



نشریه آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

جلد ۳۹ شماره ۲

سال ۱۴۰۴

شاپا: ۴۷۵۷-۲۰۰۸

شماره پیاپی ۱۰۰

عنوان مقالات

- ۱۰۷ تأثیر کمپوست و ورمی کمپوست پسماند زیتون بر عملکرد و کیفیت روغن زیتون سیده حمیده موسوی دیزکوهی - مجتبی بارانی مطلق - اسماعیل دردی پور - الهام ملک زاده - فردین صادق زاده - محمود قاسم نژاد
- ۱۲۳ تأثیر گلوله های آب بر قابلیت استفاده ی آهن از منابع مختلف در گیاه بادام زمینی در یک خاک آهکی فاطمه بی بی شهابی - رضا خراسانی - زهرا قشلاقی
- ۱۴۱ مدل سازی آب قابل استفاده خاک با استفاده از روش های نروفازی، برنامه ریزی بیان ژن و جنگل تصادفی مهسا حسینی پور کاشانی - شکراله اصغری
- ۱۵۷ تأثیر پوشش های درختی و درختچه ای بر ویژگی های خاک منطقه رودبار گیلان یحیی کوچ - مهین فولادی دوقزلو - کنایون حق وردی
- ۱۷۵ بررسی تغییر برخی شاخص های رویش گیاه کلزا در اثر کاربرد خاکی گوگرد و سلیوم فریدون نورقلی پور - مریم محمدی - حسین میر سید حسینی - رضا سلیمانی
- ۱۹۵ شبیه سازی مراحل رشد گیاه سیب زمینی در ایران تحت سناریوهای RCP با استفاده از مدل WOFOST فاطمه بیاتانی - غلامعباس فلاح قالیهری

آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

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

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد 39 شماره 2 خرداد-تیر سال 1404

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

سرمدیر: امیر فتوت

اعضای هیئت تحریریه:

اوستان، شاهین	علوم خاک (دانشگاه تبریز)
بذرافشان، جواد	هواشناسی کشاورزی (دانشگاه تهران)
تقواییان، صالح	آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، امریکا)
خراسانی، رضا	علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)
خرمائی، 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. 91775-1163 - دبیرخانه نشریات علمی- نشریه آب و خاک

پست الکترونیکی: jsa3@um.ac.ir

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

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



مندرجات

107	تأثیر کمپوست و ورمی کمپوست پسماند زیتون بر عملکرد و کیفیت روغن زیتون سیده حمیده موسوی دیزکوهی - مجتبی بارانی مطلق - اسماعیل دردی پور - الهام ملک زاده - فردین صادق زاده - محمود قاسم نژاد
123	تأثیر گلو تائین بر قابلیت استفاده ی آهن از منابع مختلف در گیاه بادام زمینی در یک خاک آهکی فاطمه بی بی شهابی - رضا خراسانی - زهرا قشلاقی
141	مدل سازی آب قابل استفاده خاک با استفاده از روش های نروفازی، برنامه ریزی بیان ژن و جنگل تصادفی مهسا حسینی پور کاشانی - شکراله اصغری
157	تأثیر پوشش های درختی و درختچه ای بر ویژگی های خاک منطقه رودبار گیلان یحیی کوچ - مهین فولادی دوقزلو - کتابون حق وردی
175	بررسی تغییر برخی شاخص های رویشی گیاه کلزا در اثر کاربرد خاکی گوگرد و سلیوم فریدون نورقلی پور - مریم محمدی - حسین میر سید حسینی - رضا سلیمانی
195	شبیه سازی مراحل رشد گیاه سیب زمینی در ایران تحت سناریوهای RCP با استفاده از مدل WOFOST فاطمه بیاتانی - غلامعباس فلاح قاله ری

The Effect of Compost and Vermicompost Derived from Olive Solid Pomace on Olive Yield and Oil Quality

S.H. Mousavi Dizkouhi¹, M. Barani Motlagh^{1*}, E. Dordipour¹, E. Malekzadeh¹, F. Sadeghzadeh², M. Ghasem Nejhad³

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

(*- Corresponding Author Email: mbarani@gau.ac.ir)

2- Department of Soil Science, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran

3- Department of Horticulture Science, Faculty of Agriculture Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

Received: 24 July 2024
Revised: 01 June 2025
Accepted: 09 June 2025
Available Online: 09 June 2025

How to cite this article:

Mousavi Dizkouhi, S.H., Barani Motlagh, M., Dordipour, E., Malekzadeh, E., Sadeghzadeh, F., & Ghasem Nejhad, M. (2025). The effect of nutrition with compost and vermicompost derived from olive solid pomace on olive yield and oil quality. *Journal of Water and Soil*, 39(2), 105-119. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.89053.1420>

Introduction

The olive tree (*Olea europaea* L.) is one of the most significant and ancient cultivated plants in the Mediterranean region, prized for its edible fruit and high-quality oil. However, the increasing scale of olive oil production has led to the accumulation of large quantities of solid waste, particularly Olive Solid Pomace (OSP), which poses considerable environmental challenges due to its high organic load and phytotoxic components. Sustainable management and valorization of this waste are crucial for reducing environmental risks and improving the circular economy in agricultural systems. This study aimed to evaluate the effects of compost and vermicompost derived from OSP, both in enriched and non-enriched forms, on the yield of olive fruit and the quality characteristics of the resulting olive oil. To this end, a field experiment was conducted during the 2018 growing season in a traditional olive orchard located in Rudbar, Gilan Province, Iran. The experiment was carried out using a randomized complete block design (RCBD) with 12 treatments and three replications using the 'Arbequina' cultivar, a well-known olive variety cultivated for its high oil content and quality.

Materials and Methods

Compost and vermicompost were first produced from olive solid pomace. After analyzing their basic physicochemical properties, several treatments were biologically enriched using plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR), including *Bacillus megaterium* (phosphorus-solubilizing), *Azotobacter chroococcum* (nitrogen-fixing), and *Thiobacillus thioparus* (sulfur-oxidizing). Additional treatments were chemically enriched by incorporating 1 kg each of urea (as a nitrogen source), triple superphosphate (as a phosphorus source), and elemental sulfur at a rate of 1% by weight. The experimental treatments included: raw olive pomace, unenriched compost, chemically enriched compost, biologically enriched compost, unenriched vermicompost, chemically enriched vermicompost, biologically enriched vermicompost, a full NPK fertilizer treatment, a manure-only treatment (10 kg of animal manure), and a no-fertilizer control. All olive waste-based amendments were applied at 3% w/w. NPK fertilizers included urea (750 g in three split applications), triple superphosphate (250 g), and



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

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.89053.1420>

potassium sulfate (750 g). Micronutrients such as magnesium sulfate, manganese, iron, zinc, copper, boric acid, and elemental sulfur were applied based on soil test recommendations. Uniform horticultural practices, including surface drip irrigation, weed control, pest management, and other cultural operations, were applied across all plots. Post-treatment, soil samples were collected at depths of 0–30, 30–60, and 60–90 cm to measure pH, EC, organic carbon, and available phosphorus. Foliar sprays were prepared with 1,000 ml solutions of urea and potassium sulfate (10 g/L), zinc sulfate (3 g/L), and boric acid (5 g/L) and applied twice at sunset using a handheld sprayer. Fruit yield, oil content, and selected oil quality parameters were then assessed.

Results and Discussion

Application of biologically enriched vermicompost significantly improved olive yield and oil quality. Trees receiving this treatment produced 50.33 kg of fruit per tree—an increase of 93.58% compared to the control. Similarly, the highest oil yield (11.14 kg per tree) was recorded in the biologically enriched vermicompost treatment. The lowest peroxide value ($1.06 \text{ meq O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ oil}$) was also observed in this treatment, representing an 88.27% reduction compared to the control. Organic fertilizers positively influenced the oil percentage of the fruit, with biologically enriched compost yielding the highest oil content (57.7%), which was 132.2% higher than the control. The extinction coefficients K270 and K232, indicators of oil oxidation, were reduced by 96.2% and 78.5%, respectively, in the biologically enriched vermicompost treatment. Furthermore, this treatment resulted in the lowest free fatty acid content, 94.7% lower than the control. Leaf phosphorus content was also significantly enhanced, reaching 0.33% in the biological vermicompost treatment, a 230% increase over the control. These findings underscore the beneficial role of organic fertilizers, particularly biologically enriched vermicompost, in improving soil fertility, nutrient availability, and plant performance. The high phosphorus content in the compost and vermicompost, combined with microbial activity, played a pivotal role in enhancing both yield and oil quality. The application of PGPRs proved particularly effective, as they not only facilitated nutrient cycling but also contributed to improved physiological responses in olive trees.

Conclusion

Overall, the results suggest that olive trees fertilized with biologically enriched organic amendments derived from olive pomace benefit from improved oil quality and fruit yield. The presence of adequate phosphorus and beneficial bacteria played a pivotal role in enhancing plant nutrition and oil characteristics. Therefore, the use of PGPR in the enrichment of composted organic materials can be an effective and sustainable strategy to improve the productivity and quality of olive oil. Among the treatments, biologically enriched vermicompost emerged as the most effective and is recommended for further field application. Future research should explore other organic amendments and their long-term effects on olive orchards.

Keywords: Compost, Olive oil, Pomace, Vermicompost

مقاله پژوهشی

جلد ۳۹، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۴، ص. ۱۱۹-۱۰۵

تأثیر کمپوست و ورمی کمپوست پسماند زیتون بر عملکرد و کیفیت روغن زیتون

سیده حمیده موسوی دیزکوهی^۱ - مجتبی بارانی مطلق^{۱*} - اسماعیل دردی پور^۱ - الهام ملک زاده^۱ - فردین صادق زاده^۲ - محمودقاسم نژاد^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹

چکیده

تولید فرآورده‌های آلی راهکاری مؤثر برای دفع پسماند زیتون و آلودگی زیست‌محیطی ناشی از آن، می‌باشد. در این پژوهش، تأثیر کمپوست و ورمی کمپوست حاصل از پسماند زیتون بر عملکرد و کیفیت روغن رقم آربکین بررسی شد. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در ۳ تکرار در رودبار استان گیلان اجرا شد. تیمارها شامل تفاله خام زیتون، کمپوست غنی نشده، کمپوست غنی شده شیمیایی، کمپوست غنی شده زیستی، ورمی کمپوست غنی نشده، ورمی کمپوست غنی شده شیمیایی، ورمی کمپوست غنی شده زیستی، ورمی کمپوست (از منبع کود اوره- سوپرفسفات تریپل و سولفات پتاسیم)، شاهد مثبت (دارای ۱۰ کیلوگرم کود دامی)، شاهد (بدون کود دامی) بودند. مواد آلی غنی شده با باکتری‌های محرک رشد گیاه به میزان ۳ درصد وزنی در چاله‌های مورد نظر اعمال شد. در نهایت عملکرد میوه، روغن و برخی ویژگی‌های روغن زیتون ارزیابی شدند. بر طبق نتایج، ورمی کمپوست غنی شده زیستی عملکرد کل میوه زیتون (۵۰/۳۳ کیلوگرم به ازای هر درخت) را نسبت به شاهد به میزان ۹۳/۵۸ درصد افزایش داد. بیشترین عملکرد روغن زیتون نسبت به شاهد متعلق به ورمی کمپوست غنی شده زیستی به میزان ۱۱/۱۴ کیلوگرم به ازای هر درخت بود. پایینترین ارزش پراکسید روغن زیتون با کاربرد ورمی کمپوست غنی شده زیستی به میزان ۱/۰۶ میلی اکسیژن بر کیلوگرم روغن نسبت به شاهد حاصل شد و ۸۸/۲۷ درصد کاهش نشان داد. کمپوست بر درصد روغن میوه‌ی زیتون اثرگذار بود؛ به‌طوری‌که بیشترین درصد روغن با کاربرد کمپوست غنی شده زیستی به میزان ۵۷/۷۷ درصد حاصل شد که نسبت به تیمار شاهد ۲/۳ برابر افزایش داشت. پایین‌ترین شاخص ضرایب خاموشی روغن زیتون (K_{270}) و (K_{232}) با کاربرد ورمی کمپوست غنی شده زیستی حاصل شد که نسبت به شاهد به ترتیب ۹۶/۲۴ و ۷۸/۵۳ درصد کاهش داشتند. کمترین مقدار اسیدهای چرب آزاد روغن با کاربرد ورمی کمپوست غنی شده زیستی نسبت به تیمار شاهد با کاهش ۹۴/۶۶ درصد، حاصل شد. بیشترین فسفر برگ متعلق به ورمی کمپوست غنی شده زیستی با ۰/۳۳ درصد و کمترین مقدار متعلق به تیمار شاهد به میزان ۰/۱ درصد بود. به‌طور کلی، درختان زیتونی که با فرآورده‌های آلی حاصل از تفاله جامد زیتون غنی شده با باکتری تغذیه شده‌اند، از نظر برخی ویژگی‌های کیفی روغن و عملکرد میوه رضایت‌بخش بوده‌اند. بنابراین، می‌توان از باکتری‌های محرک رشد گیاه در غنی‌سازی مواد آلی در جهت بهبود کیفیت روغن زیتون بهره برد. ضمناً، ورمی کمپوست غنی شده زیستی به‌عنوان تیمار برتر شناخته شد.

واژه‌های کلیدی: باکتری محرک رشد گیاه، پسماند زیتون، روغن زیتون، مواد آلی

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

(*)- نویسنده مسئول: (Email: mbarani@gau.ac.ir)

۲- گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۳- گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

مقدمه

زیتون^۱ متعلق به خانواده زیتون‌سانان^۲ بوده که به‌صورت گیاهی همیشه سبز در نواحی گرمسیری و نیمه گرمسیری رشد می‌کند. میوه‌ی زیتون دارای روغنی بسیار مطلوب و با خواص تغذیه‌ای عالی می‌باشد. با توجه به نیاز شدید کشور به روغن‌های خوراکی و کیفیت عالی روغن زیتون، افزایش سطح زیر کشت آن یکی از اهداف برنامه‌های کشاورزی در ایران می‌باشد (Seifi, Jalali, Ebrahimnia, & Feridouni, 2016). یکی از صنایع رایج در ایران و بسیاری از کشورهای زیتون‌خیز دنیا، صنعت استخراج روغن زیتون است که طی آن میزان زیادی پسماند جامد تولید می‌گردد (Seyedi, Ghasemnejad, & Hamid Oghli, 2017 and 2018; Hashempour, Farhani Rasti, Gurbanzadeh, & Fazli Sangani, 2018). درخت زیتون از معدود درختانی است که می‌تواند در خاک‌های غیر حاصلخیز میوه تولید کند و از آن روغنی با کیفیت مناسب به‌دست آورد (Hashempour, Fatuhi, Qazvini, Bakhshi, & Asadi Sanam, 2010). اما استفاده از پسماند جامد زیتون به‌دلیل غنی بودن از مواد آلی و عناصر غذایی (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) می‌تواند بر عملکرد میوه و روغن زیتون اثرگذار باشد (Seyedi et al., 2017 and 2018). گرچه استفاده از تفاله خام زیتون، روشی مؤثر برای استفاده دوباره از آن می‌باشد (Michailides, Christou, Akrotas, Tekerlekopoulou, & Vayenas, 2011)؛ اما پسماند زیتون می‌تواند موجب بروز مشکلات زیست‌محیطی گردد (Hachicha, Rigane, Ben Khodher, Nasri, & Medhioub, 2003; López-Piñero, Albarrán, Rato & Nunes, 2008). مواد زاید آلی در مزارع و باغات باعث ایجاد مشکل برای محیط‌زیست، سلامتی انسان و میکروفلورای مفید خاک می‌شوند. همچنین کاربرد مستقیم این مواد به‌صورت خام به علت ترکیبات ناشناخته برای مصرف پاتوژن‌ها، وجود ترکیبات سمی و تخم علف‌های هرز و عناصر سنگین برای استفاده زراعی نامناسب است. به علاوه، جوامع جانوری از ترکیبات آلی وارد شده به خاک تأثیر می‌پذیرند (Ahmad, Jilani, Arshad, Zahir, & Khalid, 2007). با این وجود، یکی از بهترین و مؤثرترین روش‌های دفع و بازیافت پسماند جامد زیتون تولید کمپوست از آن می‌باشد که بسیار مناسب و مقرون به صرفه است. پسماند کارخانجات روغن‌کشی زیتون غنی از مواد آلی و عناصر غذایی است که می‌توان پس از کمپوست‌سازی، از آن برای بهبود حاصلخیزی خاک استفاده و مشکل بازیافت آن را نیز حل کرد (Seyedi et al., 2017; Hashempour et al., 2018). در کمپوست باکتری‌های مؤثر و میکروارگانیسم‌های ساختاری مهم وجود دارند که در فرآیند تولید کمپوست مؤثرند (Pan, Dam, & Sen, 2012). مواد

کمپوست شده توانایی بهبود سلامت خاک و رشد گیاهان را دارند و از رشد پاتوژن‌ها و بیماری‌های گیاهان ممانعت می‌کنند. کمپوستینگ به‌عنوان مناسبترین خصیصه برای پیوستن با مواد زاید جامد آلی در جهت استفاده در کشاورزی در نظر گرفته می‌شود (Ahmad et al., 2007). استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی مانند کمپوست‌ها، ابزاری مؤثر برای بهبود خاکدانه‌سازی، ساختمان خاک، افزایش جمعیت و تنوع میکروبی، افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی در خاک می‌باشد (Alikhani & Hemmati, 2014). از آنجایی که کمپوست حاوی مقادیر قابل ملاحظه‌ای عناصر پرمصرف و کم‌مصرف می‌باشد، لذا می‌تواند به‌عنوان منبع غنی عناصر غذایی برای خاک مفید باشد (Sadeh Zadeh, Fallah Tolekolai, Bahmanyar, & Emadi, 2018). این مواد ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را بهبود بخشیده که می‌توانند موجب رشد گیاهان گردند (Sanchez, Ospina, & Montoya, 2017). ورمی‌کمپوست به‌دلیل داشتن عناصر غذایی به‌ویژه فسفر به شکل‌های آلی و معدنی، مواد محرک رشد و ریز جانداران مفید، رشد گیاهان را افزایش می‌دهد. به‌طور کلی، استفاده از کودهای زیستی به همراه منابع کم محلول فسفات می‌تواند جذب فسفر و رشد گیاه را افزایش و مصرف کود شیمیایی را کاهش دهد (Khosravi, Zarei, & Ronaghi, 2017).

طبق بررسی‌های سیدی و همکاران (Seyedi et al., 2017) در منطقه رودبار گیلان، کاربرد کمپوست تفاله زیتون و کود دامی بر کیفیت روغن زیتون تأثیر مثبت داشت. نتایج تحقیقات پیشین نشان داد، کمپوست حاصل از تفاله هسته‌دار زیتون موجب افزایش اندازه غده سیب‌زمینی شد (Hachicha et al., 2003). نتایج کاربرد کمپوست تفاله زیتون نشان داد، عملکرد کاهو به میزان ۱۴۵ درصد افزایش داشت. این افزایش عملکرد کاهو نشانه‌ی بهبود ساختار خاک، محتوی مواد آلی و ذخیره و افزایش عناصر غذایی می‌باشد (Michailides et al., 2011). در نتایج بررسی‌های دیگری، ورمی‌کمپوست تولیدی از تفاله خام زیتون، حاوی عناصری مانند نیتروژن و فسفر بوده و سبب افزایش رشد کلم گردید. همچنین تأثیر مثبت بر رشد سبزیگی گیاهان دارد و ریشه و اندام هوایی گیاه را توسعه می‌بخشد (Khosravi et al., 2017). فیاضی و همکاران (Fayazi, Abdali Mashhadi, Kochzadeh, Popzen, & Arzanesh, 2018) در بررسی‌های خود نشان دادند، استفاده از باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن و حل‌کننده فسفر همراه با ورمی‌کمپوست می‌تواند سبب افزایش مقدار نیتروژن و فسفر موجود در ورمی‌کمپوست شود. همچنین استفاده از ورمی‌کمپوست برای افزایش عملکرد و شاخص‌های عملکرد کودی تخم کاغذی توصیه شده است (Khajeh Haghverdi, Ardakani, 2018).

1- *Olea europaea* L.

2- Oleaceae

این پژوهش استفاده از پسماند و ضایعات خام زیتون به شکل کود آلی کمپوست و ورمی کمپوست در جهت بهبود حاصلخیزی خاک، افزایش رشد و عملکرد گیاه، جلوگیری از تخریب خاک و بروز مشکلات جدی زیست‌محیطی، راه حلی مقرون به صرفه برای رسیدن به کشاورزی پایدار می‌باشد.

این آزمایش در اسفند سال ۱۳۹۸ در باغ مادری زیتون علی آباد شهرستان رودبار استان گیلان با متوسط بارندگی سالیانه ۲۰۹/۳

Table 1- Some physical and chemical properties of orchard soil before treatment application

Table 2- Analysis results of olive pomace and animal manure (cow) before the experiment

تفاله جامد حا صل از روغن ک شی میوه زیتون به صورت خام تهیه شد. قبل از اختلاط کود دامی و تفاله زیتون، کود دامی (گاوی) طی دو تا سه مرحله با آب فراوان شستشو داده شد. این عمل به منظور خروج شیرابه، توزیع یکنواخت رطوبت و مرطوب شدن تمامی قسمت های بستر، شستشوی عناصر محلول و کاهش شوری انجام شد؛ سپس هوا خشک گردید. از تفاله زیتون به عنوان مواد پایه و از کود دامی جهت تحریک فعالیت های میکروبی و آغازگر استفاده شد. برخی ویژگی های اولیه تفاله زیتون و کود دامی به کار برده شده در تیمارها اندازه گیری شدند (جدول ۲).

جدول ۳- ترکیب شیمیایی کمپوست، ورمی کمپوست حاصل از تفاله زیتون

Table 3- Chemical compound of compost, vermicompost obtained from olive pomace

ترکیب شیمیایی Chemical compound	ورمی کمپوست Vermicompost (mgkg ⁻¹)	کمپوست Compost (mgkg ⁻¹)	ترکیب شیمیایی Chemical compound	ورمی کمپوست Vermicompost (%)	کمپوست Compost (%)	ترکیب شیمیایی Chemical compound	ورمی کمپوست Vermicompost (%)	کمپوست Compost (%)
Fe _{ava}	470	450	Total Fe	0.25	0.23	Moisture	29.26	30.11
Mn _{ava}	330	220	Total Mn	0.66	0.47	O.C	31.86	30.75
Zn _{ava}	20	15	Total Zn	0.08	0.06	Total N	1.69	1.25
Cu _{ava}	95	65	Total Cu	0.17	0.16	Total P	2.18	0.44
K _{ava}	676	778	C/N	18.85	24.61	Total Na	5.1	3.5
Na _{ava}	400	300	CEC	33.48	30.43	Total K	2.3	3.9
P _{ava}	380	320	pH	7.06	7.2	Total Ca	6.95	4.25
Color	Dark brown	Dark brown	EC	2.02	2.25	Total Mg	1.6	1.4

* مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی برحسب میلی‌اکی والان بر ۱۰۰ گرم، قابلیت هدایت الکتریکی (۱:۱۰) برحسب دسی‌زیمنس بر متر و pH (۱:۱۰) و نسبت کربن به نیتروژن بی‌واحد می‌باشند.

* The values of cation exchange capacity are in meq/100 grams, electrical conductivity (1:10) in dS/m, pH (1:10), and C/N ratio are unitless.

