https://doi.org/10.3390/ijms160510214
59. Singh, R.P., & Jha, P.N. (2017). The PGPR Stenotrophomonas maltophilia SBP-9 augments resistance against biotic and abiotic stress in wheat plants. *Frontiers in Microbiology*, *8*, 275381. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01945
60. Suman, A., Lal, M., Singh, A., & Gaur, A. (2006). Microbial biomass turnover in Indian subtropical soils under different sugarcane intercropping systems. *Agronomy Journal*, *98*(3), 698-704. https://doi.org/10.2134/agronj2005.0173
61. Tourajzadeh, O., Piri, H., Naserin, A., & Mahdi Cahri, M. (2024). Effect of nano biochar addition and deficit irrigation on growth, physiology and water productivity of quinoa plants under salinity conditions. *Environmental and Experimental Botany*, *217*, 105564. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105564
62. Trovato, M., Forlani, G., Signorelli, S., & Funck, D. (2019). Proline metabolism and its functions in development and stress tolerance. *Osmoprotectant-mediated abiotic stress tolerance in plants: recent advances and future perspectives*, 41-72. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27423-8_2
63. Vafadar, R., Ghavidel, A., Goli, E., & Soltani, A.A. (2017). The effect of *Pseudomonas fluorescens* and *Pseudomonas putida* on some soil biological properties and plant growth indices of wheat under salt stress. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *27*(4), 65-79.
64. Vikram, A. (2007). Interaction Between *Pseudomonas fluorescens* FPD-15 and *Bradyrhizobium* spp. in Peanut. *Biotechnology*, *6*(2), 292-298. https://doi.org/10.3923/biotech.2007.292.298
65. Wong, V.N., Dalal, R.C., & Greene, R.S. (2008). Salinity and sodicity effects on respiration and microbial biomass of soil. *Biology and Fertility of Soils*, *44*(7), 943-953. https://doi.org/10.1007/s00374-008-0279-1
66. Yadav, S., Modi, P., Dave, A., Vijapura, A., Patel, D., & Patel, M. (2020). Effect of abiotic stress on crops. In *Sustainable Crop Production* (pp. 352). https://doi.org/10.5772/intechopen.88434
67. Zahir, Z.A., Arshad, M., & Frankenberger, W.T. (2004). Plant growth promoting rhizobacteria: applications and perspectives in agriculture. *Advances in Agronomy*, *81*, 98-169. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(03)81003-9
68. Zeng, W.-Z., Xu, C., Wu, J.-W., Huang, J.-S., & Ma, T. (2013). Effect of salinity on soil respiration and nitrogen dynamics. *Ecological Chemistry and Engineering S*, *20*(3), 519-530. https://doi.org/10.2478/eces-2013-0039
69. Zhang, H., Kim, M.S., Sun, Y., Dowd, S.E., Shi, H., & Pare, P.W. (2008). Soil bacteria confer plant salt tolerance by tissue-specific regulation of the sodium transporter HKT1. *Mol Plant Microbe Interact*, *21*(6), 737-744. https://doi.org/10.1094/mpmi-21-6-0737

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 40, No. 1, Spring. 2026, p. 73-88

Enhancing the Efficiency of *Sorghum bicolor* L. in the Remediation of Cadmium-Contaminated Soils through a Bio-Chemical Approach

F. Rostami[1], H.R. Eisvand[1*], M. Daneshvar[1], M. Saeidi[2], S. Rahimi-Moghaddam[1]

1- Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran
(*- Corresponding Author Email: eisvand.hr@lu.ac.ir)
2- Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agricultural Science and Engineering, Agriculture and Natural Resources Campus, Razi University, Kermanshah, Iran

Received: 29 August 2025
Revised: 11 June 2026
Accepted: 15 June 2026
Available Online: 15 June 2026

How to cite this article:
Rostami, F., Eisvand, H.R., Daneshvar, M., Saeidi, M., & Rahimi-Moghaddam, S. (2026). Enhancing the efficiency of *Sorghum bicolor* L. in the remediation of cadmium-contaminated soils through a bio–chemical approach. *Journal of Water and Soil, 40*(1), 73-88. (In Persian with English abstract).
https://doi.org/10.22067/jsw.2026.95140.1496

Introduction

Cadmium (Cd) contamination of soils is a serious environmental concern due to its persistence, high mobility, and toxicity, posing significant risks to food security and ecosystem stability. The transfer of Cd into the food chain through contaminated crops can lead to severe human health disorders. Phytoremediation has been recognized as an environmentally friendly and cost-effective strategy for the remediation of Cd-contaminated soils. Forage sorghum (*Sorghum bicolor* L.) is considered a promising species for phytoremediation because of its extensive root system, rapid growth rate, adaptability to stress conditions, and high biomass production. However, its phytoremediation efficiency may be restricted by limited Cd bioavailability in soil and metal-induced growth inhibition. Biological approaches such as plant growth-promoting bacteria (PGPB), including Pantoea agglomerans and Pseudomonas fluorescens, can improve plant performance under Cd stress through mechanisms such as siderophore production, phytohormone synthesis, phosphate solubilization, and stimulation of antioxidant defense systems. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) enhance root absorption capacity via extensive hyphal networks and may regulate metal distribution and stabilization in the rhizosphere. In addition, chemical chelators such as Na-EDTA can increase Cd solubility and availability for plant uptake, although their application may raise environmental concerns, including potential metal leaching. Although the individual effects of PGPB, AMF, and EDTA on Cd-contaminated soils have been widely reported, information regarding their interactive effects on forage sorghum under Cd stress remains limited. Therefore, this study aimed to evaluate the individual and combined effects of PGPB, AMF, and Na-EDTA on growth traits and Cd phytoremediation efficiency of forage sorghum grown in Cd-contaminated soil.

Materials and Methods

The experiment was conducted in the summer 2024 in a greenhouse at Razi University, Kermanshah, Iran, at the geographical coordinates 34°29′19″ N latitude and 47°05′53″ E longitude. Clay loam soil (pH 7.95, EC 0.435 dS m^{-1}, organic carbon 1.326%) was collected from a nearby field, air-dried, sieved (2 mm), and mixed with sand (2:1 ratio). Soil was spiked with 40 mg kg^{-1} $CdSO_4$ and equilibrated for one month. A factorial completely

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)
https://doi.org/10.22067/jsw.2026.95140.1496

randomized design with four replicates was applied across 48 pots (26 cm diameter, 30 cm height). Treatments included: (1) PGPB at three levels (control (no bacteria inoculation), *P. agglomerans* 6 g kg^{-1} seed, *Ps. fluorescens* 7 mL kg^{-1} seed); (2) AMF at two levels (control (no mycorrhizal inoculation), 30 g kg^{-1} seed); and (3) Na-EDTA at two levels (control (zero), 3 mg kg^{-1} soil). Seeds were inoculated with sugar-water solution (2%) for solid inoculants, followed by *Ps. fluorescens*, dried, and sown (10 seeds/pot, thinned to 5 plants). Na-EDTA was applied post-emergence. Irrigation was maintained at field capacity, and plants were harvested 93 days after sowing at the onset of the reproductive stage. Measured traits included aerial and root biomass (oven-dried at 80°C for 48 h), plant height, leaf area (ImageJ), Cd concentrations in plant tissues and soil (acid digestion and atomic absorption spectrometry), translocation factor (TF = shoot Cd/soil Cd), root bioconcentration factor (BCF = root Cd/soil Cd), and tolerance index (TI = treated aerial biomass/control aerial biomass). Data were analyzed using SAS 9.4 with ANOVA and Duncan's test ($P \leq 0.05$).

Results and Discussion

Shoot and root biomass as well as tolerance index were not significantly affected by treatments, indicating that Cd stress likely overshadowed the growth-promoting effects of biological amendments and that sorghum's intrinsic tolerance mechanisms played a dominant role. Na-EDTA significantly increased plant height by 12% compared with the control, suggesting that chelation reduced Cd toxicity and improved growth conditions. The interaction between bacteria and Na-EDTA significantly influenced leaf area. Single inoculation with Pantoea agglomerans or Pseudomonas fluorescens (without EDTA) increased leaf area by approximately 25.5% compared with the control, likely due to enhanced phytohormone production and nutrient availability. However, the addition of EDTA reduced this positive bacterial effect, possibly because of nutrient imbalance or microbial competition. The most pronounced phytoremediation response was observed under the combined application of Pseudomonas fluorescens and Na-EDTA. This treatment increased Cd concentration in shoots by 91% and in roots by 73.8% relative to the control. Simultaneously, soil bioavailable Cd decreased by 44.7%, confirming substantial Cd extraction from the soil. The translocation factor increased more than three-fold, and root bioconcentration factor increased by 216.7%, demonstrating enhanced Cd uptake and internal transfer capacity. AMF showed limited influence on BCF but reduced Cd translocation to shoots, suggesting a stabilizing role in the rhizosphere and partial immobilization of Cd, consistent with its protective function under heavy metal stress.

Conclusion

The combined application of Pseudomonas fluorescens and Na-EDTA markedly enhanced Cd phytoremediation efficiency in forage sorghum by increasing Cd uptake, root accumulation, translocation to shoots, and depletion of bioavailable soil Cd. While biomass production was not significantly altered, improvements in plant height, leaf area, TF, and BCF indicate enhanced functional performance under Cd stress. Single bacterial inoculation primarily improved leaf development and physiological potential, whereas AMF moderated Cd transfer to aerial parts through rhizospheric stabilization. Overall, integrating biological inoculants with controlled chelator application represents a promising strategy for optimizing phytoremediation of Cd-contaminated soils. Future research should evaluate long-term field performance, different contamination levels, and environmental safety aspects associated with chelator use.

Acknowledgement

Gratitude is extended to Lorestan, Razi, and Kharazmi Universities for providing the necessary facilities and cooperation to carry out this research.

Keywords: Phytoremediation, Plant Growth-Promoting Bacteria, Sustainable Soil Management, Cadmium Stress

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۴۰، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص. ۸۸-۷۳

افزایش کارایی سورگوم علوفه‌ای در پالایش خاک‌های آلوده به کادمیوم با رویکرد زیستی-شیمیایی

فرزاد رستمی[۱]- حمیدرضا عیسوند[۱*]- ماشااله دانشور[۱]- محسن سعیدی[۲]- سجاد رحیمی مقدم[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

چکیده

آلودگی خاک به فلزات سنگین به‌ویژه کادمیوم از چالش‌های جدی زیست‌محیطی است به‌نحوی‌که حذف آن از خاک دشوار و پرهزینه می‌باشد. این پژوهش با هدف ارزیابی اثرات ترکیبی عوامل زیستی و شیمیایی بر بهبود کارایی سورگوم علوفه ای در پالایش خاک‌های آلوده به کادمیوم انجام شد. آزمایش در شرایط گلخانه‌ای در قالب طرح کاملاً تصادفی به‌صورت فاکتوریل با چهار تکرار اجرا گردید. تیمارهای آزمایش شامل سه سطح باکتری محرک رشد (بدون باکتری، پانتوئه آگلومرانس و سودوموناس فلورسنس)، دو سطح مایکوریزا (بدون مایکوریزا و مایکوریزا) و دو سطح EDTA (بدون EDTA و با EDTA) بود. خاک با سولفات کادمیوم با غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم آلوده شد و صفات مورفولوژیکی (زیست‌توده، ارتفاع بوته، مساحت برگ)، غلظت فلز در گیاه و خاک، فاکتورهای انتقال و تجمع زیستی و شاخص تحمل اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که بیشترین تأثیر معنی‌دار مربوط به تیمار باکتری سودوموناس فلورسنس و EDTA بوده است، زیست‌توده بخش هوایی و ریشه و همچنین شاخص تحمل به نحو معنی‌داری تحت تأثیر تیمارها قرار نگرفتند، اما تیمار EDTA باعث افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته به میزان ۱۲ درصد نسبت به شاهد شد. مساحت برگ نیز با کاربرد باکتری‌ها به طور معنی‌دار تا ۲۵/۵ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. غلظت کادمیوم در اندام هوایی با تیمار ترکیبی سودوموناس فلورسنس و EDTA به‌طور معنی‌دار و به میزان ۹۱ درصد نسبت به شاهد بیشتر شد، غلظت کادمیوم در ریشه نیز در تیمار مذکور ۷۳/۸۴ درصد نسبت به شاهد بیشتر شد. غلظت کادمیوم قابل جذب خاک با تیمار ترکیبی سودوموناس فلورسنس و EDTA به‌طور معنی‌دار ۴۴/۷ درصد کاهش یافت و فاکتور انتقال با این ترکیب بیش از سه برابر شاهد بود. تجمع زیستی کادمیوم در ریشه نیز با تیمار ترکیبی سودوموناس فلورسنس و EDTA ۲۱۶/۶۶ درصد افزایش معنی‌دار نسبت به شاهد نشان داد. این یافته‌ها بیانگر پتانسیل بالای ترکیب باکتری و EDTA در افزایش جذب و انتقال فلز برای گیاه‌پالایی می باشد و می‌تواند در مدیریت پایدار خاک‌های آلوده به فلزات سنگین کاربرد داشته باشد.

واژه های کلیدی: باکتری‌های محرک رشد، تنش کادمیوم، گیاه‌پالایی، مدیریت پایدار خاک

مقدمه

آلودگی خاک به کادمیوم[۳] به‌دلیل پایداری، تحرک بالا و سمیت شدید آن، یک تهدید جهانی برای امنیت غذایی و سلامت بوم‌سامانه‌ها محسوب می‌شود (Rizwan *et al.*, 2017). ورود این فلز به زنجیره غذایی از طریق محصولات کشاورزی آلوده می‌تواند عوارض جدی را برای سلامت انسان ایجاد کند (Haider *et al.*, 2021). در پاسخ به

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: eisvand.hr@lu.ac.ir)
۲- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

https://doi.org/10.22067/jsw.2026.95140.1496

3- Cadmium

این معضل، فناوری گیاه‌پالایی به‌عنوان یک راهکار پایدار و مقرون‌به‌صرفه برای پالایش خاک‌های آلوده مورد توجه قرار گرفته است. موفقیت این فناوری به شدت به انتخاب گیاهی با توانایی تجمع فلز در بخش هوایی و تولید زیست‌توده بالا وابسته است (Kumar *et al.*, 2024). در این میان، سورگوم علوفه‌ای *Sorghum bicolor* به دلیل ویژگی‌های خاص از جمله سیستم ریشه‌ای گسترده، سرعت رشد بالا، سازگاری با شرایط سخت و تولید زیست‌توده قابل توجه، به‌عنوان یک گونه با قابلیت تجمع زیاد عناصر سنگین[1] برای گیاه‌پالایی کادمیوم معرفی شده است (Jia *et al.*, 2016). با این وجود، کارایی این گیاه اغلب به‌دلیل دسترسی زیستی[2] محدود کادمیوم در خاک و سمیت آن که منجر به مهار رشد و اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی می‌شود، با محدودیت مواجه است (Zhang *et al.*, 2024). برای غلبه بر این چالش‌ها، راهبردهای اصلاحی زیستی مختلفی از جمله استفاده از باکتری‌های محرک رشد گیاه[3] مورد توجه قرار گرفته است (Chi *et al.*, 2025). این باکتری‌ها از طریق مکانیسم‌های متنوعی از جمله تولید سیدروفور[4] برای کلاته‌سازی[5] فلزات، سنتز هورمون‌های رشد گیاهی مانند اکسین، حل‌کنندگی فسفات و القای سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، نه تنها تحمل گیاه به تنش کادمیوم را افزایش می‌دهند، بلکه بر قابلیت جذب و تجمع آن نیز می‌افزایند (Sharma *et al.*, 2024). به‌طور مشابه، قارچ‌های مایکوریزای آربوسکولار[6] با ایجاد یک شبکه هیفی گسترده در خاک، سطح جذب ریشه را به‌طور چشمگیری افزایش داده و با تثبیت فلزات در ساختارهای خود و یا در ناحیه ریزوسفر، انتقال آن به بخش‌های هوایی را تعدیل نموده و در نتیجه سمیت کادمیوم برای میزبان را کاهش می‌دهند (Chen *et al.*, 2022). علاوه بر عوامل زیستی، استفاده از کلات‌کننده‌های شیمیایی مانند EDTA (اتیلن دی آمین ترا استیک اسید) یک روش رایج برای افزایش انحلال‌پذیری و تحرک فلزات در خاک است. شهید و همکاران (Shahid *et al.*, 2014) بیان می‌کنند که کاربرد EDTA می‌تواند غلظت کادمیوم را در اندام هوایی افزایش دهد، با این حال، این ترکیب می‌تواند اثرات منفی بر ساختار خاک و جامعه میکروبی داشته و با افزایش خطر آبشویی فلز به لایه‌های زیرین خاک، تهدیدی برای آب‌های زیرزمینی ایجاد کند. اگرچه اثرات جداگانه هر یک از این تیمارها (باکتری‌های محرک رشد گیاه، مایکوریزا و EDTA) به خوبی مورد مطالعه قرار گرفته است، اما پژوهش در مورد اثرات هم‌افزایی[7] و ترکیبی آن‌ها، که می‌تواند پتانسیل گیاه‌پالایی را به حداکثر برساند، بسیار محدود و نوظهور است. به تازگی، مطالعات بر روی گیاه آفتابگردان[8] نشان داد که کاربرد توأم باکتری‌های محرک رشد گیاه و کود آلی نسبت به کاربرد تک‌تیماری، کارایی بسیار بالاتری در استخراج سرب داشت (Saleem *et al.*, 2018). همچنین، اثر مثبت ترکیب مایکوریزا و بیوچار در کاهش سمیت کادمیوم برای ذرت[9] گزارش شد (Liu *et al.*, 2018). با این وجود، تاکنون مطالعه جامعی که به‌طور همزمان به بررسی اثر متقابل این سه عامل کلیدی بر جذب کادمیوم در گیاه سورگوم در یک خاک آلوده به این فلز بپردازد، انجام نشده است. این شکاف دانشی، انگیزه اصلی برای طراحی تحقیق حاضر است. بر این اساس، این پژوهش با هدف واکاوی تأثیر کاربرد جداگانه و ترکیبی باکتری‌های محرک رشد، قارچ‌های مایکوریزا و کلات‌کننده EDTA[10] بر شاخص‌های رشد، ویژگی‌های فیزیولوژیکی و به‌طور ویژه، توانایی گیاه‌پالایی سورگوم علوفه‌ای در یک خاک آلوده به کادمیوم انجام شد. فرضیه اصلی آن است که کاربرد ترکیبی این تیمارها می‌تواند با ایجاد اثر هم‌افزایی، بیشترین کارایی را در استخراج کادمیوم و کاهش تنش وارد بر گیاه داشته باشد. نتایج این مطالعه می‌تواند گامی مهم در جهت توسعه پروتکل‌های عملی و کارآمد برای پالایش خاک‌های آلوده باشد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در تابستان سال زراعی ۱۴۰۳ در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی کرمانشاه اجرا گردید. خاک مورد استفاده از مزرعه مجاور گلخانه به مختصات عرض جغرافیایی ″۱۹′۲۹°۳۴ و طول جغرافیایی ″۵۳′۰۵°۴۷ و به‌صورت تصادفی و از دو عمق ۳۰-۰ و ۶۰-۳۰ سانتی‌متری برداشت شد و پس از اختلاط هوا خشک شد و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد، بافت خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962) تعیین شد و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آنها مورد اندازه‌گیری قرار گرفت (جدول ۱)، هدایت الکتریکی به روش استاندارد عصاره اشباع خاک با دستگاه EC متر (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954)، اسیدیته به روش بلک (Black, 1965)، نیتروژن کل به روش کجلدال (Nelson & Sommers, 1980)، کربن آلی خاک به روش تیتراسیون واکلی- بلک (Walkley & Black, 1934)، آهک کل خاک به روش خنثی‌سازی با اسید و تیتراسیون (Black, 1965)، فسفر به روش اولسن و سامرز استخراج و غلظت آن با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد (Olsen & Sommers, 1982)، پتاسیم به روش چپمن استخراج و

1- Hyperaccumulator
2- Bioavailability
3- Plant Growth Promoting Bacteria (PGPB)
4- Siderophore
5- Chelation
6- *Arbuscular mycorrhiza*
7- Synergistic
8- *Helianthus annuus*
9- *Zea mays*
10- Sodium EDTA (Ethylenediaminetetraacetic acid)

غلظت آن با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتری قرائت شد (Chapman & Kelly, 1930) (جدول ۱). غلظت کادمیوم قابل جذب خاک[1]: پس از عصاره‌گیری به روش DTPA، غلظت کادمیوم قابل جذب خاک توسط دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی (SpectrAA 220, Varian, Australia) بر حسب میکروگرم بر کیلوگرم قرائت شد (Lindsay & Norvell, 1978; Prokop *et al*., 2003). غلظت کادمیوم در گیاه[2]: به روش هضم اسیدی و غلظت آن توسط دستگاه طیف‌سنجی جذب اتمی شعله‌ای بر حسب میکروگرم بر کیلوگرم قرائت شد (Grembecka & Szefer, 2013). همچنین ویژگی‌های یک نمونه آب چاه، از منبع آبیاری گلخانه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. میزان کادمیوم آب به روش مستقیم (اسیدی‌سازی با اسید نیتریک) توسط دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی (SpectrAA 220, Varian, Australia) بر حسب میکروگرم بر لیتر قرائت شد (Lindsay & Norvell, 1978)، هدایت الکتریکی آب با دستگاه EC متر (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954)، اسیدیته آب با PH متر (Black, 1965)، و بی‌کربنات آب به روش تیتراسیون اندازه‌گیری شد (National Research Council, 1993) (جدول ۲). آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی به‌صورت فاکتوریل با چهار تکرار و در ۴۸ گلدان با قطر ۲۶ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر انجام شد. تیمارها شامل: (۱) باکتری محرک رشد در سه سطح بدون باکتری، بذرمال با مایه جامد پانتوئه آگلومرانس[3] (۶ گرم در کیلوگرم بذر)، بذرمال با محلول سودوموناس فلورسنس[4] (۷ میلی‌لیتر در کیلوگرم بذر)، (۲) قارچ مایکوریزا در دو سطح (بدون مایکوریزا و بذرمال با مایه جامد ۳۰ گرم در کیلوگرم بذر) و (۳) پودر EDTA در دو سطح (صفر و مصرف ۳ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) بود. محتوی گلدان‌ها به نسبت ۲:۱ خاک و ماسه با پودر سولفات کادمیوم[5] (۴۰ میلیگرم در کیلوگرم) به‌صورت محلول در آب و اسپری مخلوط و به‌مدت (یک ماه) در زیر نایلون آماده شد، سپس به نسبت مساوی در هر گلدان توزین و برای کاشت آماده شد. برای بذر مال کردن بذور با مایه جامد آماده مایکوریزا آربسکولار و مایه جامد باکتری پانتوئه آگلومرانس از محلول رقیق شده آب و شکر ۲٪ استفاده شد. زمان غوطه‌وری بذور: ۲–۳ دقیقه و پس از آغشته کردن بذرها در سایه خشک شد و سپس در محلول باکتری سودوموناس فلورسنس به‌مدت حداکثر ۲ دقیقه قرار داده شد و پس از خشک شدن در سایه، تعداد ۱۰ بذر با فواصل مساوی کشت شد، پس از استقرار گیاهچه ۵ بوته در هر گلدان باقی ماند و EDTA به‌صورت محلول در آب به گلدان‌ها اضافه شد. آبیاری بر اساس نیاز آبی گیاه و در حد ظرفیت زراعی خاک انجام شد و برداشت، ۹۳ روز پس از کاشت بذرها و در ابتدای مرحله زایشی صورت گرفت.