(O_{mill})، کمپوست غنی نشده (C)، کمپوست غنی شده شیمیایی (C_c)، کمپوست غنی شده زیستی (C_B)، ورمی کمپوست غنی نشده (V)، ورمی کمپوست غنی شده شیمیایی (V_B)، ورمی کمپوست غنی شده زیستی (V_B)، NPK (۷۵۰ گرم اوره، ۲۵۰ گرم سوپر فسفات تریپل، ۷۵۰ گرم سولفات پتاسیم)، (۱۰ کیلوگرم کود دامی پوسیده)، شاهد (بدون کود دامی پوسیده) بودند. در اسفند ۱۳۹۸، تیمارهای مورد نظر در بخش سایه‌انداز درختان زیتون درون چالکودها اعمال گردید. مقدار مصرف تفاله جامد زیتون و فرآورده‌های تولیدی حاصل از آن، ۳ درصد وزنی (Sadeh Zadeh et al, 2018; Wang, Xia, Waigia, 2018; Gaoa, et al., 2018) و مقادیر NPK از منبع اوره (در ۳ تقسیط به میزان ۷۵۰ گرم)، سوپرفسفات تریپل به میزان ۲۵۰ گرم و سولفات پتاسیم به میزان ۷۵۰ گرم و همچنین عناصر کم‌مصرف از منبع سولفات‌های منیزیم، منگنز، آهن، روی، مس و اسیدبوریکی و گوگرد عنصری پودری براساس نتیجه آزمون خاک بود (Pandit, Mulder, 2017; Hale, Schmidt, & Cornelissen, 2017). محلول‌پاشی همه نقاط تاج درختان با محلول کودهای اوره (ده در هزار)، سولوپتاس (ده در هزار)، سولفات روی (سه در هزار) و اسیدبوریکی (پنج در هزار) با سمپاش دستی به هنگام غروب آفتاب انجام شد. برخی عملیات شامل سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی، مبارزه با علف‌های هرز، مبارزه با

در زمان تولید فرآورده‌های تفاله زیتون، به‌منظور سرعت بخشیدن، اثر گذاری قویتر و موفقیت در بلوغ کمپوست و ورمی کمپوست (Pan et al., 2012) و جهت غنی سازی آن‌ها با باکتری‌های مفید خاکزی، از سنگ فسفات به میزان ۱ درصد (Ahmad et al., 2007) به همراه زادمایه باکتری‌های PGPR^۱ (باکتری‌های حل‌کننده فسفر (باسیلوس مگاتریوم)، تثبیت کننده نیتروژن (ازتو باکتر کروکوکوم) و گوگرد به میزان ۱ درصد وزنی به همراه جدایه‌های تیوباسیلوس تیوپاروس استفاده شد (Busato, Lima, Aguiar, Canellas, & Olivares, 2014; Kapoor, Yadav, 2012; Alikhani & Hemmati, 2014; Singh, Mishra, & Tauro, 1983; از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گرگان تهیه شدند. جمعیت زادمایه کشت تازه هر جدایه باکتری بر اساس فاکتور رقت در حدود ۱۰^۹ × ۴ کلنی بر میلی‌لیتر تنظیم و سپس هر کیلوگرم فرآورده‌های تفاله زیتون با ۲۵ میلی‌لیتر از هر زادمایه تلقیح شدند (Busato et al., 2012). بخشی از کمپوست و ورمی کمپوست نیز با استفاده از اختلاط کود نیتروژنی، فسفوری و گوگردی به میزان ۱ درصد وزنی به ترتیب از منابع اوره (یک کیلوگرم)، سوپرفسفات تریپل (یک کیلوگرم) و گوگرد عنصری (یک کیلوگرم) به صورت شیمیایی غنی‌سازی شدند (Alikhani & Hemmati, 2014; Majeed, 2014; Munawar, Niaz, et al., 2018). تیمارها شامل تفاله خام زیتون

از جمله اسید چرب آزاد، ارزش پراکسید، ضریب خاموشی مخصوص در دو طول موج ۲۳۲ و ۲۷۰ نانومتر انجام گرفت.

این آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۱۰ تیمار و ۳ تکرار انجام شد. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS ارزیابی شدند. ترسیم جداول به کمک اکسل انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی تعیین گردید و تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح $P < 0.01$ و $P < 0.05$ مشخص گردید.

نتایج و بحث

نتایج جدول تجزیه واریانس اثر فرآورده‌های تفاله جامد زیتون بر برخی ویژگی‌های میوه و روغن زیتون نشان داد که ویژگی‌های ارزش پراکسید روغن، در صد روغن، ضرایب خاموشی (K_{270} , K_{232})، اسید چرب آزاد، فسفر برگ، عملکرد میوه و روغن زیتون در سطح احتمال ۱ درصد تفاوت معنی‌داری نشان دادند (جدول ۴).

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر فرآورده‌های تفاله جامد زیتون بر برخی ویژگی‌های میوه و روغن زیتون

Table 4- Analysis of variance results for the effect of olive pomace-derived products on selected fruit and olive oil characteristics

میانگین مربعات Average of squares									
ارزش پراکسید Peroxide value	درصد روغن Oil percentage	K_{270} Extinction coefficient	K_{232} Extinction coefficient	اسیدهای چرب آزاد Free fatty acids	فسفر برگ Leaf phosphorus	عملکرد روغن Oil yield	عملکرد میوه Fruit yield	درجه آزادی (df)	منابع تغییرات (S.O.V)
0.75 ^{ns}	2.001 ^{ns}	0.003 ^{ns}	0.0009 ^{ns}	0.0002 ^{ns}	0.00001 ^{ns}	0.005*	4.11**	2	بلوک Block
17.54**	313.17**	0.91**	0.66**	0.14**	0.015**	6.25**	189.78**	11	تیمار Treatment
0.24	1.002	0.001	0.0004	0.0005	0.0001	0.001	0.53	22	خطای کل Total error
10.05	2.56	7.76	1.57	5.98	6.46	4.7	1.86		ضریب تغییرات C.V. (%)

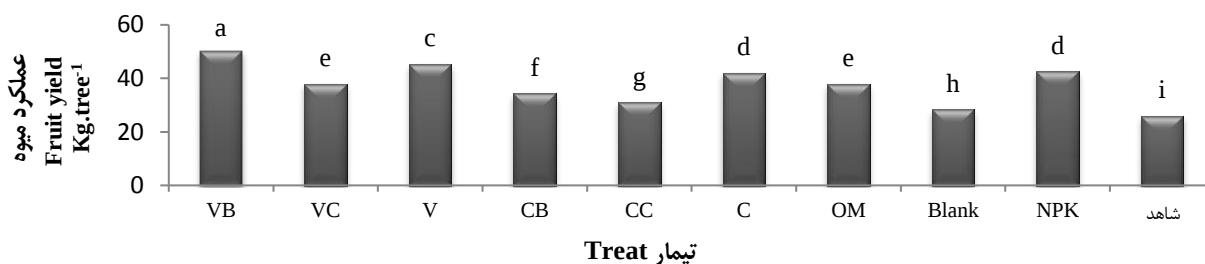
ns، * و ** به ترتیب نشان‌دهنده عدم معنی‌داری و معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد می‌باشد.

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

عمل (Montemurro, Fiore, D'Andrea, & Diacono, 2016). تلقیح ریزموجودات به مواد آلی از طریق افزایش جذب فسفر و سایر عناصر جهت افزایش رشد و عملکرد گیاهان توجه بسیاری را به خود جلب کرده است (Khosravi et al., 2017). طبق بررسی‌های توسکانو و همکاران (Toscano, Casacchia, Diacono, & Seyed et al., 2013) و سیدی و همکاران (Seyed et al., 2017)، تولید کمپوست از تفاله جامد زیتون در باغات زیتون موجب افزایش عملکرد میوه زیتون شد. بنابراین کاربرد ورمی کمپوست و کمپوست تفاله جامد زیتون تأثیر مثبتی در تغذیه رقم آریبکن از لحاظ فسفر نشان داد که می‌توان آن را به افزایش عملکرد میوه هم تعمیم داد.

آفات و حشرات و سایر عملیات باغداری برای همه تکرارها به طور یکسان اجرا گردید. بعد از اعمال تیمارهای مورد نظر و مراقبت‌های داشت، برداشت میوه‌ها همزمان با تغییر رنگ آن‌ها از سبز به ارغوانی و مقارن با زمان رسیدگی میوه‌ها صورت گرفت. کل میوه‌های هر درخت به طور جداگانه برداشت شده و توزین گردید. سپس از هر درخت به طور تصادفی حدود ۲ کیلوگرم میوه با دست برداشت و در پاکت‌های کاغذی قرار داده شد و تا زمان اندازه‌گیری برخی پارامترهای میوه و روغن، در یخچال با دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. نمونه‌برداری برگ‌ها از وسط شاخه‌های جوان فصل جاری اواسط تیرماه برای تعیین غلظت فسفر به روش خشک سوزانی انجام شد. برای استخراج روغن در ابتدا زیتون به صورت خمیر یکنواخت درآمده و سپس به کمک دستگاه روغن‌گیری دستی روغن‌کشی شدند. نمونه‌های روغن به دست آمده تا زمان شروع آزمایش در یخچال با دمای حدود ۴ درجه سانتی‌گراد و در تاریکی نگهداری شدند. برای تعیین درصد روغن میوه از روش سوکسله، برخی صفات کیفی روغن

بر طبق نتایج مقایسه میانگین، عملکرد میوه زیتون با کاربرد ورمی کمپوست غنی شده زیستی به میزان ۵۰/۳۳ کیلوگرم به ازای هر درخت نسبت به شاهد بود که ۹۳/۵۸ درصد افزایش داشت. بعد از آن تیمار ورمی کمپوست معمولی عملکرد بالایی را به خود اختصاص داد. مابقی تیمارها از نظر عملکرد تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند (شکل ۱). نتایج این پژوهش در توافقی با یافته‌های سیدی و همکاران (Seyed et al., 2016) بود که دریافتند کاربرد کمپوست در درختان زیتون موجب افزایش وزن میوه و عملکرد میوه شد. پژوهشگران دیگر در تحقیقی به این نتیجه رسیدند که کاربرد تفاله زیتون به عنوان اصلاح‌کننده ارزشمند خاک و منبع مواد آلی خاک، تأثیر مثبت روی عملکرد زیتون دارد (López-Piñeiro et al., 2008).



شکل ۱- تأثیر فرآورده‌های مختلف تفاله خام زیتون بر عملکرد میوه زیتون

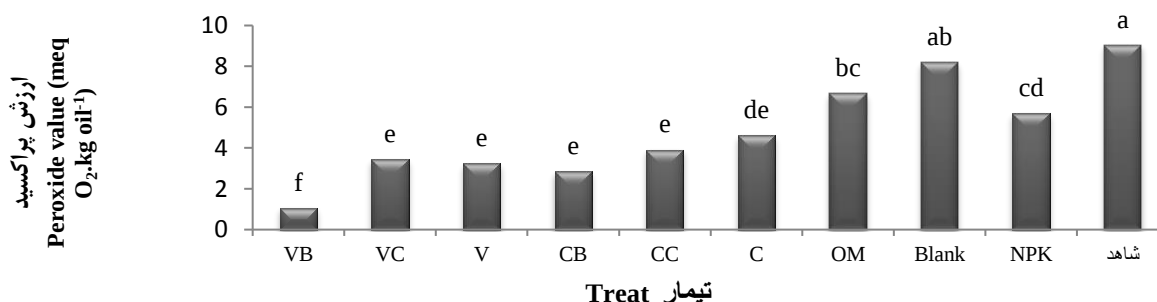
(VB= ورمی کمپوست زیستی، VC= ورمی کمپوست شیمیایی، V= ورمی کمپوست، CB= کمپوست زیستی، CC= کمپوست شیمیایی، C= کمپوست، OM= تفاله خام زیتون، Blank= شاهد مثبت (دارای کود دامی)، NPK= (مخلوط اوره+سوپرفسفات تریپل+سولفات پتاسیم)، شاهد= بدون کود دامی)

Figure 1- The effect of different raw olive pomace products on olive fruit yield

(VB= Biological Vermicompost, VC= Chemical Vermicompost, V= Vermicompost, CB= Biological Compost, CC= Chemical Compost, C= Compost, OM= Olive mill, Blank= Positive Control (with 10 kg of cow manure), NPK (750 grams of urea, 250 grams of triple superphosphate, 750 grams of potassium sulfate), Control= Without cow manure)

ورمی کمپوست غنی نشده از کیفیت بالایی برخوردار بود. غنی سازی ورمی کمپوست موجب افزایش گروه های عاملی اسید هیومیک شد که می تواند عاملی در جهت افزایش توانایی و بهبود خواص فیزیکوشیمیایی خاک باشد (Alikhani & Hemmati, 2014). غنی سازی ورمی کمپوست با سنگ فسفات موجب افزایش زیست فراهمی فسفر به علت تغییر و افزایش جمعیت ریزموجودات بومی خاک شد. این امر افزایش عملکرد و جذب عناصر غذایی را به دنبال دارد. این کار با هدف تغییر جوامع میکروبی در ورمی کمپوست و بهبود کیفیت کود های آلی صورت می گیرد (Busato et al., 2012). ورمی کمپوست به دلیل داشتن عناصر غذایی به خصوص فسفر به شکل های آلی و معدنی، مواد محرک رشد و ریز جانداران مفید، رشد گیاهان را افزایش می دهد. ورمی کمپوست سبب افزایش رشد کلم نیز می شود. همچنین تأثیر مثبتی بر روی رشد سبزیگی گیاهان دارد و ریشه و اندام هوایی گیاه را توسعه می بخشد (Khosravi et al., 2017).

پایین ترین ارزش پراکسید روغن زیتون با کاربرد ورمی کمپوست غنی شده زیستی به میزان ۱/۰۶ میلی اکسیژن بر کیلوگرم روغن نسبت به شاهد با مقدار ۹/۰۴ میلی اکسیژن بر کیلوگرم روغن حاصل شد؛ که نسبت به شاهد ۸۸/۲۷ درصد کاهش نشان داد. شکل ۲ نشان داد که تیمارهای کمپوست و ورمی کمپوست نسبت به مابقی تیمارها پایین ترین ارزش پراکسید روغن را دارا بودند؛ هر چند که نسبت به هم اختلاف معنی دار نداشتند. کمتر بودن ارزش پراکسید یک ویژگی مثبت کیفیت روغن محسوب می شود. هر چند که برخی از تیمارها نسبت به تیمار شاهد اختلاف معنی داری نداشتند، اما به نظر می رسد که استفاده از فرآورده های تفاله زیتون و فرآیند غنی سازی بر ارزش پراکسید روغن تأثیر مثبت قابل توجهی داشته و کیفیت روغن زیتون را از طریق کاهش ارزش پراکسید درختان تیمار شده نسبت به تیمار شاهد بهبود بخشیده است (شکل ۲). یافته های ما با نتایج سیدی و همکاران (Seyedi et al., 2016) مطابقت دارد. ورمی کمپوست غنی شده با کودهای شیمیایی NPS نسبت به



شکل ۲- تأثیر فرآورده های مختلف تفاله خام زیتون بر ارزش پراکسید روغن زیتون

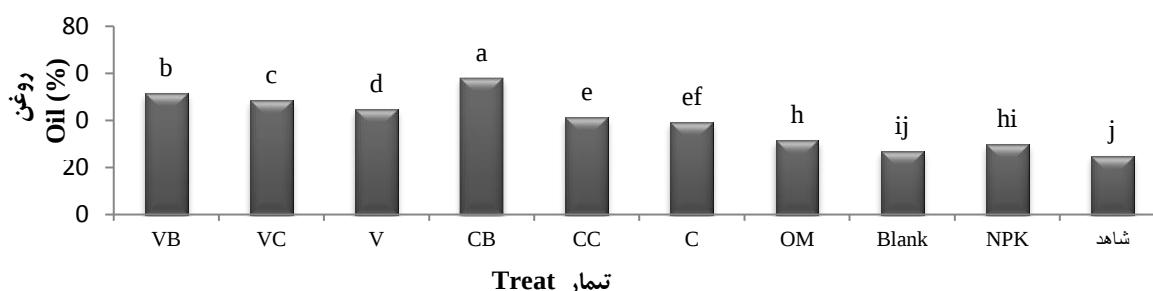
(VB= ورمی کمپوست زیستی، VC= ورمی کمپوست شیمیایی، V= ورمی کمپوست، CB= کمپوست زیستی، CC= کمپوست شیمیایی، C= کمپوست، OM= تفاله خام زیتون، Blank= شاهد مثبت (دارای کود دامی)، NPK= (مخلوط اوره+سوپرفسفات تریپل+سولفات پتاسیم)، شاهد= بدون کود دامی)

Figure 2- The effect of different raw olive pomace products on the peroxide value of olive oil

(VB= Biological Vermicompost, VC= Chemical Vermicompost, V= Vermicompost, CB= Biological Compost, CC= Chemical Compost, C= Compost, OM= Olive mill, Blank= Positive Control (with 10 kg of cow manure), NPK (750 grams of urea, 250 grams of triple superphosphate, 750 grams of potassium sulfate), Control= Without cow manure)

جذب غنی هستند و شرایط تغذیه‌ای خوبی دارند، عملکرد روغن رضایت بخشی دارند (Fatahinejhad, Siadat, Esfandiari, Moghdisi, Moazi, 2013). کاربرد کمپوست قویترین اثر بر روی تغذیه و رشد گیاهان دارد (Sadeh Zadeh et al., 2018). بر طبق بررسی‌های توسکانو و همکاران (Toscano et al., 2013) و سیدی و همکاران (Seyedi et al., 2017)، تولید کمپوست از تفاله جامد زیتون در باغات زیتون موجب افزایش روغن زیتون شد.

بیشترین درصد روغن زیتون در تیمار کمپوست غنی شده زیستی به میزان ۵۷/۷۷ درصد مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد ۱۳۲/۱۹۴ درصد افزایش داشته است. کمترین درصد روغن مربوط به شاهد و Blank بود که نسبت به هم در یک گروه آماری قرار داشتند (شکل ۳). کاربرد کودهای آلی غنی شده و غنی نشده بر درصد روغن میوه زیتون تأثیرگذار بودند. نتایج این پژوهش در توافق با یافته‌های سیدی و همکاران (Seyedi et al., 2016) می‌باشد که دریافتند کاربرد کمپوست در درختان زیتون موجب افزایش مقدار روغن شد. پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که خاک‌هایی که از نظر فسفر قابل



شکل ۳- تأثیر فرآورده‌های مختلف تفاله خام زیتون بر درصد روغن میوه زیتون

(VB= ورمی کمپوست زیستی، VC= ورمی کمپوست شیمیایی، V= ورمی کمپوست، CB= کمپوست زیستی، CC= کمپوست شیمیایی، C= کمپوست، OM= تفاله خام زیتون، Blank= شاهد مثبت (دارای کود دامی)، NPK= (مخلوط اوره+سوپرفسفات تریپل+سولفات پتاسیم)، شاهد= بدون کود دامی)

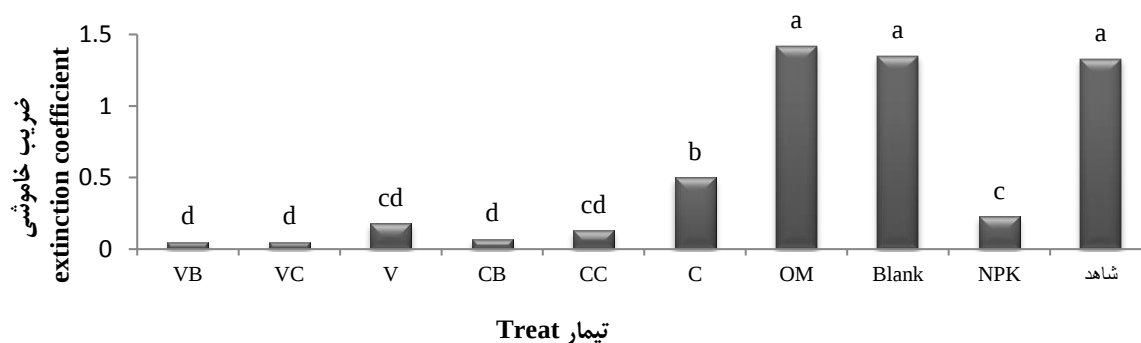
Figure 3- The effect of different raw olive pomace products on the percentage of olive fruit oil

(VB= Biological Vermicompost, VC= Chemical Vermicompost, V= Vermicompost, CB= Biological Compost, CC= Chemical Compost, C= Compost, OM= Olive mill, Blank= Positive Control (with 10 kg of cow manure), NPK (750 grams of urea, 250 grams of triple superphosphate, 750 grams of potassium sulfate), Control= Without cow manure)

مقایسه میانگین، کمترین شاخص ضریب خاموشی روغن زیتون (K_{232}) با کاربرد ورمی کمپوست غنی شده زیستی نسبت به شاهد حاصل شد که نسبت به شاهد ۷۸/۵۳ درصد کاهش داشت. بالاترین این شاخص در سه تیمار شاهد، Blank و NPK مشاهده شد (شکل ۵). نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد تفاله زیتون و فرآورده‌های حاصل از آن، نه تنها هیچ گونه تأثیر منفی بر این صفت کیفی نداشت؛ بلکه موجب بهبود کیفیت روغن زیتون از نظر این صفت شد. که می‌توان به بهبود تغذیه درختان رقم آربکین از نظر جذب فسفر و نیتروژن و پتاسیم اشاره کرد. نتایج ما مغایر با یافته‌های سیدی و همکاران (Seyedi et al., 2016) بود که گزارش کردند سطوح مختلف کمپوست تأثیری بر شاخص ضریب خاموشی در طول موج ۲۳۲ نانومتر نداشته است.

بر طبق جدول مقایسه میانگین، پایین‌ترین شاخص ضریب خاموشی روغن زیتون (K_{270}) با کاربرد ورمی کمپوست غنی شده زیستی حاصل شد که نسبت به شاهد ۹۶/۲۴ درصد کاهش داشته است. به علاوه تیمارهای مختلف کمپوست و ورمی کمپوست و NPK نیز کمترین ضریب خاموشی روغن را نشان دادند. هر چند که از لحاظ آماری با تیمار ورمی کمپوست غنی شده زیستی اختلاف معنی‌داری نشان ندادند (شکل ۴). به‌طور کلی مشاهده شد که کاربرد اصلاح کننده آلی تأثیر مثبت و قابل توجهی بر شاخص ضریب خاموشی روغن زیتون (K_{270}) داشت. این نتایج در توافق با یافته‌های سیدی و همکاران (Seyedi et al., 2016) مبنی بر بهبود کیفیت روغن در اثر کاربرد کمپوست بوده است.

شاخص ضریب خاموشی روغن زیتون (K_{232}) تحت تأثیر فرآورده‌های تولید شده از تفاله خام زیتون قرار گرفت. طبق جدول

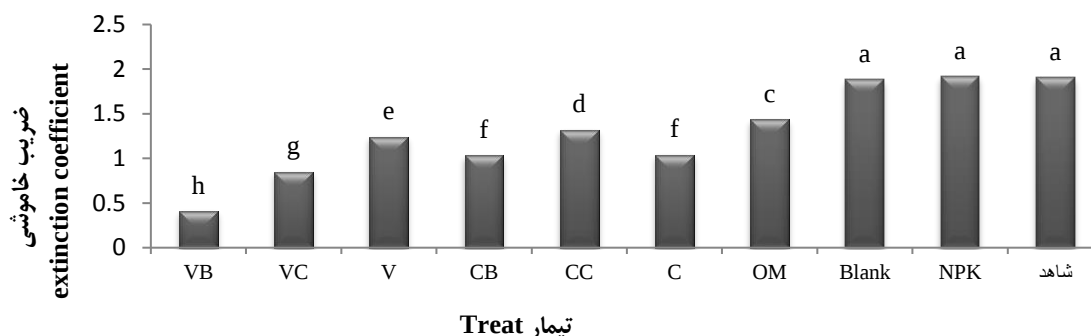


شکل ۴- تأثیر فرآورده‌های مختلف تفاله خام زیتون بر ضریب خاموشی

(K₂₇₀) (VB= ورمی کمپوست زیستی، VC= ورمی کمپوست شیمیایی، V= ورمی کمپوست، CB= کمپوست زیستی، CC= کمپوست شیمیایی، C= کمپوست، OM= تفاله خام زیتون، Blank= شاهد مثبت (دارای کود دامی)، NPK= (مخلوط اوره+سوپرفسفات تریپل+سولفات پتاسیم)، شاهد= بدون کود دامی)

Figure 4- The effect of different raw olive pomace products on extinction coefficient (K₂₇₀)

(VB= Biological Vermicompost, VC= Chemical Vermicompost, V= Vermicompost, CB= Biological Compost, CC= Chemical Compost, C= Compost, OM= Olive mill, Blank= Positive Control (with 10 kg of cow manure), NPK (750 grams of urea, 250 grams of triple superphosphate, 750 grams of potassium sulfate), Control= Without cow manure)



شکل ۵- تأثیر فرآورده‌های مختلف تفاله خام زیتون بر ضریب خاموشی

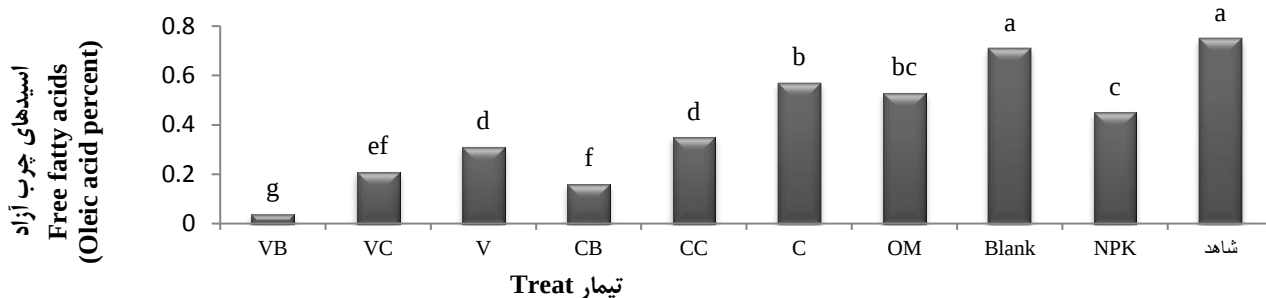
(K₂₃₂) (VB= ورمی کمپوست زیستی، VC= ورمی کمپوست شیمیایی، V= ورمی کمپوست، CB= کمپوست زیستی، CC= کمپوست شیمیایی، C= کمپوست، OM= تفاله خام زیتون، Blank= شاهد مثبت (دارای کود دامی)، NPK= (مخلوط اوره+سوپرفسفات تریپل+سولفات پتاسیم)، شاهد= بدون کود دامی)

Figure 5- The effect of different raw olive pomace products on extinction coefficient (K₂₃₂)

(VB= Biological Vermicompost, VC= Chemical Vermicompost, V= Vermicompost, CB= Biological Compost, CC= Chemical Compost, C= Compost, OM= Olive mill, Blank= Positive Control (with 10 kg of cow manure), NPK (750 grams of urea, 250 grams of triple superphosphate, 750 grams of potassium sulfate), Control= Without cow manure)

مطابق با نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، بیشترین فسفر برگ متعلق به ورمی کمپوست غنی شده زیستی با ۰/۳۳ درصد و کمترین مقدار متعلق به تیمار شاهد به میزان ۰/۱ درصد بود. این افزایش به میزان ۲۳۰ درصد بوده است. به علاوه در تیمارهای ورمی کمپوست معمولی و شیمیایی و کمپوست غنی شده زیستی نیز میزان فسفر برگ بالایی مشاهده شد. هر چند که از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری نداشتند، ولی نسبت به سایر تیمارها بالاترین مقدار را دارا بودند (شکل ۷). ورمی کمپوست حاوی عناصری مانند نیتروژن و فسفر می‌باشد که می‌تواند موجب افزایش رشد گیاه شود. افزایش رشد و توسعه گیاهان در حضور ورمی کمپوست به دلیل وجود مقادیر بالای هیومیک اسید و عناصر پرمصرف و کم‌مصرف می‌باشد.

اسیدهای چرب آزاد روغن زیتون تحت تأثیر فرآورده‌های تولید شده از تفاله خام زیتون قرار گرفت. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کمترین مقدار اسیدهای چرب آزاد روغن زیتون با کاربرد ورمی کمپوست غنی شده زیستی نسبت به شاهد حاصل شد و بیشترین مقدار متعلق به تیمار شاهد بود. میزان کاهش ۹۴/۶۶ درصد بود (شکل ۶). کمتر بودن این صفت یکی از ویژگی‌های کیفی روغن زیتون می‌باشد؛ بنابراین کاربرد ورمی کمپوست غنی شده زیستی تأثیر مثبت و کاهش بر اسیدهای چرب آزاد داشته است که نشان‌دهنده تأثیر مثبت فرآورده‌های غنی شده زیستی تفاله جامد زیتون بر جذب فسفر توسط گیاه، بهبود شرایط تغذیه‌ای و در نهایت بهبود کیفیت روغن می‌باشد. نتایج حاصل با نتایج بدست آمده از پژوهش‌های سیدی و همکاران (Seyedi et al., 2016) همخوانی دارد.



شکل ۶- تأثیر فرآورده‌های مختلف تفاله خام زیتون بر اسیدهای چرب آزاد

(VB= ورمی کمپوست زیستی، VC= ورمی کمپوست شیمیایی، V= ورمی کمپوست، CB= کمپوست زیستی، CC= کمپوست شیمیایی، C= کمپوست، OM= تفاله خام زیتون، Blank= شاهد مثبت (دارای کود دامی)، NPK= (مخلوط اوره+سوپرفسفات تریپل+سولفات پتاسیم)، شاهد= بدون کود دامی)

Figure 6- The effect of different raw olive pomace products on free fatty acids

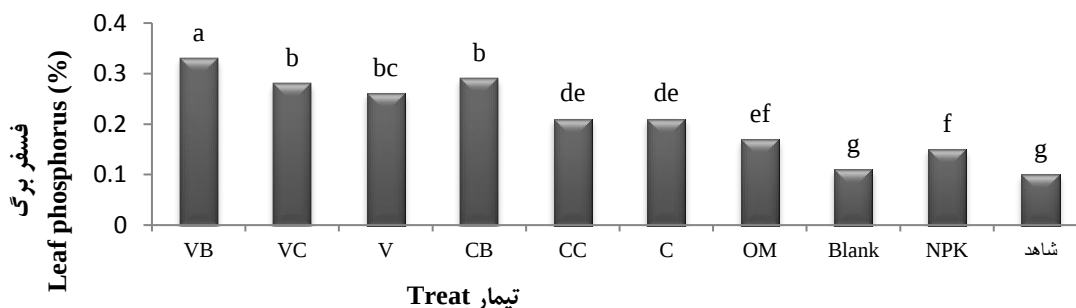
(VB= Biological Vermicompost, VC= Chemical Vermicompost, V= Vermicompost, CB= Biological Compost, CC= Chemical Compost, C= Compost, OM= Olive mill, Blank= Positive Control (with 10 kg of cow manure), NPK (750 grams of urea, 250 grams of triple superphosphate, 750 grams of potassium sulfate), Control= Without cow manure)

نیتروژن، فسفر، پتاسیم می‌باشد که موجب حاصلخیزی خاک و کاهش خطر ناشی از تخریب خاک می‌گردد (Seyedi et al., 2018). استفاده از قارچ و باکتری‌ها به دلیل اثرات مختلف این ریزموجودات در تثبیت نیتروژن و قابلیت دسترسی بهتر فسفر برای گیاه، روند افزایشی در بهبود رشد گیاه و جذب فسفر دارد. همچنین ورمی کمپوست موجب تحریک میکروارگانیسم‌های مفید خاک و عرضه مداوم و پایدار عناصر معدنی به‌ویژه نیتروژن و فسفر گیاه می‌شود. کاربرد ورمی کمپوست سبب افزایش غلظت فسفر برگ می‌گردد (Fayazi et al., 2018). استفاده از مواد آلی به همراه کودهای شیمیایی علاوه بر بهبود خواص فیزیکی خاک، می‌تواند در جذب بهتر عناصر مؤثر باشد (Taheri, Basirt, Khosh zaman, Mehshari, & Shakri, 2017). کودهای آلی توانستند بخش مهمی از فسفر قابل استفاده خاک را تأمین نمایند. زیرا با کاربرد مواد آلی فسفر با پیوندهای کم انرژی‌تر نگهداری شده و قابلیت استفاده آن افزایش می‌یابد. از طرف دیگر فعالیت‌های میکروبی در خاک با کاربرد کودهای گوسفندی و کمپوست زباله شهری بیش‌تر شد. مواد آلی فراهمی فسفر را در خاک‌های آهکی به سبب تشکیل شکل‌های فسفات با پایداری کمتر افزایش می‌دهد. با افزودن مقادیر یکسان فسفر از منابع گوناگون کودی به خاک ظرفیت خاک برای تثبیت فسفر کاهش و سرعت آزاد شدن فسفر در خاک افزایش یافت (Shahabifar, Panahpour, Moshiri, Gholami, & Mansherari, 2013). ریزجانداران موجب بهبود رشد، کارایی جذب فسفر، کارایی فسفر ریشه و شاخساره شدند. تلقیح با ریزجانداران به دلیل بالا بردن توان انتقال فسفر از ریشه به اندام‌های هوایی نقش مؤثری در افزایش غلظت فسفر در بخش‌های هوایی گیاه گندم دارد (Rahmani Iranshahi, Sepehri, Zarei, & Jahandideh, 2016). استفاده از ریزجانداران خاکری که توانایی

در ورمی کمپوست فسفر آلی و معدنی و ریزجانداران محرک رشد حل‌کننده فسفات نامحلول و ترکیبات کلات‌کننده وجود دارد که جذب فسفر را افزایش می‌دهند (Khosravi et al., 2017). به نظر می‌رسد کاربرد مواد آلی غنی شده با میکروارگانیسم‌های مفید خاکری در خاک‌های قلیایی تأثیر مثبت بر جذب فسفر توسط گیاه داشته است. به بیان دیگر تیمارهای غنی شده زیستی توانسته‌اند فسفر قابل جذب بیشتری در اختیار گیاه قرار داده و در نتیجه جذب فسفر توسط گیاه را بهبود بخشند. بنابراین غنی‌سازی زیستی مواد آلی تأثیر مثبت و فزاینده‌ای در تغذیه درختان زیتون از نظر فسفر داشته است. به‌طور کلی، افزایش فسفر خاک را می‌توان به افزایش فسفر برگ و بهبود تغذیه درختان زیتون تعمیم داد. همچنین به نظر می‌رسد کاربرد سطوح بالاتر کمپوست تأثیر مثبتی بر جذب فسفر توسط گیاه داشته است (Seyedi et al., 2016). فسفر یکی از عناصر ضروری پرمصرف در تغذیه گیاهان است و در پسماندها نیز در اندازه‌ی قابل توجه وجود دارد. نتایج بررسی‌های هاشم پور و همکاران (Hashempour et al., 2018) نشان داد که کاربرد پسماند جامد کارخانه تصفیه زیتون سبب بهبود ویژگی‌های زیستی خاک و افزایش فسفر قابل دسترس شد و مایه‌زنی باکتری‌های با سیلوس در سطوح پایین پسماند (۲ در صد) پیامد مثبتی بر فسفر قابل دسترس داشت. باکتری‌های حل‌کننده فسفر قابلیت دسترسی فسفر را از طریق ترشح اسیدهای آلی و تولید آنزیم‌های فسفاتاز افزایش می‌دهند، که به‌ترتیب باعث انحلال فسفر معدنی و معدنی شدن فسفر آلی شده و تغذیه فسفوری گیاه را بهبود می‌بخشند (Sarikhani, Chelbianlu, & Alavi Kia, 2015). بر طبق نتایج به‌دست آمده، محصولات خروجی کارخانه روغن‌کشی زیتون حاوی مواد آلی، عناصر مختلفی مانند

به دلیل تحریک فعالیت فسفوموناسترازا تأثیر قابل توجهی در افزایش زیست فراهمی فسفر دارد (Vahedi & Rasouli Sadekiani, 2019). به طور کلی، ورمی کمپوست و کمپوست طی فرآیند معدنی شدن، مواد هیومیکی آزاد کرده و فسفات خاک را به فرم قابل دسترس تبدیل می نمایند. بنابراین، توانسته اند فسفر قابل جذب بیشتری در اختیار گیاه قرار داده و جذب فسفر توسط گیاه را بهبود بخشند. مطابق با نتایج مقایسه میانگین داده ها، بیشترین عملکرد روغن زیتون متعلق به ورمی کمپوست غنی شده زیستی به میزان ۱۱/۱۴ کیلوگرم به ازای هر درخت بود و بعد از آن ورمی کمپوست شیمیایی و کمپوست غنی شده زیستی به ترتیب به میزان ۹/۴۷ و ۹/۴۳ کیلوگرم به ازای هر درخت بالاترین مقادیر را داشتند؛ هر چند که هر دو در یک گروه آماری قرار داشتند (شکل ۸).

انحلال فسفر تثبیت شده را دارند، یکی از راه های مؤثر برای افزایش جذب فسفر در خاک های قلیایی است. کاربرد فسفر نیز تأثیر معنی داری بر غلظت فسفر در اندام های هوایی و جذب کل فسفر توسط اندام های هوایی داشت. استفاده هم زمان فسفر و باکتری های حل کننده بر غلظت فسفر در اندام های هوایی سورگوم داشت. اثر مثبت ریز جانداران حل کننده فسفات در خاک می تواند به علت فراهمی عناصر غذایی به ویژه فسفر و ترشح هورمون های رشد باشد (Farahbakhsh, Ziaian, Besharti, & Jokar, 2014). نتایج نشان داد که استفاده از ریز جانداران حل کننده فسفات و مواد آلی باعث کاهش معنی دار pH و افزایش هدایت الکتریکی، فسفر محلول و فسفر قابل دسترس خاک شد. همچنین استفاده از ماده آلی و تلقیح میکروبی

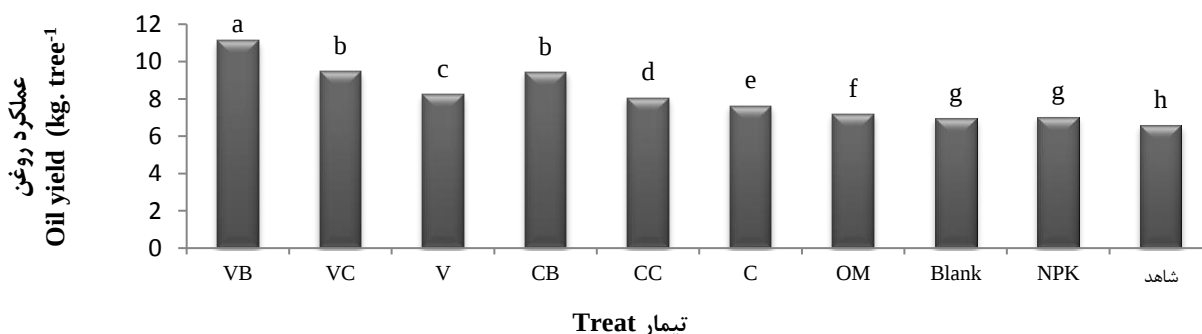


شکل ۷- تأثیر فرآورده های مختلف تفاله خام زیتون بر فسفر برگ

(VB= ورمی کمپوست زیستی، VC= ورمی کمپوست شیمیایی، V= ورمی کمپوست، CB= کمپوست زیستی، CC= کمپوست شیمیایی، C= کمپوست، OM= تفاله خام زیتون، Blank= شاهد مثبت (دارای کود دامی)، NPK= (مخلوط اوره+سوپرفسفات تریپل+سولفات پتاسیم)، شاهد= بدون کود دامی)

Figure 7- The effect of different raw olive pomace products on leaf phosphorus

(VB= Biological Vermicompost, VC= Chemical Vermicompost, V= Vermicompost, CB= Biological Compost, CC= Chemical Compost, C= Compost, OM= Olive mill, Blank= Posetive Control (with 10 kg of cow manure), NPK (750 grams of urea, 250 grams of triple superphosphate, 750 grams of potassium sulfate), Control= Without cow manure)



شکل ۸- تأثیر فرآورده های مختلف تفاله خام زیتون بر عملکرد روغن زیتون

(VB= ورمی کمپوست زیستی، VC= ورمی کمپوست شیمیایی، V= ورمی کمپوست، CB= کمپوست زیستی، CC= کمپوست شیمیایی، C= کمپوست، OM= تفاله خام زیتون، Blank= شاهد مثبت (دارای کود دامی)، NPK= (مخلوط اوره+سوپرفسفات تریپل+سولفات پتاسیم)، شاهد= بدون کود دامی)

Figure 8- The effect of different raw olive pomace products on oil yield

(VB= Biological Vermicompost, VC= Chemical Vermicompost, V= Vermicompost, CB= Biological Compost, CC= Chemical Compost, C= Compost, OM= Olive mill, Blank= Posetive Control (with 10 kg of cow manure), NPK (750 grams of urea, 250 grams of triple superphosphate, 750 grams of potassium sulfate), Control= Without cow manure)

of triple superphosphate, 750 grams of potassium sulfate), Control= Without cow manure)

یک در صد معنی دار بوده است، که این نیز می تواند به تغذیه فسفر و سایر عناصر کم مصرف موجود در این ترکیبات نسبت داده شود. بر این اساس، می توان نتیجه گرفت که کاربرد مواد آلی غنی شده با باکتری های محرک رشد، به ویژه زمانی که دارای مقادیر مناسبی از فسفر باشند، می تواند از طریق بهبود وضعیت تغذیه ای گیاه، اثرات مثبت و معناداری بر کیفیت روغن زیتون و عملکرد کلی درخت داشته باشد. در این پژوهش، ورمی کمپوست غنی شده زیستی به عنوان مؤثرترین تیمار شناخته شد. در نهایت، پیشنهاد می شود مطالعات بیشتری در زمینه استفاده از سایر انواع مواد آلی غنی شده، با تمرکز بر ترکیب عناصر غذایی به ویژه فسفر، برای تغذیه زیتون انجام گیرد تا امکان بهبود بیشتر کیفیت و کمیت محصول فراهم شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از ریاست محترم دانشکده کشاورزی دانشگاه گیلان و مدیر گروه محترم گروه علوم خاک سرکار خانم دکتر نسرین قربانزاده، اساتید بزرگوار گروه علوم باغبانی و علوم خاک، دانشجویان دکتری آقایان فرجی، شعبانی و تمامی کارکنان محترم آزمایشگاه مرکزی دانشکده کشاورزی خانم ها سلیقه دار و عاشورزاده، همچنین از مسئول محترم مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آب دانشگاه تهران واحد کوهین جناب آقای دکتر چگینی تشکر و قدردانی می شود.

نتایج حاصل از عملکرد روغن با نتایج توسکانو و همکاران (Toscano *et al.*, 2013) هم خوانی داشت که نشان دادند کاربرد کمپوست پسماند جامد کارخانه روغن کشی زیتون در خاک عملکرد روغن در درخت را افزایش داد. محققین گزارش کردند که کاربرد کمپوست عملکرد روغن را به دلیل افزایش حاصلخیزی خاک و بهبود تغذیه گیاهان و افزایش عملکرد میوه زیتون افزایش داد (Montemurro *et al.*, 2016).

نتیجه گیری

یافته های این پژوهش نشان داد که استفاده از ورمی کمپوست و کمپوست غنی شده زیستی باعث بهبود قابل توجهی در برخی ویژگی های کیفی روغن زیتون، از جمله کاهش ارزش پراکسید، کاهش میزان اسیدهای چرب آزاد، بهبود شاخص ضرایب خاموشی (K_{232})، افزایش میزان فسفر در برگ، و افزایش عملکرد میوه و روغن شد. یکی از دلایل اصلی این بهبودها، وجود مقدار قابل توجهی فسفر در ترکیب کمپوست ها و ورمی کمپوست های مورد استفاده بود. فسفر به عنوان یکی از عناصر پر مصرف و ضروری برای گیاه، نقش کلیدی در فرآیندهای متابولیکی، به ویژه در سنتز لیپیدها و رشد زایشی دارد؛ از این رو، فراهمی بهتر آن در بستر تغذیه ای درختان زیتون، موجب افزایش کیفیت روغن و کارایی تولیدی گیاه شد. نتایج همچنین نشان داد که اثر کمپوست زیستی شده بر درصد روغن میوه در سطح احتمال

References

- Ahmad, R., Jilani, Gh., Arshad, M., Zahir, Z.A., & Khalid, A. (2007). Bio-conversion of organic wastes for their recycling in agriculture: an overview of perspectives and prospects. *Annals of Microbiology*, 57(4), 471-479. <https://doi.org/10.1007/BF03175343>
- Alikhani, H.A., & Hemmati, A. (2014). The effect of vermicompost enrichment with fertilizer and bacterial treatments on humicization and humic acid characteristics. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 24(1), 113-125. (In Persian with English abstract)
- Busato, J.G., Lima, L.S., Aguiar, N.O., Canellas, L.P., & Olivares, F.L. (2012). Changes in labile phosphorus forms during maturation of vermicompost enriched with phosphorus-solubilizing and diazotrophic bacteria. *Bioresour Technol*, 110, 390-395. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.126>
- Farahbakhsh, A., Ziaian, A.H., Besharti, H., & Jokar, L. (2014). Phosphate solubilizing bacteria roles on the mineral nutrition uptake and yield of sorghum. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 4(2), 239-253. (In Persian with English abstract)
- Fatahinejad, I., Siadat, A., Esfandiari, M., Moghdisi, R., & Moazi, A.A. (2012). Effect of phosphorus fertilizer on yield, oil and canola protein in dry farming in different groups of soil phosphorus fertility. *Crop Physiology Journal*, 5(18), 83-100. (In Persian with English abstract). <http://cpj.ahvaz.iau.ir/article-1-63-fa.html>
- Fayazi, H., Abdali Mashhadi, A., Kochzadeh, A., Popzen, A.H., & Arzanesh, M.H. (2018). The effect of organic and biological fertilizers on the content of nitrogen, phosphorus and potassium, photosynthetic pigments and the amount of the effective substance of the medicinal plant (*Echinacea Purpurea* L.). *Agricultural Research of Iran*, 16(2), 283-298. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/gsc.v16i2.49182>

7. Hachicha, R., Rigane, H., Ben Khodher, M., Nasri, M., & Medhioub, K. (2003). Effects of partial stone removal on the co- composting of olive- oil processing solid residues with poultry manure and the quality of compost, *Environmental Technology*, 24(1), 59-67. <https://doi.org/10.1080/09593330309385536>
8. Hashempour, A., Fatuhi Qazvini, R., Bakhshi, D., & Asadi Sanam, S. (2010). Evaluation of Virgin olive (*Olea europaea* L.) oil quality from cultivars, "Zard, Roghani and Mari", Kazeroon region. *Iranian Journal of Horticultural Sciences*, 41(1), 47-53. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.2478/v10133-010-0053-z>
9. Hashempour, E., Farhani Rasti, M.B., Gurbanzadeh, N., & Fazli Sangani, M. (2018). Studying the release of phosphorus from olive solid residue by *Bacillus* bacteria in soil. Master's thesis, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Gilan University, Rasht, 77 Pp. (In Persian with English abstract)
10. Kapoor, K.K., Yadav, K.S., Singh, D.P., Mishra, M.M., & Tauro, P. (1983). Enrichment of compost by *Azotobacter* and phosphate solubilising microorganisms. *Agricultural Wastes*, 5, 125-133.
11. Khaja Haghvardi, M., Ardakani, M.R., Abbaszadeh, B., & Nejatkah Manavi, P. (2018). The effect of vermicompost, biochar and mycorrhizal symbiosis on some quantitative and qualitative characteristics of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). *Iranian Journal of Iranian Medicinal and Aromatic Plants Research*, 34(1), 87-100. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2018.114886.2095>
12. Khosravi, A., Zarei, M., & Ronaghi, A.M. (2017). Effect of *Cladoglyphus atonicatum* fungus, vermicompost and phosphate sources on root colonization and growth of lettuce. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 7(2), 167-181. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/ejsms.2017.11499.1663>
13. López-Piñero, A., Albarrán, A., Rato Nunes, J.M., & Barreto, C. (2008). Short and medium-term effects of two-phase olive mill waste application on olive grove production and soil properties under semiarid mediterranean conditions. *Bioresource Technology*, 99, 7982-7987. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.051>
14. Majeed, A., Munawar Mehdi, Sh., Niaz, A., Mahmood, A., Ul-Haq, E., Ahmad, N., Javid, Sh., & Mahmood, A. (2018). Influence of P-enriched compost application on economics and P use efficiency of a maize-wheat rotation system. *The crop Journal*, 99. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2018.05.007>
15. Michailides, M., Christou, G., Akratos, C.S., Tekerlekopoulou, A.G., & Vayenas, D.V. (2011). Composting of olive leaves and pomace from a three-phase olive mill plant. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 65, 560-564. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2011.02.007>
16. Montemurro, F., Fiore, A., D'Andrea, L., & Diacono, M. (2016). Olive mill by-products application: Organic olive orchard yield performance and soil fertility. *Journal of Agricultural Sciences Technology*, 18, 1883-1896. <http://jast.modares.ac.ir/article-23-1360-en.html>
17. Pandit, N.R., Mulder, J., Hale, S.E., Schmidt, H.P., & Cornelissen, G. (2017). Biochar from "Kon Tiki" flame curtain and other kilns: Effects of nutrient enrichment and kiln type on crop yield and soil chemistry. *Plos One*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176378>
18. Pan, I., Dam, B., & Sen, S.K. (2012). Composting of common organic wastes using microbial inoculants. *Biotechnology*, 2, 127-134. <https://doi.org/10.1007/s13205-011-0033-5>
19. Rahmani Iranshahi, D., Sepehri, M., Zarei, M., & Jahandideh Mahjanabadi, V. (2016). The effect of endophytic fungi on phosphorus efficiency indices and wheat tolerance to P deficiency stress. *Journal of Plant Process and Function*, 5(18), 193-205. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/20.1001.1.23222727.1396.6.19.10.8>
20. Sadegh Zadeh, F., Fallah Tolekolai, S., Bahmanyar, M.A., & Emadi, M. (2018). Application of biochar and compost for enhancement of Rice (*Oryza sativa* L.) grain yield in calcareous sandy soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(5), 552-566. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1431272>
21. Sánchez, Ó.J., Ospina, D.A., & Montoya, S. (2017). Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. *Waste Management*, 69, 136-153. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.012>
22. Sarikhani, M.R., Chelbianlu, N., & Alavi Kia, S.S. (2015). Investigating the distribution of phosphate dissolving bacteria and soil phosphatase activity in different uses. *Water and Soil, Agricultural Sciences and Industries*, 29(6), 1673-1662. (In Persian with English abstract).
23. Seyed, A., Hamid Oghli, Y., Ghasemnejad, M., & Ghorbanzadeh, N. (2018). Effect of olive oil mill wastewater application on soil biological properties, oil quality and fruit yield of two cultivars of olive. *Journal of Iranian Horticultural Sciences*, 49(2), 365-374. (In Persian with English abstract).
24. Seyed Morghaki, A., Hamid Oghli, Y., & Qasimnejad, M. (2017). Effect of olive mill pomace compost on yield, oil percentage and the leaf elements content in two olive cvs 'Zard' and 'Roughany'. *Journal of Plant Production Research*, 24(2), 125-138. (In Persian with English abstract).
25. Seyed, A., Ghasemnejad, M., & Hamid Oghli, Y. (2016). The effect of wastewater and olive pomace compost on vegetative growth, reproduction and oil quality of two local yellow and oily olive varieties. *Department of*

- Horticultural Sciences (Fruit Cultivation)*, Master's Thesis, Gilan University, Rasht, 152 Pp. (In Persian with English abstract)
26. Seifi, I., Jalali, A., Ebrahimnia, S., & Feridouni, H. (2016). Comparison of the biochemical composition of three varieties of olive oil (*Olea europaea* L.) in different regions of Golestan province. *Journal of Plant Environmental Physiology*, 11(43), 52-65. (In Persian with English abstract)
 27. Shahabifar, J., Panahpour, I., Moshiri, F., Gholami, A., & Mansherari, M. (2013). Phosphorus release and uptake in wheat using organic and chemical fertilizers on calcareous soils. *Quarterly Journal of Plant Cell and Molecular Biology*, 8(3 and 4), 29-39. (In Persian with English abstract)
 28. Taheri, M., Basirt, M., Khosh zaman, T., Mehshari, M., & Shakri, M.A. (2017). Integrated management of soil fertility and plant nutrition in olive trees. Ministry of Agriculture. Agricultural research, education and extension organization. *Soil and Water Research Institute*, 105 Pp. (In Persian with English abstract)
 29. Toscano, P., Casacchia, T., Diacono, M., & Montemurro, F. (2013). Composted olive mill by-products: compost characterization and application on olive orchards. *Journal of Agricultural Sciences and Technology*, 15, 627-638. <http://jast.modares.ac.ir/article-23-2628-en.html>
 30. Vahedi, R., & Rasouli Sadekiani, M.H. (2019). The effect of biochar and rhizospheric growth-promoting bacteria on the activity of phosphomonoesterase enzymes and phosphorus bioavailability. *The 16th Iran Soil Science Congress*, Zanzan, Iran. (In Persian with English abstract)
 31. Wang, J., Xia, K., Waigia, M.G., Gaoa, Y., Odingaa, E.S., Linga, W., & Liua, J. (2018). Application of biochar to soils may result in plant contamination and human cancer risk due to exposure of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environment International*, 121, 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.09.010>

The Effect of Glutathione on Iron Availability of Different Sources in Peanut Plant in a Calcareous Soil

F. Shahabi¹, R. Khorassani^{1*}, Z. Gheshlaghi²

1- Department of Soil Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(*- Corresponding Author Email: khorasani@um.ac.ir)

2- Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 25 November 2024

Revised: 23 April 2025

Accepted: 26 April 2025

Available Online: 26 April 2025

How to cite this article:

Shahabi, F., Khorassani, R., & Gheshlaghi, Z. (2025). The effect of glutathione on iron availability of different sources in peanut plant in a calcareous soil. *Journal of Water and Soil*, 39(2), 121-138. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90971.1450>

Introduction

This study examined the influence of glutathione on iron availability in calcareous soils and its effect on the iron availability from various iron sources for peanut plants. Calcareous soils, prevalent in many regions, challenge nutrient availability, particularly for micronutrients such as iron, manganese, and zinc, owing to their high pH levels. Despite adequate iron levels in these soils, plant accessibility remains restricted, often resulting in iron deficiency symptoms, such as chlorosis, due to impaired chlorophyll synthesis. Various strategies, including the development of resistant cultivars, organic amendments, and mineral or chelated iron fertilizers, have been explored to mitigate iron deficiency. Chelated iron fertilizers, especially iron sequestration (EDDHA) agents, are commonly used in calcareous soils to enhance iron availability in plants. However, their environmental impact and cost-effectiveness are concerns, prompting interest in alternatives such as iron oxides, which are cost-effective and environmentally friendly. Studies have suggested that iron oxides, particularly magnetite nanoparticles, support plant growth and enhance the availability of iron. Additionally, growth stimulants, such as glutathione (a tripeptide with antioxidant properties), have been investigated for their potential to alleviate iron deficiency. Glutathione not only boosts plant defense mechanisms but also improves reactive oxygen species availability. Recent studies have shown that the foliar application of glutathione in iron-deficient plants can significantly increase total iron uptake and enhance photosynthesis. This study aimed to investigate the effects of glutathione on iron bioavailability from various iron sources and growth parameters in peanuts cultivated in calcareous soils.