زیست‌توده اندام‌هوایی: در پایان رشد رویشی و آغاز مرحله زایشی بوته‌ها از محل طوقه بریده شدند و پس از توزین، به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار داده شدند. پس از آن مجدد وزن شدند و بر حسب گرم در بوته گزارش شد. زیست‌توده ریشه: بوته‌ها پس از خروج از گلدان و شستشوی کامل، به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک و سپس بر حسب گرم در بوته توزین شدند. ارتفاع بوته: ارتفاع بوته‌ها از سطح گلدان تا نقطه انتهای رشد بر حسب سانتی‌متر محاسبه شد. مساحت برگ: مساحت مربوطه با نرم‌افزار (Image j) در مرحله پایان رشد رویشی محاسبه شد. فاکتور انتقال[6] و تجمع زیستی ریشه[7] طبق فرمول‌های ۱ و ۲ و شاخص تحمل[8] طبق فرمول (۳) محاسبه شدند:

$$TF = \frac{\text{Cd Shoot}}{\text{Cd Soil}} \quad (۱)$$

که در این فرمول Cd_{shoot} و Cd_{soil} به‌ترتیب نشان‌دهنده غلظت کادمیوم در اندام هوایی و خاک (برحسب میکروگرم بر کیلوگرم) هستند (Yoon *et al*., 2006)

$$BCF = \frac{\text{Cd root}}{\text{Cd Soil}} \quad (۲)$$

که در این فرمول Cd_{root} و Cd_{soil} به‌ترتیب نشان‌دهنده غلظت کادمیوم در ریشه و خاک (برحسب میکروگرم بر کیلوگرم) هستند (Zayed *et al*., 1998).

$$TI = \frac{B\ treatmet}{\text{B control}} \quad (۳)$$

که در این فرمول $B_{treatment}$ و $B_{control}$ به‌ترتیب نشان‌دهنده زیست توده خشک اندام هوایی (بر حسب گرم) در تیمارهای مختلف و شرایط شاهد هستند (Wilkins, 1978).

پردازش داده‌ها

آنالیز آماری برای مقایسه اثر تیمارها مورد استفاده بر صفات مورد اندازه‌گیری با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS 9.4 انجام شد. برای مقایسه میانگین‌ها از روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده گردید.

1- Bioavailable cadmium concentration in soil
2- Cadmium concentration in plant
3- *Pantoea agglomerans*
4- *Pseudomonas fluorescens*
5- Cadmium sulfate hydrate ($3CdSO_48H_2O$)
6- Transfer Factor
7- Root Bioconcentration Factor
8- Tolerance Index

جدول ۱- آنالیز خاک قبل از اعمال تیمارها

Table 1- Soil analysis before the application of treatments

سیلت (٪) Silt	شن (٪) Sand	رس (٪) Clay	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی عصاره اشباع ECe (dS m^{-1})	کادمیوم قابل جذب Cd (µg kg^{-1})
۴۷	22	31	7.95	0.435	186
پتاسیم K (mg kg^{-1})	**فسفر P (mg kg^{-1})**	**آهک ($CaCO_3$) (٪)**	**کربن آلی O.C (٪)**	**نیتروژن کل TN (٪)**	**بافت خاک Soil texture**
474	9.05	40	1.326	0.14	Clay Loam

جدول ۲- آنالیز آب

Table 2- Irrigation water analysis

بی‌کربنات Bicarbonate (mg L^{-1})	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS m^{-1})	کادمیوم Cd (µg L^{-1})
-	8.28	0.827	28.4

نتایج و بحث

زیست‌توده اندام‌هوایی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که هیچ‌یک از اثرات ساده باکتری‌های محرک رشد، قارچ مایکوریزا و EDTA، همچنین اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه آن‌ها بر وزن خشک اندام هوایی گیاه سورگوم علوفه‌ای تحت تنش کادمیوم معنی‌دار نبودند (جدول ۳). بر اساس گزارش چیرانجیوی و همکاران (Chiranjeevi *et al.*, 2024) کاربرد قارچ‌های مایکوریزا و باکتری‌های محرک رشد مگر در شرایط تغذیه‌ای بهینه، در گیاه سورگوم علوفه‌ای تحت تنش فلزات سنگین، تأثیر معنی‌داری بر رشد اندام هوایی نداشته است، همچنین مطالعه مذکور تأکید می‌کند که تنش شدید ناشی از کادمیوم می‌تواند اثرات مثبت عوامل زیستی را بر رشد اندام هوایی گیاه کاهش دهد. در شرایط آلودگی شدید، افزایش وزن خشک گیاه مستلزم زمان بیشتری برای استقرار همزیستی مؤثر مایکوریزا و تثبیت عملکرد باکتری‌ها است (Qin *et al.*, 2024). بنابراین، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در حضور کادمیوم، رشد اندام هوایی گیاه سورگوم علوفه‌ای پاسخ آماری معنی‌داری به تیمارهای زیستی نشان نداد و به‌نظر می‌رسد که مکانیسم‌های فیزیولوژیک دیگری نظیر تنظیم اسمزی، تولید ترکیبات آنتی‌اکسیدانی نقش مهم‌تری در تحمل گیاه به تنش ایفا کرده‌اند.

زیست‌توده ریشه

در شرایط حضور کادمیوم هیچ‌یک از اثرات ساده باکتری‌های محرک رشد، قارچ مایکوریزا و EDTA، همچنین اثرات برهم‌کنش دوگانه و سه‌گانه آن‌ها تأثیر آماری معنی‌داری بر وزن خشک ریشه سورگوم علوفه‌ای نشان ندادند (جدول ۳). همزیستی با مایکوریزا در گیاه سورگوم در شرایط آلودگی فلزات سنگین لزوماً منجر به افزایش وزن ریشه نمی‌شود و تأثیر آن به عوامل محیطی، شدت تنش و نوع قارچ بستگی دارد (Kchikich *et al.*, 2025). رقابت بین میکروارگانیسم‌ها برای منابع ریزوسفری ممکن است مانع از تأثیر مثبت بر رشد ریشه شده باشد (Dhawi *et al.*, 2016). در تحقیقی توسط عبداله و همکاران (Al-Dokhi *et al.*, 2015). تأثیر قارچ‌های مایکوریزا و EDTA بر رشد ریشه آفتابگردان در خاک آلوده به کادمیوم بررسی شد. نتایج آنها نشان داد که هیچ‌یک از تیمارها اثر معنی‌داری بر وزن خشک ریشه نداشتند، این مطالعه اشاره کرد که کاهش رشد ریشه ممکن است به‌عنوان یک مکانیسم حفاظتی برای محدود کردن جذب کادمیوم عمل کند.

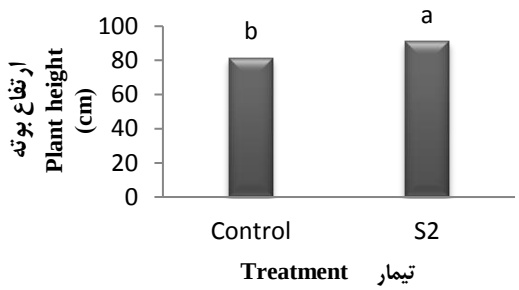
ارتفاع بوته

نتایج نشان دادند تنها اثر ساده EDTA بر ارتفاع بوته گیاه سورگوم در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود و سایر اثرات معنی‌دار نبودند (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد تیمار حاوی EDTA ۱۲ درصد نسبت به تیمار شاهد (۸۱/۲ سانتی‌متر) ارتفاع بیشتری داشت (شکل ۱). این یافته بیانگر نقش مثبت EDTA در کاهش اثرات منفی تنش کادمیوم بر رشد اندام هوایی گیاه است. به نظر می‌رسد EDTA با نقش کلاته‌کنندگی خود باعث کاهش فراهمی کادمیوم در اطراف ریشه و در نتیجه کاهش سمیت آن شده و به رشد بهتر بخش هوایی گیاه، از جمله ارتفاع، کمک کرده است. این یافته با دیگر نتایج همراستا است کاربرد

EDTAدر خاک‌های آلوده به کادمیوم باعث افزایش جذب عناصر مفید، کاهش تحرک فلزات سنگین و بهبود رشد گیاه ذرت شد (Anwar *et al.*, 2017). در مطالعه‌ای دیگر، اثر مثبت کاربرد توأم باکتری‌های محرک رشد وEDTA را در افزایش ارتفاع بوته گندم تحت تنش فلزات سنگین گزارش کردند (Rizvi *et al.*, 2020).

مساحت برگ

بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه، اثر متقابل تیمار باکتری و EDTA بر مساحت برگ در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود، در حالی‌که اثرات مرتبط با قارچ مایکوریزا معنی‌دار نشدند (جدول ۳).



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر اصلی تیمار EDTA بر ارتفاع بوته سورگوم علوفه ای درخاک آلوده به کادمیوم

Control (شاهد: بدون EDTA)، EDTA (S2)

Figure 1- Comparison of the main effect of Na-EDTA treatment on plant height of (*Sorghum bicolor* L.) grown in cadmium-contaminated soil

(Control: No Na-EDTA), S2: Na-EDTA treatment)

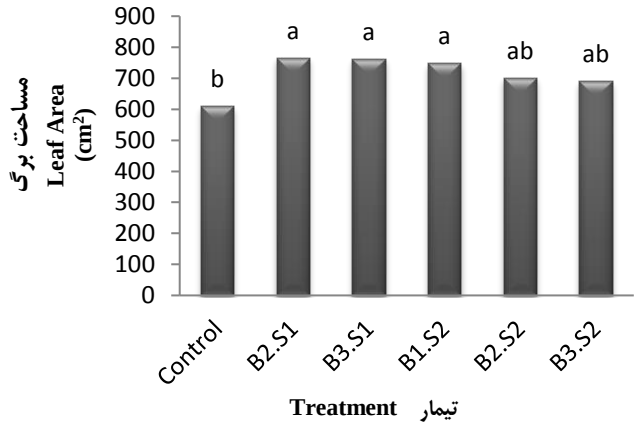
جدول ۳- تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایشی بر صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی سورگوم علوفه‌ای در خاک آلوده به کادمیوم

Table 3- Analysis of variance (ANOVA) of the effect of experimental treatments on morphological and physiological traits of *Sorghum bicolor* L. in cadmium-contaminated soil

منابع تغییرات s.o.v	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Mean squares			
		زیست‌توده‌اندام‌هوایی Shoot biomass	زیست‌توده ریشه Root biomass	ارتفاع بوته Plant height	سطح برگ Leaf area
باکتری Bacteria	2	0.10192	0.01548	323.6	13926
مایکوریزا Mycorrhiza	1	0.00691	0.00792	4.6	5106
EDTA Na-EDTA	1	0.13700	0.00035	1136.4*	20
باکتری×مایکوریزا Bacteria × Mycorrhiza	2	0.02053	0.03264	3.6	3464
EDTA×باکتری Bacteria × Na-EDTA	2	0.28292	0.01140	424.0	56693*
EDTA×مایکوریزا Mycorrhiza × Na-EDTA	1	0.02400	0.00250	13.3	7001
EDTA×باکتری×مایکوریزا Bacteria × Mycorrhiza × Na-EDTA	2	0.00489	0.01175	298.1	4027
خطا Error	36	0.10013	0.07160	201.0	14725
ضریب تغییرات (٪) (%) C.V		10.62000	14.65000	17.4	17.11

بدون علامت، *، ** و *** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵، ۱ و ۰/۰۱ درصد.

ns, *, ** and *** indicate non-significance and significance at the probability level of 5, 1 and 0.01%, respectively.



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر تیمار باکتری × EDTA بر مساحت برگ سورگوم علوفه ای در خاک آلوده به کادمیوم

شاهد (بدون باکتری و بدون EDTA)، B1(بدون باکتری)، B2(باکتری پانتوئه آگلومرانس)، B3(باکتری سودوموناس فلورسنس)، S1(بدون EDTA)، S2(با EDTA).

Figure 2- Comparison of the mean effect of bacterial treatment × Na-EDTA on the leaf area of *Sorghum bicolor* L. in cadmium-contaminated soil

Control (No Bacteria and No Na-EDTA), B1 (No Bacteria), B2 (*Pantoea agglomerans* Bacteria), B3 (*Pseudomonas fluorescens* Bacteria), S1 (No Na-EDTA), S2 (With Na-EDTA).

بیشترین مساحت برگ در تیمار پانتوئه آگلومرانس × بدون EDTA مشاهده شد که به‌طور معنی‌داری ۲۵/۵ درصد بیشتر از شاهد (۶۰۹/۴۱ سانتی‌متر مربع) بود، تیمار سودوموناس فلورسنس × بدون EDTA و تیمار بدون باکتری × EDTA نیز نسبت به شاهد اختلاف معنی‌داری داشتند، هر چند از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای باکتری × بدون EDTA و بدون باکتری × EDTA نبود (شکل ۲). این یافته‌ها نشان می‌دهد که باکتری‌های محرک رشد بدون EDTA، احتمالاً به دلیل تحریک تولید هورمون‌های گیاهی (مانند اکسین و سیتوکنین)، بهبود جذب عناصر غذایی و افزایش کارایی فتوسنتز در شرایط تنش کادمیوم، مساحت برگ را افزایش می‌دهند. در مقابل، ترکیب EDTA با پانتوئه آگلومرانس یا سودوموناس فلورسنس باعث کاهش مساحت برگ در مقایسه با تیمارهای فاقد EDTA و فاقد باکتری شد، اگرچه همچنان افزایش نسبت به شاهد مشاهده گردید. این کاهش می تواند ناشی از رقابت برای جذب عناصر غذایی باشد (Gouda *et al.*, 2018). در شرایط این آزمایش، قارچ مایکوریزا نتوانسته است تأثیر معنی‌داری بر مساحت برگ گیاه سورگوم داشته باشد. احتمالا این عدم تاثیر می‌تواند به چند دلیل از جمله تنش شدید کادمیوم، یا عدم موفقیت در رقابت با جمعیت‌های باکتریایی باشد (Kchikich *et al.*, 2024).

این نتایج با یافته‌های بشیر و همکاران (Bashir *et al.*, 2022) در گندم[1] تحت تنش کادمیوم و یافته‌های اله و همکاران (Ullah *et al.*, 2024) در آفتابگردان همخوانی دارد که اثرات متناقض ترکیب باکتری‌های محرک رشد و کلاتورها را گزارش کردند. کاربرد ترکیبی تیمارهای زیستی و شیمیایی، با وجود تأثیر معنی‌دار بر شاخص‌هایی چون مساحت برگ و ارتفاع بوته، به افزایش آماری معنی‌دار در وزن خشک اندام هوایی منجر نشده است، که این امر می‌تواند ناشی از تفاوت‌های فیزیولوژیکی بین شاخص‌های رشد، نحوه توزیع ماده خشک، و محدودیت زمانی برداشت باشد (Abou Jaoudé *et al.*, 2024).

غلظت کادمیوم در اندام هوایی

اثرات اصلی باکتری، مایکوریزا، EDTA در سطح احتمال ۰/۰۱ درصد و همچنین اثر متقابل باکتری × EDTA بر غلظت کادمیوم در اندام هوایی گیاه سورگوم در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). در اثر متقابل باکتری و EDTA بیشترین میزان کادمیوم در اندام هوایی در تیمار ترکیبی باکتری سودوموناس فلورسنس×EDTA مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد (۴۶۷/۲۵ میکروگرم بر کیلوگرم) حدود ۹۱ درصد افزایش داشت و کمترین میزان کادمیوم اندام هوایی از شاهد بدست آمد (شکل ۳، a). این افزایش قابل توجه نشان می‌دهد که استفاده توأم از باکتری سودوموناس و EDTA می‌تواند به طرز مؤثری جذب و انتقال کادمیوم به اندام‌های هوایی را افزایش دهد و در فرآیند گیاه‌پالایی نقش کلیدی ایفا کند. همچنین، تیمارهای حاوی باکتری پانتوئه آگلومرانس با EDTA و بدون EDTA نیز نسبت به شاهد به ترتیب ۷۴/۲۶ درصد و ۱۷/۶ درصد افزایش داشتند که نشان‌دهنده تأثیر مثبت این باکتری در افزایش تحرک فلز سنگین است (شکل ۳، a).

1- *Triticum aestivum*

تأثیر مایکوریزا گرچه در تجزیه واریانس معنی‌دار بود (جدول ۴)، اما در مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری نبود (شکل ۳، b)، اما روند کاهش نسبی در میانگین‌ها دیده شد که ممکن است به دلیل افزایش تثبیت فلز در ریشه و کاهش انتقال به اندام هوایی باشد. با کاربرد سودوموناس فلورسنس و EDTA افزایش کادمیوم در برگ‌های ذرت گزارش شد (Chen *et al.*, 2017). همچنین با کاربرد سودوموناس و EDTA افزایش ۸۵ درصدی کادمیوم در برگ‌های پنیرک گزارش شد (Chen *et al.*, 2024). در مطالعه‌ای دیگر محققان نقش هم‌افزایی تیمار EDTA و سودوموناس فلورسنس در انتقال کادمیوم به ساقه اسپرس را گزارش کردند (Lambert *et al.*, 2004).

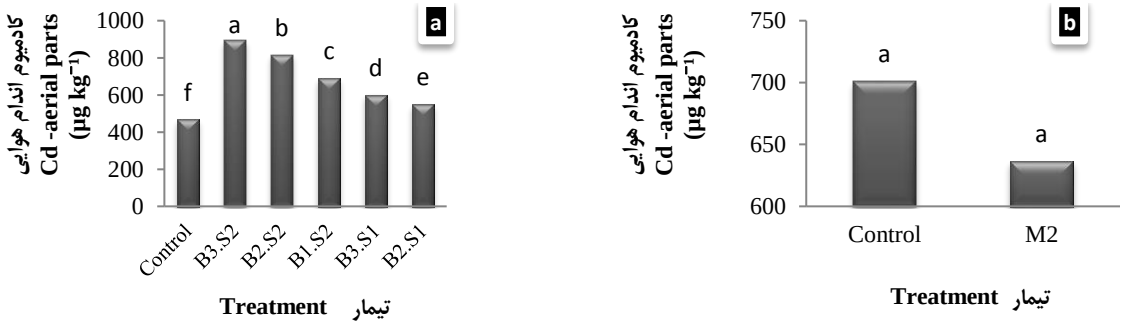
غلظت کادمیوم در ریشه

در اثر متقابل باکتری و مایکوریزا تیمار باکتری سودوموناس فلورسنس×بدون مایکوریزا بیشترین میزان غلظت کادمیوم در ریشه را داشت که ۳۰ درصد افزایش جذب کادمیوم در ریشه نسبت به شاهد را نشان داد، در مقابل، تیمار بدون باکتری×مایکوریزا کمترین مقدار را داشت که تقریباً ۷ درصد کمتر از شاهد (بدون باکتری × بدون مایکوریزا) که فاقد EDTA و با مقدار (۴۱۲ میکروگرم بر کیلوگرم) بود اگرچه تفاوت آماری معنی‌داری با شاهد نشان نداد (شکل ۴، a). در اثر متقابل باکتری و EDTA، تیمار باکتری سودوموناس فلورسنس × EDTA نیز بیشترین غلظت کادمیوم را در ریشه ثبت کرد که ۷۳/۸۴ درصد بالاتر از شاهد (بدون باکتری×بدون EDTA) که فاقد مایکوریزا با مقدار (۳۳۶/۵ میکروگرم بر کیلوگرم) بود، در مقابل، شاهد (بدون باکتری×بدون EDTA) که فاقد مایکوریزا بود کمترین مقدار کادمیوم در ریشه را نشان داد (شکل ۴، b). نتایج نشان داد که استفاده از باکتری فسفره سودوموناس فلورسنس به تنهایی و به‌ویژه در ترکیب با EDTA، موجب افزایش قابل توجهی در تجمع کادمیوم در ریشه سورگوم علوفه‌ای گردید. این موضوع نشان‌دهنده نقش مؤثر این باکتری در افزایش ظرفیت گیاه برای جذب و تجمع کادمیوم است. مطالعات مشابه نیز گزارش کرده‌اند که استفاده از سودوموناس فلورسنس باعث افزایش معنی‌دار غلظت کادمیوم در ریشه و بخش‌های هوایی ذرت شد (Akhgar *et al.*, 2020) همچنین، نقش همزیستی مایکوریزا در تنظیم جذب فلزات سنگین نیز در مطالعات مختلف تأیید شده است این قارچ می‌تواند با افزایش سطح جذب مواد مغذی و بهبود سلامت ریشه، به تعدیل تجمع فلزات کمک کند (Zhao *et al.*, 2024).

غلظت کادمیوم در خاک

در اثر متقابل باکتری و EDTA شاهد بیشترین غلظت کادمیوم قابل جذب خاک را با میانگین ۷۰۱ میکروگرم بر کیلوگرم داشت و تیمار باکتری سودوموناس فلورسنس همراه با EDTA کمترین مقدار را داشت که کاهش ۴۴/۷ درصدی نسبت به شاهد را نشان داد (شکل ۵، a). تیمار باکتری پانتوئه آگلومرانس همراه با EDTA نیز کاهش ۳۶/۶ درصدی نسبت به شاهد داشت.

حتی در غیاب EDTA، تیمار باکتری پانتوئه آگلومرانس× بدون EDTA و تیمار سودوموناس فلورسنس× بدون EDTA نسبت به شاهد (بدون باکتری× بدون EDTA) ۸/۶ و ۱۵/۶ درصد کاهش در غلظت کادمیوم در خاک را نشان دادند. در غیاب باکتری نیز، کاهش ۲۲/۹۷ درصدی کادمیوم نسبت به شاهد مشاهده شد. در بررسی اثر مایکوریزا، غلظت کادمیوم درخاک در تیمار مایکوریزا نیز ۷/۵۳ درصد بیشتر از شاهد (۵۳۱ میکروگرم بر کیلوگرم) بود (شکل ۵، b).

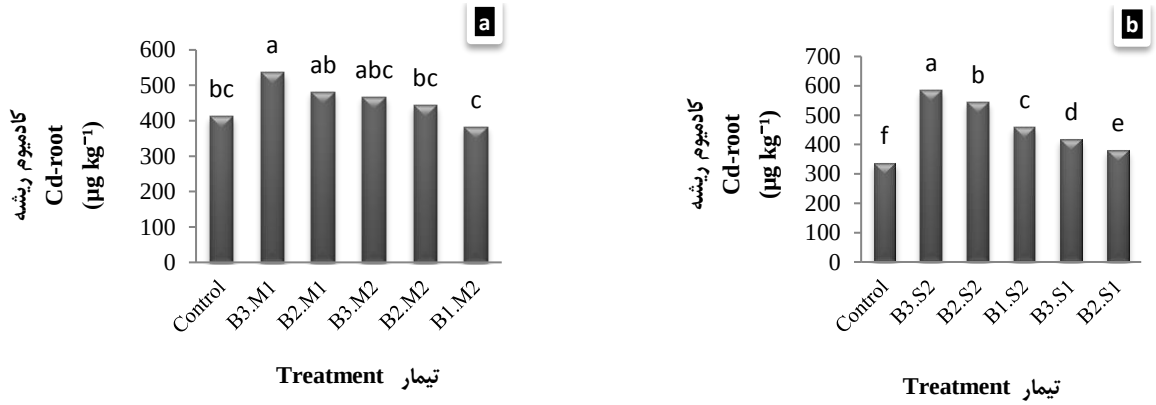


شکل ۳- مقایسه میانگین اثر تیمار باکتری× EDTA و تیمار مایکوریزا بر غلظت کادمیوم اندام هوایی سورگوم علوفه‌ای در خاک آلوده به کادمیوم

شکل a شاهد (بدون باکتری و بدون EDTA)، شکل b شاهد (بدون مایکوریزا)، B1 (بدون باکتری)، B2 (باکتری پانتوئه آگلومرانس)، B3 (باکتری سودوموناس فلورسنس)،S1 (بدون EDTA)، S2 (با EDTA)، M2 (با مایکوریزا).

Figure 3- Comparison of the mean effects of combined treatments of bacteria with sodium EDTA and mycorrhiza on the cadmium concentration in the aerial parts of *Sorghum bicolor* L. in cadmium-contaminated soil

Control in figure a (No bacterial and no Na-EDTA), Control in figure b (No mycorrhizal), B1 (No bacteria), B2 (*Pantoea agglomerans* Bacteria), B3 (*Pseudomonas fluorescens* Bacteria), S1 (No Na-EDTA), S2 (With Na-EDTA), M2 (with mycorrhiza).

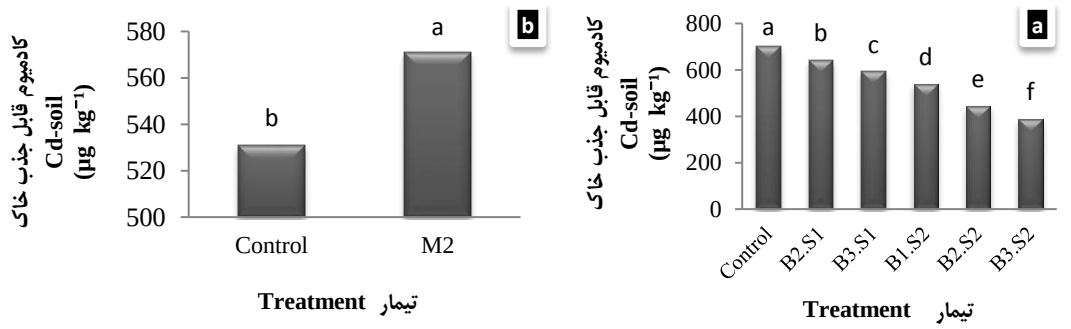


شکل ٤- مقایسه میانگین اثر تیمار باکتری × EDTA و باکتری ×مایکوریزا بر غلظت کادمیوم در ریشه سورگوم علوفه‌ای در خاک آلوده به کادمیوم

شکل a شاهد (بدون باکتری و بدون مایکوریزا)، شکل b شاهد (بدون باکتری و بدون Na-EDTA)، B1 (بدون باکتری)، B2 (باکتری پانتوئه آگلومرانس)، B3 (باکتری سودوموناس فلورسنس)،S1 (بدون Na-EDTA)، S2 (با Na-EDTA)، M1 (بدون مایکوریزا)، M2 (با مایکوریزا).