Materials and Methods

The experiment was conducted in a greenhouse at the Agricultural Research Center of Ferdowsi University of Mashhad and, employed a completely randomized factorial design with three replications. The factors were iron sources (control, iron sequestration (EDDHA), iron oxide, and iron filings) and glutathione foliar application (0, 1, and 2 mM, four times per growth season: 29, 38, 42, and 48 days after planting). Soil was sampled from a farm, and some of its physical and chemical properties were analyzed using conventional methods. Macronutrients were added at the recommended dosage to minimize interference with iron treatment. The iron levels were 0 and 50, 1370, and 108 mg kg⁻¹ for sequestration, iron oxide, and iron filings, respectively. Glutathione foliar treatments were applied at four growth stages (29, 38, 42, 48 days after planting) in concentrations of 0, 1, and 2 mM. The plants were grown in pots with soil moisture maintained at the field capacity. After 66 days, the plants were harvested, and parameters such as dry shoot weight, total iron uptake, and nitrogen content were measured. The



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

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90971.1450>

iron content in plants was determined using atomic absorption spectroscopy, and nitrogen was quantified applying the Kjeldahl method. Statistical analyses were conducted using SAS software, and mean comparisons were performed using Duncan's test at the 5% significance level.

Results and Discussion

The study revealed that glutathione, either alone or in combination with iron sources, notably improved peanut plant growth and iron uptake. Iron sequestration (EDDHA) was the most effective treatment, significantly increasing dry shoot weight, particularly when combined with 2 mM glutathione. The combination of glutathione and iron treatment substantially boosted total iron uptake in both the shoots and roots of peanut plants. Notably, iron sequestration (EDDHA) with glutathione resulted in a 20% increase in shoot iron uptake and a 34.3% increase in shoot nitrogen uptake compared to glutathione treatment alone. Glutathione application also enhanced iron filings, leading to a 55.6% increase in root iron uptake by shoots and a 50.6% increase in iron concentration in shoots, as extracted by phenanthroline. The results indicated that glutathione improved and facilitated iron translocation from the roots to the shoots. Iron filings, a cost-effective iron source, showed significant results when paired with glutathione, enhancing both shoot dry weight and iron uptake. This synergy between glutathione and iron treatments suggests that iron sequestration (EDDHA) is more effective when combined with glutathione, resulting in alleviating deficiency symptoms of iron, such as chlorosis, and promoting overall growth.

Conclusion

This study underscores the positive impact of glutathione on iron availability and growth in peanut plants grown in calcareous soils. Applying glutathione significantly increased iron uptake in both shoots and roots, nitrogen uptake, and plant biomass. Iron sequestration (EDDHA), combined with glutathione, emerged as the most effective treatment, improving shoot iron and nitrogen uptake by 20% and 34.3%, respectively. Additionally, glutathione enhanced the efficacy of iron filings, an economical iron source, suggesting its potential as an alternative to expensive iron fertilizers. Glutathione application also reduced chlorosis and improved iron translocation from roots to shoots, supporting its role in enhancing iron nutrition in crops grown in iron-deficient soils. This study offers insights into the role of glutathione in managing iron deficiency stress and recommends further exploration of optimal application rates and effects on diverse crops and soil conditions.

Keywords: Iron oxide, Iron sequestration (EDDHA), Glutathione

تأثیر گلوکاتینون بر قابلیت استفاده‌ی آهن از منابع مختلف در گیاه بادام‌زمینی در یک خاک آهکی

فاطمه بی بی شهابی^۱ - رضا خراسانی^{۱*} - زهرا قشلاقی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۶

چکیده

اغلب خاک‌های مناطق کشور آهکی هستند و از مشکلات اصلی آن‌ها، کم‌بود عناصر ریزمغذی مانند آهن به دلیل قلیابیت بالاست. این مطالعه جهت بررسی تأثیر منابع مختلف آهن و گلوکاتینون بر جذب و فراهمی آهن و رشد گیاه بادام‌زمینی، در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل با دو فاکتور منابع آهن در چهار سطح (شاهد، سکوسترین آهن، اکسید آهن و براده آهن) در خاک و گلوکاتینون در سه سطح (صفر، ۱ و ۲ میلی‌مولار) به صورت محلول‌پاشی، به صورت کشت گلدانی در سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. نتایج نشان دادند که گلوکاتینون به تنهایی و یا در ترکیب با منابع آهن اثر مثبتی بر رشد اندام هوایی و بهبود جذب آهن داشت. در تیمار سکوسترین آهن، کاربرد گلوکاتینون ۱ میلی‌مولار موجب افزایش آهن فعال برگ (۱۱ درصد)، جذب کل آهن در اندام هوایی (۲۰ درصد)، وزن خشک اندام هوایی (۸ درصد) و جذب نیتروژن (۳۴/۳ درصد) شد و در سطح ۲ میلی‌مولار گلوکاتینون، جذب آهن در ریشه و وزن خشک ریشه به ترتیب ۳۷/۹ و ۳۴/۴ درصد افزایش یافت. در تیمار براده آهن، گلوکاتینون ۱ میلی‌مولار باعث افزایش آهن فعال برگ (۵۰/۶ درصد) و جذب نیتروژن (۵ درصد) گردید، در حالی که در سطح ۲ میلی‌مولار محلول‌پاشی گلوکاتینون، جذب آهن در ریشه، وزن خشک ریشه و وزن خشک اندام هوایی به ترتیب ۵۵/۶، ۳۹/۴ و ۱۲/۵ درصد افزایش نشان داد. همچنین، نسبت آهن فعال به کل در اندام هوایی در این سطح تا ۳۸/۴ درصد نسبت به تیمار براده آهن بدون گلوکاتینون بهبود یافت. این نتایج نشان می‌دهد که گلوکاتینون با بهبود فراهمی آهن در خاک آهکی و افزایش انتقال درون‌گیاهی آن، می‌تواند کارایی کودهای آهن، به‌ویژه منابع معدنی مانند براده آهن را افزایش دهد. بنابراین، کاربرد هم‌زمان گلوکاتینون با منابع مناسب آهن، به‌ویژه در شرایط قلیایی خاک، راه‌کاری مؤثر برای کاهش کلروز آهن و بهبود تغذیه گیاهان حساس از جمله بادام‌زمینی است.

واژه‌های کلیدی: اکسید آهن، سکوسترین آهن، گلوکاتینون

مقدمه

کم‌بود آن در گیاه سبب اختلال در فعالیت کوانزیم‌ها و پروتئین‌های مربوط به فرآیند رشد شده و در نهایت به کلروز یا زرد برگی در گیاه منجر می‌شود. برای جلوگیری از این مشکل، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که از جمله مهم‌ترین آن‌ها انتخاب گونه‌های مقاوم به کم‌بود آهن، کاربرد مواد آلی و مصرف کودهای معدنی و کلاته است. همچنین کوددهی به شکل خاکی و محلول‌پاشی از مؤثرترین روش‌ها برای رفع کلروز آهن، به‌ویژه در شرایط خاک‌های آهکی، محسوب می‌شود. کلات‌های آهن ترکیبات شیمیایی هستند که در مقایسه با

با توجه به قرار گرفتن ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک کره زمین، خاک‌های اغلب مناطق کشور آهکی هستند. علی‌رغم وجود غلظت بالای آهن در این خاک‌ها، عواملی مانند قلیابیت بالا (pH بالا)، کم‌بود مواد آلی و همچنین حضور عناصری چون فسفر، فراهمی آهن را برای گیاهان محدود می‌کنند (Malakouti & Tehrani, 1991; Ghorashi, Haghnia, Lakzian, & Khorasani, 2012). آهن نقش مهمی در ساختار کلروپلاست و سنتز کلروفیل ایفا می‌کند.

۱- گروه مهندسی و علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*)- نویسنده مسئول: (Email: khorasani@um.ac.ir)

۲- گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

ناقل‌های اختصاصی در غشای سلول‌های ریشه، انتقال آن به سمت اندام‌های هوایی در قالب کمپلکس‌هایی با اسیدهای آلی و ورود به ساختارهای پروتئینی فعال در فتوسنتز و تنفس است (Kobayashi & Nishizawa, 2012).

علاوه بر منابع مختلف آهن، کاربرد محرک‌های رشد نیز به‌عنوان روشی نوین و کارآمد برای رفع زرد برگی حاصله از کمبود آهن در گیاه مطرح شده‌است. یکی از مهم‌ترین این محرک‌ها، گلوکاتینون است. گلوکاتینون تری‌پتیدی، متشکل از اسیدهای آمینه گلوتامیک اسید، سیستئین و گلیسین است که به‌واسطه ظرفیت بالای آنتی‌اکسیدانی و احیاکنندگی خود، در تنظیم بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیکی و پاسخ گیاهان به تنش‌ها نقش کلیدی دارد (Gill & Tuteja, 2010). یکی از ویژگی‌های مهم و کمتر بررسی‌شده گلوکاتینون، توانایی آن به‌عنوان یک عامل عصاره‌گیر و استخراج‌کننده آهن از منابع معدنی غیرمحلول مانند اکسیدهای آهن (Fe(III)) است. خاصیت احیاکنندگی بالای گلوکاتینون موجب انحلال بهتر اکسیدهای آهن و تبدیل آنها به فرم محلول و قابل‌جذب (Fe(II)) در ناحیه ریزوسفر شده و با کاهش موضعی pH خاک، فراهمی آهن برای گیاهان را به‌ویژه در خاک‌های آهکی افزایش می‌دهد (Zuchi, Watanabe, Bromke, Osorio, & Astolfi, 2015). ترکیب گلوکاتینون با سایر منابع آهن مانند کلات‌ها و کودهای معدنی نیز اثرات هم‌افزایی داشته و موجب بهبود جذب، انتقال و آسمیلاسیون آهن در گیاه می‌شود (Gheslilagh, Khorassani, Abadía, Kafi, & Fotovat, 2019). براساس نتایج گلوکاتینون به دلیل دارا بودن نقش دوگانه در سیگنال‌دهی و استخراج آهن، می‌تواند بهره‌وری استفاده از آهن را در گیاهان به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. بادام‌زمینی به‌دلیل حساسیت به کمبود آهن، به‌ویژه در خاک‌های آهکی با pH بالا و بی‌کربنات، گیاهی مناسب برای ارزیابی فراهمی آهن محسوب می‌شود. با وجود کاربرد گسترده کلات‌های آهن، مشکلاتی نظیر پایداری کم برخی کلات‌ها در pH بالا، هزینه‌ی زیاد و نگرانی‌های زیست‌محیطی، ضرورت بررسی جایگزین‌های پایدارتر را افزایش داده‌است. گلوکاتینون، به‌عنوان ترکیبی زیستی با پتانسیل کلات‌کنندگی و احیای آهن، می‌تواند گزینه‌ای مؤثر در بهبود جذب آهن از منابع معدنی باشد. این پژوهش با هدف ارزیابی اثر گلوکاتینون بر افزایش جذب آهن از منابع مختلف آهن در گیاه بادام‌زمینی در شرایط طبیعی خاک آهکی انجام شد.

مواد و روش‌ها

نمونه خاک جهت کشت گلخانه‌ای از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر از منطقه‌ای با مشخصات طول جغرافیایی ۱۸° ۱۶' ۵۹" شرقی و عرض جغرافیایی ۱۸° ۱۶' ۳۶" شمالی و ارتفاع ۹۸۵ متر از سطح دریا، واقع

ترکیبات معدنی آهن (مانند کلرید آهن و سولفات آهن)، کارایی بیشتری دارند. یکی از مهم‌ترین این کلات‌ها، سکوسترین است که به‌طور خاص در خاک‌های آهکی استفاده می‌شود. با این حال، کلات‌های مصنوعی آهن علی‌رغم کارایی زیاد در فراهمی آهن برای گیاه، دارای معضلات زیست‌محیطی بوده و از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه نیستند (Malakouti, 1995). منابع معدنی مانند اکسیدهای آهن به‌عنوان گزینه‌های اقتصادی نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مطالعات نشان داده‌اند که اکسیدهای آهن، از جمله نانو اکسیدهای مگنتیت، تأثیر مثبتی بر رشد گیاه و فراهمی آهن دارند. نانو اکسیدهای مگنتیت باعث بهبود رشد گیاه منداب^۱ (Plaksenkova et al., 2019)، افزایش جذب عناصر غذایی در لوبیا (De Souza-Torres et al., 2019)، رشد گیاه در شرایط شوری در نخود (Abd-Alla, Nafady, Bashandy, & Hassan, 2019)، افزایش سطح کلروفیل و ظهور مولکول‌های کوچک اران آ غیر کد دهنده (mi RNA) در یونجه (Kokina et al., 2020)، افزایش جذب آهن از ریشه و تجمع آهن در گندم (Iannone et al., 2016) شد. ذرات نانومتری مگنتیت با فرستادن سیگنال‌هایی سبب کاهش pH ریزوسفری خاک و افزایش غلظت پتاسیم، کلسیم، فسفر، آهن، منگنز در گیاه لوبیا شد (De Souza-Torres et al., 2019). همچنین تلقیح رایزوبیوم با نانو ذرات مگنتیت، محتویات لگ‌هموگلوبین در ریشه، فعالیت‌های آنزیم نیتروژناز و در نهایت رشد گیاه نخود در شرایط شوری را افزایش داد (Abd-Alla et al., 2019). این یافته‌ها نقش برجسته منابع مختلف آهن، شامل هر دو نوع کلات و معدنی (مانند اکسیدهای آهن)، در بهبود فراهمی آهن و رشد گیاه را نشان می‌دهند.

آهن در گیاهان به اشکال مختلفی شامل فرم‌های فعال و محلول (Fe(II))، اشکال ذخیره‌ای غیرمحلول مانند فریتین و نیز کمپلکس‌شده با پروتئین‌ها (نظیر فریدوکسین و سیتوکروم‌ها) وجود دارد (Marschner, 1995; Kobayashi & Nishizawa, 2012). فراهمی آهن در خاک، به‌ویژه در خاک‌های آهکی که عمدتاً آهن به شکل غیرمحلول Fe(III) است، مستقیماً روی میزان جذب و نوع اشکال بیوشیمیایی آهن درون گیاه تأثیر می‌گذارد. در این شرایط، گیاهان دولپه مانند بادام‌زمینی با ترشح کلات‌ها و ترکیبات احیاکننده (نظیر اسیدهای آلی)، آهن Fe(III) را به فرم قابل‌جذب Fe(II) تبدیل می‌کنند (Marschner, 1995; Roosta & Mohsenian, 2012). همچنین، آسمیلاسیون آهن درون گیاه به‌شدت وابسته به فراهمی آهن در خاک است، به‌طوری‌که کاهش قابلیت استفاده آهن خاک مستقیماً باعث کاهش جذب و آسمیلاسیون آهن در گیاه شده و منجر به کاهش رشد و سلامت گیاه می‌شود (Malakouti & Homae, 1989). تغییرات بیوشیمیایی آهن درون گیاه نیز شامل جذب فرم Fe(II) توسط

پودر براده آهن (با خلوص ۶۰/۵ درصد آهن، مجتمع صنعتی اسفراین خراسان شمالی) مورد استفاده قرار گرفتند.

بر اساس نتایج حاصل از آزمون استخراج‌پذیری آهن با استفاده از گلوکاتینون ۵ میلی‌مولار، میزان آهن استخراج‌شده از براده آهن و اکسید آهن به ترتیب ۲۷۷۸۰ و ۲۱۹۲/۶ میکروگرم در گرم ماده بود (مطابق جدول ۲). با استفاده از این داده‌ها، به‌منظور فراهم‌آوردن معادل ۳ میلی‌گرم آهن قابل‌استخراج در هر کیلوگرم خاک، مقادیر بهینه از هر منبع شامل ۵۰ میلی‌گرم سکوسترین آهن (Fe-EDDHA)، ۱۳۷۰ اکسید آهن، و ۱۰۸ میلی‌گرم براده آهن انتخاب و به خاک افزوده شد. این هم‌ارزی آهن قابل‌استخراج میان تیمارها بر پایه مطالعات پیشین (Gheshlaghi, Khorassani, & Abadía, 2022) و امکان مقایسه‌ی دقیق‌تر کارایی منابع آهن در شرایط خاکی انجام شد. ترکیبات معدنی پیش از استفاده، جهت یکنواختی و افزایش سطح تماس، از الک شماره ۱۰۰ (۱۵۰ میکرومتر) عبور داده شدند.

گلوکاتینون (GSH)، به‌عنوان یک عصاره‌گیر زیستی مؤثر جهت استخراج آهن از منابع کم‌محلول به کار گرفته شد. این تری‌پپتید دارای گروه‌های تیول (R-SH) و ساختار احیاکننده است که توانایی کاهش و احیا آهن فریک (Fe(III)) به فرو قابل‌جذب (Fe(II)) و تشکیل کمپلکس‌های محلول با آهن را دارد (Aliaga, Carrasco-Pozo, López-Alarcón, Olea-Azar, & Speisky, 2011; Briat, Dubos, & Gaymard, 2015). بررسی‌ها نشان داده‌اند که پیش‌ماده گلوکاتینون یعنی γ -گلوتامیل‌سیستئین نیز دارای واکنش‌پذیری بالایی در تشکیل کمپلکس با آهن فریک (Fe(III)) است (Tsutsumi, Yamashita, Muraoka, Hirata, & Nagano, 2024). درحالی‌که سولفات آهن (FeSO_4) یکی از منابع رایج آهن محلول در کشاورزی است، اما در خاک‌های آهکی به‌سرعت به ترکیبات نامحلول نظیر هیدروکسید آهن (Fe(OH)_3) تبدیل شده و قابلیت جذب آن توسط گیاه کاهش می‌یابد. در این شرایط، استفاده از منابع آهن کم‌محلول همراه با عصاره‌گیرهای زیستی مانند گلوکاتینون می‌تواند موجب فراهمی تدریجی و پایداری بیشتر آهن در خاک‌های قلیایی می‌شود (Rombola, Pinton, & Zocchi, 2019; Fuentes, Bosch, Hita, et al., 2023). محلول‌پاشی گلوکاتینون (تهیه‌شده از شرکت سیگما)، در چهار نوبت (۲۹، ۳۸، ۴۲ و ۴۸ روز بعد از کشت)، در سطوح تعریف شده صورت گرفت. طی دوره رشد، رطوبت خاک گلدان‌ها در حد ظرفیت زراعی حفظ گردید. گیاهان پس از ۶۶ روز برداشت شده و صفاتی از جمله وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه، آهن فعال (استخراج شده با فناترولین)، آهن کل اندام هوایی و نیتروژن اندام هوایی اندازه‌گیری شدند. تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹٫۱ انجام گرفت و مقایسه میانگین‌ها نیز به کمک آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. نمودارها نیز با استفاده از نرم‌افزار Excel رسم شدند.

در پردیس دانشگاه فردوسی مشهد نمونه‌برداری شد و پس از هوا خشک کردن و عبور آن از الک ۲ میلی‌متری، برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد نظر از جمله بافت خاک به روش هیدرومتری (Ge & Bauder, 1986)، pH (واکنش خاک) در گل اشباع به روش توماس (Thomas, 1996) با دستگاه pH متر، هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع به روش رودز (Rhoades, 1996) توسط دستگاه EC متر، نیتروژن کل خاک به روش کدال (Bremner & Mulvaney, 1982)، فسفر قابل استفاده خاک به روش اولسن (Olsen & Sommers, 1982) توسط دستگاه اسپکتروفتومتر و پتاسیم قابل استفاده خاک به روش استات آمونیوم (Helmek & Sparks, 1996) توسط دستگاه فلیم‌فتومتر، کربن آلی به روش بی‌کرومات (Walkley & Black, 1934)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک (Leoppert & Soares, 1996)، رطوبت ظرفیت زراعی به روش اشباع از کف و پس از خروج آب ثقلی از خاک (Alizadeh, 2006) اندازه‌گیری شدند. آهن قابل استفاده‌ی خاک نیز با استفاده از عصاره‌گیر DTPA-TEA (DTPA 0.005 نرمال، TEA 0.1 نرمال، CaCl_2 0.01 نرمال) به روش لیندزی و نورول (Lindsay & Norvell, 1978) عصاره‌گیری و غلظت آن با دستگاه جذب اتمی مدل (Shimadzu, AA-670)، اندازه‌گیری شد؛ نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. بعد از آماده‌سازی خاک و با توجه به نتایج تجزیه خاک و نیاز کودی گیاه بادام‌زمینی، عناصر پرمصرف چون نیتروژن، فسفر و پتاسیم براساس توصیه کودی از منابع مختلف (نیترات کلسیم، سولفات پتاسیم و مونو فسفات کلسیم در غلظت‌های ۱۰۰، ۱۰۰ و ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، به خاک اضافه شد (Zuo, Ren, Zhang, & Jiang, 2007; Rachaputi, Yashvir, & Wilson, 2021).

با توجه به حساسیت گیاه بادام‌زمینی به کمبود آهن در خاک‌های آهکی به‌دلیل تأثیر بی‌کربنات و افزایش pH و نیز حد بحرانی کمبود آهن (۵/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم، Malakouti & Homaee, 1989) در آن، بادام‌زمینی گیاه مناسبی برای بررسی کمبود آهن است و با توجه به ارزش اقتصادی این گیاه، بهبود تغذیه آهن می‌تواند منجر به افزایش عملکرد شود. بنابراین، پژوهش حاضر به‌صورت آزمایش گلخانه‌ای در قالب طرح کاملاً تصادفی به‌صورت فاکتوریل با سه تکرار انجام شد. هر واحد آزمایشی شامل گلدان‌هایی حاوی ۷ کیلوگرم خاک با ۴ بوته بادام‌زمینی بود. فاکتورهای مورد بررسی شامل منابع مختلف آهن (کنترل- بدون مصرف آهن، سکوسترین آهن، اکسید آهن و براده آهن) به‌صورت مصرف خاکی، و گلوکاتینون به‌صورت محلول‌پاشی در سه سطح (صفر، ۱ و ۲ میلی‌مولار) بود.