Figure 4- Comparison of the mean effect of bacterial treatment × Na-EDTA and bacterial treatment × mycorrhiza on cadmium concentration in the roots of *Sorghum bicolor* L. in cadmium-contaminated soil

Control in figure a (No bacterial and mycorrhiza), Control in figure b (Bacterial and no Na-EDTA), B1 (No bacteria), B2 (*Pantoea agglomerans* Bacteria), B3 (*Pseudomonas fluorescens* Bacteria), S1 (No Na-EDTA), S2 (With Na-EDTA), M1 (No mycorrhiza), M2 (with mycorrhiza).



شکل ٥- مقایسه میانگین اثر تیمار باکتری× EDTA و مایکوریزا بر غلظت کادمیوم قابل جذب در خاک آلوده به کادمیوم در سورگوم علوفه‌ای

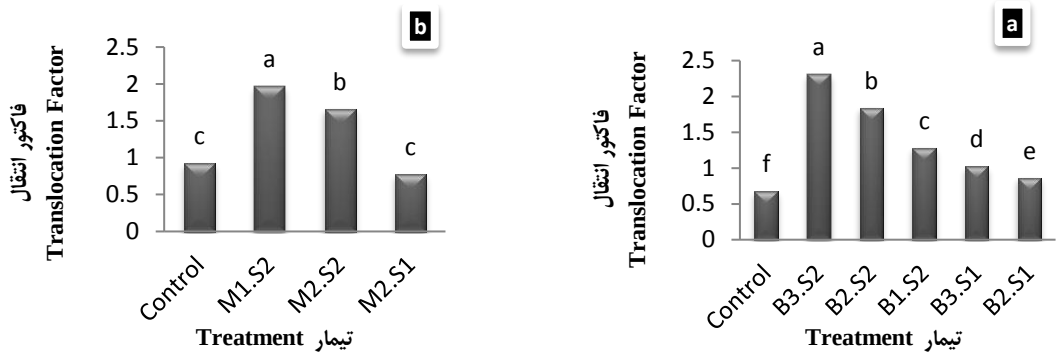
شکل a شاهد (بدون باکتری و بدون Na-EDTA)، شکل b شاهد (بدون مایکوریزا)، B1 (بدون باکتری)، B2 (باکتری پانتوئه آگلومرانس)، B3 (باکتری سودوموناس فلورسنس)، S1 (بدون EDTA)، S2 (با Na-EDTA)، M1 (بدون مایکوریزا)، M2 (با مایکوریزا).

Figure 5- Comparison of the mean effects of treatments with bacteria, sodium EDTA, and mycorrhiza on the concentration of bioavailable cadmium in cadmium-contaminated soil for *Sorghum bicolor* L.

Control in figure a (No bacterial and no Na-EDTA), Control in figure b (No mycorrhizal), B1 (No bacteria), B2 (*Pantoea agglomerans* Bacteria), B3 (*Pseudomonas fluorescens* Bacteria), S1 (No Na-EDTA), S2 (With Na-EDTA), M1 (No mycorrhiza), M2 (with mycorrhiza).

بر اساس گزارش چن و همکاران (Chen *et al.*, 2017) باکتری سودوموناس فلورسنس موجب افزایش جذب و تجمع کادمیوم در گیاه سدوم آلفردی[1] می‌شود و همزمان رشد و بیوماس این گیاه را تحت تنش کادمیوم بهبود می‌بخشد، که می‌تواند به‌طور غیرمستقیم تحمل این گیاه در برابر تنش فلزات سنگین را افزایش دهد، در نتیجه کارایی گیاه پالایی بیشتر می شود. گونه‌های مختلف باکتری سودوموناس فلورسنس توانایی بالایی در تثبیت و کاهش کادمیوم در خاک دارند (Chellaiah, 2018) در مطالعه ای توسط فانگ و همکاران (Fang *et al.*, 2024) گزارش شده که کاربرد قارچ‌های مایکوریزا به‌تنهایی به دلیل تغییر در ساختار ریز محیط ریشه، افزایش موقتی در دسترسی‌پذیری کادمیوم را ایجاد کرده است. در مطالعه دیگری نتایج نشان دادند که باکتری‌های فسفره همراه با کلاتور EDTA باعث کاهش قابل توجه کادمیوم در خاک و بهبود سلامت آفتابگردان شدند (Rauf *et al.*, 2025).

1- *Sedum alfredii*



شکل ٦- مقایسه میانگین اثر تیمار باکتری×EDTA و مایکوریزا×EDTA بر فاکتور انتقال در سورگوم علوفه‌ای در خاک آلوده به کادمیوم

شکل a شاهد (بدون باکتری و بدون EDTA)، شکل b شاهد (بدون مایکوریزا و بدون EDTA)، B1 (بدون باکتری)، B2 (باکتری پانتوئه آگلومرانس)، B3 (باکتری سودوموناس فلورسنس)،S1 (بدون EDTA)، S2 (با EDTA)، M1 (بدون مایکوریزا)، M2 (با مایکوریزا).

Figure 6- Comparison of the mean effects of combined treatments of bacteria with sodium EDTA and mycorrhiza with sodium EDTA on the translocation factor in *Sorghum bicolor* L. in cadmium-contaminated soil

Control in figure a (No bacterial and no Na-EDTA), Control in figure b (No mycorrhizal and no Na-EDTA), B1 (No bacteria), B2 (*Pantoea agglomerans* Bacteria), B3 (*Pseudomonas fluorescens* Bacteria), S1 (No Na-EDTA), S2 (With Na-EDTA), M1 (No mycorrhiza), M2 (with mycorrhiza).

فاکتور انتقال

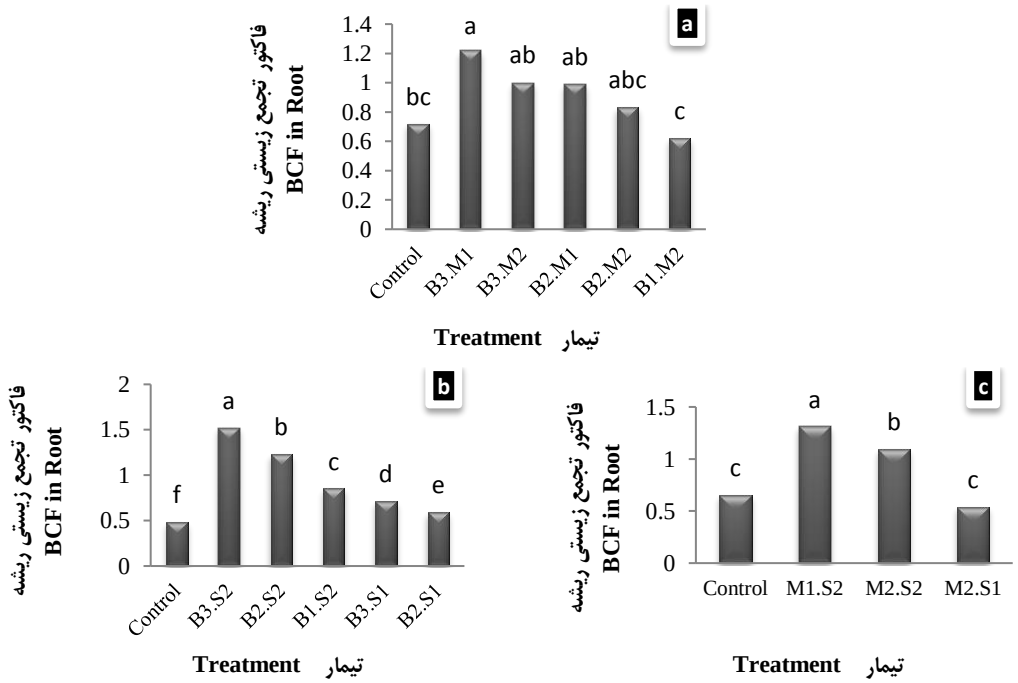
در اثر متقابل تیمار باکتری و EDTA، فاکتور انتقال در تیمار باکتری سودوموناس فلورسنس×EDTA ۲۴۴/۸ درصد بیشتر از شاهد (۰/۶۷) بود (شکل ۶ a). فاکتور انتقال در تیمار باکتری پانتوئه آگلومرانس×EDTA و تیمار بدون باکتری×EDTA به‌ترتیب ۱۷۴/۶ درصد و ۹۱ درصد بالاتر از شاهد (۰/۶۷) بودند، حضور همزمان سودوموناس فلورسنس و EDTA به شدت انتقال کادمیوم را از ریشه به بخش‌های هوایی افزایش داده و کارایی گیاه‌پالایی سورگوم را بهبود بخشید (شکل ۶ a). فاکتور انتقال در اثر متقابل مایکوریزا و EDTA در تیمار بدون مایکوریزا×EDTA بیشترین مقدار را در این برهم‌کنش نشان داد که ۱۱۴/۱ درصد بالاتر از شاهد (۰/۹۲) بود (شکل ۶ b). تیمار با مایکوریزا×EDTA نسبت به شاهد ۸۰/۴ درصد افزایش داشت. تیمار با مایکوریزا×بدون EDTA کمترین مقدار را بدون اختلاف معنی دار با شاهد داشت (شکل ۶ b). این یافته‌ها حاکی از آن است که نقش اصلی در افزایش فاکتور انتقال، به EDTA مربوط می‌شود و اثر مایکوریزا در این میان، نسبتاً محدودتر است.

در واقع، افزایش فاکتور انتقال به بیش از سه برابر تیمار شاهد در تیمار سودوموناس فلورسنس×EDTA در (شکل ۶ a)، نشانگر عملکرد سینرژیک سودوموناس و EDTA در بهینه‌سازی مکانیسم انتقال فلزات سنگین است. در مطالعه‌ای بر روی گیاه خردل هندی نشان داده شد که کاربرد سودوموناس فلورسنس همراه با EDTA باعث افزایش فاکتور انتقال کادمیوم و بهبود کارایی پالایش فلزات سنگین گردید (Rajkumar *et al.*, 2010). EDTA در ترکیب با باکتری‌های محرک رشد در گیاه نازبو[1] نقش مؤثری در افزایش انتقال کادمیوم به بخش هوایی داشت (Alamo-Nole & Estrella-Martinez, 2022). کاربرد سودوموناس و کلاتورها بر روی آفتابگردان منجر به افزایش معنی‌دار انتقال فلز از ریشه به ساقه می‌شود که این امر به‌دلیل افزایش تحرک فلز در خاک و افزایش فعالیت سیستم انتقال داخلی گیاه است (Randriamamonjy *et al.*, 2021). فاکتور انتقال بیشتر از ۱ نشان‌دهنده توانایی گیاه تحت تیمار در انتقال مؤثر فلزات سنگین از خاک به اندام‌های هوایی و پتانسیل آن برای گیاه‌پالایی است، در حالی که مقداری کمتر از ۱ بیانگر محدودیت در انتقال فلز و عدم کارایی گیاه تحت آن تیمار برای فرآیند گیاه‌پالایی می‌باشد (Sharma *et al.*, 2023).

فاکتور تجمع زیستی ریشه

در اثر متقابل باکتری و مایکوریزا بیشترین فاکتور تجمع زیستی ریشه در تیمار باکتری سودوموناس فلورسنس×بدون مایکوریزا مشاهده شد که به‌طور معنی‌داری ۶۹/۴۴ درصد بالاتر از شاهد (۰/۷۲) بود. سایر تیمارها مانند تیمار باکتری سودوموناس فلورسنس×مایکوریزا و تیمار باکتری پانتوئه آگلومرانس× بدون مایکوریزا نیز بالاتر از شاهد بودند اما از لحاظ آماری در یک گروه قرار گرفتند، همچنین تیمار باکتری پانتوئه آگلومرانس×مایکوریزا و تیمار بدون باکتری×مایکوریزا نیز با شاهد اختلاف معنی‌داری نشان ندادند (شکل ۷، a)، کمترین مقدار فاکتور تجمع زیستی نیز در تیمار بدون باکتری×مایکوریزا مشاهده شد.

1- *Sedum alfredii*



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر تیمار باکتری×مایکوریزا ، باکتری× EDTA و مایکوریزا×EDTA بر فاکتور تجمع زیستی ریشه در سورگوم علوفه‌ای در خاک آلوده به کادمیوم

شکل a شاهد (بدون باکتری و بدون مایکوریزا)، شکل b شاهد (بدون باکتری و بدون EDTA)، شکل c شاهد (بدون مایکوریزا و بدون EDTA)، B1 (بدون باکتری)، B2 (باکتری پانتوئه آگلومرانس)، B3 (باکتری سودوموناس فلورسنس)،S1 (بدون EDTA)، S2 (با EDTA)، M1 (بدون مایکوریزا)، M2 (با مایکوریزا).

Figure 7- Comparison of the mean effect of bacterial treatment × mycorrhiza, bacterial treatment × Na-EDTA, and mycorrhizal treatment × Na-EDTA on the root bioaccumulation factor in *Sorghum bicolor* L. in cadmium-contaminated soil

Control in figure a (No bacterial and no mycorrhiza), Control in figure b (No bacterial and no Na-EDTA), Control in figure c (No mycorrhizal and no Na-EDTA), B1 (No bacteria), B2 (*Pantoea agglomerans* Bacteria), B3 (*Pseudomonas fluorescens* Bacteria), S1 (No Na-EDTA), S2 (With Na-EDTA), M1 (No mycorrhiza), M2 (with mycorrhiza).

همچنین در اثر متقابل باکتری و EDTA بیشترین فاکتور تجمع زیستی ریشه در تیمار باکتری سودوموناس×با EDTA مشاهده شد که حدود ۳/۱ برابر یا ۲۱۶/۶۶ درصد نسبت به شاهد (۰/۴۸) افزایش نشان داد (شکل ۷، b). کمترین مقدار فاکتور تجمع زیستی ریشه نیز در شاهد مشاهده شد. همچنین در اثر متقابل مایکوریزا و EDTA بیشترین فاکتور تجمع زیستی ریشه مربوط به تیمار بدون مایکوریزا × EDTA بود که حدود ۱۰۱/۵۴ درصد نسبت به شاهد (۰/۶۵) افزایش نشان داد (شکل ۷، c). کمترین مقدار فاکتور تجمع زیستی نیز در تیمار مایکوریزا×بدون EDTA مشاهده شد.

این نتیجه نشان‌دهنده تأثیر مثبت EDTA بر افزایش جذب و تجمع کادمیوم در ریشه است. باکتری سودوموناس با تولید سیدروفورها و اسیدهای آلی، موجب افزایش جذب فلزات سنگین در ریشه می‌شود (Lozano-González *et al.*, 2023).در تحقیقی روی گیاه ماش[1] باکتری سودوموناس فلورسنس با افزایش انباشت فلزات در ریشه، از انتقال آن‌ها به اندام‌های هوایی جلوگیری کرده و تحمل گیاه را بهبود بخشید(Saini *et al.*, 2024). در پژوهش حاضر در تیمار ترکیبی سودوموناس فلورسنس×EDTA، همزمان فاکتور تجمع زیستی ریشه و فاکتور انتقال به‌طور معنی‌داری افزایش یافتند؛ به‌گونه‌ای که تجمع کادمیوم در ریشه بیش از سه برابر و انتقال آن به اندام هوایی نیز بیش از سه برابر شاهد بود. یافته تحقیق حاضر با نتایج پژوهش‌های الحاجی و همکاران (Alhaj Hamoud *et al.*, 2025) همسو است. به‌طور خاص این اثر هم‌افزایی ناشی از افزایش همزمان زیست‌فراهمی فلز و بهبود عملکرد سیستم ریشه‌ای است (Cao *et al.*, 2025). تیمار EDTA همراه با مایکوریزا کاهش نسبی تجمع کادمیوم را نسبت به تیمار EDTA × بدون مایکوریزا نشان داد که می‌تواند به‌دلیل آثار بازدارنده و سمی EDTA بر رشد و کارایی قارچ‌های مایکوریزایی و همچنین اختلال در فرآیند همزیستی در حضور غلظت‌های بالای کمپلکس کادمیوم–EDTA باشد (Zhao *et al.*, 2024).

1- *Vigna radiata*

جدول ٤- تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایشی بر غلظت کادمیوم و شاخص‌های گیاه پالایی سورگوم علوفه‌ای در خاک آلوده به کادمیوم

Table 4- Analysis of variance (ANOVA) of the effect of experimental treatments on cadmium concentration and phytoremediation indices of *Sorghum bicolor* L. in cadmium-contaminated soil

منابع تغییرات s.o.v	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Mean squares					
		کادمیوم اندام هوایی Cd-aerial parts	کادمیوم ریشه Cd-root	کادمیوم خاک Cd-soil	فاکتور انتقال Translocation Factor	فاکتور تجمع زیستی ریشه Bioaccumulation factor in root	شاخص تحمل Tolerance Index
باکتری Bacteria	2	43.52***	44165***	69093***	0.3375***	0.2079***	0.01472
مایکوریزا Mycorrhiza	1	19.48***	24752***	19200***	0.1167***	0.0806***	0.00118
EDTA Na-EDTA	1	304.51***	273914***	420376***	2.0980***	1.2162***	0.02105
باکتری×مایکوریزا Bacteria × Mycorrhiza	2	0.09	1776***	290	0.0000	0.0023**	0.00372
EDTA×باکتری Bacteria × Na-EDTA	2	0.55*	2590***	2103***	0.0397***	0.0274***	0.04705
EDTA×مایکوریزا Mycorrhiza × Na-EDTA	1	0.14	7	8	0.0034**	0.0023*	0.00008
EDTA×باکتری×مایکوریزا Bacteria × Mycorrhiza × Na-EDTA	2	0.14	79	204	0.0002	0.0003	0.00092
خطا Error	36	0.11	148	131	0.0004	0.0003	0.01568
ضریب تغییرات (٪) (%) C.V		11.59	20.36	20.29	22.4	21.01	11.07

بدون علامت، *، ** و *** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵، ۱ و ۰/۰۱ درصد.

ns, *, ** and *** indicate non-significance and significance at the probability level of 5, 1 and 0.01%, respectively.

شاخص تحمل

هیچ‌یک از اثرات اصلی یا متقابل تیمارها بر شاخص تحمل معنی‌دار نبودند (جدول ۴). این یافته ممکن است ناشی از پایداری نسبی شاخص تحمل تحت شرایط مختلف تیماردهی باشد. همچنین می‌توان احتمال داد که شاخص تحمل در گیاه سورگوم بیش از آن‌که تحت تأثیر فاکتورهای خارجی قرار گیرد، به‌طور عمده تابع صفات ژنتیکی و سازوکارهای درونی آن در مقاومت به فلزات سنگین است. در مطالعه روی گیاه سویا[1] نیز مشاهده شده که شاخص تحمل در برخی شرایط تنش، حساسیت کمتری نسبت به تیمارهای زیستی از خود نشان داد (Noor *et al.*, 2024). همچنین، در مطالعه‌ای روی گیاه اسفناج[2] گزارش شد که شاخص تحمل تنها در سطوح بالای کاربرد EDTA یا آلودگی شدید کادمیوم واکنش معنی‌دار نشان داده است (Javed *et al.*, 2024). پیشنهاد می‌شود در مراحل بعدی، آزمایش‌هایی با سطوح بالاتر تنش یا مدت زمان طولانی‌تر اجرا گردد تا پاسخ‌های تأخیری یا تجمعی در شاخص تحمل بهتر آشکار گردد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که کاربرد ترکیبی باکتری‌های محرک رشد، به‌ویژه سودوموناس فلورسنس و EDTA، کارایی گیاه‌پالایی سورگوم علوفه‌ای را در خاک آلوده به کادمیوم به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد. این ترکیب نه‌تنها جذب و انتقال کادمیوم به اندام‌های هوایی و ریشه را تقویت کرد، بلکه غلظت کادمیوم قابل جذب خاک را به‌طور مؤثری کاهش داد. استفاده منفرد باکتری‌ها نیز مساحت برگ را بهبود بخشید که نشان‌دهنده تأثیر مثبت آن‌ها بر رشد و کارایی فتوسنتزی گیاه است. مایکوریزا نیز با تثبیت بخشی از کادمیوم در ریزوسفر و ساختارهای هیفی خود نقش مؤثری در کاهش انتقال فلز به اندام‌های هوایی داشت.

1- *Glycine max*

2- *Spinacia oleracea*

این یافته‌ها بر اهمیت استفاده هدفمند از تیمارهای زیستی و شیمیایی برای بهینه‌سازی فرآیند گیاه‌پالایی تأکید دارد. نتایج این مطالعه می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای توسعه پروتکل‌های عملی در پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مورد استفاده قرار گیرد و راهکارهای پایداری را برای مدیریت بوم‌سامانه‌های کشاورزی ارائه دهد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، اثرات طولانی‌مدت این تیمارها و سطوح مختلف آلودگی بررسی شود تا کارایی و پایداری این روش‌ها در شرایط واقعی مزرعه تأیید گردد.

سپاسگزاری

از دانشگاه‌های لرستان، رازی و خوارزمی به‌دلیل تأمین امکانات و همکاری لازم جهت انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می شود.

References

1. Abou Jaoudé, R., Luziatelli, F., Ficca, A.G., & Ruzzi, M. (2024). A plant's perception of growth-promoting bacteria and their metabolites. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1332864. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1332864
2. Akhgar, A., Ahmadinia, E., & Shirani, H. (2020). Effect of phosphate solubilizing fluorescent pseudomonads on cadmium uptake by corn in contaminated soil. *Journal of Siol Biology*, *8*(1), 1-14. (In Persian). https://sid.ir/paper/403640/en
3. Al-Dokhi, O., Mukhtar, A., Al-Dosary, A., & Al-Sadoon, M.K. (2015). Ultrastructural differentiation of sperm tail region in *Diplometopon zarudnyi* (an amphisbaenian reptile). *Saudi Journal of Biological Sciences*, *22*(4), 448-454. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.05.002
4. Alhaj Hamoud, Y., Shaghaleh, H., Saleem, M.H., Alshaharni, M.O., Alqurashi, M., Alhelaify, S.S., Alharthy, O.M., Fayad, E., & Rastogi, A. (2025). Eco-friendly role of Serratia marcescens and Pseudomonas fluorescens in enhancing rice growth and mitigating cadmium toxicity via uptake modulation and antioxidant regulation. *BMC Plant Biology*, *25*, 718. https://doi.org/10.1186/s12870-025-06693-6
5. Alamo-Nole, L., & Estrella-Martinez, B. (2022). Phytoremediation of CdS/Te quantum dots by *Ocimum basilicum* in the presence of EDTA. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, *20*, 827–834. https://doi.org/10.1007/s40201-022-00822-1
6. Anwar, S., Shafaqat, A., Rizwan, M., Ali, S., Zia-ur-Rehman, M., Ibrahim, M., & Abbas, F. (2017). Impact of chelator-induced phytoextraction of cadmium on yield and ionic uptake of maize. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*(6), 5521–5530. https://doi.org/10.1007/s11356-016-8246-0
7. Bashir, S., Javed, S., Al-Anazi, K. M., Farah, M.A., & Ali, S. (2022). Bioremediation of cadmium toxicity in wheat (*Triticum aestivum* L.) plants primed with L-proline, *Bacillus subtilis* and *Aspergillus niger*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(19), 12683. https://doi.org/10.3390/ijerph191912683
8. Black, C.A. (Ed.). (1965). *Methods of soil analysis: Part 2*. Chemical and microbiological properties. Madison, WI: American Society of Agronomy.
9. Bouyoucos, G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*, *54*(5), 464–465. https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x
10. Cao, X., Dong, Q., Mao, L., Yang, X., Wang, X., & Zou, Q. (2025). Enhanced phytoextraction technologies for the sustainable remediation of cadmium-contaminated soil based on hyperaccumulators—a review. *Plants*, *14*(1), 115. https://doi.org/10.3390/plants14010115
11. Chapman, H.D., & Kelley, W.P. (1930). The determination of the replaceable bases and the base-exchange capacity of soils. *Soil Science*, *30*(5), 391-406. https://doi.org/10.1097/00010694-193011000-00004
12. Chellaiah, E.R. (2018). Cadmium (heavy metals) bioremediation by *Pseudomonas aeruginosa*: A minireview. *Applied Water Science*, *8*, 154. https://doi.org/10.1007/s13201-018-0796-5
13. Chen, B., Luo, S., Wu, Y., Ye, J., Wang, Q., Xu, X., Pan, F., Khan, K.Y., Tian, X., Hu, Y., & Yang, X. (2017). The effects of the endophytic bacterium *Pseudomonas fluorescens* Sasm05 and IAA on the plant growth and cadmium uptake of *Sedum alfredii* Hance. *Frontiers in Microbiology*, *8*, 2538. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02538
14. Chen, Y., Yu, Y., Fang, X., Zhou, Y., & Lu, D. (2024). How *Pseudomonas nitroreducens* passivates cadmium to inhibit plant uptake. *Applied Sciences*, *14*(7), 2857. https://doi.org/10.3390/app14072857
15. Chen, J., Guo, J., Li, Z., Liang, X., You, Y., Li, M., He, Y., & Zhan, F. (2022). Effects of an arbuscular mycorrhizal fungus on the growth of and cadmium uptake in maize grown on polluted wasteland, farmland and slopeland soils in a lead-zinc mining area. *Toxics*, *10*(7), 359. https://doi.org/10.3390/toxics10070359
16. Chi, Y., Ma, X., Chu, S., You, Y., Chen, X., Wang, J., Wang, R., Zhang, X., Zhang, D., Zhao, T., Zhang, D., & Zhou, P. (2025). Nitrogen cycle induced by plant growth-promoting rhizobacteria drives "microbial partners" to enhance cadmium phytoremediation. *Microbiome*, *13*, 113. https://doi.org/10.1186/s40168-025-02113-x
17. Chiranjeevi, M., Goudar, G.D., Krishnaraj, P.U., & Yalavarthi, N. (2024). Study on effect of plant growth promoting rhizobacteria on sorghum (*Sorghum bicolor* L.) under gnotobiotic conditions. *Frontiers in Microbiology*, *15*, 1374802. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1374802

18. Dhawi, F., Datta, R., & Ramakrishna, W. (2016). Mycorrhiza and heavy metal resistant bacteria enhance growth, nutrient uptake and alter metabolic profile of sorghum grown in marginal soil. *Chemosphere*, *157*, 33–41. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.04.112
19. Fang, X., Lee, X., Twagirayezu, G., Cheng, H., Lu, H., Huang, S., Deng, L., & Ji, B. (2024). A critical review of the effectiveness of biochar coupled with arbuscular mycorrhizal fungi in soil cadmium immobilization. *Journal of Fungi*, *10*(3), 182. https://doi.org/10.3390/jof10030182
20. Gouda, S., Kerry, R.G., Das, G., Paramithiotis, S., Shin, H.S., & Patra, J.K. (2018). Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture: A review. *Frontiers in Microbiology*, *9*, 1473. https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.08.016
21. Grembecka, M., & Szefer, P. (2013). Comparative assessment of essential and heavy metals in fruits from different geographical origins. *Environmental Monitoring and Assessment*, *185*(11), 9139–9160. https://doi.org/10.1007/s10661-013-3242-z
22. Haider, F.U., Liqun, C., Coulter, J.A., Cheema, S.A., Wu, J., Zhang, R., Wenjun, M., & Farooq, M. (2021). Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *211*, 111887. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111887
23. Javed, S., Anwaar, N., Zahoor, A.F., Haider, M.Z., Azeem, M., Gul, S., & Aftab, A. (2024). Cadmium stress mitigation in different cultivars of spinach (*Spinacia oleracea*) with foliar application of ascorbic acid. *Russian Journal of Plant Physiology*, *71*, 40. https://doi.org/10.1134/S1021443723603324
24. Jia, W., Lv, S., Feng, J., Li, J., Li, Y., & Li, S. (2016). Morphophysiological characteristic analysis demonstrated the potential of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) in the phytoremediation of cadmium-contaminated soils. *Environmental Science and Pollution Research*, *23*(18), 18823-18831. https://doi.org/10.1007/s11356-016-7083-5
25. Kchikich, A., Amraoui, B.E., Nhhala, N., Krid, A., Kchikich, A., Kounnoun, A., El Khalloufi, F., El Khalloufi, A., & Nhiri, N. (2025). Mitigating heavy metals toxicity in sorghum using arbuscular mycorrhizal fungi: Enhancing photosynthesis and antioxidant defense. *Protoplasma*, 1–13. https://doi.org/10.1007/s00709-025-02095-5
26. Kchikich, A., Roussi, Z., Krid, A., Nhhala, N., Ennoury, A., Benmrid, B., Kounnoun, A., El Maadoudi, M., Nhiri, N., & Mohamed, N. (2024). Effects of mycorrhizal symbiosis and *Ulva lactuca* seaweed extract on growth, carbon/nitrogen metabolism, and antioxidant response in cadmium-stressed sorghum plant. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, *30*(4), 605-618. https://doi.org/10.1007/s12298-024-01446-5
27. Kumar, A., Dadhwal, M., Mukherjee, G., Srivastava, A., Gupta, S., & Ahuja, V. (2024). Phytoremediation: Sustainable approach for heavy metal pollution. *Scientifica*, *2024*(1), 3909400. https://doi.org/10.1155/2024/3909400
28. Lambert, R.J.W., Hanlon, G.W., & Denyer, S.P. (2004). The synergistic effect of EDTA/antimicrobial combinations on *Pseudomonas aeruginosa*. *Journal of Applied Microbiology*, *96*(2), 244–253. https://doi.org/ 10.1046/j.1365-2672.2004.02135.x
29. Lozano-González, J.M., Valverde, S., Montoya, M., Martín, M., Rivilla, R., Lucena, J.J., & López-Rayo, S. (2023). Evaluation of siderophores generated by *Pseudomonas* bacteria and their possible application as Fe biofertilizers. *Plants*, *12*(23), 4054.
30. Lindsay, W.L., & Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, *42*(3), 421–428. https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x
31. Liu, L., Li, J., Yue, F., Yan, X., Wang, F., Bloszies, S., & Wang, Y. (2018). Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation and biochar amendment on maize growth, cadmium uptake and soil cadmium speciation in Cd-contaminated soil. *Chemosphere*, *194*, 495–503. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.025
32. National Research Council, Committee on Long-Range Soil, & Water Conservation Policy. (1993). *Soil and water quality: An agenda for agriculture*. National Academies Press. https://doi.org/10.2134/jeq1995.00472425002400020029x
33. Noor, J., Ahmad, I., Ullah, A., Iqbal, B., Anwar, S., Jalal, A., Okla, M.K., Alaraidh, I.A., Abdelgawad, H., & Fahad, S. (2024). Enhancing saline stress tolerance in soybean seedlings through optimal NH_4^+/NO_3^- ratios: A coordinated regulation of ions, hormones, and antioxidant potential. *BMC Plant Biology*, *24*, 572. https://doi.org/10.1186/s12870-024-05294-z
34. Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1980). Total nitrogen analysis of soil and plant tissues. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, *63*(4), 770–778. https://doi.org/10.1093/jaoac/63.4.770
35. Olsen, S.R., & Sommers, L.E. (1982). Phosphorus. In A. L. Page, R. H. Miller, & D. R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 2. Chemical and microbiological properties* (2nd ed., pp. 403–430). Madison, WI: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c24
36. Prokop, Z., Cupr, P., & Zlevorova-Zlamalikova, V. (2003). Mobility, bioavailability, and toxic effects of cadmium in soil samples. *Environmental Research*, *91*(2), 119–126. https://doi.org/10.1016/s0013-9351(02)00012-9
37. Qin, H., Wang, Z., Sha, W., Song, S., Qin, F., & Zhang, W. (2024). Role of plant-growth-promoting rhizobacteria in plant machinery for soil heavy metal detoxification. *Microorganisms*, *12*(4), 700.

https://doi.org/10.3390/microorganisms12040700
38. Rajkumar, M., Ae, N., Prasad, M.N.V., & Freitas, H. (2010). Potential of siderophore-producing bacteria for improving heavy metal phytoextraction. *Soil Biology and Biochemistry*, *42*(3), 503-510. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2009.12.002
39. Randriamamonjy, S., Mouret, A., Metzger, E., Gaudin, P., La, C., Capiaux, H., ... & Lebeau, T. (2021). 2D distribution of *Pseudomonas fluorescens* activities at the soil-root interface of sunflower grown on vineyard soils: Effects on copper uptake. *Soil Biology and Biochemistry*, *163*, 108462. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108462
40. Rauf, M., Naveed, M., Munir, M., Ghafoor, A., Sattar, M.N., Ali-Dinar, H., Mohamed, H.A., Bashir, M.A., Asif, M., & Mustafa, A. (2025). Revitalizing cadmium-stressed sunflower: Co-composted biochar improves growth, antioxidant responses, and soil remediation efficiency. *BMC Plant Biology*, *25*, 875. https://doi.org/ 10.1186/s12870-025-07098-1
41. Rizvi, A., Zaidi, A., Ameen, F., Ahmed, B., AlKahtani, M.D.F., & Khan, M.S. (2020). Heavy metal induced stress on wheat: phytotoxicity and microbiological management. *RSC Advances*, *10*(64), 38379–38403. https://doi.org/10.1039/D0RA05610C
42. Rizwan, M., Ali, S., Adrees, M., Ibrahim, M., Tsang, D.C., Zia-ur-Rehman, M., & Ok, Y.S. (2017). A critical review on effects, tolerance mechanisms and management of cadmium in vegetables. *Chemosphere*, *182*, 90–105. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.013
43. Saini, N., Singh, S., & Chowdhury, P. (2024). Enhancing *Vigna radiata* growth and reducing metal toxicity with *Pseudomonas* spp. in hydroponic systems. *Current World Environment*, *19*(3), 1434–1446. https://doi.org/10.12944/CWE.19.3.32
44. Saleem, M., Naeem, A.H., Ahmad, Z.Z., & Muhammad, S. (2018). Impact of lead tolerant plant growth promoting rhizobacteria on growth, physiology, antioxidant activities, yield and lead content in sunflower in lead contaminated soil. *Environmental Pollution*, *242*, 1268–1277. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.117
45. Shahid, M., Austruy, A., Echevarria, G., Arshad, M., Sanaullah, M., Aslam, M., Nadeem, M., Nasim, W., & Dumat, C. (2014). EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metals: A Review. *Soil and Sediment Contamination*, *23*(4), 389–416. https://doi.org/10.1080/15320383.2014.831029
46. Sharma, M., Sharma, S., Paavan, P., Gupta, M., Goyal, S., Talukder, D., Akhtar, M.S., Kumar, R., Umar, A., Alkhanjaf, A.A.M., & Baskoutas, S. (2024). Mechanisms of microbial resistance against cadmium–a review. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, *22*(1), 13-30. https://doi.org/10.1007/s40201-023-00887-6
47. Sharma, J.K., Kumar, N., Singh, N.P., & Santal, A.R. (2023). Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1076876. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1076876
48. Ullah, S., Ikram, M., Sarfaraz, S., ul Haq, I., Khan, A., Murad, Z., & Munsif, F. (2024). Influence of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on the growth and yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.) under salt stress. *Journal of Crop Health*, *76*, 1221–1234. https://doi.org/10.1007/s10343-024-01006-7
49. U.S. Salinity Laboratory Staff. (1954). L.A. Richards (Ed.). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. USDA Handbook No. 60. U.S. Govt. Print. Office, Washington, DC. https://doi.org/10.2134/agronj1954.00021962004600060019x
50. Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, *37*(1), 29–38. https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003
51. Wilkins, D.A. (1978). The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth. *New Phytologist*, *80*(3), 623–634. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1978.tb01595.x
52. Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q., & Ma, L.Q. (2006). Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of The Total Environment*, *368*(2–3), 456–464. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.01.016
53. Zayed, A., Gowthaman, S., & Terry, N. (1998). Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: I. Duckweed. *Journal of Environmental Quality*, *27*(3), 715–721. https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700030032x
54. Zhang, P., Li, J., Li, T., Li, X., Lu, Y., & Wu, J. (2024). Transcriptome analysis of potassium-mediated cadmium accumulation in sweet sorghum. *Plant Physiology and Biochemistry*, *215*, 109064. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.109064
55. Zhao, S., Yan, L., Kamran, M., Liu, S., & Riaz, M. (2024). Arbuscular mycorrhizal fungi-assisted phytoremediation: A promising strategy for cadmium-contaminated soils. *Plants*, *13*(23), 3289. https://doi.org/10.3390/plants13233289

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 40, No. 1, Spring. 2026, p. 89-109

The Effect of Land Use Change on Root Characteristics and Soil Enzyme Dynamics in the Hyrcanian Ecosystem

F. Heidari[1], Y. Kooch[1*]

1- Department of Range Management. Faculty of Natural Resources & Marine Sciences. Tarbiat Modares University. Noor. Iran

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

Received: 10 February 2026
Revised: 25 May 2026
Accepted: 01 June 2026
Available Online: 01 June 2026

How to cite this article:
Heidari, F., & Kooch, Y. (2026). The effect of land use change on root characteristics and soil enzyme dynamics in the Hyrcanian ecosystem. *Journal of Water and Soil, 40*(1), 89-108. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97791.1526

Introduction

The Hyrcanian region, one of the richest forest ecosystems in Iran, is characterized by dense and diverse vegetation that plays a fundamental role in environmental sustainability, regulation of biogeochemical cycles, and support of biodiversity. However, in recent years, increasing human pressures and unsustainable land-use practices have led to the degradation of parts of the Caspian forest ecosystems and a substantial reduction in vegetation cover in some areas. In this context, fine roots, due to their crucial role in nutrient cycling and high sensitivity to land-use changes, together with coarse roots because of their structural functions, and soil enzymes as sensitive indicators of land management, are considered effective tools for assessing the impacts of land-use change on ecosystem functioning. Therefore, this study aimed to investigate the effects of vegetation degradation and restoration on root characteristics and soil enzyme activities in the Caspian region.

Materials and Methods

The study area is located in Kelarabad district, western Mazandaran Province, Iran. Seven different land-use types were selected in the study area, including (1) natural forest, (2) degraded forest, (3) afforestation with *Alnus subcordata* C. A. Mey., (4) afforestation with *Acer insigne* Boiss, (5) mixed afforestation with *Alnus subcordata* C. A. Mey.– *Acer insigne* Boiss., (6) afforestation with the non-native coniferous species *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl., and (7) prairie. For each vegetation type, three one-hectare sample plots (100 × 100 m) were established. Within each plot, soil samples were collected from the four corners at three depths (0–10, 10–20, and 20–30 cm) using a 30 × 30 cm sampling frame. Consequently, a total of 36 soil samples were collected from each habitat. Simultaneously, root samples were collected from the 0–30 cm depth within the same sampling units, resulting in 12 root samples per habitat, which were then transported to the laboratory. After transfer to the laboratory, root traits and soil properties were determined using standard analytical methods. All statistical analyses were performed using SPSS software (version 22). In addition, principal component analysis (PCA) was conducted using PC-ORD software to examine the relationships among vegetation cover, root characteristics, and soil enzyme activities across different soil depths.

Results and Discussion

The results of the assessment of root and soil ecochemical characteristics across the studied habitats indicated that the highest fine-root biomass and coarse root biomass occurred in the natural forest habitat. Specifically, coarse root biomass (482.38 kg ha^{-1}) and the concentrations of carbon (40.72%), nitrogen (0.51%), phosphorus (2.64%), potassium (1.56%), calcium (0.77%), and magnesium (0.42%) in fine roots were higher in the natural forest than in the other habitats. In contrast, the highest carbon-to-nitrogen ratios of both coarse roots (91.92) 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://doi.org/10.22067/jsw.2026.97791.1526

fine roots (89.27) were observed in the degraded forest habitat. Regarding soil enzyme activities, the highest activities of acid phosphatase (420.58 µg PNP g^{-1} h^{-1}), arylsulfatase (310.58 µg PNP g^{-1} h^{-1}), and invertase (198.08 µg glucose g^{-1} 3 h^{-1}) were recorded in the natural forest habitat at the 0–10 cm soil depth. The highest urease activity (33.84 µg NH_4^+ –N g^{-1} 2 h^{-1}) was observed in the *Alnus subcordata*-restored habitat. Across all studied habitats, enzyme activities decreased with increasing soil depth, reaching their lowest values in the deeper soil layers.

Conclusion

The available evidence suggests that land degradation and land-use change, through reductions in vegetation quantity and diversity, can alter soil biological processes and lead to changes in root characteristics and soil enzyme activities. Because these biological indicators play a crucial role in regulating nutrient cycling and maintaining soil quality, understanding their responses to forest degradation and restoration is particularly important, especially in temperate ecosystems. The results of this study demonstrated that natural forest and restored forest habitats, characterized by higher soil enzyme activities, greater root biomass, and more favorable soil ecochemical conditions, exhibited superior biological performance compared with degraded and prairie habitats. Overall, the findings indicate that soil biological indicators—particularly root traits and soil enzyme activities—are sensitive and effective tools for evaluating the success of vegetation restoration and detecting the impacts of degradation in forest ecosystems of the Hyrcanian region. Therefore, the application of these indicators can provide a robust scientific basis for soil quality monitoring and the development of sustainable restoration and management programs in this region.

Acknowledgements

This work is based upon research funded by Iran National Science Foundation (INSF) under postdoctoral research project No.4038546.

Keywords: Coarse root, Fine root, Soil biochemical activity, Soil depth, Vegetation change

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۴۰، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص. ۱۰۹-۸۹

تأثیر تغییر کاربری زمین بر مشخصه‌های ریشه و پویایی آنزیم‌های خاک در اکوسیستم خزری

فاطمه حیدری[۱]- یحیی کوچ[۱*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۱

چکیده

ناحیه خزری یکی از غنی‌ترین اکوسیستم‌های جنگلی ایران است که نقش مهمی در پایداری زیست‌محیطی و چرخه عناصر غذایی دارد. با این حال، تخریب ناشی از فعالیت‌های انسانی موجب کاهش پوشش گیاهی و اختلال در عملکرد زیستی خاک شده است. از آنجاکه مشخصه‌های ریشه و فعالیت آنزیم‌های خاک شاخص‌های حساسی نسبت به تغییر کاربری اراضی هستند، این پژوهش با هدف بررسی اثر تخریب و احیای پوشش گیاهی بر ویژگی‌های ریشه و فعالیت‌های آنزیمی خاک در ناحیه خزری انجام شد. مطالعه در حوزه کلارآباد (غرب مازندران) و در هفت نوع کاربری شامل جنگل طبیعی، جنگل‌کاری آمیخته با گونه پلت- توسکا، جنگل‌کاری خالص با گونه پلت، جنگل‌کاری خالص با گونه توسکا، جنگل‌کاری با گونه غیربومی سکویا، جنگل مخروبه و رویشگاه علف‌زار انجام گرفت. در هر رویشگاه سه قطعه یک‌هکتاری انتخاب و نمونه‌برداری خاک در سه عمق صفر تا۱۰، ۱۰—۲۰ و ۲۰—۳۰ سانتی‌متر انجام شد. هم‌زمان نمونه‌های ریشه از عمق صفر تا۳۰ سانتی‌متر برداشت گردید. بدین منظور در هر یک از رویشگاه‌های مورد مطالعه ۱۲ نمونه ریشه و ۳۶ نمونه خاک از سه عمق مورد مطالعه برداشت و جهت تجزیه و تحلیل به آزمایشگاه انتقال داده شد. ویژگی‌های ریشه، عناصر غذایی ریشه و فعالیت آنزیم‌های خاک با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری و تحلیل آماری کلیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ انجام شد. همچنین از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای بررسی روابط بین پوشش گیاهی، مشخصه‌های ریشه و فعالیت‌های آنزیمی خاک در عمق‌های مختلف استفاده شد. طبق نتایج پژوهش حاضر بیشترین زی‌توده ریزریشه و درشت‌ریشه و نیز بالاترین مقادیر عناصر غذایی ریزریشه در رویشگاه جنگل طبیعی مشاهده شد، در حالی‌که نسبت کربن به نیتروژن ریشه‌ها در جنگل مخروبه بیشینه بود. فعالیت آنزیم‌های اسیدفسفاتاز، آریل‌سولفاتاز و اینورتاز در جنگل طبیعی و در عمق سطحی خاک بیشترین مقدار را داشت و بیشترین فعالیت اوره‌آز در رویشگاه احیاشده با توسکا ثبت شد. در تمامی رویشگاه‌ها با افزایش عمق خاک، فعالیت آنزیم‌ها کاهش یافت. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تخریب و تغییر کاربری اراضی با کاهش پوشش گیاهی موجب افت زی‌توده ریشه و فعالیت آنزیم‌های خاک می‌شود، در حالی‌که رویشگاه‌های طبیعی و احیاشده از عملکرد زیستی مطلوب‌تری برخوردارند. بنابراین، مشخصه‌های ریشه و فعالیت آنزیم‌های خاک شاخص‌های مناسبی برای ارزیابی اثرات تخریب و موفقیت برنامه‌های احیای پوشش گیاهی در جنگل‌های ناحیه خزری محسوب می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: تغییر پوشش گیاهی، درشت‌ریشه، ریزریشه، فعالیت اکوشیمی، عمق خاک

مقدمه

حفاظت از آب و خاک و تأمین بخشی از نیازهای انسانی، از جمله مهم‌ترین دلایلی بوده که جنگل‌ها و مراتع از گذشته تاکنون مورد توجه قرار گرفته‌اند. پوشش گیاهی و اکوسیستم‌های طبیعی، بویژه جنگل‌ها و مراتع، در برگیرنده منابع عظیمی از ذخایر ژنتیکی و تنوعی از گونه های گیاهی هستند که بخش بزرگی از تنوع زیستی را در خود جای داده‌اند و نقشی حیاتی در حفظ تعادل زیست‌بومی ایفا می‌کنند (Kiapash *et al.*, 2017; Košanin *et al.*, 2023). یکی از مهمترین خدمات اکوسیستمی جنگل‌ها و مراتع، اثرات پوشش گیاهی این اکوسیستم‌ها بر روی خاک است. پوشش گیاهی به‌عنوان یک عنصر حیاتی در کره زمین، نقش بسزایی در حفظ تعادل اکولوژیکی، کنترل آب و هوا (اقلیم)، حفاظت از رویشگاه‌ها، خاک و فرسایش را ایفا می کند (Wright *et al.*, 2021). شرایط نامساعد محیطی، رشد سریع جمعیت و افزایش تقاضا برای سوخت، محصولات زراعی، پناهگاه و مسائلی از این قبیل موجب شده که پوشش طبیعی زمین و جنگل‌ها با سرعت هشداردهنده‌ای تخریب شود (Boromand *et al.*, 2015). در حال حاضر حجم عظیمی از سطوح جنگلی و علف‌زار دچار تخریب شده است که این تخریب، با اختلال در ویژگی‌های فیزیکی و اکولوژیکی و

۱- گروه مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: yahya.kooch@modares.ac.ir

https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97791.1526

کاهش بهره‌وری زمین آشکار می‌شود، یک خطر محیطی عمده است که امنیت غذایی و معیشت پایدار را در سراسر جهان تهدید می‌کند (Cowie *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2023).

یکی از چالش‌های مهم اقتصادی- اجتماعی بسیاری از کشورها از جمله ایران، تخریب پوشش گیاهی است. در طی چند دهه گذشته وسعت پوشش گیاهی اراضی ایران به میزان قابل ملاحضه‌ای کاهش یافته است که تخریب رویشگاه‌های طبیعی منجر به تخریب زمین و خاک می‌شود (Kohestani *et al.*, 2021). تخریب اکوسیستم‌های طبیعی و تغییرات پوشش طبیعی عواقب جدی بر اکوسیستم‌ها دارد و سبب از بین رفتن بسیاری از خدمات اکوسیستمی می‌شود (Kamiab & Shabani, 2019). به دنبال تخریب جنگل، کاهش و تغییر پوشش گیاهی، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در مشخصه‌های لاشبرگ و خاک ایجاد می‌شود. این تخریب با کاهش کیفیت و ورودی مواد آلی و ریزش لاشبرگ‌ها به خاک و تسریع تجزیه لاشبرگ همراه است که در نتیجه منجر به فرسایش خاک، کاهش حاصلخیزی و اختلال در چرخه عناصر غذایی خاک و کاهش میکروارگانیسم‌های خاک می‌شود (Zarafshar *et al.*, 2019). فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه جنگل‌زدایی، تأثیر قابل توجهی بر کیفیت خاک دارد. به‌عبارت دیگر، از بین بردن پوشش گیاهی می‌تواند به‌طور مستقیم به کاهش کیفیت خاک منجر شود. از این‌رو، ارزیابی کیفیت خاک به‌عنوان یک شاخص مهم در مدیریت پایدار خاک به‌شمار می‌آید (Kooch *et al.*, 2018). به‌طور کلی ویژگی‌های زیستی و اکوشیمیایی خاک، به‌دلیل حساسیت بالا به تغییرات مدیریتی، شاخص‌های مناسبی برای ارزیابی کیفیت و سلامت خاک در زیستگاه‌های طبیعی محسوب می‌شوند و در مقایسه با سایر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک، تأثیر بیشتری از تخریب و احیاء پوشش گیاهی می‌پذیرند (Dipesh & Schuler, 2013).