به‌منظور تأمین مقدار یکنواختی از آهن قابل‌استخراج در کلیه‌ی تیمارها، سه منبع مختلف آهن شامل سکوسترین آهن (Fe-EDDHA)، ۶ درصد آهن از شرکت هلیو پتاسه فرانسه)، پودر اکسید آهن (Fe_3O_4)، مگنتیت با خلوص ۷۲ درصد آهن شرکت فرونز استال قرقیزستان) و

نتایج و بحث

اثرات منابع آهن و گلوپاتیون بر وزن خشک اندام هوایی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که فقط برهم‌کنش آهن و گلوپاتیون بر وزن خشک اندام گیاهی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). براساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها و برهم‌کنش سطوح مختلف آهن و گلوپاتیون بر وزن خشک اندام هوایی (شکل ۱)، در سطح شاهد گلوپاتیون (GSH_0)، تفاوت معنی‌داری بین منابع مختلف آهن مشاهده نشد. در حالی که با کاربرد گلوپاتیون در سطوح ۱ و ۲ میلی مولار، منبع کلاته آهن ($Fe(III)-EDDHA$) بیشترین وزن خشک را نشان داد که نسبت به تیمار اکسید آهن (Fe_{Oxi}) به ترتیب ۲۷ و ۲۲ درصد افزایش داشت؛ اما این تفاوت در مقایسه با تیمار شاهد بدون آهن (Fe_0) و براده آهن (Fe_{Ore}) معنی‌دار نبود. در حالی که آهن اکسیدی

(Fe_{Oxi}) نیز وزن خشک اندام هوایی را بهبود بخشید، اما کارایی آن به طور قابل توجهی کمتر از آهن کلاته بود. وزن خشک اندام هوایی در گلوپاتیون در سطح یک میلی مولار (GSH_1) با آهن اکسیدی (Fe_{Oxi}) کمترین و معادل ۲۴/۷ گرم بر گلدان بود، اما با افزودن گلوپاتیون افزایش یافت و نشان داد که واکنش دوز-پاسخی به کاربرد گلوپاتیون دارد. همچنین افزودن گلوپاتیون در سطح دو میلی مولار اثربخشی براده آهن را نیز افزایش داده و سبب افزایش ۱۲/۵ درصدی (۳۲/۶۴ - ۲۹ گرم بر گلدان)، نسبت به براده آهن به تنهایی شد. بیشترین وزن خشک اندام هوایی در سکوسترین آهن با محلول پاشی گلوپاتیون در سطح دو میلی مولار (۳۵/۶۳) رسید. اگرچه این افزایش ۲۲ درصدی (۳۵/۶۳ - ۲۹/۲ گرم بر گلدان)، در مقایسه با تیمار سکوسترین آهن و فاقد گلوپاتیون معنی‌دار بود و نسبت به شاهد معنی‌دار نبود.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1- Physical and Chemical Properties of Soil

بافت خاک Texture Soil	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی Electrical Conductivity (EC) (dS m ⁻¹)	کربن آلی Organic Carbon (OC) (%)	نیترोजن کل Total Nitrogen (%)	کربنات کلسیم معادل Calcium Carbonate Equivalent (CCE) (%)	رطوبت مزرعه Field Capacity Moisture (FC) (%)	فسفر قابل استفاده Available Phosphorus (mg kg ⁻¹)	پتاسیم قابل استفاده Available Potassium (mg kg ⁻¹)	آهن قابل استفاده DTPA Extractable Iron (DTPA-Fe) (mg kg ⁻¹)
Loam	7.4	1.04	0.58	0.06	15.3	18	6.82	153.13	2.07

جدول ۲- میزان آهن قابل استخراج از براده آهن و اکسید آهن با استفاده از عصاره‌گیرهای مختلف (برحسب میکروگرم بر گرم)

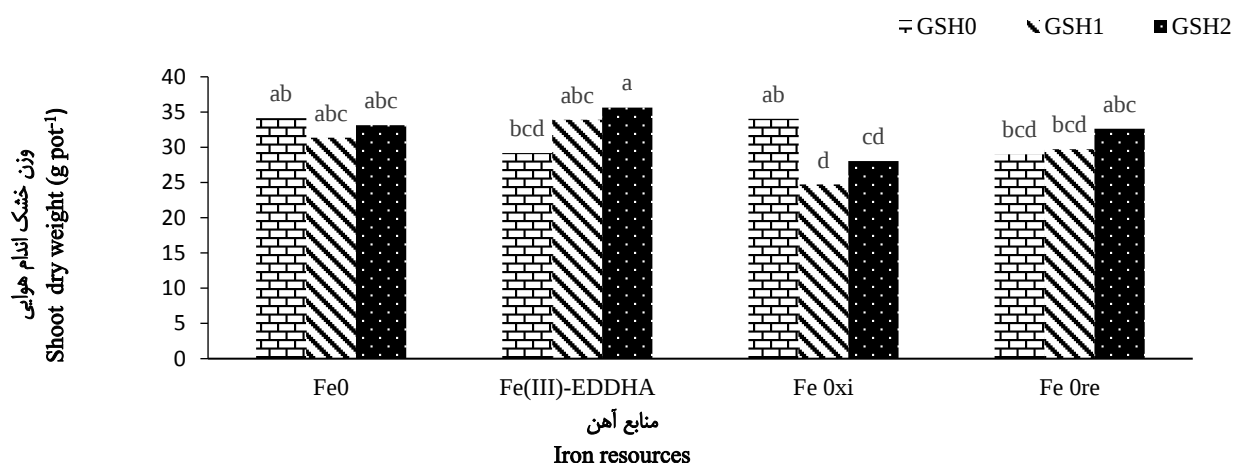
Table 2- Extractable iron content (μg/g) from Iron Filings and Iron Oxide using various extractants

عصاره‌گیر Extractant	آهن استخراج شده از براده آهن Iron extracted from iron filings	آهن استخراج شده از اکسید آهن Iron extracted from iron oxide
گلوپاتیون (۵ میلی مولار) Glutathione (GSH, 5 mM)	27,780	2,192.6
دی‌تیوتریتول (۰.۵ میلی مولار) Dithiothreitol (DTT, 0.5 mM)	294.4	153.8
تیوفنول (۵ میلی مولار) Thiophenol (5 mM)	52.8	3.4
آب دی‌یونیزه Deionized Water (MQ)	10.48	7.8
دی‌تی‌پی‌ای-تری‌اتانول آمین DTPA-TEA (pH 7.3)	2,086	219

جدول ۳- تجزیه واریانس اثرهای اصلی و متقابل فاکتورها بر صفات مورد مطالعه
Table 3- Analysis of variance for the main and interaction effects of factors on the studied traits

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی DF	میانگین مربعات (Mean squares)					
		وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	وزن خشک ریشه Root dry weight	غلظت آهن برگ عصاره‌گیری شده با فنانترولین Phenanthroline-extracted leaf iron concentration	جذب آهن کل اندام هوایی Total iron uptake of shoot	جذب آهن کل ریشه Total iron uptake in root	جذب نیتروژن اندام هوایی Nitrogen uptake of the shoot
آهن Fe	2	34.18 ^{ns}	0.498 ^{ns}	1.72 ^{**}	5.51 ^{**}	0.05 ^{ns}	8627 ^{**}
گلوپتاتین Glutathione	3	18.64 ^{ns}	0.9772 ^{ns}	14.22 ^{**}	1.62 ^{ns}	0.11 [*]	8878 ^{**}
آهن*گلوپتاتین Glutathione*Fe	6	32.86 [*]	1.24 [*]	3.15 ^{**}	1.6 [*]	0.15 ^{**}	3498 ^{**}
خطا error	24	12.31	0.35	0.118	0.5	0.03	931
ضریب تغییرات CV	%	11.21	18	3.7	2.4	17.31	14.66

ns, **, and * represent non-significance, significance at the 1% level, and significance at the 5% level, respectively.



شکل ۱- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف آهن و گلوپتاتین بر وزن خشک اندام هوایی

Fe₀: عدم کاربرد آهن، کنترل؛ Fe(III)-EDDHA: سکوسترین آهن؛ Fe_{0xi}: اکسید آهن؛ Fe_{0re}: براده آهن؛ GSH₀، GSH₁ و GSH₂ به ترتیب: صفر، یک و دو میلی‌مولار گلوپتاتین

Figure 1- The interaction effect of different levels of iron and glutathione on shoots dry weight

Fe₀: without Fe, control; Fe(III)-EDDHA: iron sequestration; Fe_{0xi}: iron oxide; Fe_{0re}: iron filings; GSH₀, GSH₁, and GSH₂: 0, 1, and 2 mM glutathione, respectively

مشابه‌ای گزارش کرده است که آهن کلاته (Fe(III)-EDDHA)، در ترکیب با محرک‌های رشد باعث بهبود محتوای کلروفیل و رشد اندام

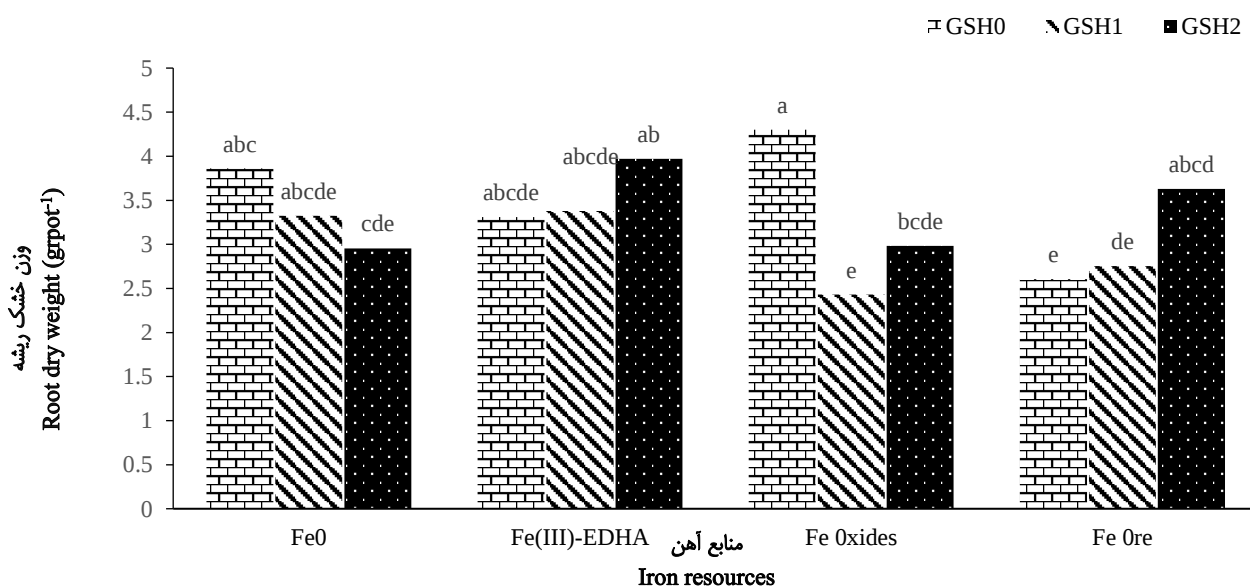
ولی نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی سکوسترین و گلوپتاتین در افزایش وزن خشک اندام هوایی بود. سکوسترین هم‌چنین سبب افزایش ۸ درصد (۳۳/۹-۳۱/۳۵) و ۷/۶ درصدی (۳۳/۱-۳۵/۶) ماده خشک اندام هوایی در سطوح یک و دو میلی‌مولار گلوپتاتین در مقایسه با تیمار هم‌سطح گلوپتاتین و بدون آهن شد. مطالعه (Mohammadipour, Sedaghat-Hoor, & Mahboub-Khomami, 2013) نیز نتایج

هوایی در گیاه اسپاتیفیلوم^۱ شد.

اثرات منابع آهن و گلوپتاتین بر وزن خشک ریشه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که برهم کنش آهن و گلوپتاتین بر وزن خشک ریشه در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار بود (مطابق جدول ۳). براساس نتایج مقایسه میانگین داده ها و برهم کنش سطوح مختلف آهن و گلوپتاتین بر وزن خشک ریشه (مطابق شکل ۲)، در سطح شاهد گلوپتاتین (GSH_0)، بیشترین وزن خشک ریشه در تیمار اکسید آهن مشاهده شد که تفاوت معنی داری با شاهد Fe_0 نداشت، اما به طور معنی داری بیشتر از تیمار براده آهن (افزایش حدود ۴۳ درصد) بود. در سطح گلوپتاتین ۱ میلی مولار، تیمار سکوسترین آهن ($Fe(III)-EDDHA$) بیشترین وزن خشک ریشه را داشت که تفاوت معنی داری با تیمارهای شاهد (Fe_0) و براده آهن (Fe_{Ore}) نشان نداد؛ در حالی که تیمار اکسید آهن کاهش قابل توجهی (حدود ۳۷ درصد) نسبت به شاهد (Fe_0) نشان داد. در سطح ۲ میلی مولار گلوپتاتین نیز بالاترین وزن خشک ریشه در تیمار سکوسترین آهن ($Fe(III)-EDDHA$) مشاهده شد، اما تفاوت آن با تیمارهای شاهد آهن (Fe_0) و براده آهن (Fe_{Ore}) معنی دار نبود و نسبت به تیمار اکسید آهن افزایش (۲۵/۵ درصد) را نشان داد. همچنین سکوسترین آهن سبب افزایش تاثیر گلوپتاتین در سطوح یک و دو

میلی مولار به ترتیب، ۱/۶ و ۳۴/۴ درصدی (۳/۳۲-۳/۳۸ و ۲/۹۵-۳/۹۷ گرم بر گلدان)، در مقایسه با تیمار هم سطح گلوپتاتین و بدون آهن شد. این افزایش در سطح دو میلی مولار معنی دار شد. به طور کلی، افزایش معنی دار وزن خشک اندام هوایی و پایداری مطلوب وزن خشک ریشه در حضور سکوسترین آهن ($Fe(III)-EDDHA$) و گلوپتاتین به ویژه در سطوح بالاتر (۲ میلی مولار) می تواند به دلیل بهبود فراهمی آهن در خاک آهکی باشد. نتایج مطالعات قبلی نیز نشان داده اند که سکوسترین آهن ($Fe(III)-EDDHA$) به دلیل پایداری و انحلال پذیری بالا در شرایط قلیایی خاک، قابلیت جذب آهن و رشد گیاهان حساس به کمبود آهن را بهبود می بخشد (Malakouti & Homaee, 1989; Lucena & Chaney, 2006). همچنین گلوپتاتین به عنوان ترکیبی با خاصیت احیاکنندگی و عصاره گیری آهن از ترکیبات معدنی می تواند باعث افزایش دسترسی گیاه به آهن شود (Gill & Tuteja, 2010; Gheshlaghi et al., 2019). با این حال کاهش وزن خشک ریشه در تیمار اکسید آهن در حضور گلوپتاتین ممکن است به دلیل تغییرات شیمیایی در ناحیه ریزوسفری باشد که منجر به کاهش فراهمی موضعی آهن شده است (Zuchi et al., 2015).



شکل ۲- اثر برهم کنش سطوح مختلف آهن و گلوپتاتین بر وزن خشک ریشه

Fe_0 : عدم کاربرد آهن، کنترل؛ $Fe(III)-EDDHA$: سکوسترین آهن؛ Fe_{Oxi} : اکسید آهن؛ Fe_{Ore} : براده آهن؛ GSH_0 ، GSH_1 و GSH_2 به ترتیب: صفر، یک و دو میلی مولار گلوپتاتین

Figure 2- The interaction effect of different levels of iron and glutathione on root dry weight

Fe_0 : without Fe, control; $Fe(III)-EDDHA$: iron sequestration; Fe_{Oxi} : iron oxide; Fe_{Ore} : iron filings; GSH_0 , GSH_1 , and GSH_2 : 0, 1, and 2 mM glutathione, respectively

کمتری (۲۴ و ۷ درصد کمتر) داشته و تنها براده آهن و سوکسترین آهن، افزایش آماری معنی‌داری با آهن اکسیدی (Fe_{Oxi}) داشتند. علاوه بر این محلول‌پاشی گلوئاتیون در سطح یک میلی‌مولار، غلظت آهن در سکوسترین آهن را در مقایسه با گلوئاتیون به تنهایی ۱۱ درصد (۱۰/۴-۹/۳۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) افزایش داد و همچنین افزودن گلوئاتیون در این سطح موجب افزایش ۵۰/۶ درصدی (۷/۳-۱۱) میلی‌گرم بر کیلوگرم) در براده آهن، نسبت به براده آهن به تنهایی شد و هر دو درصد افزایشی از نظر آماری معنی‌دار بود.

به‌طور کلی، این نتایج نشان می‌دهد که در حضور گلوئاتیون، اثربخشی منابع معدنی آهن به‌ویژه براده آهن (Fe_{Ore}) در سطح ۱ میلی‌مولار و اکسید آهن (Fe_{Oxi}) در سطح ۲ میلی‌مولار بهبود یافته و منجر به افزایش قابل توجه آهن قابل جذب در برگ گیاه بادام‌زمینی در خاک آهکی شده است. در شرایط بدون کاربرد گلوئاتیون (GSH_0)، اگرچه تیمار سکوسترین آهن و آهن اکسیدی (Fe_{Oxi} و Fe(III)-EDDHA) نسبت به تیمار شاهد بدون آهن، افزایش غلظت آهن را نشان دادند، اما میزان آهن قابل استخراج در تیمار براده آهن (Fe_{Ore})، بسیار پایین باقی ماند. این یافته با مطالعات پیشین هم‌خوانی دارد که نشان داده‌اند، ترکیبات معدنی مانند براده آهن (Fe_{Ore}) به‌دلیل پایداری بیشتر در فرم آهن فریک (Fe(III)) و حلالیت پایین در pHهای بالا، در غیاب عوامل احیاکننده، قابلیت استفاده محدودی دارند (Lindsay & Schwab, 1982; Marschner, 1995). با کاربرد گلوئاتیون در سطح ۱ میلی‌مولار، تیمار براده آهن (Fe_{Ore}) بیشترین افزایش غلظت آهن را در برگ نشان داد. این امر احتمالاً به خاصیت احیاکنندگی گلوئاتیون مربوط می‌شود که می‌تواند فرم غیرمحلول آهن فریک (Fe(III)) به فرو قابل جذب (Fe(II)) تبدیل کرده و در عین حال با کاهش pH ریزوسفری، انحلال‌پذیری آهن را افزایش دهد (Zuchi et al., 2015; Gheslaghi et al., 2019). همچنین مشخص شده است که گلوئاتیون می‌تواند با آهن کمپلکس تشکیل دهد و انتقال آن را از ریشه به اندام‌های هوایی تسهیل کند (Rouhier, Couturier, Johnson, & Jacquot, 2010). در سطح ۲ میلی‌مولار گلوئاتیون، بیشترین غلظت آهن برگ مربوط به تیمار اکسید آهن (Fe_{Oxi}) بود، که نسبت به سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) افزایش قابل توجهی نشان داد. این یافته قابل توجه است چرا که با وجود اینکه کلات‌های مصنوعی مانند سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) به‌دلیل پایداری شیمیایی بالاتر در خاک‌های آهکی شناخته شده‌اند (Lucena & Chaney, 2006)، اما کاربرد هم‌زمان گلوئاتیون با منابع معدنی آهن ممکن است از طریق اثرات هم‌افزایی در کاهش pH موضعی، احیای آهن فریک (Fe(III)) و همچنین افزایش تحرک آهن، باعث افزایش کارایی منابع معدنی آهن شود. این پدیده به‌ویژه در منابعی مانند آهن اکسیدی (Fe_{Oxi}) که سطح ویژه بالایی دارند و قابلیت پاسخ‌گویی به شرایط

در تیمار براده آهن نیز فراهمی اندک آهن به‌دلیل عدم حضور عوامل احیاکننده یا کلات‌کننده، موجب کاهش رشد ریشه در سطح شاهد شد، اما کاربرد گلوئاتیون در سطح ۲ میلی‌مولار تا حدودی این محدودیت را برطرف کرده و رشد ریشه را بهبود بخشید و موجب افزایش رشد ۳۹/۴۳ درصدی (۶/۶۳-۲/۳ گرم بر گلدان)، در مقایسه با مصرف براده آهن به تنهایی شد.

بنابراین، نتایج این پژوهش ضمن تأیید یافته‌های قبلی (Zuchi et al., 2015; Gheslaghi et al., 2019)، نشان می‌دهد که کاربرد توأم سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) و گلوئاتیون می‌تواند به‌عنوان راه‌کاری مناسب برای بهبود فراهمی آهن و حفظ رشد گیاه بادام‌زمینی در خاک‌های آهکی پیشنهاد شود.

بررسی اثر منابع آهن و گلوئاتیون بر غلظت و جذب عناصر

غذایی در گیاه بادام‌زمینی

غلظت آهن فعال

براساس نتایج (جدول ۳)، تجزیه واریانس اثرهای اصلی و متقابل فاکتورها بر غلظت آهن قابل استخراج با معرف فنانتروپین در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. برهم‌کنش سطوح مختلف آهن و گلوئاتیون بر غلظت آهن برگ عصاره‌گیری شده با فنانتروپین (شکل ۳)، نشان داد که هر دو عامل نقش قابل توجهی در بهبود فراهمی آهن قابل جذب در شرایط خاک آهکی داشتند. در سطح بدون گلوئاتیون (GSH_0)، تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) نسبت به تیمار شاهد (Fe_0) افزایش ۳۵/۲ درصدی در غلظت آهن عصاره‌گیری‌شده نشان داد، در حالی که تیمار اکسید آهن (Fe_{Oxi}) افزایش ۳۲/۲ درصدی و براده آهن (Fe_{Ore}) تنها افزایش ۸/۲ درصدی نسبت به Fe_0 داشت. از میان تیمارها، سکوسترین و آهن اکسیدی (Fe(III)-EDDHA و Fe_{Oxi}) تفاوت معنی‌داری با Fe_0 نشان دادند، در حالی که براده آهن (Fe_{Ore}) از نظر آماری با Fe_0 تفاوت معنی‌داری نداشت. غلظت آهن فعال در شرایط عدم مصرف آهن (Fe_0)، آهن اکسیدی (Fe_{Oxi}) و براده آهن (Fe_{Ore}) با محلول‌پاشی گلوئاتیون در دو سطح ۱ و ۲ میلی‌مولار به‌ترتیب ۳۸ و ۴۹ درصد، ۹ و ۱۸ درصد و ۵۰ و ۲۲ درصد افزایش یافت. در سطح ۱ میلی‌مولار گلوئاتیون (GSH_1)، تیمار براده آهن (Fe_{Ore}) نسبت به آهن صفر و سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) به‌ترتیب افزایش ۲۴/۴ و ۹ درصدی را نشان داد. در سطح ۲ میلی‌مولار گلوئاتیون (GSH_2)، تیمار اکسید آهن (Fe_{Oxi}) بیشترین مقدار آهن عصاره‌گیری‌شده را داشت و نسبت به سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) افزایشی معادل ۲۶ درصد نشان داد که از نظر آماری معنی‌دار بود. در این سطح، تیمارهای براده آهن و آهن صفر (Fe_0 و Fe_{Oxi}) نسبت به آهن اکسیدی (Fe_{Oxi}) به‌ترتیب افزایش

بیشترین اثر افزایشی در نسبت مذکور مربوط به تیمار براده آهن (FeOre) بود که از ۱/۹۶ در سطح صفر گلوپتاتین به ۲/۷۲ در سطح ۲ میلی مولار افزایش یافت (افزایش حدود ۳۸/۴ درصد)، که این نتیجه احتمالاً ناشی از پتانسیل زیاد گلوپتاتین در احیای آهن (Fe(III)) و تسهیل جذب آن از منابع معدنی مانند براده آهن است (Zuchi et al., 2015; Gheshlaghi et al., 2019).

نسبت غلظت آهن برگ قابل استخراج با فنانترولین به آهن کل اندام هوایی در این پژوهش در دامنه ۱/۱۳ تا ۳/۴۳ قرار گرفت. این مقادیر در محدوده‌ی پایین‌تر گزارش‌های قبلی قرار دارند، به‌طوری‌که در مطالعات پیشین، دامنه‌هایی بین ۰/۷ تا ۲۲/۷ گزارش شده است. این اختلاف می‌تواند ناشی از تفاوت در منابع آهن، شرایط خاک، رقم گیاه، مراحل رشد و یا نوع تیمارهای زیستی باشد (Zuo et al., 2007; Kong, Dong, Xu, Liu, & Bai, 2014; Zhang, Dong, Kong, Liu, & Wang, 2014; Song, Dong, Tian, Wang, & He, 2017; Jiao, Wang, Ma, Zhang, & Jensen, 2021). تنوع مطالعات انجام شده در گیاه بادام‌زمینی، نسبت آهن عصاره‌گیری شده با فنانترولین بر غلظت آهن کل اندام هوایی در شرایط کشت و تیمارهای مختلف به‌ترتیب، ۰/۲-۷/۹ (Kong, Dong, Zhang, 2014; Wang, Xu, Liu, & Fan, 2015; Song, 2021; Zhang et al., 2014) ۲/۶-۱۳/۴۷، ۱۱/۵۳-۳/۰۷ (Song et al., 2017; Zuo et al., 2007) ۷/۹۹-۲۲/۷، ۱۱/۳۲-۱۸/۸۴ (Song, Dong, Tian, Bai, & He, 2016) ۱۳/۷۴-۱۶/۱۲، (Kong et al., 2014) گزارش شده است. با این حال، تطابق عددی نسبی با بازه‌های گزارش شده نشان‌دهنده اعتبار نتایج حاضر و قابلیت استناد آن‌ها در شرایط مشابه کشت بادام‌زمینی است. نسبت‌های پایین‌تر در برخی تیمارها، نظیر سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) در غیاب گلوپتاتین، احتمالاً به تجمع آهن غیر فعال شده در بافت گیاه به‌ویژه در مراحل انتهایی رشد مربوط می‌شود (Kong et al., 2015; Jiao et al., 2021).