ریشه‌های گیاهان، شامل ریزریشه‌ها (با قطری کمتر از ۲ میلی‌متر) و درشت‌ریشه‌ها (با قطری بیش از ۲ میلی‌متر)، بخش قابل‌توجهی از اجزای زیرزمینی خاک را در اکوسیستم‌های طبیعی تشکیل می‌دهند. ریزریشه‌ها نقش اساسی در جریان کربن و چرخه عناصر غذایی در خاک ایفا می‌کنند (Dipesh & Schuler, 2013). ازاین‌رو، میزان تولید و نرخ تجزیه آن‌ها تأثیر مستقیمی بر فرآیندهای بیوژئوشیمیایی در اکوسیستم‌های مختلف داشته و به‌عنوان منبع اصلی کربن آلی زیرزمینی، تغییرات مهمی را در ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک ایجاد می‌کنند (Yuan *et al.*, 2011). پوشش گیاهی به واسطه ریزریشه‌ها، آب و عناصر غذایی را از خاک جذب می‌کند (Leuschner & Hertel, 2003). ارزیابی مشخصه‌های ریزریشه‌ها به‌دلیل حساسیت بالای آنها به تغییرات مدیریتی و کوتاه بودن دوره رشد آنها بسیار حائز اهمیت می‌باشد (Azaryan *et al.*, 2021). درشت‌ریشه‌ها، با ابعاد بزرگ‌تر و نقش ساختاری برجسته، عامل مهمی در پایداری و استحکام بخش‌های هوایی گیاهان محسوب می‌شوند (Cardinale *et al.*, 2007). اگرچه فرآیند تجزیه و بازگشت آن‌ها به خاک نسبت به ریزریشه‌ها کندتر است، اما همچنان تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد اکوسیستم‌های گیاهی و پویایی رویشگاه دارند (Tamooh *et al.*, 2008). کاربری اراضی و نحوه بهره‌برداری از زمین، تأثیر مستقیمی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی محیط داشته و در نتیجه، بر وضعیت کلی آنزیم‌های خاک اثرگذار است (Varesteh Khanlari *et al.*, 2020). تنوع، تراکم و زوال پوشش گیاهی می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی بر میزان و الگوی فعالیت آنزیمی خاک تأثیرگذار باشند، چراکه تغییر در ترکیب پوشش گیاهی موجب تغییر در ورود مواد آلی، ریزوسفر گیاهی و شرایط میکروبی محیط خاک می‌شود (Zeng *et al.*, 2009). آنزیم‌های خاک تغییر و تحول عناصر خاک مانند کربن، نیتروژن، فسفر و گوگرد و سایر عناصر را هدایت می‌کنند و تا حدودی منعکس کننده بهره‌برداری عناصر از محصول از عناصر غذایی خاک هستند (Van der Heijden *et al.*, 2008). رابطه بین آنزیم‌ها با مشخصه‌های زیستی و بیوشیمی، سهولت در اندازه‌گیری و عکس‌العمل سریع آنها به تغییرات، آنزیم‌ها به‌عنوان شاخص‌های پتانسیل کیفیت خاک مطرح شده‌اند (Martinez-Salgado *et al.*, 2010). آنزیم اوره‌آز نقش اساسی در فرآیند معدنی‌شدن نیتروژن از ترکیبات آلی ایفا می‌کند. تخریب پوشش گیاهی می‌تواند فعالیت این آنزیم را در خاک تحت تأثیر قرار داده و از طریق تغییر در میزان ورود مواد آلی و پویایی میکروبی، بر چرخه نیتروژن و کارکردهای زیستی خاک اثرگذار باشد (Silva *et al.*, 2019). آنزیم اسیدفسفاتاز به‌دلیل تسریع در فرآیند هیدرولیز استر- فسفات سبب آزادسازی فسفات به خاک می‌شود که می‌تواند توسط گیاهان و جانوران خاکی جذب شود و از آنزیم‌های مؤثر در چرخه فسفر است که در خاک‌های اسیدی فعالیت بیشتری دارد (Pang, 2009). آنزیم آریل‌سولفاتاز نقش مهمی در تجزیه مواد آلی و معدنی دارد و در مقایسه با آنزیم‌های دیگر حساسیت زیادی به تغییرات دارد (Zeng *et al.*, 2009). آنزیم اینورتاز سبب تسریع در فرآیند هیدرولیز ساکاروز می‌شود و شاخص مهمی برای کیفیت خاک است (Pang, 2009). مرور منابع حاکی از آن است که مطالعات پیشین بیشتر بر مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تمرکز داشته‌اند (Mohmedi *et al.*, 2024a; Kooch *et al.*, 2024; Gao *et al.*, 2025) و در خصوص تأثیر تخریب و احیاء پوشش گیاهی با گونه‌های مختلف بر پویایی فعالیت آنزیمی خاک و اجزای زیرزمینی خاک در رویشگاه‌های مختلف، به‌ویژه در ناحیه خزری، مطالعات اندکی انجام شده است.

ناحیه خزری به‌عنوان یکی از غنی‌ترین اکوسیستم‌های جنگلی ایران، با برخورداری از پوشش گیاهی متراکم و متنوع، نقش مهمی در پایداری زیست‌محیطی، تنظیم چرخه‌های بیوژئوشیمیایی و حفظ تنوع زیستی ایفا می‌کند. باوجود این اهمیت، پژوهش‌های پیشین در این منطقه عمدتاً به تغییرات ساختاری پوشش گیاهی یا ویژگی‌های شیمیایی خاک محدود شده‌اند و کمتر مطالعه‌ای به بررسی همزمان

شاخص‌های اکوشیمی خاک و ویژگی‌های ریشه در شرایط تخریب و احیای پوشش گیاهی پرداخته است. از سوی دیگر، افزایش فشارهای انسانی و بهره‌برداری ناپایدار در سال‌های اخیر موجب تخریب بخش‌هایی از این جنگل‌ها و پیدایش رویشگاه‌هایی با پوشش گیاهی ضعیف یا بدون پوشش شده است. در چنین شرایطی، پژوهش حاضر با نگاهی تلفیقی به‌دنبال آن است که نشان دهد تخریب و احیای پوشش گیاهی چگونه بر شاخص‌های اکوشیمی خاک و ویژگی‌های ریشه تأثیر می‌گذارد. برای این منظور، سه هدف (۱) مقایسه شاخص‌های اکوشیمی خاک در رویشگاه‌های تخریب‌یافته، احیاشده و دست‌نخورده؛ (۲) بررسی ویژگی‌های ریشه در این سه شرایط؛ (۳) ارزیابی ارتباط بین نوع پوشش گیاهی و تغییرات شاخص‌های اکوشیمی خاک به‌منظور ارائه مبنایی علمی برای احیای اکوسیستم‌های خزری دنبال می‌شود. به این ترتیب، پژوهش حاضر خلأ موجود در مطالعات پیشین را که نبود بررسی همزمان شاخص‌های اکوشیمی خاک و ویژگی‌های ریشه در شرایط تخریب و احیای پوشش گیاهی است، پر می‌کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد بررسی در رویشگاه‌های جنگلی کلارآباد قرار گرفته است (شکل ۱). حداقل ارتفاع از سطح دریا ۵۰ متر، حداکثر ارتفاع ۱۴۴ متر، شیب منطقه بین صفر تا ۵ درصد و متوسط بارندگی سالانه ۱۳۰۰ میلی‌متر است. بر اساس سامانه طبقه‌بندی خاک USDA، خاک‌های غالب منطقه مورد مطالعه از نظر بافت، از نوع لوم رسی (Clay Loam) و از نظر رده‌بندی ژنتیکی، در گروه آلفی‌سول‌ها (Alfisols) قرار می‌گیرند. این خاک‌ها بر بستر سنگ‌های آهک دولومیتی مربوط به دو دوره زمین‌شناسی ژوراسیک بالایی و کرتاسه پایینی تشکیل شده‌اند. به منظور حفاظت از عرصه‌های جنگلی و باغ‌ها در برابر تصرفات غیرمجاز، حدود ۳۸ هکتار از اراضی حاشیه شمالی پارسل ۱۱۲ (خرماچال) واقع در سری ۱ حوزه ۳۸ طرح جنگل‌داری تیله‌کنار سلمانشهر، در سال ۱۳۶۸ جنگل‌کاری شده است. در این پژوهش، به بررسی ۷ نوع کاربری مختلف در منطقه مورد مطالعه پرداخته شد.

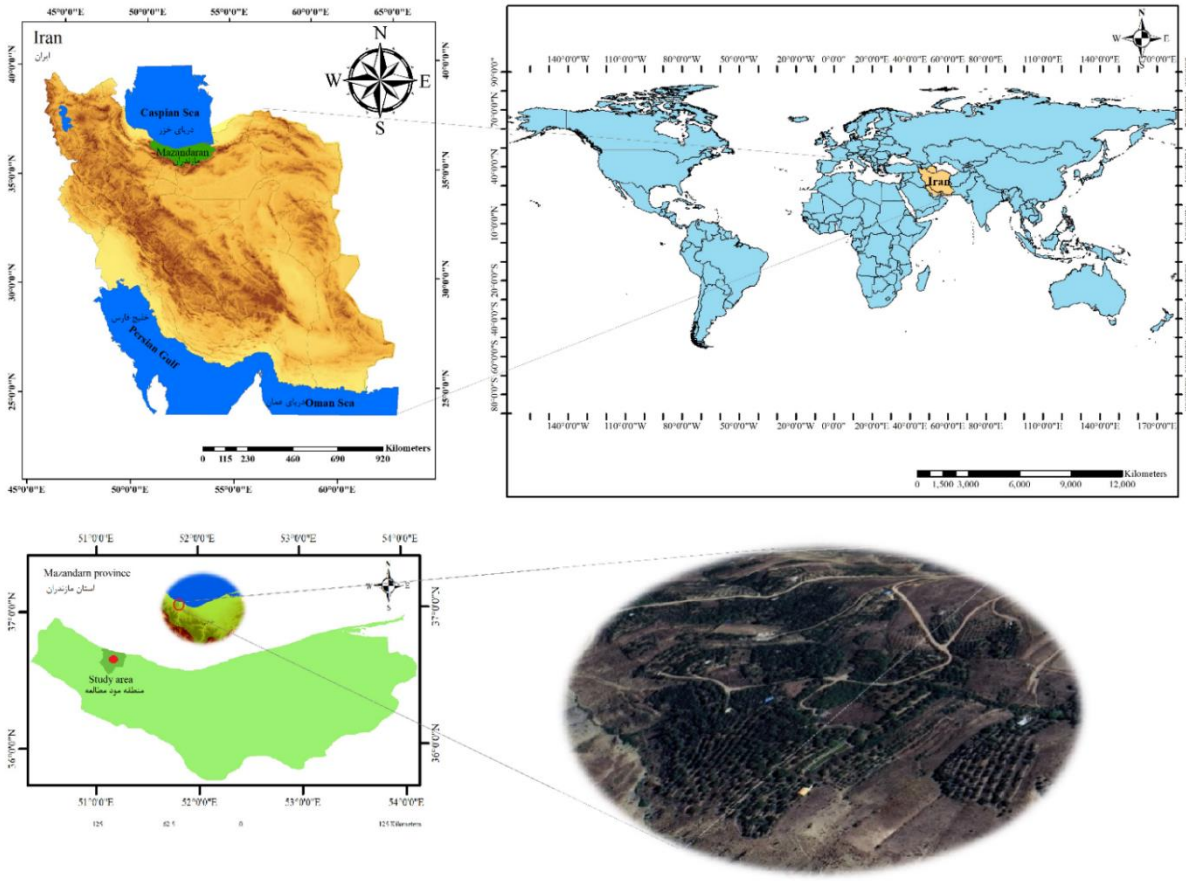
۱. جنگل طبیعی (تقریباً دست نخورده) ممرز و انجیلی
۲. جنگل مخروبه با گونه‌های ممرز و انجیلی
۳. توده دست‌کاشت خالص با گونه پهن‌برگ توسکا
۴. توده دست‌کاشت خالص با گونه پهن‌برگ پلت
۵. توده دست‌کاشت آمیخته با گونه‌های پهن برگ پلت – توسکا
۶. توده دست‌کاشت خالص با گونه سوزنی‌برگ غیربومی سکویا
۷. علف‌زار ثانویه شکل‌گرفته پس از رهاشدگی اراضی با دوره کوتاه کشت، که در حال حاضر تحت غالبیت گونه‌های *Brachypodium pinnatum*، *Microstegium vimineum*، *Oplismenus undulatifolius* و *Setaria viridis* قرار دارد.

فرآیند جمع‌آوری داده‌ها

در این بررسی بخش‌هایی از اراضی فوق‌الذکر که کمترین اختلاف ارتفاع، شیب و جهت شیب را از یکدیگر نشان دادند، به‌عنوان نمونه‌های مطالعاتی انتخاب شدند، شرح تفصیلی هر رویشگاه در جدول ۱ گزارش شده است. سه قطعه نمونه یک هکتاری (۱۰۰ متر × ۱۰۰ متر) در هر یک از پوشش‌های گیاهی فوق‌الذکر مدنظر قرار گرفت. در هر یک از قطعات یک هکتاری، تعداد ۴ نمونه (از چهار گوشه قطعه نمونه یک هکتاری) از لایه معدنی خاک (سطح ۳۰ سانتی‌متر × ۳۰ سانتی‌متر از عمق صفر تا ۱۰، ۲۰–۱۰ و ۳۰–۲۰ سانتی‌متری) برداشت شد. در هر رویشگاه در مجموع ۳۶ نمونه خاک (۴ نمونه × ۳ قطعه نمونه × ۳ عمق) جمع‌آوری شد. هم‌زمان با نمونه‌برداری خاک، نمونه‌های ریشه از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک و در همان واحدهای نمونه‌برداری برداشت گردید که در مجموع ۱۲ نمونه (۴ نمونه × ۳ قطعه نمونه) ریشه در هر رویشگاه برداشت و به آزمایشگاه انتقال داده شد.

تجزیه آزمایشگاهی مشخصه‌های خاک و ریشه

یک بخش از نمونه‌های خاک جهت انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی، پس از هوا خشک شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. مشخصات خاک و ریشه، با بهره‌گیری از روش‌های استاندارد آزمایشگاهی به‌صورت زیر انجام گرفت. بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتری و رطوبت خاک به روش توزین مورد اندازه‌گیری و سنجش قرار گرفت (Jafari Haghighi, 2003). مشخصه‌های شیمیایی خاک شامل: واکنش خاک به روش پتانسیومتری از طریق دستگاه pH متر الکتریکی، هدایت الکتریکی به‌وسیله EC سنج، کربن آلی با استفاده از روش والکی–بلاک و نیتروژن کل به روش کجلدال مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند (Jafari Haghighi, 2003). ریزریشه‌ها و درشت‌ریشه‌ها از نمونه‌ها جداسازی (بر مبنای عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری) و با استفاده از الک ۲ میلی‌متری شستشو داده شدند. سپس نمونه‌ها در آون به‌مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. در نهایت پس از توزین زی‌توده آنها محاسبه گردید (Neatrour *et al.*, 2005). ویژگی‌های ریشه شامل زی‌توده (به روش توزین)، اندازه‌گیری غلظت کربن در درشت‌ریشه و ریزریشه از روش والکی–بلاک و اندازگیری غلظت نیتروژن درشت‌ریشه و ریزریشه از روش کجلدال صورت گرفت (Pransiska *et al.*, 2016).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان مازندران، شمال ایران

Figure 1- Location of the study area in Mazandaran Province, northern Iran

برای اندازه‌گیری غلظت کلسیم، پتاسیم، فسفر و منیزیم ریشه، نمونه‌های ریشه در محلول H_2SO_4 هضم شدند و با استفاده از Thermal-Jarrell-Ash ICP اندازه‌گیری شدند (Parkinso & Allen, 1975). اندازه‌گیری فعالیت آنزیم اوره آز با استفاده از محلول ۲۰۰ میلی‌مول اوره به‌عنوان سوبسترا و تحت شرایط استاندارد (۲ ساعت در دمای ۲۷ درجه سانتی‌گراد) تعیین شد. نرخ فعالیت آنزیم اسید فسفاتاز با استفاده از محلول ۱۵ میلی‌مولار پارانیتروفنل فسفات به‌عنوان سوبسترا و تحت شرایط استاندارد (pH=11 به‌مدت یک ساعت در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد) اندازه‌گیری شد. فعالیت آنزیم آریل سولفاتاز پس از انکوباسیون خاک در پارانیتروفنل سولفات به‌مدت ۱ ساعت و دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد و اندازه‌گیری پارانیتروفنل آزاد شده در طول هیدرولیز آنزیمی توسط اسپکتروفتومتری مدل ۷۵۰۰ UV در طول موج ۴۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. آنزیم اینورتاز از محلول گلوکز ۱/۲ درصد به‌عنوان سوبسترا با دوره انکوباسیون ۳ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد (Alef & Nannipieri, 1995).

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

نخست، نرمال بودن و همگنی واریانس داده‌ها با استفاده از آزمون‌های کولموگروف- اسمیرنوف و لون مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور بررسی تفاوت یا عدم تفاوت مقادیر مشخصه‌های ریشه و فعالیت‌های اکوشیمی خاک در ارتباط با انواع پوشش‌های گیاهی و عمق‌های مختلف خاک به‌ترتیب از تجزیه واریانس یک طرفه و دو طرفه استفاده شد. آزمون دانکن هم به‌منظور مقایسه میانگین داده‌ها بکار گرفته شد. کلیه تجزیه و تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ صورت پذیرفت. همچنین، به‌منظور تعیین ارتباط شاخص اکوشیمی خاک و ریشه در ارتباط با نوع رویشگاه‌ها، آنالیز چند متغیره (PCA) با ایجاد ماتریس حاصله با استفاده از نرم‌افزار Origin Pro 2024b مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱- توصیف پوشش اراضی و ویژگی‌های فیزیوگرافی منطقه مورد مطالعه

Table 1- Description of land covers and physiographic characteristics in study area

رویشگاه Habitat	گونه‌های غالب Dominant species	مشخصه‌های فیزیوگرافی Physiographic characteristics		
		ارتفاع Altitude (m)	شیب Slope (%)	جهت Aspect
جنگل طبیعی Natural Forest	*Carpinus betulus* L. (143 n/ha) *Parrotia persica* C.A. Meyer. (91 n/ha)	105-111	1-4	شمال North
جنگل‌کاری با گونه پلت–توسکا Plantation with Alnus-Acer	*Alnus subcordata* C.A.Mey. +*Acer insigne* Boiss.	110-116	3-5	شمال North
جنگل‌کاری با گونه درختی توسکا Plantation with *Al. Subcordata*	*Alnus subcordata* C.A.Mey.	98-106	2-5	شمال North
جنگل‌کاری با گونه درختی پلت Plantation with *Ac. Insigne*	*Acer insigne* Boiss	107-115	1-4	شمال North
جنگل‌کاری با گونه درختی سکویا Plantation with *S. Semperviren*	*Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl.	103-109	3-5	شمال North
جنگل تخریب یافته Degraded forest	*Carpinus betulus* L (18 n/ha) *Parrotia persica* C.A. Meyer. (10 n/ha)	99-110	2-5	شمال North
علف‌زار Prairie	*Brachypodium pinnatum, Microstegium vimineum, Oplismenus undulatifolius, Setaria viridis*	106-113	1-4	شمال North

جدول ۲- اثر رویشگاه‌های مورد بررسی بر مشخصه‌های خاک

Table 2- The effect of different habitat on soil characteristics

مشخصه‌های خاک Soil properties	رویشگاه Habitat		عمق خاک Depth		عمق × رویشگاه Habitat×Depth	
	مقدار F *F test*	معنی‌داری *P value*	مقدار F *F test*	معنی‌داری *P value*	مقدار F *F test*	معنی‌داری *P value*
شن Sand	3.388	0.003	4.030	*0.019*	0.687	0.763
سیلت Silt	1.772	0.106	10.817	*0.000*	0.243	0.996
رس Clay	4.693	*0.000*	4.408	*0.013*	0.472	0.930
رطوبت Moisture	4.368	0.000	0.077	0.926	0.241	0.996
واکنش خاک pH	15.205	0.000	0.122	0.886	0.151	1.000
هدایت الکتریکی خاک Electrical Conductivity	1.177	0.319	1.573	0.210	0.123	1.000
کربن آلی خاک Total organic C	9.730	0.000	35.730	0.000	0.725	0.727
نیتروژن خاک Total N	20.062	0.000	26.331	0.000	1.753	0.057
نسبت کربن به نیتروژن C/N ratio	5.631	0.000	1.862	0.158	0.562	0.871

نتایج

مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

نتایج به‌دست آمده از اثر رویشگاه‌های مختلف و عمق بر روی مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بجز مشخصه سیلت و هدایت الکتریکی خاک اختلاف معنی‌داری را در رویشگاه‌های مختلف مورد مطالعه نشان داده است.

جدول ۳- میانگین (± اشتباه معیار) مشخصه‌های خاک در اعماق و کاربری‌های مختلف

Table 3- Mean (± standard error) soil properties in different depths and land use

مشخصه‌های خاک Soil properties	عمق (سانتی‌متر) Depth (cm)	رویشگاه Studied sites						
		جنگل طبیعی Natural forest	پلت-توسکا Alnus-Acer	توسکا *Al. Subcordata*	پلت *Ac. Insigne*	سکویا *S. Semperviren*	جنگل مخروبه Degraded forest	علفزار Prairie
شن (درصد) Sand (%)	0-10	23.58±2.59ab	18.41±1.87b	26.16±2.59ab	28.83±3.78a	26.58±2.82ab	31.75±3.96a	33.08±4.58a
	10-20	22.66±1.95	22.75±1.82	24.08±1.78	26.33±3.10	25.66±2.72	26.58±2.95	29.50±4.69
	20-30	20.58±1.22	22.66±2.19	20.66±2.12	24.25±2.42	17.91±1.85	27.16±2.87	24.66±3.87
	Mean	22.27±1.14C	21.27±1.15C	23.63±1.28BC	26.47±1.79A-C	23.38±1.55BC	28.50±1.89AB	29.08±2.53A
سیلت (درصد) Silt (%)	0-10	36.50±3.39	42.91±2.19	33.33±3.52B	34.75±3.80	35.83±2.07	33.58±5.53	37.16±2.85
	10-20	37.91±1.85	44.16±3.38	37.41±2.38AB	39.83±3.19	36.83±3.61	40.91±3.81	42.50±7.80
	20-30	43.33±4.08ab	50.75±2.93a	43.41±3.07Aab	47.00±2.77ab	45.41±2.60ab	40.00±3.25b	48.00±4.07ab
	Mean	39.25±1.88	45.94±1.71	38.05±1.83	40.52±2.02	39.36±1.75	38.16±2.48	42.55±3.08
رس (درصد) Clay (%)	0-10	39.91±2.68	38.66±2.46	40.50±1.95	36.41±4.53	37.58±3.35	34.66±4.61	29.75±3.25
	10-20	39.41±2.04a	33.08±2.39ab	38.50±2.08a	33.83±1.96ab	37.50±3.31a	32.50±3.79ab	28.00±3.96b
	20-30	36.08±3.62a	26.58±2.36b	35.91±3.25a	28.75±1.48ab	36.66±1.39a	32.83±2.62ab	27.33±2.23b
	Mean	38.47±1.62A	32.77±1.58BC	38.30±1.43A	33.00±1.75BC	37.25±1.59AB	33.33±2.11A-C	28.36±1.81C
رطوبت خاک (درصد) Soil moisture (%)	0-10	33.47±2.52	28.91±1.40	30.58±2.32	33.52±2.42	37.93±2.15	32.35±1.83	24.64±2.75
	10-20	34.22±3.01	31.55±4.01	31.54±2.16	33.86±2.55	33.88±1.17	32.48±1.56	25.67±1.61
	20-30	33.81±2.57	32.435.57±	31.61±1.55	34.24±4.77	33.71±0.62	33.13±1.50	26.32±1.48
	Mean	33.83±1.52A	30.96±2.28A	31.24±1.14A	33.87±1.91A	35.17±0.88A	32.65±0.92A	25.54±1.14B
واکنش خاک pH (1:2.5 H_2O)	0-10	7.61±0.14A	6.96±0.19AB	7.17±0.14AB	6.82±0.32B	5.87±0.19C	6.87±0.37AB	6.83±0.23B
	10-20	7.59±0.16A	6.97±0.17BC	7.32±0.13AB	6.98±0.21BC	6.03±0.19D	6.99±0.23BC	6.62±0.22C
	20-30	7.63±0.15A	6.93±0.18B	7.28±0.14AB	6.78±0.26B	6.08±0.28C	6.82±0.24B	6.67±0.23BC
	Mean	7.61±0.08	6.95±0.10	7.26±0.08	6.86±0.15	5.99±0.12	6.89±0.16	6.70±0.13
هدایت الکتریکی خاک (دسی زیمنس بر متر) Electrical Conductivity or EC (ds m^{-1})	0-10	0.38±0.02	0.33±0.03	0.37±0.03	0.33±0.04	0.33±0.01	0.32±0.04	0.30±0.05
	10-20	0.35±0.01	0.38±0.03	0.37±0.04	0.35±0.02	0.31±0.03	0.32±0.05	0.39±0.03
	20-30	0.39±0.03	0.40±0.04	0.39±0.03	0.38±0.05	0.39±0.03	0.35±0.05	0.33±0.05
	Mean	0.39±0.01	0.36±0.01	0.38±0.02	0.36±0.02	0.35±0.01	0.32±0.02	0.32±0.03
کربن آلی خاک (درصد) Total organic C (%)	0-10	4.22±0.19ABb	3.80±0.38ABC	3.87±0.22ABCa	3.49±0.44BC	4.56±0.09Aa	3.11±0.32CDa	2.49±0.36D
	10-20	3.38±0.25Ab	2.87±0.31ABC	2.60±0.28ABCb	2.45±0.28BCD	3.24±0.28ABb	2.20±0.34CDab	1.70±0.22D
	20-30	2.82±0.21Aa	2.88±0.31A	2.17±0.18ABb	2.44±0.31AB	2.47±0.27ABc	2.13±0.27ABb	1.74±0.40B
	Mean	3.48±0.15A	3.18±0.20ABC	2.88±0.17BCD	2.79±0.21CD	3.42±0.19AB	2.48±0.19DE	1.98±0.20E
نیتروژن خاک (درصد) Total N (%)	0-10	0.55±0.07Aa	0.41±0.06Ba	0.42±0.04Ba	0.30±0.05BC	0.26±0.02Ca	0.17±0.01C	0.17±0.02Ca
	10-20	0.33±0.01Ab	0.27±0.04ABab	0.32±0.02Aab	0.27±0.03AB	0.19±0.02BCb	0.15±0.03C	0.13±0.01Cab
	20-30	0.26±0.01Ab	0.20±0.03ABb	0.25±0.04Ab	0.24±0.02AB	0.16±0.01BCb	0.12±0.01C	0.10±0.01Cb
	Mean	0.38±0.03A	0.29±0.03B	0.33±0.02AB	0.27±0.02C	0.21±0.01CD	0.15±0.01DE	0.13±0.01E
نسبت کربن به نیتروژن C/N ratio	0-10	9.39±1.28C	11.80±1.82BCb	9.72±0.59CBC	14.97±2.58ABC	19.52±2.55A	18.98±2.63A	16.80±3.27AB
	10-20	10.58±1.17BC	12.06±1.66BCb	8.86±1.44C	9.87±1.14BC	20.15±3.06A	16.96±3.44AB	15.28±3.01ABC
	20-30	11.75±1.49	18.62±2.86a	13.74±2.68	11.45±2.04	17.99±3.43	22.28±6.09	17.64±3.84
	Mean	10.57±0.76	14.16±1.33	10.77±1.06	12.10±1.18	19.22±1.71	19.41±2.44	16.57±1.91

متغیرهای بافت خاک، کربن و نیتروژن خاک تحت تأثیر عمق خاک قرار گرفتند در حالی‌که هیچ یک از متغیرهای مورد مطالعه تحت تأثیر اثرات متقابل رویشگاه و عمق خاک قرار نگرفتند (جدول ۲). بیشترین مقادیر شن خاک مربوط به رویشگاه علف‌زار می‌باشد و کمترین میزان این متغیر در رویشگاه جنگل طبیعی و رویشگاه جنگل‌کاری شده با گونه پلت- توسکا مشاهد شد. درصد سیلت خاک تحت تأثیر رویشگاه قرار نگرفت و کمترین درصد رس خاک متعلق به رویشگاه علف‌زار بود. بیشترین میزان رطوبت خاک متعلق به رویشگاه جنگل طبیعی و رویشگاه پلت با میزان ۳۳/۸۰ درصد و کمترین آن در رویشگاه علفزار با میزان ۲۲/۵۴ درصد ثبت شد. رویشگاه سکویا مقادیر پایینی از مقدار pH، خاک را نشان می‌دهد در حالی‌که در رویشگاه جنگل طبیعی مقادیر بالاتری از pH خاک ثبت شد. کمترین میزان هدایت الکتریکی خاک متعلق به رویشگاه علف‌زار و جنگل تخریب یافته بود، در حالی‌که بالاترین میزان این متغیر در رویشگاه جنگل طبیعی مشاهده شد هر چند که این مشخصه تحت تأثیر رویشگاه و عمق قرار نگرفتند. بیشترین میزان محتوای کربن و نیتروژن خاک در رویشگاه جنگل طبیعی، به‌ترتیب ۳/۴۸ درصد و ۰/۳۸ درصد مشاهده شد. اما کمترین میزان این دو متغیر متعلق به رویشگاه علف‌زار بود. کمترین میزان نسبت کربن به نیتروژن متعلق به رویشگاه جنگل طبیعی بود، در حالی‌که بالاترین میزان نسبت کربن به نیتروژن خاک در رویشگاه جنگل مخروبه مشاهده شد (جدول ۳).

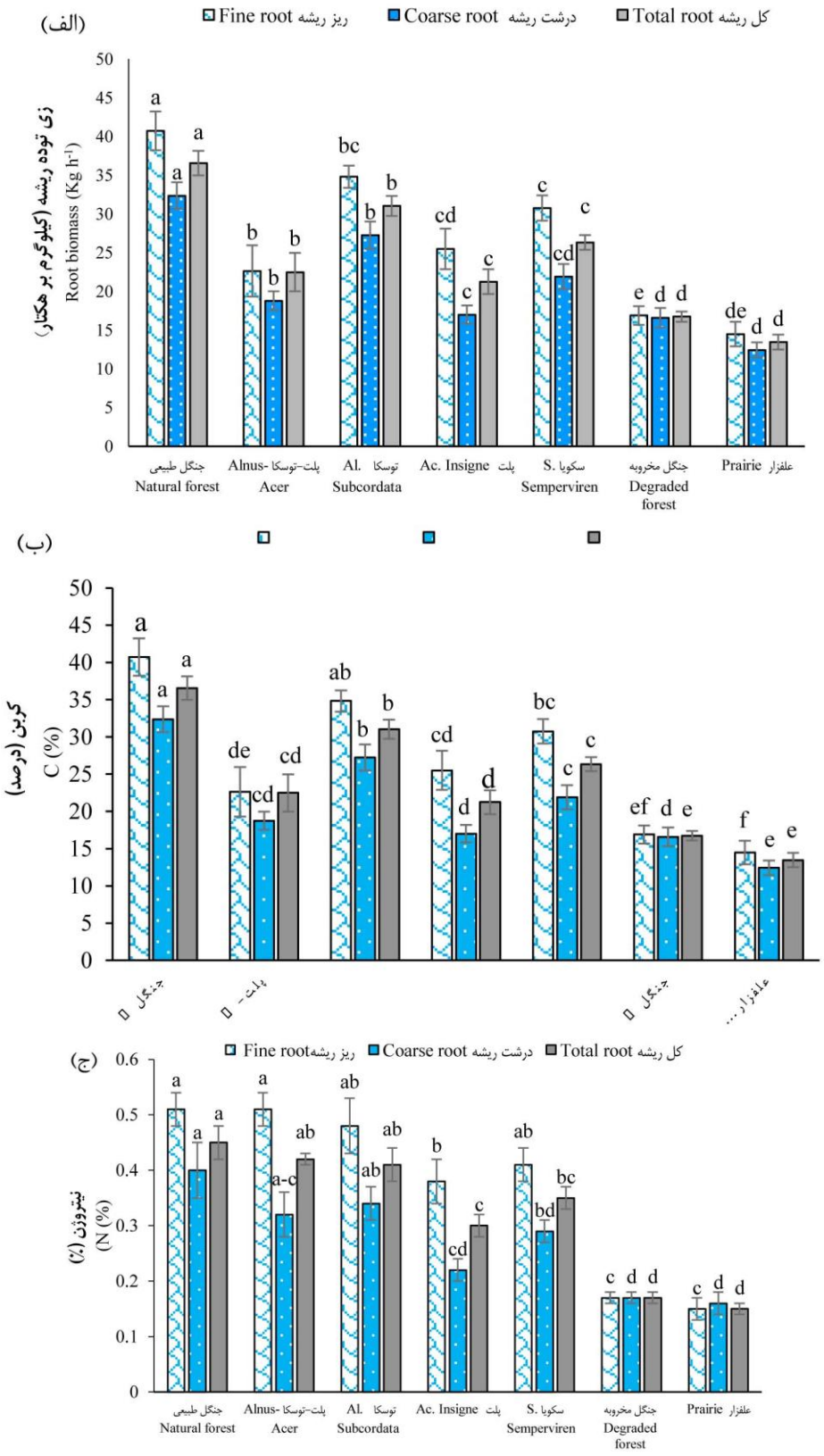
مشخصه‌های ریشه

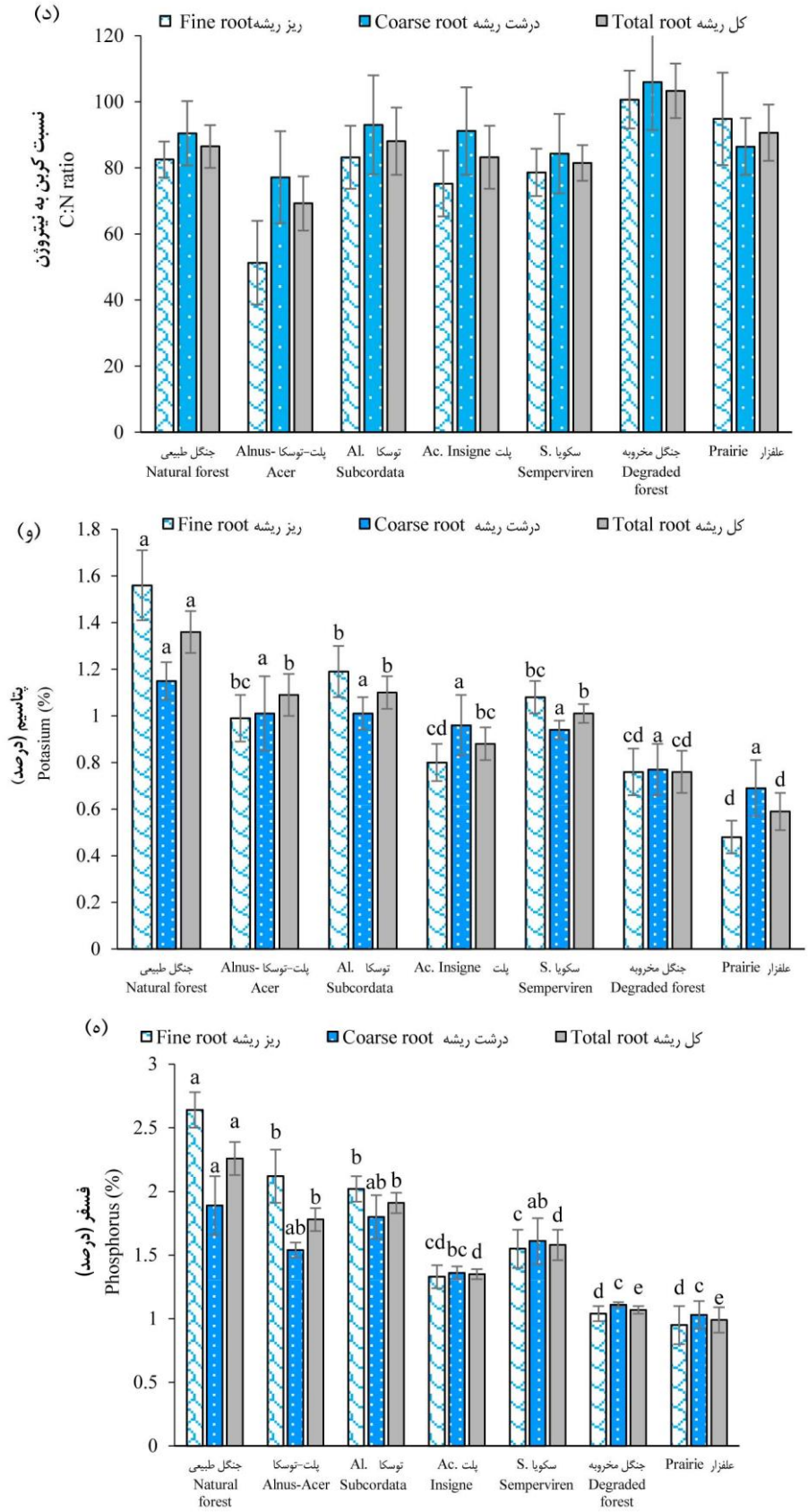
نتایج به‌دست آمده از مشخصه‌های ریشه اختلاف معنی‌داری را در رویشگاه‌های مختلف مورد مطالعه نشان داده است (جدول ۴).

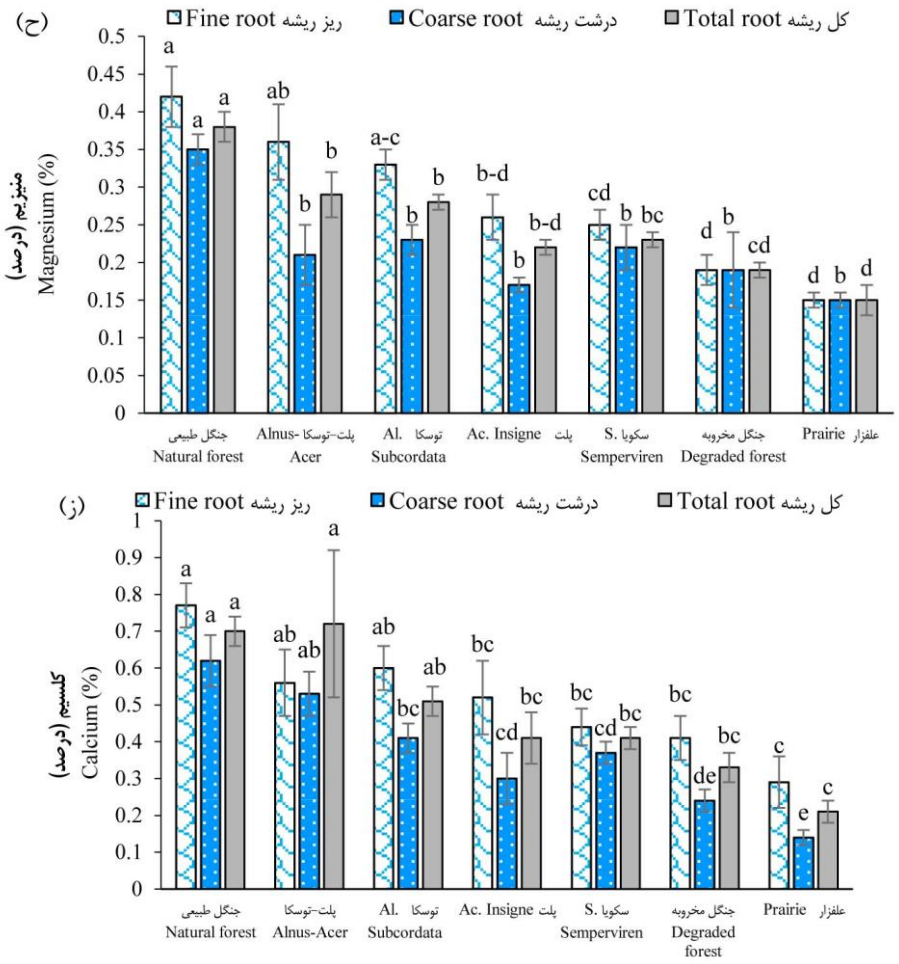
جدول ٤- اثر رویشگاه‌های مورد بررسی بر مشخصه‌های ریشه

Table 4- The effect of different habitat on root characteristics

ویژگی ریشه Root properties	نوع ریشه Root type	رویشگاه Habitat		ویژگی ریشه Root properties	نوع ریشه Root type	رویشگاه Habitat	
		مقدار F *F test*	معنی‌داری *P value*			مقدار F F test	معنی‌داری P value
زی‌توده Biomass	ریزریشه Fine root	16.905	0.000	فسفر Phosphorus	ریزریشه Fine root	19.516	0.000
	درشت‌ریشه Coarse root	40.873	0.000		درشت‌ریشه Coarse root	5.319	0.000
	کل ریشه Total root	49.567	0.000		کل ریشه Total root	23.049	0.000
کربن Carbon	ریزریشه Fine root	34.378	0.000	پتاسیم Potassium	ریزریشه Fine root	10.658	0.000
	درشت‌ریشه Coarse root	26.460	0.000		درشت‌ریشه Coarse root	1.947	0.084
	کل ریشه Total root	49.507	0.000		کل ریشه Total root	9.575	0.000
نیتروژن Nitrogen	ریزریشه Fine root	16.593	0.000	کلسیم Calcium	ریزریشه Fine root	3.939	0.002
	درشت‌ریشه Coarse root	7.711	0.000		درشت‌ریشه Coarse root	9.855	0.000
	کل ریشه Total root	22.549	0.000		کل ریشه Total root	4.310	0.001
نسبت کربن به نیتروژن C:N ratio	ریزریشه Fine root	22.320	0.947	منیزیم Magnesium	ریزریشه Fine root	6.523	0.000
	درشت‌ریشه Coarse root	3.030	0.193		درشت‌ریشه Coarse root	3.706	0.003
	کل ریشه Total root	13.142	0.742		کل ریشه Total root	10.595	0.000


(الف)
Fine root ریز ریشه
Coarse root درشت ریشه
Total root کل ریشه
زی توده ریشه (کیلوگرم بر هکتار)
Root biomass (Kg h-1)
جنگل طبیعی Natural forest
پلت-توسکا Alnus-Acer
توسکا Al. Subcordata
پلت Ac. Insigne
سکویا S. Semperviren
جنگل مخروبه Degraded forest
علفزار Prairie
(ب)
کربن (درصد)
C (%)
(ج)
نیتروژن (٪)
(N (%


(د)
Fine root ریز ریشه
Coarse root درشت ریشه
Total root کل ریشه
نسبت کربن به نیتروژن
C:N ratio
120
100
80
60
40
20
0
جنگل طبیعی Natural forest
پلت-توسکا Alnus-Acer
توسکا Al. Subcordata
پلت Ac. Insigne
سکویا S. Semperviren
جنگل مخروبه Degraded forest
علفزار Prairie
(و)
پتاسیم (درصد)
Potasium (%)
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
Natural forest
Acer
Subcordata
Semperviren
Degraded forest
(ه)
فسفر (درصد)
Phosphorus (%)
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
Natural forest
Alnus-Acer
Subcordata
Insigne
Semperviren
Degraded forest



شکل ۲- میانگین (± اشتباه معیار) مشخصه‌های ریشه خاک (صفر تا ۳۰ سانتی‌متری) در کاربری‌های مختلف

Figure 2. Mean (± standard error) root properties (0-30 cm) different land uses

بیشترین مقادیر زی‌توده درشت‌ریشه و ریزریشه مربوط به رویشگاه جنگل طبیعی می‌باشد و کمترین میزان زی‌توده ریزریشه و درشت‌ریشه به‌ترتیب در رویشگاه تخریب‌یافته و رویشگاه علف‌زار مشاهد شد. بیشترین میزان محتوای کربن ریزریشه و درشت‌ریشه در رویشگاه جنگل طبیعی، به‌ترتیب ۴۰/۷۲ درصد و ۳۲/۳۷ درصد مشاهده شد. در دو رویشگاه جنگل طبیعی و رویشگاه پلت- توسکا بالاترین میزان نیتروژن ریزریشه مشاهده شد اما بیشترین میزان نیتروژن درشت‌ریشه متعلق به رویشگاه جنگل طبیعی بود. کمترین میزان نسبت کربن به نیتروژن ریزریشه متعلق به رویشگاه پلت– توسکا بود، در حالی‌که بالاترین میزان نسبت کربن به نیتروژن درشت‌ریشه در رویشگاه جنگل مخروبه مشاهده شد هر چند که این مشخصه‌ها تحت تأثیر تغییرات پوشش گیاهی قرار نگرفتند. رویشگاه بدون تخریب و طبیعی دارای بالاترین مقادیر فسفر ریزریشه و درشت‌ریشه به‌ترتیب ۲/۶۴ درصد و ۱/۸۹ درصد بود. بیشترین مقدار پتاسیم ریشه در رویشگاه جنگل طبیعی مشاهده شد در حالی‌که اثر رویشگاه‌های مختلف بر میزان پتاسیم درشت‌ریشه معنی‌دار نشد. بیشترین و کمترین میزان کلسیم و منیزیم درشت‌ریشه و ریزریشه متعلق به رویشگاه جنگل طبیعی و علف‌زار بود (جدول ۴ و شکل ۲).

فعالیت‌های اکوشیمی خاک

اثر رویشگاه‌های مختلف و عمق بر روی فعالیت‌های آنزیمی خاک معنی‌دار بود. بیشترین میزان فعالیت آنزیم اوره‌آز در هر سه عمق مورد مطالعه در رویشگاه توسکا مشاهده شد و با افزایش عمق و افزایش شدت تخریب میزان فعالیت این آنزیم به‌صورت معنی‌داری کاهش پیدا کرد. در عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری بیشترین میزان فعالیت آنزیم اوره‌آز متعلق به رویشگاه توسکا با مقدار $۳۳/۸۴\mu gNH_4^+\text{-}N\ g^{-1}2h^{-1}$ بود، همچنین میزان این آنزیم در عمق۲۰-۱۰ و ۳۰-۲۰ سانتی‌متری در رویشگاه توسکا به‌ترتیب برابر با $۲۳/۵۷\mu gNH_4^+\text{-}N\ g^{-1}2h^{-1}$ و $۲۱/۰۴\mu gNH_4^+\text{-}N\ g^{-1}2h^{-1}$ مشاهده شد. تخریب رویشگاه سبب کاهش معنی‌دار در میزان آنزیم اسیدفسفاتاز خاک شد به گونه‌ای که

بیشترین میزان فعالیت این آنزیم با میزان $\mu gPNP\ g^{-1}\ h^{-1}$ ۴۲۰/۵۸ در رویشگاه جنگل طبیعی و کمترین میزان فعالیت این آنزیم با میزان $\mu gPNP\ g^{-1}\ h^{-1}$ ۵۰/۹۱ در رویشگاه علف‌زار در عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری مشاهده شد. بررسی میزان فعالیت این آنزیم در عمق‌های مختلف بیانگر بیشترین میزان فعالیت این آنزیم در عمق سطحی خاک صفر تا ۱۰ سانتی‌متری است. با افزایش شدت تخریب میزان فعالیت آنزیم اریل سولفاتاز و اینورتاز روند کاهشی را نشان می‌دهد به‌طوری‌که در هر سه عمق مورد بررسی بیشترین میزان این آنزیم‌ها مربوط به رویشگاه جنگل طبیعی و کمترین میزان متعلق به رویشگاه مخروبه و علف‌زار شده است. عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری خاک دارای بیشترین مقادیر آریل سولفاتاز و اینورتاز در رویشگاه جنگل طبیعی به‌ترتیب با مقدار $\mu gPNP\ g^{-1}\ h^{-1}$ ۳۱۰/۵۸ و $\mu gGlucose\ g^{-1}\ 3h^{-1}$ ۱۹۸/۰۸ بود (جدول ۵ و شکل ۳).