احیایی ریزوسفری را دارند، بیشتر نمایان است (Chen, Yang, Qin, 2010; Abadía & Grusak, 2013). به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که گلوپتاتین نه‌تنها به عنوان آنتی‌اکسیدان عمل می‌کند، بلکه می‌تواند در شرایط قلیایی خاک، نقش فعالی در بهبود فراهمی آهن معدنی ایفا کند. به‌ویژه در سطوح پایین گلوپتاتین، براده آهن بیشترین پاسخ را داشته و در سطوح بالاتر، اکسید آهن به عنوان منبع کارآمدتر ظاهر شده است. این تفاوت می‌تواند ناشی از تفاوت در ساختار و واکنش‌پذیری منابع آهن در تعامل با گلوپتاتین و محیط خاک باشد.

نسبت غلظت آهن قابل استخراج با معرف فنانترولین به غلظت آهن کل اندام هوایی

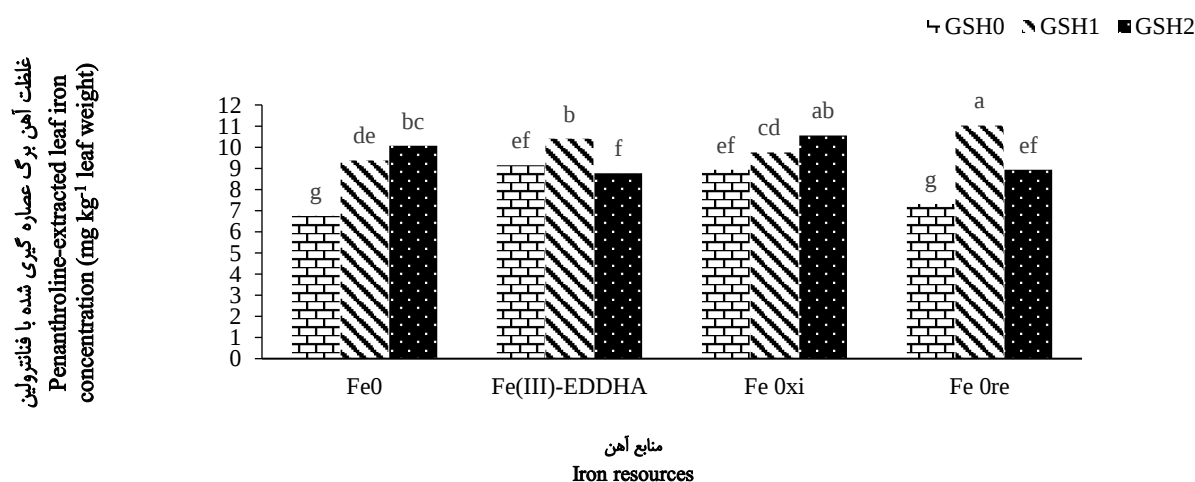
با توجه به جدول ۴، نسبت غلظت آهن برگ عصاره‌گیری شده با فنانترولین به غلظت آهن کل اندام هوایی گیاه بادام‌زمینی، بسته به نوع منبع آهن و سطح گلوپتاتین به‌کار رفته، در دامنه‌ای بین ۱/۱۳ تا ۳/۴۳ به‌دست آمد. این نسبت به‌عنوان شاخصی مهم در ارزیابی فراهمی آهن قابل‌استفاده برای گیاه شناخته می‌شود و بیانگر سهم آهن متحرک و فعال فیزیولوژیکی نسبت به آهن کل جذب‌شده در گیاه است (Marschner, 1995; Jungk, Waisel, & Kafkafi, 2002).

در تیمارهای بدون آهن (Fe_0) با افزایش گلوپتاتین از صفر به ۲ میلی مولار، نسبت مذکور از ۲/۱۵ به ۲/۲۴ افزایش یافت (حدود ۴/۷ درصد افزایش). در تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) نیز این نسبت از ۱/۹۵ در سطح بدون گلوپتاتین به ۲/۳۲ در سطح ۲ میلی مولار گلوپتاتین رسید (افزایش حدود ۱۸/۸ درصد)، که نشان‌دهنده بهبود استفاده فیزیولوژیک از آهن جذب‌شده تحت تأثیر گلوپتاتین است. در تیمار اکسید آهن (FeOxi)، افزایش سطح گلوپتاتین از صفر به ۲ میلی مولار موجب افزایش نسبت از ۲/۲۸ به ۲/۴۰ شد (افزایش حدود ۴/۹ درصد)، که از تداوم عملکرد مثبت گلوپتاتین در تحریک فعالیت جذب و استفاده از آهن حتی در منابع معدنی غیرکلاته حکایت دارد.

جدول ۴- نسبت غلظت آهن برگ عصاره‌گیری شده با فنانترولین بر غلظت آهن کل اندام هوایی تحت تیمارهای مختلف در گیاه بادام‌زمینی

Table 4- Ratio of phenanthroline-extracted leaf iron concentration to total shoot iron concentration in peanut under different treatments

براده آهن Iron Ore (FeOre)	اکسید آهن IronOxide (FeOxi)	سکوسترین آهن Fe(III)-EDDHA	کنترل Control (Fe_0)	گلوپتاتین Glutathione (mM)
1.96	2.28	1.95	2.15	0
2.44	2.07	2.08	1.83	1
2.72	2.40	2.32	2.24	2
			1.13- 3.43	دامنه Range



شکل ۳- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف آهن و گلوپاتین بر غلظت آهن برگ عصاره‌گیری شده با فنانترولین
 Fe0: عدم کاربرد آهن، کنترل؛ Fe(III)-EDDHA: سکوسترین آهن؛ Fe0xi: اکسید آهن؛ Fe0re: براده آهن؛ GSH0، GSH1 و GSH2 به ترتیب: صفر، یک و دو میلی‌مولار گلوپاتین

Figure 3- The interaction effect of different levels of iron and glutathione on phenanthroline-extracted leaf iron concentration
 Fe0: without Fe, control; Fe(III)-EDDHA: iron sequestration; Fe0xi: iron oxide; Fe0re: iron filings; GSH0, GSH1, and GSH2: 0, 1, and 2 mM glutathione, respectively

نسبت به آهن صفر (Fe0) داشت که از نظر آماری معنی‌دار نبود. در مجموع، تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) در تمامی سطوح گلوپاتین کارایی بالاتری در افزایش جذب آهن کل نشان داد. در حالی که منابع معدنی آهن اکسیدی و براده آهن (Fe0xi و Fe0re)، به‌ویژه در سطوح بالای گلوپاتین، نتایج ضعیف‌تری داشتند و حتی در برخی موارد با کاهش معنی‌دار جذب آهن همراه بودند. این نتایج تأییدکننده‌ی نقش مؤثر منابع کلاته آهن و گلوپاتین در بهبود جذب آهن در شرایط محدودکننده مانند خاک‌های آهکی است که پیش‌تر نیز در مطالعاتی چون (Panjtandoust, Sorooshzadeh, & Ghanati, 2010; Koen, Szymańska, Klinguer, Dobrowolska, Besson-Bard, & Wendehenne, 2012; Gheshlaghi et al., 2019) گزارش شده بود.

جذب آهن کل ریشه

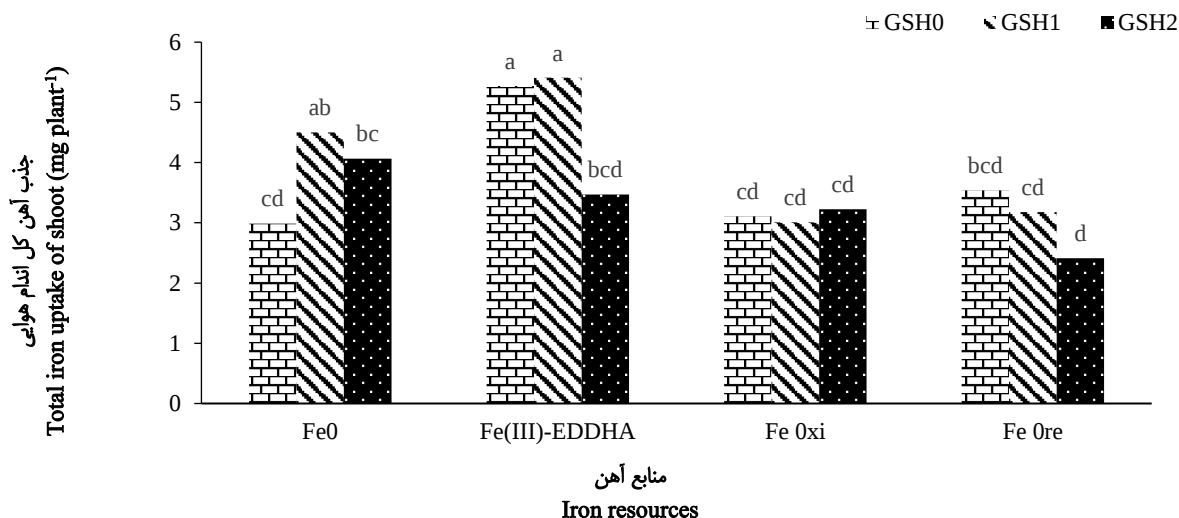
براساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر منابع گلوپاتین و برهم‌کنش آهن و گلوپاتین بر میزان جذب آهن کل در ریشه گیاه به ترتیب در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). یافته‌ها (شکل ۵)، نشان داد که در سطح بدون گلوپاتین (GSH0)، تیمار اکسید آهن (Fe0xi) با افزایش حدود ۱۶/۴ درصدی نسبت به تیمار شاهد (Fe0)، بیشترین جذب آهن ریشه را نشان داد، هرچند این اختلاف از نظر آماری معنی‌دار نبود. تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) نیز با کاهش حدود ۱۵/۵ درصدی نسبت به آهن صفر (Fe0) عملکردی مشابه داشت و تفاوت آن از نظر آماری بی‌معنی بود.

جذب آهن کل اندام هوایی

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر منابع آهن و برهم‌کنش آهن و گلوپاتین بر میزان جذب آهن کل در گیاه به ترتیب در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین بر جذب آهن کل در اندام هوایی (شکل ۴)، نشان داد که در سطح بدون گلوپاتین (GSH0)، مصرف (Fe(III)-EDDHA) موجب افزایش ۷۶ درصدی و معنی‌داری جذب آهن نسبت به تیمار شاهد بدون آهن (Fe0) شد. تیمارهای اکسید و براده آهن (Fe0xi و Fe0re) افزایش جذب حدود ۴ تا ۱۸ درصدی نسبت به آهن صفر (Fe0) داشتند، اما این افزایش‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبودند.

در سطح گلوپاتین ۱ میلی‌مولار (GSH1)، تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) با حدود ۸۱ درصد افزایش جذب نسبت به آهن صفر (Fe0)، افزایش معنی‌داری را نشان داد. در همین سطح، تیمار براده آهن (Fe0re) حدود ۶ درصد و اکسید آهن (Fe0xi) حدود ۰/۶ درصد افزایش جذب نسبت به آهن صفر (Fe0) داشتند که از نظر آماری غیرمعنی‌دار بودند. محلول پاشی گلوپاتین در سطح یک میلی‌مولار، جذب آهن در سکوسترین آهن را در مقایسه با گلوپاتین به تنهایی ۲۰ درصد (۴/۵-۴/۵ میلی‌گرم بر گیاه) افزایش داد.

در سطح گلوپاتین ۲ میلی‌مولار (GSH2)، تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA)، افزایش ۱۶ درصدی نسبت به (Fe0)، را نشان داد. در مقابل، تیمار براده آهن (Fe0re) کاهش ۱۹/۳ درصدی نسبت به آهن صفر (Fe0) را نشان داد که از نظر آماری معنی‌دار نبود. تیمار آهن اکسیدی (Fe0xi) نیز در این سطح افزایش اندکی (۸ درصد)،



شکل ۴- اثر برهم کنش سطوح مختلف آهن و گلوپاتیون بر جذب آهن کل اندام هوایی (۴ بوته در ۷ کیلوگرم خاک)

Fe0: عدم کاربرد آهن، کنترل؛ Fe(III)-EDDHA: سکوسترین آهن؛ FeOxi: اکسید آهن؛ FeOre: براده آهن؛ GSH0، GSH1 و GSH2 به ترتیب: صفر، یک و دو میلی مولار گلوپاتیون

Figure 4- Interaction effect of different levels of iron and glutathione on total iron uptake of shoot

Fe0: without Fe, control; Fe(III)-EDDHA: iron sequestration; FeOxi: iron oxide; FeOre: iron filings; GSH0, GSH1, and GSH2: 0, 1, and 2 mM glutathione, respectively

همچنین افزودن گلوپاتیون در این سطح موجب افزایش معنی دار جذب آهن در ۵۵/۶ درصدی (۱/۰۸ - ۰/۶۹ میلی گرم بر گیاه) در براده آهن، نسبت به براده آهن به تنهایی شد.

به طور کلی، نتایج نشان داد که تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) در ترکیب با محلول پاشی گلوپاتیون ۲ میلی مولار، مؤثرترین تیمار در افزایش جذب آهن کل ریشه بود. در حالی که منابع معدنی آهن اکسیدی و براده آهن (FeOre و FeOxi) نیز در برخی سطوح گلوپاتیون منجر به بهبود نسبی جذب آهن شدند، اما این اثرات عمدتاً از نظر آماری معنی دار نبودند. این اختلاف عملکرد می تواند به تفاوت در حلالیت، پایداری در pH بالا، و کارایی جذب آهن از این منابع نسبت داده شود، به ویژه این تعامل به شکل مثبت تر بین سکوسترین آهن با گلوپاتیون در شرایط خاک آهکی دیده می شود (Roosta & Mohsenian, 2012; Gheshlaghi et al., 2019).

در این پژوهش، تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) به ویژه در سطح ۲ میلی مولار گلوپاتیون، بیشترین افزایش جذب آهن ریشه را نشان داد، که این یافته با مطالعات قبلی مبنی بر تأثیر مثبت سکوسترین آهن بر جذب آهن ریشه در گیاه فلفل سیاه (Roosta & Mohsenian, 2012)، یونجه (Gheshlaghi et al., 2019) و اسپاتی فیلوم (Mohammadipour et al., 2013) همخوانی دارد. این اثر به پایداری بالای سکوسترین آهن در محیط های قلیایی و فراهمی مداوم آهن برای ریشه نسبت داده می شود.

در مقابل، تیمار براده آهن (FeOre) با کاهش حدود ۳۷ درصدی نسبت به آهن صفر (Fe0)، کاهش معنی داری در جذب آهن ریشه نشان داد. کاربرد منابع آهن اکسیدی و براده آهن به تنهایی سبب افزایش ۱۶/۴ درصدی (۱/۱۱ - ۱/۲۹ میلی گرم بر گیاه) و کاهش ۳۷ درصدی (۰/۶۹ - ۱/۱۱ میلی گرم بر گیاه) نسبت به شاهد شد.

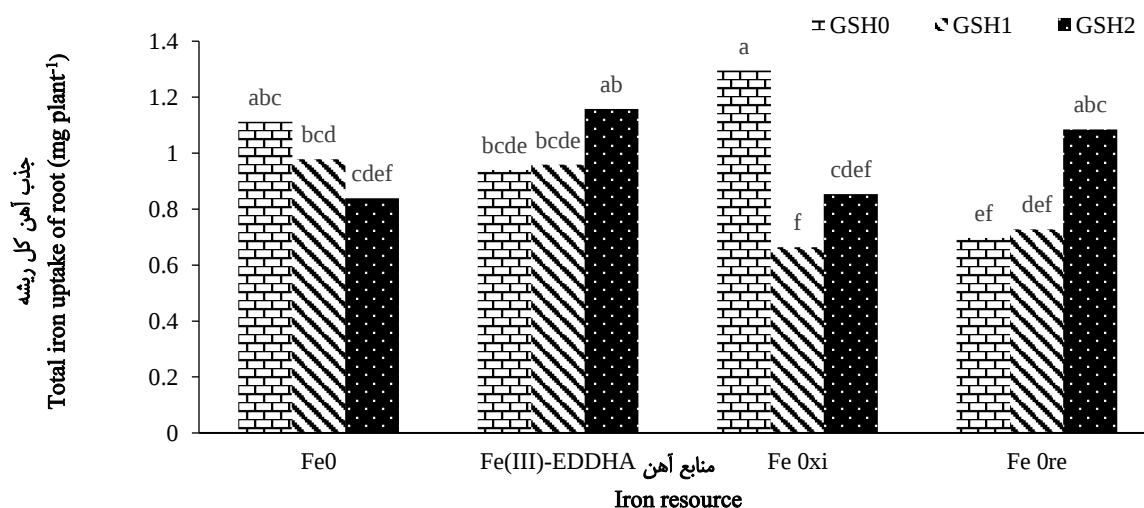
در سطح ۱ میلی مولار گلوپاتیون (GSH1)، تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA)، جذبی معادل آهن صفر (Fe0) داشت و اختلاف آماری بین آن ها مشاهده نشد. تیمار اکسید آهن (FeOxi) در این سطح، کاهش حدود ۴۰ درصدی نسبت به (Fe0) را نشان داد که این کاهش از نظر آماری معنی دار بود. تیمار براده آهن (FeOre) نیز در این سطح با کاهش حدود ۳۴ درصدی، تفاوت معنی داری با آهن صفر (Fe0) داشت. در سطح ۲ میلی مولار گلوپاتیون (GSH2)، تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) با افزایش حدود ۳۷/۹ درصدی نسبت به تیمار (GSH2Fe0)، بالاترین جذب آهن در ریشه را نشان داد که از نظر آماری معنی دار بود. تیمار براده آهن (FeOre) نیز در این سطح، افزایش حدود ۲۹ درصدی در جذب آهن نسبت به Fe0 داشت، اما این اختلاف از نظر آماری معنی دار نبود. همچنین تیمار اکسید آهن (FeOxi) در همین سطح با افزایش حدود ۱/۶ درصدی نسبت به تیمار (GSH2Fe0)، تفاوت آماری معنی داری نشان نداد. محلول پاشی گلوپاتیون در سطح دو میلی مولار، جذب آهن ریشه در سکوسترین آهن را در مقایسه با گلوپاتیون به تنهایی ۳۷/۹ درصد (۱/۱۵ - ۰/۸۳ میلی گرم بر گیاه) افزایش داد و

در تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) مشاهده شد، که با وجود جذب بالای آهن در ریشه، آهن قابل استخراج در برگ به نسبت کمتری افزایش یافت. چنین الگویی احتمالاً ناشی از محدودیت در انتقال درون‌گیاهی یا پتانسیل ذخیره‌سازی آهن به شکل غیر فعال در ریشه است (Koen *et al.*, 2012; Ramirez, Bartoli, & Lamattina, 2013; Shanmugam, Wang, Tsednee, Karunakaran, & Yeh, 2015).

جذب نیتروژن اندام هوایی

براساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر منابع آهن و برهم‌کنش آهن و گلوپاتیون بر میزان جذب نیتروژن در اندام هوایی گیاه به‌ترتیب در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). براساس داده‌ها (شکل ۴)، جذب نیتروژن در اندام هوایی گیاه بادام‌زمینی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع منبع آهن و محلول‌پاشی گلوپاتیون قرار گرفت. در سطح بدون گلوپاتیون (GSH₀)، بیشترین مقدار جذب نیتروژن در تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد (Fe₀) حدود ۱۳۲ درصد افزایش نشان داد. تیمارهای اکسید آهن و براده آهن (Fe_{Oxi} و Fe_{Ore}) نیز به‌ترتیب باعث افزایش ۴۹ و ۱۰۸ درصدی جذب نیتروژن نسبت به (Fe₀) شدند.

در مورد منابع معدنی آهن مانند اکسید آهن (Fe_{Oxi})، اگرچه در برخی سطوح گلوپاتیون (GSH₀) افزایش جزئی در جذب مشاهده شد، اما با افزایش سطح گلوپاتیون به ۱ و ۲ میلی‌مولار، جذب آهن کاهش یافت. این رفتار می‌تواند به واکنش‌های احتمالی بین گلوپاتیون و ترکیبات معدنی اکسید آهن در ریزوسفر مربوط باشد که منجر به کاهش تحرک و دسترسی آهن می‌شود. با این حال، گزارش‌هایی از تأثیر مثبت منابع اکسیدی بر افزایش جذب آهن در گیاهان مانند لوبیا (De Souza Rui, Ma, Hao, Guo, Rui, Torres *et al.*, 2019)، بادام‌زمینی (Tang, & Zhu, 2016) و سویا (Yang, Alidoust, & Wang, 2020) وجود دارد، که نشان می‌دهد این تأثیر ممکن است تحت تأثیر نوع خاک، روش مصرف یا ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه قرار گیرد. از سوی دیگر، گلوپاتیون با عملکرد احیاکننده قوی خود، در برخی تیمارها مانند براده آهن (Fe_{Ore}) موجب افزایش جذب آهن ریشه شد (افزایش ۲۹ درصدی در GSH₂ نسبت به کنترل)، اگرچه این افزایش از نظر آماری معنی‌دار نبود اما این نتیجه هم‌راستا با یافته‌هایی (Gheshlaghi *et al.*, 2019) است که نشان دادند، گلوپاتیون می‌تواند با انحلال مجدد آهن رسوب‌شده در آپوپلاست ریشه و تسهیل انتقال آن به اندام هوایی نقش مؤثری در مقابله با کمبود آهن ایفا کند. بررسی الگوی جذب آهن در اندام هوایی و ریشه نشان داد که در برخی تیمارها، گلوپاتیون موجب افزایش جذب آهن ریشه شد. اما این آهن به‌طور کامل به بخش‌های هوایی منتقل نشد. این موضوع به‌ویژه



شکل ۵- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف آهن و گلوپاتیون بر جذب آهن کل ریشه

Fe₀: عدم کاربرد آهن، کنترل؛ Fe(III)-EDDHA: سکوسترین آهن؛ Fe_{Oxi}: اکسید آهن؛ Fe_{Ore}: براده آهن؛ GSH₀، GSH₁ و GSH₂ به‌ترتیب: صفر، یک و دو میلی‌مولار گلوپاتیون

Figures 5- Interaction effect of different levels of iron and glutathione on total iron uptake in roots

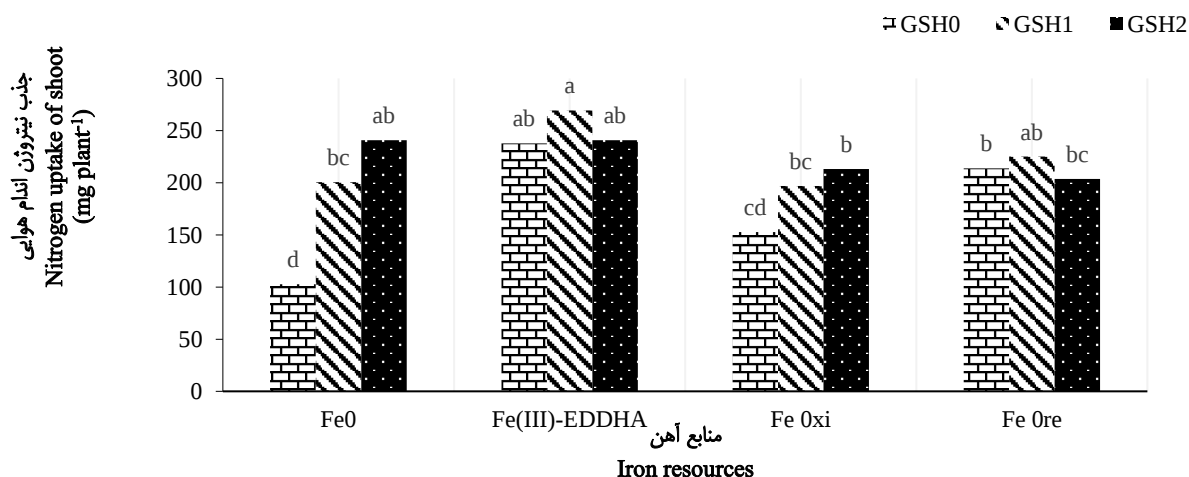
Fe₀: without Fe, control; Fe(III)-EDDHA: iron sequestration; Fe_{Oxi}: iron oxide; Fe_{Ore}: iron filings; GSH₀, GSH₁, and GSH₂: 0, 1, and 2 mM glutathione, respectively

داشته، ولی تفاوت‌های میان آن‌ها نسبت به گلوپاتیون سطح یک میلی‌مولار (GSH_1) کاهش یافت و جذب نیتروژن به حدود ۹۸ تا ۱۳۴ درصد نسبت به شاهد رسید.