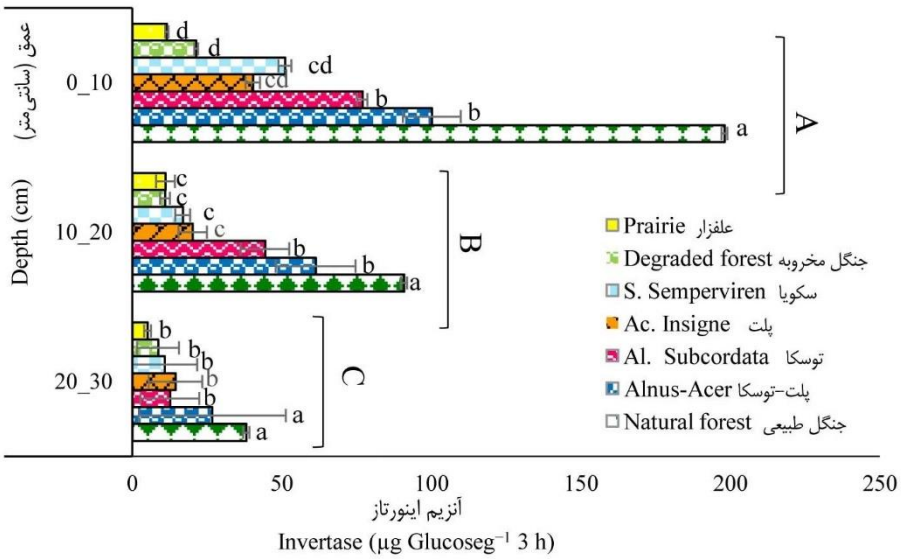
ارتباط رویشگاه‌های مورد مطالعه با مشخصه‌های ریشه و پویایی آنزیم‌های خاک

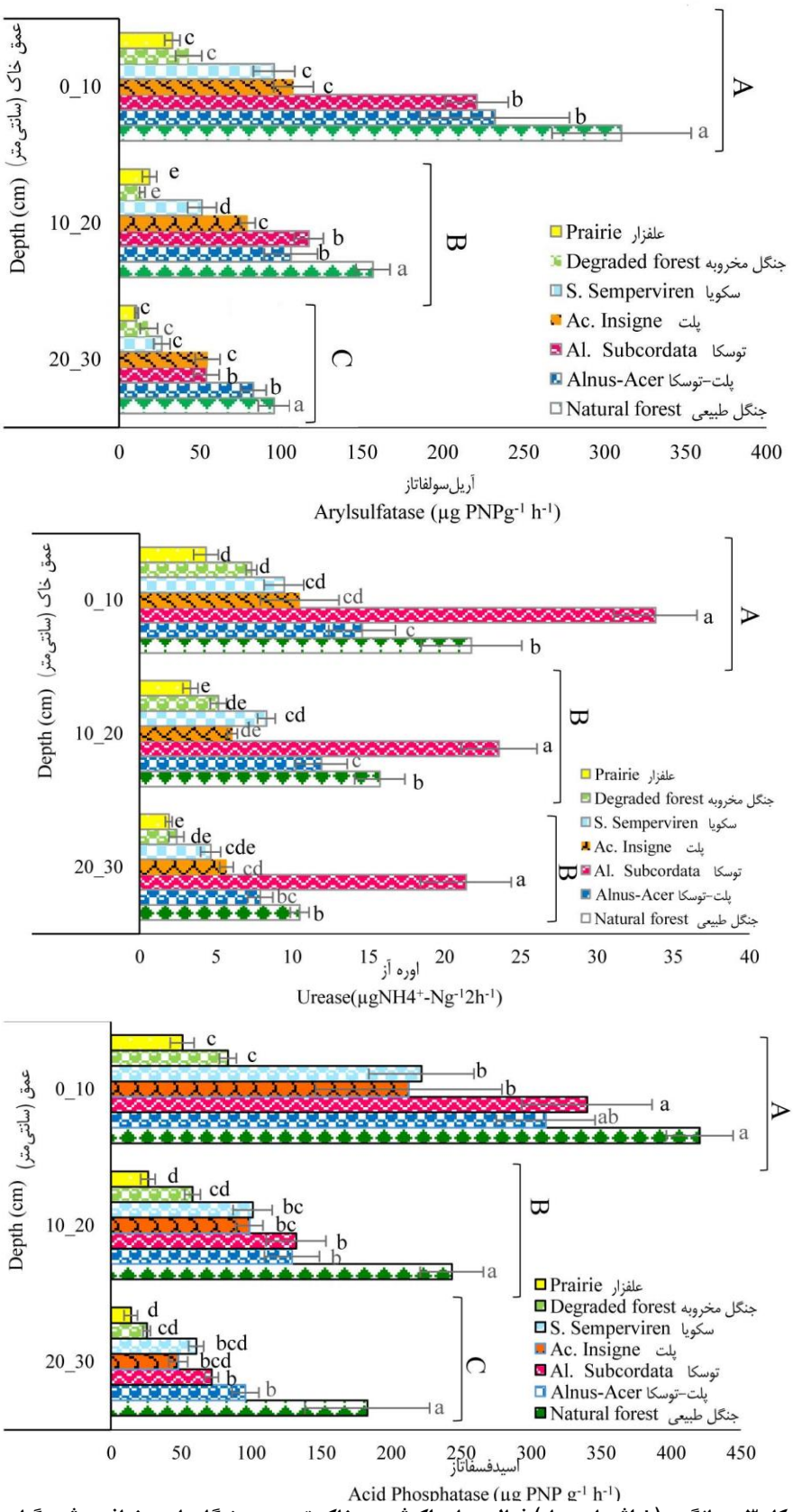
یافته‌های حاصل از PCA، ویژگی‌های متفاوت مشخصه‌های ریشه و پویایی آنزیم‌های خاک را در رویشگاه‌های مختلف آشکار کرد. به طوری‌که تغییرات در انواع پوشش گیاهی به وضوح در ویژگی‌های مختلف ریشه و آنزیم خاک منعکس شد.

جدول ۵- اثر رویشگاه‌های مختلف و عمق بر مشخصه‌های آنزیمی خاک

Table 5- The effect of different habitats and depth on soil enzyme characteristics

مشخصه‌های آنزیمی خاک Enzyme characteristics	رویشگاه Habitat		عمق خاک Depth		عمق × رویشگاه Habitat×Depth	
	مقدار F F test	معنی‌داری P value	مقدار F F test	معنی‌داری P value	مقدار F F test	معنی‌داری P value
اوره‌آز Urease	71.275	0.000	30.209	0.000	1.715	0.065
اسیدفسفاتاز Acidphosphatase	32.764	0.000	76.302	0.000	3.414	0.000
آریل‌سولفاتاز Arylsulfatase	42.000	0.000	68.597	0.000	5.869	0.000
اینورتاز Invertase	38.540	0.000	56.389	0.000	7.653	0.000





شکل ۳- میانگین (± اشتباه معیار) فعالیت‌های اکوشیمی خاک تحت رویشگاه‌های مختلف پوش گیاهی.

Figure 3. Mean (± standard error) soil ecochemical activitie sunder different land uses

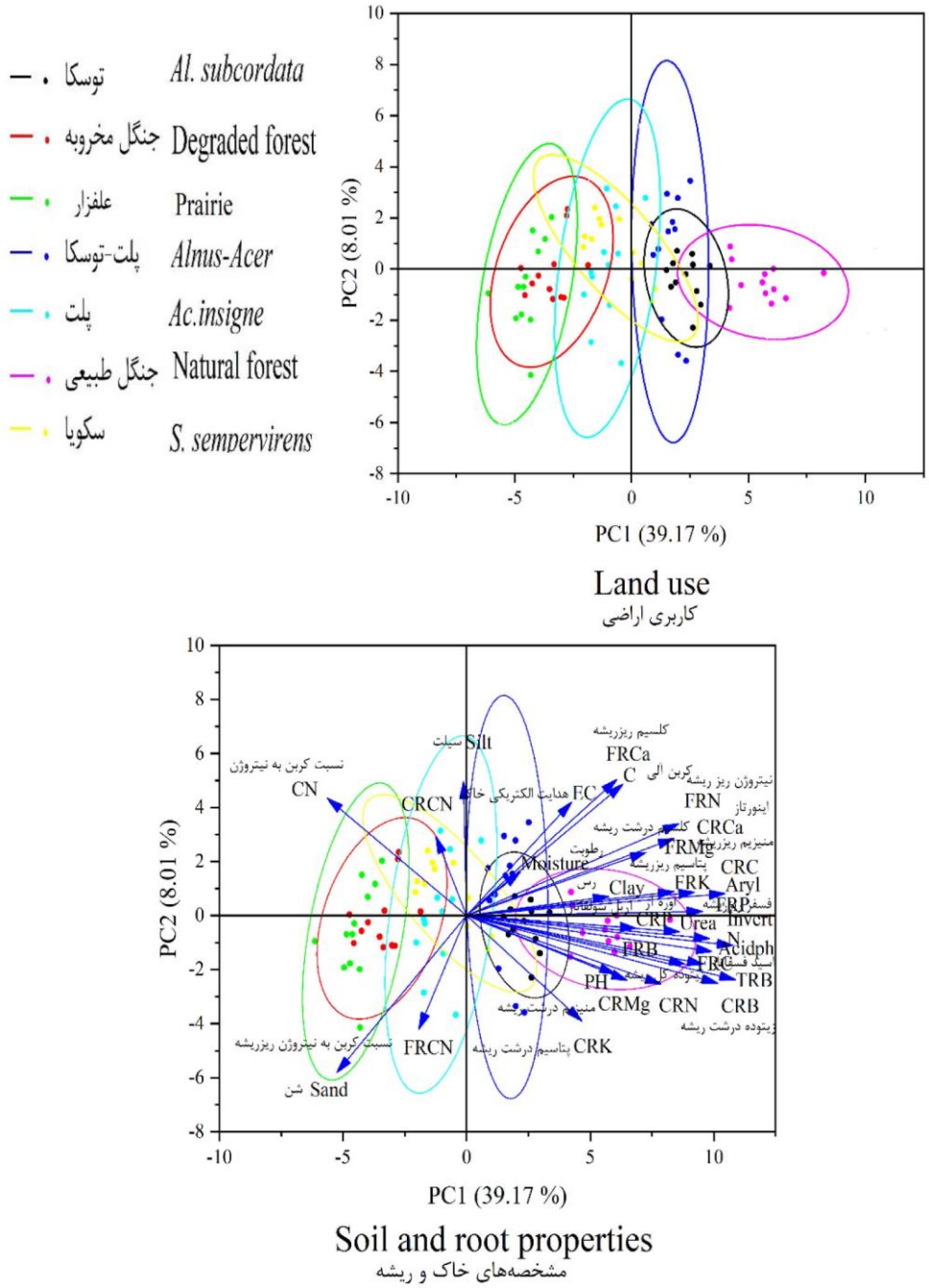
جدول ٦- همبستگی مشخصه‌های خاک و ریشه با مؤ لفه‌های PCA

Table 6- Correlation of soil enzyme and root properties with PCA components

مشخصه‌های خاک و ریشه Soil and root properties	مخفف Abbreviation	محور اول Axis1	محور دوم Axis2	مشخصه‌های خاک و ریشه Soil and root properties	مخفف Abbreviation	محور اول Axis1	محور دوم Axis 2
شن Sand	Sand	0.396**	-0.122	فسفر درشت‌ریشه Coarse root phosphorus	CRP	-0.556**	-0.079
سیلت Silt	Silt	0.003	-0.041	پتاسیم درشت‌ریشه Coarse root potassium	CRK	-0.403**	-0.248*
رس Clay	Clay	-0.427**	0.177	کلسیم درشت‌ریشه Coarse root calcium	CRCa	-0.688**	0.074
رطوبت Moisure	Moist	-0.188	0.018	منیزیم درشت‌ریشه Coarse root magnesium	CRMg	-0.495**	0.096
pH	pH	-0.497**	0.024	میانگین کربن ریشه Root carbon	MeanCR	-0.827**	0.255*
هدایت الکتریکی خاک EC	EC	-0.335**	0.302**	میانگین نیتروژن ریشه Root nitrogen	MeanNR	-0.810**	-0.400**
کربن آلی خاک C	C	-0.533**	0.172	میانگین نسبت کربن به نیتروژن ریشه Root C.N ratio	MeanC/NR	0.158	0.901**
نیتروژن N	N	-0.765**	-0.086	میانگین فسفر ریشه Root phosphorus	MeanPR	-0.816**	-0.023
نسبت کربن به نیتروژن C/N	C/N	0.407**	0.216*	میانگین پتاسیم ریشه Root potassium	MeanKR	-0.721**	-0.029
کربن ریزریشه Fine root Carbon	FRC	-0.725**	0.143	میانگین کلسیم ریشه Root calcium	MeanCaR	-0.530**	0.241*
نیتروژن ریزریشه Fine root Nitrogen	FRN	-0.717**	-0.199	میانگین منیزیم ریشه Root magnesium	MeanMgR	-0.732**	0.228*
نسبت کربن به نیتروژن ریزریشه Fine root C.N ratio	FRC/N	0.168	0.422**	زی‌توده ریزریشه Fine root biomass	FRB	-0.669**	0.031
فسفر ریزریشه Fine root phosphorus	FRP	-0.780**	0.056	زیتود درشت‌ریشه Coarse root biomass	CRB	-0.452**	0.037
پتاسیم ریزریشه Fine root potassium	FRK	-0.679**	0.094	زی‌توده کل Tootal root biomass	TRB	-0.625**	0.042
کلسیم ریزریشه Fine root calcium	FRCa	-0.484**	0.268*	آنزیم اوره‌آز Urease enzyme	Urea	-0.669**	0.067
منیزیم ریزریشه Fine root magnesium	FRMg	-0.610**	0.236*	آنزیم اسیدفسفاتاز Acidphosphatase enzyme	Acidph	-0.860**	-0.041
کربن درشت‌ریشه Coarse root Carbon	CRC	-0.736**	0.274*	آنزیم آریل‌سولفاتاز Arylsulfatase enzyme	Aryl	-0.833**	0.0390
نیتروژن درشت‌ریشه Coarse root Nitrogen	CRN	-0.641**	-0.539**	آنزیم اینورتاز Invertase enzyme	Invert	-0.780**	-0.150
نسبت کربن به نیتروژن درشت‌ریشه Coarse root C:N ratio	CRC/N	0.112	0.812**				

* ($p < ۰/۰۵$)، ** ($p < ۰/۰۱$)، ns (عدم معنی‌داری).

ns: non-significance, *: significance at the 5% probability level, **: significance at the 1% probability level



شکل ٤- ارتباط رویشگاه‌های مورد مطالعه با مشخصه‌های خاک و ریشه و آنزیم‌های خاک در تحلیل PCA.

Figure 4. The relationship between different habitats with soil, root and biocemical in principal component analysis (PCA).

نتایج تجزیه مؤلفه‌های اصلی در ارتباط با رویشگاه‌های مورد مطالعه، مشخصه‌های ریشه و آنزیم‌های خاک نشان می‌دهد که محورهای اول و دوم به‌ترتیب ۳۹/۱۷ و ۸/۰۱ درصد از تغییرات واریانس کل را توجیه می‌کنند، به‌طوری‌که تیپ‌های مورد مطالعه و مشخصه‌های خاک و ریشه بر روی محورهای نمودار پراکنش متفاوتی را نشان داده‌اند (جدول ۶ و شکل ۴). مطابق با نتایج، بیش‌ترین مقادیر مشخصه‌های کمی و کیفی درشت‌ریشه و ریزریشه حاصلخیزی خاک و پویایی آنزیم‌های خاکی به‌ترتیب به رویشگاه‌های جنگل طبیعی، توسکا، پلت-توسکا، پلت، سکویا، جنگل مخروبه و علف‌زار در سمت راست محور اختصاص داشت که در ارتباط مستقیم با مقادیر محتوی رس، pH، هدایت الکتریکی، نیتروژن کل، کربن آلی خاک و رطوبت،می‌باشند. در حالی‌که مشخصه‌های C/N خاک، C/N درشت‌ریشه و ریزریشه و

درصد شن در سمت چپ محور که مربوط به کاربری‌های جنگل مخروبه و علف‌زار بوده، بیشتر دیده شد (شکل ۴).

بحث

تراکم و نوع پوشش گیاهی روزمینی در رویشگاه‌های مختلف، مشخصه‌های خاکی و زی‌توده ریشه‌های موجود در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Nadelhoffer & Raich, 1992; Hertel *et al.*, 2009). پایین بودن تراکم و تنوع پوشش گیاهی در رویشگاه‌های تخریب شده سبب کاهش معنی‌داری در میزان زی‌توده ریشه‌ها می‌شود (Yang *et al.*, 2003; Jones *et al.*, 2003). تنوع بالای پوشش گیاهی در رویشگاه‌های جنگل طبیعی در مقایسه با رویشگاه‌های جنگل‌کاری شده می‌تواند دلیلی برای افزایش میزان زی‌توده ریشه باشد. علت افزایش زی‌توده با افزایش تنوع گونه‌ای را می‌توان به این دلیل عنوان کرد که مجموعه متنوعی از گیاهان مکمل یکدیگر در جذب و استفاده از منابع موجود هستند و در مقایسه با حضور تک گونه‌ها میزان زیست‌توده وضعیت مناسب‌تری پیدا می‌کند (Cardinale *et al.*, 2007). نتایج مقایسه میانگین مشخصه‌های ریزریشه و درشت‌ریشه در رویشگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داد که غلظت عناصر غذایی در ریزریشه‌ها بیشتر از درشت‌ریشه‌ها است. این یافته با نتایج گزارش‌شده توسط امانی و همکاران (Amani *et al.*, 2023) همخوانی دارد. این تفاوت می‌تواند به نقش عملکردی متفاوت ریشه‌ها نسبت داده شود؛ به‌طوری‌که درشت‌ریشه‌ها عمدتاً در استحکام و پایداری گیاه در خاک نقش دارند، در حالی‌که جذب عناصر غذایی خاک عمدتاً توسط ریزریشه‌ها انجام می‌گیرد (Yuan & Chen, 2010; Ma *et al.*, 2015). علاوه بر این، تخریب پوشش گیاهی موجب کاهش تراکم گیاهان و افزایش آبشویی عناصر غذایی خاک می‌شود که در نهایت کاهش زی‌توده ریشه را به‌دنبال دارد (Singha *et al.*, 2020; Kooch *et al.*, 2024b). همچنین بالا بودن محتوای عناصر غذایی ریشه در رویشگاه‌های طبیعی و بدون تخریب در مقایسه با رویشگاه‌های احیاء شده و تخریب شده نشان‌دهنده حاصلخیزتر بودن خاک‌های این رویشگاه است. کمترین میزان زی‌توده ریشه در رویشگاه‌های علف‌زار و جنگل مخروبه مشاهده شد (شکل ۲)، این کاهش می‌تواند با اسیدی تر بودن خاک در این رویشگاه‌ها مرتبط باشد، زیرا pH پایین خاک با کاهش قابلیت دسترسی عناصر غذایی ضروری و افزایش سمیت برخی عناصر، شرایط نامناسبی برای رشد و فعالیت ریشه فراهم می‌کند. در نتیجه، توسعه و زی‌توده ریشه در چنین شرایطی محدود می‌شود که این موضوع با یافته‌های امانی و همکاران (Amani *et al.*, 2023) همخوانی دارد.

آنزیم‌های خاک و سطح فعالیت آن‌ها نقش مهمی در تبیین عملکرد اکوسیستم خاک دارند و بازتاب‌دهنده تغییرات در ویژگی‌های خاک و ریشه، حاصلخیزی خاک و ارتباط تنگاتنگ آن با نوع پوشش گیاهی هستند (He *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2008). مقایسه میانگین فعالیت‌های آنزیمی خاک در رویشگاه‌های مختلف در شکل ۳ تفاوت‌های قابل توجهی را نشان داد در نتیجه بالا بودن فعالیت آنزیم‌های خاکی (آریل‌سولفاتاز، اسیدفسفاتاز، اینورتاز و اوره‌آز) در رویشگاه جنگل طبیعی در مقایسه با سایر رویشگاه‌های مورد بررسی را می‌توان به بالا بودن میزان تهویه خاک، مواد آلی سخت نسبت داد (Chen *et al.*, 2016). افزایش فعالیت آنزیمی در جنگل‌های طبیعی و جنگل‌کاری آمیخته با گونه پلت–توسکا باعث تسریع فرآیند تجزیه و انتشار مواد مغذی آلی می‌شود (Cheng *et al.*, 2013). بیشترین فعالیت آنزیم اوره‌آز در رویشگاه توسکا و پس از آن در جنگل طبیعی مشاهده شد، در حالی‌که کمترین مقدار آن در رویشگاه علف‌زار ثبت گردید که نتایج آن در شکل ۳ ارائه شده است. گونه توسکا به‌دلیل توانایی تثبیت نیتروژن و ایجاد بستر مناسب خاک، نقش مهمی در افزایش نیتروژن خاک ایفا می‌کند (Kooch *et al.*, 2016). نتایج مقایسه میانگین مشخصه‌های خاک در رویشگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۳ و نتایج تجزیه مؤلفه‌های اصلی در ارتباط با رویشگاه‌های مختلف و فعالیت‌های آنزیم خاک در شکل ۴ نشان داد که افزایش نیتروژن قابل دسترس، همراه با شرایط مناسب pH خاک، می‌تواند فعالیت میکروارگانیسم‌ها و در نتیجه فعالیت آنزیم اوره‌آز را تقویت کند. نتایج تجزیه مؤلفه‌های اصلی در ارتباط با رویشگاه‌های مختلف و فعالیت‌های آنزیم خاک در شکل ۴ همبستگی معنی‌دار مشاهده‌شده بین فعالیت اوره‌آز، نیتروژن و pH خاک، این تفسیر را تأیید می‌کند و دلیل بالاتر بودن فعالیت این آنزیم در رویشگاه توسکا را توضیح می‌دهد. فعالیت بالای آنزیم اوره‌آز در رویشگاه‌های توسکا و جنگل طبیعی ممکن است ناشی از رشد میکروبی و تحریک فعالیت میکروبی به‌دلیل افزایش دسترسی به منابع باشد، همچنین تغییرات در ترکیب جامعه میکروبی نیز می‌تواند در این امر تأثیرگذار باشد (Moghimian *et al.*, 2017). تحقیقات پیشین بیان کرده‌اند که تغییرات فعالیت آنزیم اوره‌آز تحت تأثیر کاربری زمین را می‌توان به متفاوت بودن میزان مواد مغذی خاک در این رویشگاه‌ها و همبستگی این آنزیم با مواد مغذی خاک عنوان کرد (Zeng *et al.*, 2009; Moghimian *et al.*, 2017). برهمین اساس، ارتباط بین مشخصه‌های خاکی در رویشگاه‌های مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است.

بالا بودن فعالیت آنزیمی خاک در رویشگاه طبیعی را می‌توان به pH بالا و در دسترس بودن مواد غذایی نسبت داد (شکل ۴) که نتایج حاصل از تحقیقات چنگ و همکاران (Cheng *et al.*, 2013) و لینگ و همکاران (Ling *et al.*, 2014) تأیید کننده این موضوع است. آنزیم اسیدفسفاتاز از آنزیم‌هایی است که به واسطه ریز جانداران ریشه‌های گیاهی و کرم خاکزی تولید می‌شود و ارتباط مستقیمی با مواد آلی و رطوبت خاک دارد که علت افزایش این آنزیم در رویشگاه طبیعی را

می‌توان به بالا بودن میزان رطوبت و مواد آلی این رویشگاه در مقایسه با رویشگاه‌های دیگر عنوان کرد (جدول ۳ و شکل ۳). آنزیم اسیدفسفاتاز تحت تأثیر میزان شدت نور نسبی کاهش پیدا می‌کند (Taati *et al.*, 2016). بنابراین به‌دنبال تخریب و کاهش میزان پوشش گیاهی، میزان نور ورودی به درون این رویشگاه‌ها بیشتر شده و همین امر با تأثیر منفی بر فعالیت این آنزیم، کاهش آن را سبب می‌شود (Amani *et al.*, 2022). کاهش ورودی مواد آلی در رویشگاه‌های علف زار و مخروبه سبب کاهش مواد مغذی خاک و در نتیجه کاهش آنزیم فسفاتاز شد زیرا مقادیر کربن، نیتروژن و فسفر خاک برفعالیت‌های این آنزیم اثرگذار هستند (Maharjan *et al.*, 2017).

آنزیم آریل‌سولفاتاز نقش مهم و اساسی در هیدرولیز استرهای آروماتیک سولفات به گوگرد معدنی مورد نیاز گیاهان دارد و تحت تأثیر اندازه ذرات خاک قرار می‌گیرد (Moscatelli *et al.*, 2005). در رویشگاه مورد مطالعه جنگل طبیعی به‌دلیل مناسب بودن شرایط موجود رویشگاه بالاترین مقدار فعالیت آنزیم آریل‌سولفاتاز مشاهده شد (Ling *et al.*, 2014). فعالیت‌های اسیدفسفاتاز و آریل‌سولفاتاز در خاک‌های رویشگاه جنگل طبیعی و توسکا مشابه بود، احتمالاً به این دلیل که هر دو به pH وابسته هستند. آنزیم اینورتاز به‌دلیل نقش کلیدی در چرخه کربن و نیتروژن می‌تواند منجر به تبدیل ساکارز به گلوکز و فروکتوز شود (Pang, 2009) که بر همین اساس رابطه نزدیکی بین میزان کربن و نیتروژن خاک با فعالیت آنزیم اینورتاز وجود دارد (Zeng *et al.*, 2009). علاوه بر موارد فوق، بالا بودن میزان کربن و نیتروژن ریشه در رویشگاه‌های بدون تخریب و طبیعی نیز نقش بسیار مؤثر در افزایش فعالیت این آنزیم در داخل خاک دارد (شکل ۳ و ۴). فعالیت آنزیم اینورتاز تحت تأثیر کاربری/پوشش زمین، فصل نمونه‌برداری و تعاملات بین آنها قرار دارد. بیشترین فعالیت آنزیم اینورتاز در جنگل طبیعی به دلیل تجزیه سریع و آسان لاشبرگ و تسریع چرخه نیتروژن است (Pang *et al.*, 2009). کمترین فعالیت این آنزیم در رویشگاه علف‌زار و مخروبه مشاهده شد. مقادیر پایین pH خاک و کاهش حاصل‌خیزی از جمله عوامل مؤثر در نتیجه مذکور می‌باشد (Zeng *et al.*, 2009). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) در شکل ۴، به نظر می‌رسد نوع کاربری و پوشش زمین، از طریق تغییر در ورودی بقایای آلی، وضعیت نیتروژن و شرایط زیستی خاک، نقش مهمی در تنظیم فعالیت آنزیم‌های خاک ایفا کند. تفاوت مشاهده‌شده بین رویشگاه‌های جنگلی و اراضی علف‌زار در این مطالعه، مؤید این موضوع است و با گزارش‌های پیشین درباره اثر شیوه‌های مدیریتی و پوشش زمین بر فعالیت آنزیمی خاک هم‌راستا می‌باشد (Maharjan *et al.*, 2017). به‌طور کلی، می‌توان اظهار داشت که روابط مؤثری بین انواع مختلف پوشش گیاهی، مشخصه‌های ریشه، شاخص‌های حاصلخیزی خاک و پویایی آنزیم خاک وجود دارد. این مطالعه به بررسی و کمی‌سازی تأثیر انواع مختلف پوشش گیاهی بر ویژگی‌های ریشه، پویایی آنزیم‌های خاک و شاخص‌های حاصلخیزی خاک در اکوسیستم‌های ناحیه خزری ایران می‌پردازد. تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) در شکل ۴ واگرایی مناسبی از ویژگی ریشه و خاک انتخاب شده بین انواع مختلف پوشش گیاهی را تعیین کرد. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که فراوانی میزان شاخص‌های کمی و کیفی ریشه، شاخص‌های حاصلخیزی خاک و فعالیت‌های آنزیمی خاک در رویشگاه‌های مورد مطالعه به‌ترتیب رتبه<علف‌زار <جنگل مخروبه< سکویا< پلت < پلت– توسکا< توسکا < جنگل طبیعی کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

بررسی تأثیرپذیری مشخصه‌های خاکی و اجزای موجود در آن تحت تأثیر پوشش‌های مختلف از پایه‌های مدیریت اصولی عرصه‌های طبیعی است. نوع پوشش گیاهی از عوامل اصلی مؤثر بر ویژگی‌های خاک و اجزای زیرزمینی آن است و تغییر در ترکیب و وضعیت پوشش گیاهی، به‌طور مستقیم بر کیفیت خاک، زی‌توده ریشه‌ای و فعالیت‌های زیستی آن اثر می‌گذارد. کاهش پوشش گیاهی و تشدید تخریب، با افت ورود مواد آلی به خاک، برهم خوردن شرایط مطلوب میکروکلیمایی و افزایش آبشویی عناصر غذایی همراه بوده و در نهایت موجب تضعیف فعالیت‌های آنزیمی و کاهش شاخص‌های زیستی و عملکردی خاک می‌شود. در مقابل، حفظ و احیای پوشش‌های طبیعی و بهره‌گیری از جنگل‌کاری‌های با گونه بومی می‌تواند شرایط مساعدتری را برای پایداری خاک و بهبود فرآیندهای زیستی آن فراهم کند. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، استفاده از پوشش‌های چوبی بومی می‌تواند به‌عنوان یک راهکار کاربردی در مناطق دچار تخریب پیشنهاد شود، زیرا این پوشش‌ها در بهبود ویژگی‌های خاک و پایداری چرخه عناصر نقش داشته و به حفظ کیفیت و سلامت خاک کمک می‌کنند بنابراین، حفاظت از رویشگاه‌های طبیعی، جلوگیری از تخریب بیشتر عرصه‌ها، احیای پوشش گیاهی بومی و متناسب با شرایط اکولوژیکی منطقه و همچنین استفاده از گونه‌های مناسب در عملیات جنگل‌کاری و بازسازی، از مهم‌ترین راهکارهای مدیریتی برای ارتقای کیفیت خاک و پایداری اکوسیستم‌های طبیعی به شمار می‌رود. بر این اساس، حفاظت از رویشگاه‌های طبیعی، جلوگیری از تخریب بیشتر عرصه‌ها و استفاده از گونه‌های بومی و سازگار، به‌ویژه توسکا، در برنامه‌های احیا و جنگل کاری می‌تواند به حفظ کیفیت خاک و پایداری بلندمدت اکوسیستم‌های طبیعی کمک کند.

سپاسگزاری

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح پسادکتری شماره "۴۰۳۸۵۴۶" انجام شده است.

References

1. Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press, London.
2. Amani, M., Kooch, Y., & Abedi, M. (2022). Effect of degradation intensity of wooded rangelands on soil health indicators of Kojur region, Nowshahr. (master's thesis). Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, 181 pages. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154827
3. Amani, M., Kooch, Y., & Abedi, M. (2023). Effect of degradation intensity of wooded rangelands on root characteristics and soil ecochemical activities of Mirkola Region of Nowshahr. *Rangeland*, *17*, 82-96. (In Persian with English abstract)
4. Azaryan, M., Abrari Vajari, K., & Amanzadeh, B. (2021). Variations in humus and fine root properties related to development stages in a temperate natural Beech forest. *European Journal of Forest Research, 140*, 307-316. https://doi.org/10.1007/s10342-020-01331-2
5. Boromand, M., Qajar Sepalnou, M., Bahmanyar, M.A., & Salek Gilani, S. (2015). Evaluation of the effects of land use change from forest areas into agricultural lands on some chemical properties of soil (Case study: Zarin Abad, Sari, Iran). *Physical Geography Research*, *47*, 449-435. (In Persian with English abstract)
6. Cardinale, B.J., Wright, J.P., Cadotte, M.W., Carroll, I.T., Hector, A., Srivastava, D.S., Loreau, M., & Weis, J.J. (2007). Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *104*, 18123-18128. https://doi.org/10.1073/pnas.0709069104
7. Chen, X., Chen, H.Y.H., Chen, X., Wang, J., Chen, B., Wang, D., & Guan, Q. (2016). Soil labile organic carbon and carbon-cycle enzyme activities under different thinning intensities in Chinese fir plantations. *Soil Ecology*, *107*, 162-169. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.05.016
8. Cheng, X.L., Yang, Y.H., Li, M., Dou, X.L., & Zhang, Q.F. (2013). The impact of agricultural land use changes on soil organic carbon dynamics in the Danjiangkou Reservoir area of China. *Plant and Soil, 366*, 415-424. https://doi.org/10.1007/s11104-012-1446-6
9. Cowie, A.L., Orr, B.J., Sanchez, V.M.C., Chasek, P., Crossman, N.D., Erlewein, A., Louwagie, G., Maron, M., Metternicht, G.I., Minelli, S., Tengberg, A.E., Walter, S., & Welton, S. (2018). Land in balance: The scientific conceptual framework for Land Degradation Neutrality. *Environmental Science & Policy*, *79*, 25-35. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.10.011
10. Dipesh, K.C,. & Schuler, J.L. (2013). Estimating fine-root production and mortality in the biomass plantations. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *44*, 2514-2523. https://doi.org/10.1080/00103624.2013.811516
11. Gao, M., Hu, W., Li, M., Wang, S., & Chu, L. (2025). Network analysis was effective in establishing the soil quality index and differentiated among changes in land-use type. *Soil and Tillage Research*, *246*, 106352. https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106352
12. He, Y., Hong, M., Xu, X., Liang, Z., Jiang, N., Tu, N., & Wu, Z. (2022). Nitrogen deposition changes the keystone taxa of soil microorganisms and indirectly affects plant aboveground biomass in desert steppe regions. *Research Square*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1354926/v1
13. Hertel, D., Harteveld, M.A., & Leuschne, C.H. (2009). Conversion of a tropical forest into agroforestry alters the fine root-related carbon flux to the soil. *Soil Biology and Biochemistry*, *4*, 481–490. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.11.020
14. Jafari Haghighi, M. (2003). *Methods of soil analysis sampling and important physical*. 2nd ed., Sari: Neday Zohi, 236 p. (In Persian).
15. Jones, R.H., Mitchell, R.J., Tevens, G.N.S., & Pecot, S.D. (2003). Controls of fine root dynamics across a gradient of gap sizes in a pine woodland. *Oecologia*, *134*,132–143. https://doi.org/10.1007/s00442-002-1098-y
16. Kamiab, H.R., & Shabani, N. (2019). The impact of land use/land cover change on ecosystem services in Golestan province. *Advanced Environmental Sciences*, *17*, 43-56. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.29252/envs.17.2.43
17. Kiapasha, K., Darvishsefat, A.A., Zargham, N., Attarod, P., Nadi, M., & Schaepman, M. (2017). Greening trend in the Hyrcanian forests using NOAA NADVI time series during 1981-2012. *Journal of Forest and Wood Products*, *70*, 409-420. (In Persian with English abstract)
18. Kohestani, N., Rastgar, S., Heydari, G., Shetaee Jouibary, S., & Amirnejad, H. (2021). Monitoring the spatial distribution of soil carbon sequestration during four decades of rangeland cover changes (Case study: Nourroud watershed, Mazandaran province). *Rangeland Journal*, *15*, 344-356. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.1007/s10668-023-03203-2
19. Kooch, Y., Heidari, F., Haghverdi, K., Gómez-Brandón, M., & Kartalaei, Z.M. (2024a). The type of land cover

and management affect differently soil functional indicators in a semi-arid ecosystem. *Applied Soil Ecology, 202*, 105553. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105553

20. Kooch, Y., Heidari, F., Gómez-Brandón, M., & Meurer, K.H. (2024b). Restoration of soil multifunctional indicators requires more than thirty years in degraded shrubland of a semi-arid mountainous ecosystem. *Journal of Environmental Management, 371*, 123140. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123140
21. Kooch, Y., Rostayee, F., & Hosseini, S.M. (2016). Effects of tree species on topsoil properties and nitrogen cycling in natural forest and tree plantations of northern Iran. *Catena, 144*, 65-73. https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.05.002
22. Kooch, Y., Tavakoli, M., & Akbarinia, M. (2018). Tree species could have substantial consequences on topsoil fauna: a feedback of land degradation/restoration. *European Journal of Forest Research, 137*, 793-805. https://doi.org/10.1007/s10342-018-1140-1
23. Košanin, O., Govedar, Z., Ljubičić, J., & Nešić, M. (2023). The importance of forests in the environment. n: Ilić P, Govedar Z, Pržulj N (eds) Environment. Academy of Sciences and Arts of the Republic of Srpska, Banja Luka, Monograph LV:579–621. https://doi.org/10.7251/EORU2309579K
24. Leuschner, C., & Hertel, D. (2003). Fine root biomass of temperate forests in relation to soil acidity and fertility, climate, age and species. *Prog Botany, 64*, 405–438. https://doi.org/10.1007/978-3-642-55819-1_16
25. Ling, N., Sun, Y., Ma, J., Guo, J., Zhu, P., Peng, C., & Shen, Q. (2014). Response of the bacterial diversity and soil enzyme activity in particle-size fractions of Mollisol after different fertilization in a long-term experiment. *Biology and Fertility of Soils, 50*, 901-911. https://doi.org/10.1007/s00374-014-0911-1
26. Ma, Y.Z., Zhong, Q.L., Jin, B.J., Lu, H.D., Guo, B.Q., Zheng, Y., Li, M., & Cheng, D.L. (2015). Spatial changes and influencing factors of fine root carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of plants in China. *Chinese Journal of Plant Ecology, 39*, 159-167. https://doi.org/10.17521/cjpe.2015.0015
27. Maharjan, M., Sanaullah, M., Razavi, B.S., & Kuzyakov, Y. (2017). Effect of land use and management practices on microbial biomass and enzyme activities in subtropical top-and sub-soils. *Applied Soil Ecology, 113*, 22-28. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.01.008
28. Martinez-Salgado, M.M., Gutiérrez- Romero, V., Jannsens, M., & Ortega- Blu, R. (2010). Biological soil quality indicators: a review. *Current Research, Technology and Education Topics in Applied Microbiology and Microbial Biotechnology, 1*, 319-328.
29. Moghimian, N., Hosseini, S.M., Kooch, Y., & Darki, B.Z. (2017). Impacts of changes in land use/cover on soil microbial and enzyme activities. *Catena, 157*, 407-414. https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.003
30. Mohmedi Kartalaei, Z., Kooch, Y., & Dianati Tilaki, Q. (2024). Biogeochemical cycling of carbon and nitrogen in wooded and non-wooded lands of Kojur region, Nowshahr. (doctoral dissertation). Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, 152 pages. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106289
31. Moscatelli, M.C., Lagomarsino, A., Angelis, P.D., & Grego, S. (2005). Seasonality of soil biological properties in a poplar plantation growing under elevated atmospheric Co_2. *Applied Soil Ecology, 30*, 162-173. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.02.008
32. Nadelhoffer, K.J., & Raich, J.W. (1992). Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forest ecosystems. *Ecology, 73*, 1139–1147. https://doi.org/10.2307/1940664
33. Neatrour, M.A., Jones, R.H., & Golladay, S.W. (2005). Correlations between soil nutrients availability and fine-root biomass at two spatial scales in forested wetlands with contrasting hydrological regimes. *NRC Research Press, 35*, 2934-2941. https://doi.org/10.1139/x05-217
34. Pang, L. (2009). Microbial removal rates in subsurface media estimated from published studies of field experiments and large intact soil cores. *Journal of Environmental Quality, 38*, 1531-1559. https://doi.org/10.2134/jeq2008.0379
35. Pransiska, Y., Triadiati, T., Tjitrosoedirjo, S., Hertel, D., & Kotowska, M.M. (2016). Forest conversion impacts on the fine and coarse root system, and soil organic matter in tropical lowlands of Sumatera (Indonesia). *Forest Ecology and Management, 379*, 288–298. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.038
36. Parkinson, J.A., & Allen, S.E. (1975). A wet oxidation procedure suitable for the determination of nitrogen andmineral nutrients in biological material. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 6*, 1–11. https://doi.org/10.1080/00103627509366539
37. Silva, V., Mol, H.G., Zomer, P., Tienstra, M.C., Ritsema, J., & Geissen, V. (2019). Pesticide residues in European agricultural soils–A hidden reality unfolded. *Science of the Total Environment, 653*, 1532-1545. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.441
38. Singha, D., Brearley, F.Q., & Tripathi, S.K. (2020). Fine root and soil nitrogen dynamics during stand development following shifting agriculture in Northeast India. *Forests, 11*, 123-142. https://doi.org/10.3390/f11121236
39. Taati, S., Matinizadeh, M., Sagheb-Talebi, Kh., Rahmani, Kh., & Habashi, H. (2016). The role of canopy gap size and light intensity on soil phosphatase enzyme activity in Beech forest (Case study: Langa-Kladresht). *Iranian Journal of Plant Research, 29*, 532-539. (In Persian with English abstract)
40. Tamooh, F., Huxhamd, M., Karachi, M., MencucciniJ, M., Kairo, G., & Kirui, B. (2008). Below-ground root

yieldand distribution in natural and replanted mangrove forests at Gazi bay, Kenya. *Forest Ecology and Management, 256*, 1290–1297. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.06.026

41. Van der Heijden, M.G.A., Bardgett, R.D., & van Straalen, N.M. (2008). The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters, 11*, 296–310. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01139.x
42. Varesteh Khanlari, Z., Golchin, A., & Mousavi Cooper, S.A. (2020). Effect of land use change and land reclamation on some qualitative characteristics and activity of some enzymes in the soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research, 51*, 1055-1068. (In Persian with English abstract)
43. Wright, A.J., Barry, K.E., Lortie, C.J., & Callaway, R.M. (2021). Biodiversity and ecosystem functioning: Have our experiments and indices been underestimating the role of facilitation? *Journal of Ecology, 109*, 1962-1968. https://doi.org/10.1111/1365-2745.13665
44. Yang, L.L., Zhang, F.S., Mao, R.Z., Ju, X.T., Cai, X.B., Lu, Y.H. (2008). Conversion of natural ecosystems to cropland increases the soil net nitrogen mineralization and nitrification in Tibet. *PedospHere, 18*, 699–706. https://doi.org/10.1016/s1002-0160(08)60065-x
45. Yang, Y.S., Guo, J.F., Chen, G.S., He, Z.M., & Xie, J.S. (2003). Effects of slash burning nutrient removal and soil fertility in Chinese fir and evergreen broadleaved forests of mid-subtropical China. *Pedosphere, 13*, 87–96. https://doi.org/10.1016/s1002-0160(06)60026-x
46. Yuan, Z.Y., & Chen, H.Y.H. (2010). Fine root biomass, production, turnover rates, and nutrient contents in Boreal forest ecosystems in relation to species, climate, fertility, and stand age: Literature Review and Meta-Analyses. *Critical Reviews in Plant Sciences, 29*, 204–221. https://doi.org/10.1080/07352689.2010.483579
47. Yuan, Z.Y., Chen, H.Y., & Reich, P.B. (2011). Global-scale latitudinal patterns of plant fine-root nitrogen and phosphorus. *Nature Communications, 2*, 12-19. https://doi.org/10.1038/ncomms1346
48. Zarafshar, M., Matinizadeh, M., Rousta, M.J., Bordbar, S.K., Kooch, Y., Negahdarsaber, M.R., Abbasi, A., & Enayati, K. (2019). The impact of forest degradation and land use change on some soil biological indices (case study: Persian oak (*Quercus brantii* Lindl) forests in Fars province). *Journal of Plant Ecosystem Conservation, 7*, 319-332. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103536
49. Zeng, D.H., Hu,Y.L., Chang, S.X., & Fan, Z.P. (2009). Land cover change effects on soil chemical and biological properties after planting Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) in sandy lands in Keerqin, northeastern China. *Plant and Soil, 317*, 121-133. https://doi.org/10.1007/s11104-008-9793-z
50. Zhao, L., Jia, K., Liu, X., Li, J., & Xia, M. (2023). Assessment of land degradation in Inner Mongolia between 2000 and 2020 based on remote sensing data. *Geography and Sustainability, 4*, 100-111. https://doi.org/10.1016/j.geosus.2023.01.003
51. Zhao, W., Hua, T., Meadows, M. E., & Pereira, P. (2021). Degradation debts accounting: A holistic approach towards land degradation neutrality. *Global Change Biology, 27*, 5411-5413. https://doi.org/10.1111/gcb.15855

بسم الله الرحمن الرحیم

مندرجات

تحلیل ردپای انرژی در تولید برنج، ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی (مطالعه موردی: سه شهرستان استان لرستان) 3

فاطمه آزادپور - مسعود شاکرمی - سید یعقوب کریمی

بررسی تأثیر تنش کمبود رطوبت بر کارایی جذب و مصرف نور ارقام مختلف لوبیاقرمز (*Phaseolus vulgaris* L.) در یک اقلیم مدیترانه‌ای 21

فاطمه پارساپور - فرزاد مندنی - غلامرضا محمدی

تحلیل چندمعیاره ضرایب تخلیه مجاز رطوبت خاک در مدیریت آبیاری چغندرقند: پیوند معیارهای عملکردی، فنی و اقتصادی 41

رضا محمدی کیا

نقش باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد در کاهش تنش خشکی در گیاه گوجه‌فرنگی و ویژگی‌های زیستی خاک 57

سهیلا ساسانی فر - علی بهشتی آل آقا - روح الله شریفی - صحبت بهرامی نژاد

افزایش کارایی سورگوم علوفه‌ای در پالایش خاک‌های آلوده به کادمیوم با رویکرد زیستی-شیمیایی 73

فرزاد رستمی - حمیدرضا عیسوند - ماشااله دانشور - محسن سعیدی - سجاد رحیمی مقدم

تأثیر تغییر کاربری زمین بر مشخصه‌های ریشه و پویایی آنزیم‌های خاک در اکوسیستم خزری 89

فاطمه حیدری - یحیی کوچ

Contents

Energy Footprint Analysis in the Production of Rice, Forage Maize, and Potatoes (Case Study: Three Counties in Lorestan Province) 1
F. Azadpour, M. Shakarami, S.Y. Karimi

Studying the Effect of Moisture Deficit Stress on the Light Absorption and Use Efficiency of Different Red Bean Cultivars (*Phaseolus vulgaris* L.) in a Mediterranean Climate 19
F. Parsapour, F. Mondani, Gh. Mohammadi

Multi-Criteria Analysis of Allowable Soil Moisture Depletion Coefficients in Sugar Beet Irrigation Management: Linking Functional, Technical, and Economic Criteria 39
R. Mohammadikia

The Role of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria in Reducing Drought Stress in Tomato Plants and Soil Biological Characteristics 55
S. Sasanifar, A. Beheshti Ale Agha, R. Sharifi, S. Bahraminejad

Enhancing the Efficiency of *Sorghum bicolor* L. in the Remediation of Cadmium-Contaminated Soils through a Bio-Chemical Approach 71
F. Rostami, H.R. Eisvand, M. Daneshvar, M. Saeidi, S. Rahimi-Moghaddam

The Effect of Land Use Change on Root Characteristics and Soil Enzyme Dynamics in the Hyrcanian Ecosystem 87
F. Heidari, Y. Kooch

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 40 No. 1 Spring. 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	Tabrzi University
Taghvaeian, S.	Irrigation	Oklahoma University

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

Address: Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

P.O. Box: 91775- 1163

Fax: +98 51 8787430

E-Mail: jswa3@um.ac.ir

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

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

Ferdowsi University of Mashhad

Vol. 40 No. 1

2026

Journal of Water and Soil

(Agricultural Science and Technology)

ISSN:2008-4757

Contents

Energy Footprint Analysis in the Production of Rice, Forage Maize, and Potatoes (Case Study: Three Counties in Lorestan Province) 1
F. Azadpour, M. Shakarami, S.Y. Karimi

Studying the Effect of Moisture Deficit Stress on the Light Absorption and Use Efficiency of Different Red Bean Cultivars (*Phaseolus vulgaris* L.) in a Mediterranean Climate 19
F. Parsapour, F. Mondani, Gh. Mohammadi

Multi-Criteria Analysis of Allowable Soil Moisture Depletion Coefficients in Sugar Beet Irrigation Management: Linking Functional, Technical, and Economic Criteria 39
R. Mohammadikia

The Role of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria in Reducing Drought Stress in Tomato Plants and Soil Biological Characteristics 55
S. Sasanifar, A. Beheshti Ale Agha, R. Sharifi, S. Bahraminejad

Enhancing the Efficiency of *Sorghum bicolor* L. in the Remediation of Cadmium-Contaminated Soils through a Bio-Chemical Approach 71
F. Rostami, H.R. Eisvand, M. Daneshvar, M. Saeidi, S. Rahimi-Moghaddam

The Effect of Land Use Change on Root Characteristics and Soil Enzyme Dynamics in the Hyrcanian Ecosystem 87
F. Heidari, Y. Kooch