این یافته‌ها نشان می‌دهد که کاربرد گلوپاتیون به‌ویژه در سطح ۱ میلی‌مولار به‌طور مؤثری باعث بهبود جذب نیتروژن در اندام هوایی گیاه شد. افزایش جذب نیتروژن می‌تواند ناشی از نقش آهن در فعال‌سازی آنزیم‌های کلیدی در چرخه نیتروژن (نظیر نیترات‌ردوکتاز) و اثر هم‌افزایی گلوپاتیون در بهبود جذب عناصر غذایی باشد (Marschner, 1995; Mohammadipour et al., 2013). مطالعات قبلی نیز اثربخشی مثبت منابع آهن کلاته و اکسیدی آهن در بهبود عملکرد نیتروژنی گیاهان را گزارش کرده‌اند (Yang et al., 2020; De Souza-Torres et al., 2021). در مجموع، ترکیب منابع مؤثر آهن به‌ویژه سکوسترین آهن ($Fe(III)$ -EDDHA) با گلوپاتیون، راه‌کاری عملی برای بهبود جذب نیتروژن در شرایط کم‌بود آهن در خاک‌های آهکی محسوب می‌شود. در این پژوهش، تعامل منابع مختلف آهن و سطوح گلوپاتیون تأثیر معناداری بر جذب نیتروژن در اندام هوایی گیاه بادام‌زمینی داشت. در سطح بدون گلوپاتیون (GSH_0)، تیمارهای سکوسترین آهن و براده آهن ($Fe(III)$ -EDDHA و Fe_{Ore}) موجب افزایش معنی‌دار جذب نیتروژن نسبت به تیمار شاهد (Fe_0) شدند.

در سطح گلوپاتیون ۱ میلی‌مولار (GSH_1)، جذب نیتروژن در تمام تیمارهای آهنی افزایش چشم‌گیری نسبت به آهن صفر (Fe_0) داشت. بیشترین مقدار جذب در تیمار سکوسترین آهن ($Fe(III)$ -EDDHA) با افزایش حدود ۱۶۲ درصد نسبت به آهن صفر (Fe_0) مشاهده شد، در حالی که تیمارهای اکسید آهن و براده آهن (Fe_{Oxi} و Fe_{Ore}) نیز افزایشی به‌ترتیب معادل ۹۲ و ۱۲۰ درصد نسبت به آهن صفر (Fe_0) نشان دادند. محلول‌پاشی گلوپاتیون در سطح یک میلی‌مولار، جذب نیتروژن در سکوسترین آهن را در مقایسه با گلوپاتیون به‌تنهایی ۳۴/۳ درصد (۲۶۹-۲۰۰ میلی‌گرم بر گیاه) افزایش داد و همچنین افزودن گلوپاتیون در این سطح موجب افزایش ۵ درصدی (۲۲۵-۲۱۳/۸ میلی‌گرم بر گیاه) جذب در براده آهن نسبت به براده آهن به‌تنهایی شد. جذب نیتروژن اندام هوایی در منابع براده و سکوسترین آهن با محلول‌پاشی گلوپاتیون در دو سطح ۱ و ۲ میلی‌مولار در مقایسه با شاهد به‌ترتیب افزایش ۱۲۰-۹۸ درصدی (۱۰۲-۲۲۵ و ۱۰۲-۲۰۳ میلی‌گرم بر گیاه در براده آهن) و ۱۳۵-۱۶۲ درصدی (۱۰۲-۲۶۹/۴ و ۱۰۲-۲۴۰ میلی‌گرم بر گیاه در سکوسترین آهن) دیده شد.

در سطح ۲ میلی‌مولار گلوپاتیون (GSH_2) تیمار آهن صفر (Fe_0) پاسخ مثبتی به گلوپاتیون نشان داد و جذب نیتروژن در آن نسبت به گلوپاتیون صفر (GSH_0)، ۱۳۵ درصد افزایش یافت. تیمارهای سکوسترین آهن، آهن اکسیدی و براده آهن نیز ($Fe(III)$ -EDDHA، Fe_{Oxi} و Fe_{Ore}) نیز در این سطح جذب بالایی (۱۰۷، ۱۳۴ و ۹۸ درصد)



شکل ۶- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف آهن و گلوپاتیون بر جذب نیتروژن اندام هوایی

Fe_0 : عدم کاربرد آهن، کنترل؛ $Fe(III)$ -EDDHA: سکوسترین آهن؛ Fe_{Oxi} : اکسید آهن؛ Fe_{Ore} : براده آهن؛ GSH_0 ، GSH_1 و GSH_2 به‌ترتیب: صفر، یک و دو میلی‌مولار گلوپاتیون

Figure 6- Interaction effect of different levels of iron and glutathione on nitrogen uptake in shoots.

Fe_0 : without Fe, control; $Fe(III)$ -EDDHA: iron sequestration; Fe_{Oxi} : iron oxide; Fe_{Ore} : iron filings; GSH_0 , GSH_1 , and GSH_2 : 0, 1, and 2 mM glutathione, respectively

وضعیت تغذیه‌ای گیاه بادام‌زمینی در خاک آهکی داشتند. تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) در ترکیب با گلوپاتیون در سطح ۲ میلی‌مولار، بیشترین افزایش را در جذب آهن کل در اندام هوایی، جذب آهن در ریشه، وزن خشک اندام هوایی و جذب نیتروژن نسبت به سایر تیمارها ایجاد کرد. همچنین محلول‌پاشی گلوپاتیون به‌تنهایی نیز موجب افزایش آهن فعال در برگ، جذب کل آهن و بهبود انتقال آهن از ریشه به اندام هوایی شد. در میان منابع معدنی، براده آهن در ترکیب با گلوپاتیون عملکرد نسبتاً مطلوبی در افزایش آهن فعال، جذب آهن ریشه و وزن خشک گیاه نشان داد. بررسی نسبت آهن فعال به آهن کل نیز نشان داد که کاربرد گلوپاتیون، به‌ویژه در سطوح بالاتر، موجب افزایش سهم آهن فیزیولوژیکی قابل استفاده در گیاه شد. این نتایج بیانگر نقش مؤثر گلوپاتیون در افزایش فراهمی آهن از منابع مختلف و بهبود شاخص‌های رشدی و تغذیه‌ای گیاه در خاک‌های آهکی است. از طرفی، براده آهن (Fe_{ore}) که یک منبع معدنی و ارزان‌قیمت محسوب می‌شود، در ترکیب با گلوپاتیون عملکرد مناسبی در افزایش آهن فعال، جذب آهن و رشد گیاه داشت و می‌تواند به‌عنوان جایگزینی اقتصادی برای کودهای کلاته در مدیریت تغذیه آهن در خاک‌های آهکی مدنظر قرار گیرد. به‌طور کلی، این پژوهش تأکید می‌کند که کاربرد تلفیقی منابع آهن با ترکیبات محرک زیستی مانند گلوپاتیون، راهکاری عملی، مؤثر و اقتصادی برای بهبود تغذیه آهن در گیاهان حساس به کمبود آهن، به‌ویژه در خاک‌های آهکی، محسوب می‌شود و می‌تواند در قالب برنامه‌های کوددهی پایدار در کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد برای حمایت مالی از این طرح پژوهشی با کد ۵۴۵۹۳-۳ تشکر و قدردانی می‌شود.

این افزایش احتمالاً به پایداری بالای کلات سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) در خاک‌های آهکی (Lucena & Chaney, 2006) و همچنین فراهمی نسبی آهن در تیمار براده آهن (Fe_{ore}) برمی‌گردد. این نتایج نشان می‌دهند که حتی در غیاب ترکیبات محرک مانند گلوپاتیون، استفاده از منابع مناسب آهن می‌تواند نقش مؤثری در بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه ایفا کند.

در سطح گلوپاتیون ۱ میلی‌مولار (GSH₁)، جذب نیتروژن در تمامی تیمارهای آهن نسبت به شاهد (Fe₀) افزایش یافت و تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) همراه با گلوپاتیون سطح یک میلی‌مولار (GSH₁) بیشترین تأثیر مثبت و معنی‌دار را نشان داد. این یافته مؤید نقش هم‌افزایی گلوپاتیون با منابع آهن (به‌ویژه کلات‌ها)، در بهبود فراهمی آهن و افزایش جذب نیتروژن در گیاه است (Marschner, 1995; Gheshlaghi et al., 2019).

در سطح ۲ میلی‌مولار گلوپاتیون (GSH₂)، هرچند روند افزایشی جذب نیتروژن همچنان حفظ شد، اما اختلاف بین تیمارها کاهش یافت و در برخی موارد تفاوت‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبودند. این امر می‌تواند ناشی از رسیدن به نقطه اشباع پاسخ فیزیولوژیکی گیاه و یا اثرات منفی مصرف بیش از حد گلوپاتیون باشد (Koen et al., 2012). یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین در گیاهان خانواده بقولات، از جمله یونجه و سویا، هم‌راستا بوده و بر نقش کلیدی آهن و ترکیبات محرک مانند گلوپاتیون در بهبود جذب نیتروژن، به‌ویژه در شرایط کمبود آهن در خاک‌های آهکی، تأکید دارد (Yang et al., 2020; De Souza-Torres et al., 2021).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که منابع مختلف آهن و سطوح گلوپاتیون، به‌ویژه در ترکیب با یکدیگر، تأثیر معنی‌داری بر بهبود

References

1. Abadía, J., & Grusak, M.A. (2013). Iron deficiency in plants: An insight from proteomic approaches. *Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00254>
2. Abd-Alla, M.H., Nafady, N.A., Bashandy, S.R., & Hassan, A.A. (2019). Mitigation of salt-stress effects on nodulation, nitrogen fixation and growth of chickpea (*Cicer arietinum* L.) by triple microbial inoculation. *Rhizosphere*, 10(12), 100–148. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2019.100148>
3. Aliaga, M.E., Carrasco-Pozo, C., López-Alarcón, C., Olea-Azar, C., & Speisky, H. (2011). Superoxide-dependent reduction of Fe³⁺ and release of Fe²⁺ from ferritin by the physiologically occurring Cu(I)-glutathione complex. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 19(1), 534–541. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2010.10.064>
4. Alizadeh, A. (2006). *The relationship between water, soil and plant* (6th ed.). Imam Reza University Press. (In Persian)
5. Bremner, J.M., & Mulvaney, C.S. (1982). Total nitrogen. In A. L. Page (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 2 – Chemical and microbiological properties* (2nd ed., pp. 595–624). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c31>
6. Briat, J.-F., Dubos, C., & Gaymard, F. (2015). Iron nutrition, biomass production and plant product quality. *Trends in Plant Science*, 20(1), 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.07.005>

7. Chen, W.-W., Yang, J.-L., Qin, C., Jin, C.-W., Mo, J.-H., Ye, T., & Zheng, S.-J. (2010). Nitric oxide acts downstream of auxin to trigger root ferric-chelate reductase activity in response to iron deficiency in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiology*, 154(2), 810–819. <https://doi.org/10.1104/pp.110.161109>
8. De Souza-Torres, A., Govea-Alcaide, E., Masunaga, S.H., Fajardo-Rosabal, L., Effenberger, F., Rossi, L.M., & Jardim, R.F. (2019). Impact of Fe₃O₄ nanoparticles on nutrient accumulation in common bean plants grown in soil. *SN Applied Sciences*, 1(3), Article 321. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0321-y>
9. De Souza-Torres, A., Govea-Alcaide, E., Gómez-Padilla, E., Masunaga, S.H., Effenberger, F.B., Rossi, L.M., & Jardim, R.F. (2021). Fe₃O₄ nanoparticles and *Rhizobium* inoculation enhance nodulation, nitrogen fixation and growth of common bean grown in soil. *Rhizosphere*, 17, 100275. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100275>
10. Fuentes, M., Bosch, G., Hita, D., Olaetxea, M., Erro, J., Zamarreño, Á.M., & García-Mina, J.M. (2023). Supramolecular arrangement of lignosulfonate-based iron complexes and consequences for Ca²⁺ interaction at alkaline pH and Fe uptake. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(30), 11404–11417. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c03474>
11. Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1986). Particle-size analysis. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 1 – Physical and mineralogical methods* (2nd ed., pp. 383–411). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>
12. Gheshlaghi, Z., Khorassani, R., & Abadía, J. (2022). Two Fe mining by-products and three thiol compounds alleviate Fe deficiency in soybean grown in calcareous soil under greenhouse conditions. *Plant and Soil*, 479, 1–22. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1656181/v1>
13. Gheshlaghi, Z., Khorassani, R., Abadía, J., Kafi, M., & Fotovat, A. (2019). Glutathione foliar fertilisation prevents lime-induced iron chlorosis in *Medicago scutellata* grown in soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 182(4), 607–624. <https://doi.org/10.1002/jpln.201800692>
14. Ghorashi, L.S., Haghnia, G.H., Lakzian, A., & Khorasani, R. (2012). Effect of lime, phosphorus and organic matter on maize ability for iron uptake. *Journal of Water and Soil*, 26(4), 818–820. (In Persian with English abstract).
15. Gill, S.S., & Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48, 909–930. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
16. Helmke, P.A., & Sparks, D.L. (1996). Lithium, sodium, potassium, rubidium and cesium. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3 – Chemical methods* (pp. 551–576). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c19>
17. Iannone, M.F., Groppa, M.D., De Sousa, M.E., Van Raap, M.B.F., & Benavides, M.P. (2016). Impact of magnetite nanoparticles on wheat development: Evaluation of oxidative damage. *Environmental and Experimental Botany*, 131, 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.07.004>
18. Jiao, N., Wang, F., Ma, C., Zhang, F., & Jensen, E.S. (2021). Interspecific interactions of iron and nitrogen use in peanut–maize intercropping on calcareous soil. *European Journal of Agronomy*, 128, 126303. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126303>
19. Jungk, A., Waisel, Y., & Kafkafi, U. (2002). Dynamics of nutrient movement at the soil–root interface. In Y. Waisel, A. Eshel, & U. Kafkafi (Eds.), *Plant roots: The hidden half* (3rd ed., pp. 587–616). Marcel Dekker. <https://doi.org/10.1201/9780203909423>
20. Kobayashi, N., & Nishizawa, N.K. (2012). Iron uptake, translocation and regulation in higher plants. *Annual Review of Plant Biology*, 63, 131–152. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105522>
21. Koen, E., Szymańska, K., Klinguer, A., Dobrowolska, G., Besson-Bard, A., & Wendehenne, D. (2012). Nitric oxide and glutathione impact expression of iron-uptake and transport genes and metal content in *Arabidopsis thaliana* under iron deficiency. *Plant Signaling & Behavior*, 7(10), 1246–1250. <https://doi.org/10.4161/psb.21548>
22. Kokina, I., Plaksenkova, I., Jermałonoka, M., & Petrova, A. (2020). Impact of iron oxide nanoparticles on yellow medick (*Medicago falcata* L.) plants. *Journal of Plant Interactions*, 15(1), 1–7. <https://doi.org/10.1080/17429145.2019.1708489>
23. Kong, J., Dong, Y., Xu, L., Liu, S., & Bai, X. (2014). Foliar application of salicylic acid and nitric oxide alleviates iron-deficiency-induced chlorosis in peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Botanical Studies*, 55, 9. <https://doi.org/10.1186/1999-3110-55-9>
24. Kong, J., Dong, Y., Zhang, X., Wang, Q., Xu, L., Liu, S., & Fan, Z. (2015). Exogenous salicylic acid affects physiological characteristics of peanut seedlings under iron-deficiency stress. *Journal of Plant Nutrition*, 38(1), 127–144. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.920391>
25. Loeppert, R.H., & Suarez, D.L. (1996). Carbonate and gypsum. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3 – Chemical methods* (pp. 437–474). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c15>

26. 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, 421–428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
27. Lindsay, W.L., & Schwab, A.P. (1982). The chemistry of iron in soils and its availability to plants. *Journal of Plant Nutrition*, 5(4–7), 821–840. <https://doi.org/10.1080/01904168209363012>
28. Lucena, J.J., & Chaney, R.L. (2006). Synthetic iron chelates as substrates of root ferric-chelate reductase in iron-stressed cucumber plants. *Journal of Plant Nutrition*, 29(3), 423–439. <https://doi.org/10.1080/01904160500524886>
29. Malakouti, M.J. (1995). *Sustainable agriculture and yield increase through balanced fertilization*. Karaj Agricultural Education Publishing. (In Persian with English abstract)
30. Malakouti, M.J., & Homaei, M. (1989). *Soil fertility of arid and semiarid regions: Difficulties and solutions*. Tarbiat Modares University Press. (In Persian with English abstract)
31. Malakouti, M.J., & Tehrani, M.M. (1991). Effects of micronutrients on yield and quality of agricultural products. In *Proceedings of the Workshop on Micronutrients* (pp. 342–360). Tarbiat Modares University. (In Persian with English abstract)
32. Marschner, H. (1995). *Mineral nutrition of higher plants* (2nd ed.). Academic Press.
33. Mohammadipour, R., Sedaghat-Hoor, S., & Mahboub-Khomami, A. (2013). Effect of soil and foliar iron fertilization on growth of *Spathiphyllum illusion*. *European Journal of Experimental Biology*, 3(6), 232–240. (In Persian with English abstract)
34. Olsen, S.R., & Sommers, L.E. (1982). Phosphorus. In A. L. Page (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 2 – Chemical and microbiological properties* (2nd ed., pp. 403–427). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c24>
35. Panjtandoust, M., Sorooshzadeh, A., & Ghanati, F. (2010). Effect of soil and foliar iron application on qualitative characteristics of peanut (*Arachis hypogaea* L.) in calcareous soil. Department of Agronomy, Tarbiat Modares University. (In Persian with English abstract)
36. Plaksenkova, I., Jermaļonoka, M., Bankovska, L., Gavarane, I., Gerbreders, V., Sledevskis, E., & Kokina, I. (2019). Effects of Fe₃O₄ nanoparticle stress on growth and development of rocket (*Eruca sativa*). *Journal of Nanomaterials*, 2019, 2678247. <https://doi.org/10.1155/2019/2678247>
37. Rachaputi, R., Yashvir, S.C., & Wilson, G.C. (2021). Crop physiology case histories for major crops (Chap. 11, pp. 360–382). In V. O. Sadras & D. Calderini (Eds.), *Crop physiology* (2nd ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819194-1.00011-6>
38. Ramirez, L., Bartoli, C.G., & Lamattina, L. (2013). Glutathione and ascorbic acid protect *Arabidopsis thaliana* against detrimental effects of iron deficiency. *Journal of Experimental Botany*, 64(11), 3169–3178. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert153>
39. Rhoades, J.D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3 – Chemical methods* (pp. 417–435). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c14>
40. Rombolà, A.D., Pinton, R., & Zocchi, G. (2019). Glutathione foliar fertilisation prevents lime-induced iron chlorosis in kiwifruit (*Actinidia deliciosa*). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 182(2), 271–277. <https://doi.org/10.1002/jpln.201800692>
41. Roosta, H.R., & Mohsenian, Y. (2012). Effects of foliar spray of different Fe sources on pepper (*Capsicum annuum* L.) plants in an aquaponic system. *Scientia Horticulturae*, 146, 182–191. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.08.018>
42. Rouhier, N., Couturier, J., Johnson, M.K., & Jacquot, J.-P. (2010). Glutaredoxins: Roles in iron homeostasis. *Trends in Biochemical Sciences*, 35(1), 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.tibs.2009.08.005>
43. Rui, M., Ma, C., Hao, Y., Guo, J., Rui, Y., Tang, X., & Zhu, S. (2016). Iron oxide nanoparticles as a potential iron fertilizer for peanut (*Arachis hypogaea*). *Frontiers in Plant Science*, 7, 815. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00815>
44. Shanmugam, V., Wang, Y.-W., Tsednee, M., Karunakaran, K., & Yeh, K.-C. (2015). Glutathione plays an essential role in nitric-oxide-mediated iron-deficiency signalling and tolerance in *Arabidopsis thaliana*. *The Plant Journal*, 84(3), 464–477. <https://doi.org/10.1111/tpj.13011>
45. Song, Y., Dong, Y., Tian, X., Bai, X., & He, Z. (2016). An exogenous source of nitric oxide modulates iron nutritional status in peanut seedlings (*Arachis hypogaea* L.). *Journal of Plant Growth Regulation*, 35(3), 730–743. <https://doi.org/10.1007/s00344-016-9578-1>

46. Song, Y., Dong, Y., Tian, X., Wang, W., & He, Z. (2017). Mechanisms of exogenous nitric oxide and 24-epibrassinolide in alleviating iron deficiency stress of peanut seedlings. *Pedosphere*, 27(5), 987–997. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60446-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60446-6)
47. Thomas, G.W. (1996). Soil pH and soil acidity. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3 – Chemical methods* (pp. 475–490). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>
48. Tsutsumi, R., Yamashita, T., Muraoka, M., Hirata, K., & Nagano, K. (2024). γ -Glutamylcysteine, a glutathione precursor, exhibits higher thiol reactivity for complex formation with iron(III) ions than glutathione. *BPB Reports*, 7(6), 218–222. https://doi.org/10.1248/bpbreports.7.6_218
49. 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>
50. Yang, X., Alidoust, D., & Wang, C. (2020). Effects of iron oxide nanoparticles on mineral composition and growth of soybean (*Glycine max* L.). *Acta Physiologiae Plantarum*, 42, 128. <https://doi.org/10.1007/s11738-020-03104-1>
51. Zhang, X., Dong, Y., Kong, J., Liu, Z., & Wang, Q. (2014). Effects of nitric oxide on alleviation of iron-deficiency stress in peanut. *Journal of Plant Nutrition*, 37(13), 2108–2127. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.920371>
52. Zuchi, S., Watanabe, M., Bromke, M., Osorio, S., & Astolfi, S. (2015). The interplay between sulfur and iron nutrition in tomato. *Plant Physiology and Biochemistry*, 93, 62–71. <https://doi.org/10.1104/pp.15.00995>
53. Zuo, Y., Ren, L., Zhang, F., & Jiang, R.F. (2007). Bicarbonate concentration as affected by soil water content controls iron nutrition of peanut in calcareous soil. *Plant Physiology and Biochemistry*, 45(5), 357–364. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2007.03.017>

Modeling Soil Available Water Using Neuro-fuzzy, Gene Expression Programming and Random Forest Methods

M. Hasanpour Kashani^{1*}, Sh. Asghari²

1- Department of Water Engineering, Water Management Research Center, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

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

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

Received: 25 February 2025
Revised: 09 April 2025
Accepted: 14 May 2025
Available Online: 14 May 2025

How to cite this article:

Hasanpour Kashani, M., & Asghari, Sh. (2025). Modeling soil available water using neuro-fuzzy, gene expression programming and random forest methods. *Journal of Water and Soil*, 39(2), 139-154. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92342.1470>

Introduction

Soil available water (SAW) is defined as the difference between field capacity (FC) and permanent wilting point (PWP). FC is the amount of soil water content held by the soil after the gravitational water was drained from the soil. PWP is defined as a minimum water content of a soil which is needed for the crop survival and if the water content decreases lower than PWP, a plant wilts and can no longer recover itself. The direct measurement of FC and PWP soil water contents is very costly and time consuming; therefore, it is useful the use of different intelligent models such as neuro-fuzzy (NF), gene expression programming (GEP) and random forest (RF) to estimate FC, PWP and SAW through easily accessible and low-cost soil characteristics. The objectives of this research were: (1) to obtain NF, GEP and RF models for estimating SAW from the easily accessible soil variables in the cultivated lands of Ardabil plain, and (2) to compare the accuracy of the mentioned models in estimating SAW using the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), mean error (ME) and Nash-Sutcliffe coefficient (NS) criteria.

Materials and Methods

The measured data from 102 soil samples taken from 0-10 cm soil depth of the cultivated lands of Ardabil plain, northwest of Iran, were used in this study. Sand, clay, mean geometric diameter (d_g) and geometric standard deviation (σ_g) of soil particles, bulk density (BD) and organic carbon (OC) were introduced as input variables to the applied three intelligent models for estimating soil available water (SAW). Data randomly were divided in two series as 82 data for training and 20 data for testing of models. In all models, six different input variables combinations were used; SPSS 22 software with stepwise method was applied to select the input variables. MATLAB, Gene Xpro Tools 4.0 and Weka softwares were used to derive neuro-fuzzy (NF), gene expression programming (GEP) and random forest (RF) models, respectively. One of the important steps by using NF method is selecting the appropriate membership functions (MFs) and its numbers. Based on a trial and error procedure, 3 numbers of MFs and 50 to 100 optimum replications were found for the NF modeling. Also, the input MFs were chosen as “triangular”, “trapezoid”, “generalized bell” and “pi” and the output MF was selected as “constant”. A set of optimal parameters were chosen before developing a best GEP model. The number of chromosomes and genes, head size and linking function were selected by the trial and error method, and they are 30, 3, 8, and +,



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

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92342.1470>

respectively. The rates of genetic operators were chosen according to literature studies. Various tree numbers were analyzed for choosing the best random forest (RF) method. Increasing the tree numbers beyond 100 made lower variations in the average squared error values for the SAW estimation cases. The accuracy of NF, GEP and RF models in estimating SAW was evaluated by coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), mean error (ME) and Nash-Sutcliffe coefficient (NS) statistics.

Results and Discussion

The studied soils were loam ($n=53$), clay loam ($n=26$), sandy loam ($n=15$), silt loam ($n=6$) and clay ($n=2$) textural classes. The values of sand (24.40 to 68.00 %), clay (3.80 to 42.90 %), dg (0.02 to 0.26 mm), σ_g (7.48 to 19.41), BD (1.04 to 1.70 g cm⁻³), OC (0.31 to 1.52 %) and SAW (5.10 to 25.10 % g g⁻¹) indicated good variations in the soils of studied region. Significant correlations were found between SAW and BD ($r = -0.59$), clay ($r = 0.56^{**}$), OC ($r = 0.45^{**}$), and sand ($r = -0.44^{**}$). NF, GEP and RF models were applied to estimate SAW using six different combinations of input soil variables (sand, clay, dg, σ_g , BD and OC). The results of the best NF, GEP and RF models indicated that the most appropriate input variables to predict SAW were OC and BD. The values of R^2 , RMSE, ME and NS criteria were obtained equal 0.73, 2.51 % g g⁻¹, 0.09 % g g⁻¹ and 0.71, and 0.76, 3.10 % g g⁻¹, -1.41 % g g⁻¹ and 0.56, 0.68, 3.30 % g g⁻¹, -1.45 % g g⁻¹, 0.50 for the best NF, GEP and RF models in the testing data set, respectively. Numerous investigations also showed that there is significant negative correlation between SAW with BD and sand and positive correlation between SAW with OC and clay.

Conclusion

The results from the three investigated intelligent models indicated that organic carbon (OC) and bulk density (BD) were the most important and readily available soil variables for predicting soil available water (SAW) in the study area. Among the models, the Neuro-Fuzzy (NF) approach demonstrated the highest accuracy, as evidenced by the lowest root mean square error (RMSE) and the highest Nash-Sutcliffe efficiency (NS) values. In contrast, the Random Forest (RF) model provided the least accurate estimates of SAW, performing worse than both the NF and Gene Expression Programming (GEP) models.

Keywords: Intelligent models, Prediction, Readily variables, Soil water

مدل‌سازی آب قابل استفاده خاک با استفاده از روش‌های نروفازی، برنامه‌ریزی بیان ژن و جنگل تصادفی

مهسا حسیور کاشانی، ^۱id* - شکر اله اصغری ^۲id

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۴

چکیدہ

آب قابل استفاده خاک (SAW) از تفاضل دو نقطه مهم و کاربردی منحنی رطوبتی خاک (رطوبت‌های ظرفیت مزرعه‌ای و پرمردگی دائم) به‌دست می‌آید؛ روش مستقیم اندازه‌گیری این نقاط رطوبتی خاک مستلزم صرف وقت و هزینه زیادی می‌باشد. بنابراین اخیراً از روش‌های غیر مستقیم مانند توابع انتقالی رگرسیونی و مدل‌های هوشمند برای تخمین این متغیرهای دیرپافت خاک استفاده گردیده است. هدف از این پژوهش، مقایسه عملکرد سه مدل هوشمند نروفازی (NF)، برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و جنگل تصادفی (RF) در برآورد SAW از روی ویژگی‌های زودپافت خاک بود. در این تحقیق، داده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به تعداد ۱۰۲ نمونه خاک سطحی دشت اردبیل شامل مقادیر ذرات شن، سیلت، رس، میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات، جرم مخصوص ظاهری، کربن آلی و SAW مورد استفاده قرار گرفت. داده‌ها به‌طور تصادفی به دو گروه آموزشی (۸۲ نمونه) و آزمونی (۲۰ نمونه) تقسیم شدند. شش تابع SAW با ترکیب متفاوت از متغیرهای زودپافت خاک به‌عنوان ورودی مدل انتخاب و مدل‌های NF، GEP و RF برای هر کدام اجرا گردید. نتایج مدل‌ها بیانگر آن بود که کربن آلی و جرم مخصوص ظاهری خاک، دو متغیر ورودی مهم و اثرگذار در برآورد SAW بودند. مقادیر آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا (ME) و ضریب نش-ساکلیف (NS) براساس داده‌های آزمونی برابر 0.73 ، 1 g g^{-1} ، 2.51 g g^{-1} و 0.09 و 0.76 ، 0.71 و 0.176 ، 3.10 g g^{-1} ، 1.41 g g^{-1} و 0.56 ، 0.68 ، 3.30 g g^{-1} و 1.45 و 0.50 به‌ترتیب برای بهترین مدل NF، GEP و RF تعیین شد. مقایسه نتایج آماره‌های ارزیابی مدل‌ها نشان داد که مدل NF به علت داشتن مقدار کم RMSE، مقدار نزدیک به صفر ME و مقدار زیاد NS نسبت به دو مدل دیگر از خطای پایین و دقت بالا در برآورد SAW برخوردار بود.

واژه‌های کلیدی: آب خاک، برآورد، متغیر زود یافت، مدل‌های هوشمند

(2017; Cheema, Shah, Farooque, *et al.*, 2024

مقدمه

آب قابل استفاده خاک (SAW) از اختلاف رطوبت‌های ظرفیت زراعی^۴ (FC) و نقطه پژمردگی دائم^۵ (PWP) به‌دست می‌آید. رطوبت FC عبارت از مقدار آبی است که پس از خروج آب ثقیلی در خاک نگهداری می‌شود. رطوبت PWP عبارت از مقدار آبی است که در مقادیر

اطلاع از وضعیت آب قابل استفاده خاک^۳(SAW) از نظر برنامه ریزی آبیاری، زهکشی و احیای اراضی، تجزیه و تحلیل فعالیت زیستی خاک، شبیه‌سازی رواناب سطحی، نیاز آشیویی و شبیه‌سازی رشد گیاه حائز اهمیت فراوان است (Shiri, Keshavarzi, Kisi, & Karimi,

۱- گروه مهندسی آب، پژوهشکده مدیریت آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
*نویسنده مسئول؛ (Email: m.hkashani@uma.ac.ir)

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

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92342.1470>

3- Soil available water

4- Field capacity

5- Permanent wilting point

با مدل شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه و مدل GEP از دقت زیاد و خطای کم در برآورد منحنی رطوبتی خاک در ۱۰۸ نمونه خاک جنگلی منتخب از فنلاند برخوردار بودند. شجاعی و همکاران (Shojaei et al., 2023) در خاک‌های منتخب از منطقه روانسر کرمانشاه گزارش کردند مدل کیوبیست و مدل ANN در مقایسه با مدل‌های MLR، RF و SVM دارای دقت بیشتر و خطای کمتر در تخمین FC و PWP بودند. چیمبا و همکاران (Cheema et al., 2024) از مدل GEP برای برآورد منحنی رطوبتی در خاک‌های منتخب از کانادا با سه نوع کلاس بافت شن لومی، لوم و لوم شنی استفاده کردند. برای این منظور، داده‌های شن، سیلت، رس، جرم مخصوص ظاهری، کربن آلی و مکش خاک به عنوان متغیرهای ورودی مدل در نظر گرفته شد؛ نتایج نشان داد مدل GEP توانست منحنی رطوبتی خاک را در محدوده خشک (۲۰ درصد حجمی) تا اشباع (۷۰ درصد حجمی) با دقت بالا و خطای پایین تخمین بزند. کیانی و بیات (Kiani & Bayat, 2024) گزارش نمودند که مدل RF در مقایسه با مدل MLR توانست باعث افزایش صحت تخمین منحنی رطوبتی خاک به میزان ۲۲ تا ۴۶ درصد در ۱۲۰ نمونه خاک منتخب از استان‌های تهران و همدان گردد.

بررسی منابع انجام گرفته در این پژوهش نشان داد اگرچه توابع انتقالی رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی برای برآورد FC، PWP و SAW در خاک‌های دشت اردبیل توسط امیرعابدی و همکاران (Amirabedi et al., 2013) ارائه شده است ولی بر اساس اطلاعات موجود، کارایی سایر مدل‌های هوشمند مانند نروفازی، برنامه‌ریزی بیان ژن و جنگل تصادفی در برآورد SAW در خاک‌های استان اردبیل تاکنون بررسی نشده است. از سوی دیگر، توابع انتقالی خاک روابط تجربی هستند و استفاده از مدل‌های هوشمند توسعه‌یافته توسط سایر محققان برای برآورد ضرایب رطوبتی خاک (FC، PWP و SAW) در خاک‌های دشت اردبیل با توجه به مواد مادری و منطقه اقلیمی متفاوت این خاک‌ها، نیاز به راستی‌آزمایی دارد. بنابراین، هدف اصلی پژوهش حاضر عبارت بود از: ارائه مدل‌های NF، GEP و RF برای برآورد SAW از روی متغیرهای زودیافت در خاک‌های دشت اردبیل و نیز مقایسه دقت مدل‌های مذکور در برآورد SAW با استفاده از معیارهای ضریب تبیین (R^2)، مجذور میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، میانگین خطا (ME)^{۱۱} و ضریب نش-ساتکلiffe^{۱۲} (NS).

کمتر از آن رشد گیاه متوقف می‌شود (Jury & Horton, 2004). اندازه‌گیری مستقیم FC، PWP و SAW کاری بسیار پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد بنابراین تلاش‌های زیادی انجام شده است تا این نقاط مهم و پرکاربرد منحنی رطوبتی خاک به جای اندازه‌گیری مستقیم، از روی ویژگی‌های زودیافت و کم‌هزینه خاک مانند شن، سیلت، رس، میانگین (d_g) و انحراف استاندارد (σ_g) هندسی قطر ذرات، جرم مخصوص ظاهری و کربن آلی تخمین زده شود (مانند، Amirabedi, Asghari, Mesri, & Keivan behjo, 2013; Shiri et al., 2017; Jafari, Ojaghlou, & Karbasi, 2021; Shojaei, Farhadi, Bansouleh, Fatehi, & Rahmani, 2023).

تاکنون توابع انتقالی متعددی مبتنی بر مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه^۱ (MLR) و رگرسیون غیر خطی چندگانه^۲ (MNLR) و نیز مدل‌های هوشمند مانند شبکه عصبی مصنوعی^۳ (ANN)، نروفازی^۴ (NF)، برنامه‌ریزی بیان ژن^۵ (GEP) و جنگل تصادفی^۶ (RF) برای برآورد نقاط رطوبتی مهم خاک (FC، PWP و SAW) از طریق ویژگی‌های سهل‌الوصول و کم‌هزینه خاک توسعه یافته‌اند. مردون و همکاران (Merdun, Cinar, Meral, & Apan, 2006) از مدل‌های MLR و ANN برای برآورد FC و PWP در ۱۹۵ نمونه خاک استفاده کرده و دریافتند که جرم مخصوص ظاهری و d_g از متغیرهای ورودی مهم و اثرگذار بودند. امیرعابدی و همکاران (Amirabedi et al., 2013) دقت مدل‌های MLR و ANN را در برآورد FC، PWP و SAW در ۱۰۲ نمونه خاک منتخب از دشت اردبیل مقایسه و بررسی نمودند؛ نتایج بیانگر دقت بالا و خطای پایین مدل ANN در برآورد هر سه ضریب رطوبتی مذکور بود. استواری و همکاران (Ostovari, Asgari, & Cornelis, 2015) با به‌کارگیری مدل‌های MLR در ۲۵۵ نمونه خاک دریافتند رس و d_g از متغیرهای ورودی مهم در تخمین FC و PWP بودند. شیر و همکاران (Shiri et al., 2017) نتایج مدل‌های MLR، NF، GEP، RF، ماشین بردار پشتیبان^۷ (SVM)، اسپلین رگرسیون تطبیقی چند متغیره^۸ (MARS) و مدل درختی^۹ (MT) را در برآورد FC و PWP از روی متغیرهای ورودی خاک شامل رس، سیلت، جرم مخصوص ظاهری و d_g در ۱۹۲ نمونه خاک منتخب از اراضی مرتعی و زراعی استان فارس بررسی کردند؛ نتایج نشان داد که مدل NF دارای بالاترین و مدل MT دارای ضعیف‌ترین صحت تخمین در بین مدل‌های مورد مطالعه بود. نتایج پژوهش جعفری و همکاران (Jafari et al., 2021) بیانگر آن بود که مدل شبکه‌های عصبی آبشاری در مقایسه

7- Support vector machine
8- Multivariate adaptive regression spline
9- Model tree
10- Root mean square error
11- Mean error
12- Nash-Sutcliffe coefficient

1- Multiple linear regression
2- Multiple nonlinear regression
3- Artificial neural network
4- Neuro-fuzzy
5- Gene expression programming
6- Random forest

مواد و روش ها

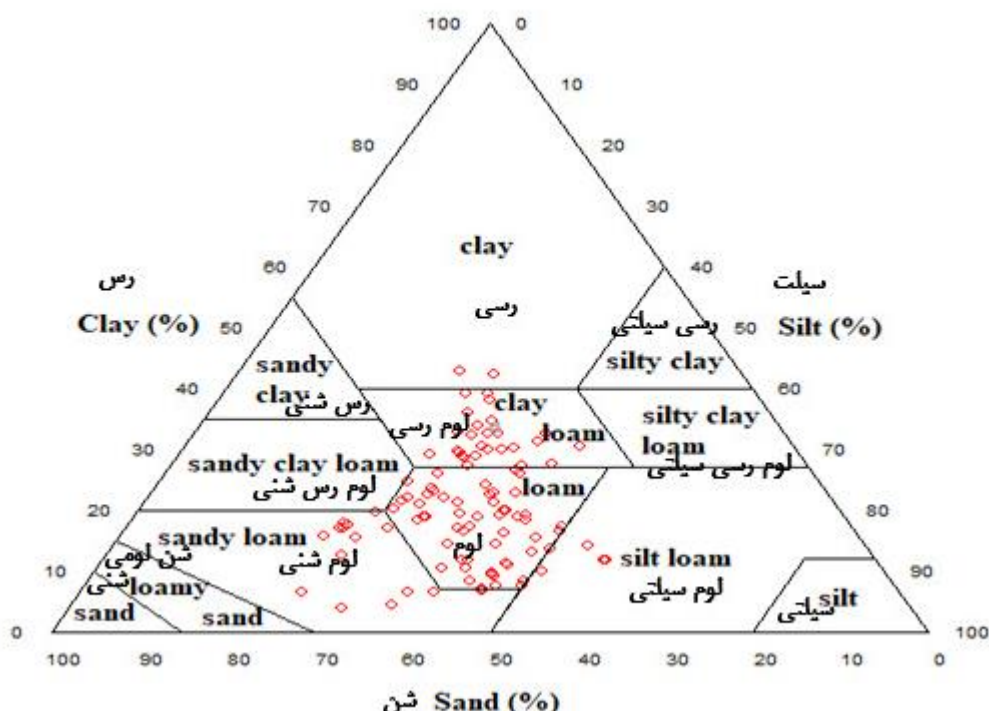
در این پژوهش، از داده های اندازه گیری شده توزیع اندازه ذرات، جرم مخصوص ظاهری، کربن آلی، رطوبت های ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) مربوط به تعداد ۱۰۲ نمونه خاک که از افق Ap اراضی زراعی دشت اردبیل با مساحت حدود ۲۲۰۰ کیلومتر مربع برداشته شده بود، استفاده گردید (Amirabedi et al., 2013). درصد های ذرات شن، سیلت و رس به روش هیدرومتری ۴ قرائته (Gee & Or, 2002) و کلاس بافت خاک (شکل ۱) بر اساس استاندارد وزارت کشاورزی آمریکا تعیین و پارامتر های میانگین (d_g) و انحراف استاندارد (σ_g) هندسی قطر ذرات خاک با استفاده از روابط ارائه شده توسط شیرازی و بورسما (Shirazi & Boersma, 1984) محاسبه گردید. کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (Nelson & Sommers, 1982) و جرم مخصوص ظاهری (BD) در استوانه های استیل (Blake & Hartge, 1986) به قطر و ارتفاع ۵ سانتی متر اندازه گیری شد. اندازه گیری های رطوبت خاک در مکش ۰/۱ بار (معادل رطوبت FC در خاک های درشت بافت)، ۰/۲ بار (معادل رطوبت FC در خاک های متوسط بافت) و ۰/۳ بار (معادل رطوبت FC در خاک های ریزبافت) در استوانه های استیل و در مکش ۱۵ بار (معادل رطوبت PWP در همه خاک ها) در نمونه های خاک گذرانده شده از الک ۲ میلی متری با استفاده از دستگاه صفحات فشاری و پس از آون خشک کردن در دمای 105°C به روش وزنی انجام گرفت (Gardner, 1986). آب قابل استفاده خاک (SAW) از اختلاف رطوبت های FC و PWP محاسبه گردید (Bauer & Black, 1992). برخی ویژگی های نمونه های خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به شکل ۱ مشاهده می شود که خاک ها از تنوع بافتی نسبتاً مناسب (۵۳ نمونه لوم، ۲۶ نمونه لوم رسی، ۱۵ نمونه لوم شنی، ۶ نمونه لوم سیلتی و ۲ نمونه رسی) برخوردار هستند.

نرمال بودن توزیع داده ها با آزمون کولموگروف - اسمیرنوف بررسی گردید؛ آزمون نرمال بودن نشان داد داده های همه متغیر های مورد مطالعه از توزیع نرمال برخوردار هستند. محاسبات مربوط به آمار توصیفی و ضریب همبستگی پیرسون (جدول ۲) بین متغیر ها و نیز اشتقاق توابع رگرسیونی خطی چندگانه (MLR) بین متغیر های زود یافت خاک با متغیر دیر یافت (SAW) به روش گام به گام^۱ در نرم افزار SPSS 22 انجام شد. بر اساس روش گام به گام، شش مدل رگرسیونی (جدول ۳) با ترکیب های متفاوتی از متغیر های زود یافت ورودی شامل شن، سیلت، رس، جرم مخصوص ظاهری، کربن آلی، d_g و σ_g برای برآورد متغیر دیر یافت (SAW) ایجاد گردید (Amirabedi et al., 2013). به منظور بررسی و مقایسه دقیق نتایج پژوهش حاضر، در فرآیند مدل

سازی SAW به سه روش هوشمند نروفازی (NF)، برنامه ریزی بیان ژن (GEP) و جنگل تصادفی (RF)، از همان ترکیب های متفاوت متغیر های ورودی در مدل های رگرسیونی ارائه شده توسط امیرعابدی و همکاران (Amirabedi et al., 2013) استفاده شد.

روش نروفازی (NF) ترکیبی از شبکه عصبی تطبیقی و سیستم استنتاج فازی می باشد که بر اساس قوانین اگر - آنگاه پایه ریزی شده است. پارامتر های سیستم فازی با به کارگیری الگوریتم های آموزشی شبکه عصبی، تشخیص داده می شوند (Shiri et al., 2017). در این پژوهش، مدل های نروفازی (NF) برای برآورد آب قابل استفاده خاک (SAW) با استفاده از نرم افزار MATLAB ایجاد شدند. بهترین ساختار مدل های نروفازی به روش سعی و خطا و با به کارگیری توابع عضویت و تکرار های مختلف برای هر کدام از مدل ها تعیین گردید (Ghorbani, 2019). به این ترتیب که توابع عضویت مثلثی (trimf)، دوزنقه ای (trapmf)، زنگوله ای (gbellmf) و پی شکل (pimf) به عنوان بهترین توابع عضویت لایه ورودی و تابع عضویت ثابت (Constant) به عنوان بهترین تابع عضویت لایه خروجی انتخاب شدند. همچنین، تعداد تابع عضویت ۳ و تعداد تکرار بهینه بین ۵۰ تا ۱۰۰ برای اجرای شش مدل NF به کار رفته در روش نروفازی تعیین گردید.

مدل برنامه ریزی بیان ژن (GEP) یک الگوریتم توسعه یافته بر اساس برنامه ریزی ژنتیک و الگوریتم ژنتیک می باشد و مبنای تمامی آنها بر اساس نظریه تکامل داروین استوار است که در آن کروموزوم های خطی و ساده با طول ثابت مشابه در الگوریتم ژنتیک استفاده می شود و ساختار های شاخه ای با اندازه ها و اشکال متفاوت مشابه با برنامه ریزی ژنتیک ترکیب می شوند. جزئیات بیشتر درباره فرآیند اجرای مدل GEP را می توان در مقاله زانگ و زانگ (Zhang & Zhang, 2024) پیدا نمود. در این پژوهش برای مدل سازی آب قابل استفاده خاک (SAW) بر اساس برنامه ریزی بیان ژن (GEP) از نرم افزار Gene Xpro Tools 4.0 استفاده گردید (Ferreira, 2006). در روش GEP، پدیده های مختلف با استفاده از مجموعه ای از توابع و ترمینال ها، مدل سازی می شوند. از مجموعه توابع اصلی حسابی، مثلثاتی و توابع تعریف شده توسط کاربر بر اساس سعی و خطا تا حصول حداکثر ضریب تبیین (R^2) و حداقل مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) در برازش مدل استفاده می شود. عملگر های ریاضی پر کاربرد در فرآیند اجرای مدل شامل چهار عمل اصلی (+، -، × و /)، جذر، لگاریتم نپری، لگاریتم طبیعی، توان ۲ و ۳ و ریشه سوم هستند. خلاصه پارامتر های لازم برای اجرای مدل GEP در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۱- توزیع کلاس بافت در خاک‌های مورد مطالعه
Figure 1- Distribution of textural class in the studied soils

جدول ۱- آماره‌های توصیفی متغیرهای خاک در منطقه مورد مطالعه
Table 1- Descriptive statistics of soil variables in the studied area

متغیر Variable	آموزش Training (n= 82)				آزمون Testing (n= 20)			
	Min.	Max.	Mean	Sd.	Min.	Max.	Mean	Sd.
BD (g cm ⁻³)	1.04	1.70	1.35	0.15	1.15	1.60	1.39	0.15
Sand (%)	24.40	68.00	41.45	8.31	28.30	65.00	44.40	10.96
Silt (%)	24.40	57.60	37.93	7.75	23.30	49.90	36.40	8.43
Clay (%)	4.40	42.90	20.61	9.31	3.80	42.20	19.18	9.04
d _g (mm)	0.02	0.26	0.07	0.04	0.02	0.25	0.09	0.06
σ _g (-)	8.02	19.41	13.69	3.05	7.48	17.48	13.31	2.73
OC (%)	0.31	1.52	0.85	0.26	0.37	1.10	0.70	0.20
SAW (% g g ⁻¹)	5.10	20.40	13.72	3.21	5.10	25.1	14.04	4.78

BD: جرم مخصوص ظاهری (bulk density)، clay: رس، silt: سیلت، sand: شن، d_g: میانگین هندسی قطر ذرات (geometric mean diameter)، σ_g: انحراف استاندارد هندسی ذرات (geometric standard deviation)، OC: کربن آلی (organic carbon)، SAW: آب قابل استفاده خاک (soil available water)، Sd: انحراف استاندارد (Standard deviation)، Mean: میانگین، Max: حداکثر، Min: حداقل.

جدول ۲- ضریب همبستگی پیرسون (r) بین آب قابل استفاده خاک و متغیرهای ورودی مدل‌ها (n=102)
Table 2- Pearson correlation coefficient (r) between soil available water and input variables of models (n=102)

متغیر Variable	Sand	Silt	Clay	d _g	σ _g	OC	BD
SAW	-0.44*	-0.08 ^{ns}	0.56**	-0.42*	0.28*	0.45**	-0.59**

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

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

جدول ۳- مدل های رگرسیون خطی چندگانه (MLR) آب قابل استفاده خاک (Amirabedi et al., 2013)

Table 3- MLR models of soil available water (SAW) (Amirabedi et al., 2013)

شماره Number	مدل Model
1	SAW = 5.03 OC - 9.97 BD + 21.01
2	SAW = 5.35 OC - 6.97 BD + 21.01 + 0.09 Clay + 14.85
3	SAW = - 0.12 Sand + 5.55 OC + 11.99
4	SAW = - 0.08 Sand - 10.22 BD + 28.91
5	SAW = - 7.32 BD + 5.08 OC - 36.87 dg + 18.68
6	SAW = - 7.19 BD + 5.73 OC + 0.28 σ_g + 12.83

توصیف متغیرها در زیر جدول آورده شده است

The description of the variables is available in Table 1.

جدول ۴- مقادیر پارامترهای مدل برنامه ریزی بیان ژن (GEP)

Table 4- The values of GEP model parameters

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

برآورد می باشد. از لحاظ آماری کمترین مقدار RMSE، صفر می باشد که در آن وضعیت، مقادیر اندازه گیری و برآورد شده SAW باهم برابر هستند؛ هر چه مقدار RMSE کوچکتر باشد برآوردهای انجام شده توسط مدل برآورد کننده دقیق تر است. مقادیر مثبت ME بیش برآوردی و مقادیر منفی آن کم برآوردی مدل را نشان می دهد. اگر ضریب NS برابر یک باشد بیانگر آن است که مدل سازی با دقت بالایی انجام گرفته و مقادیر اندازه گیری و برآورد شده SAW در تطابق کامل هستند. مقدار برابر با صفر NS نشان دهنده آن است که برآوردهای مدل، دقتی برابر با دقت میانگین داده های اندازه گیری شده دارند.

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

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

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

در معادله های ۱، ۲ و ۳، $Y_{i(p)}$ ، $Y_{i(m)}$ و $\bar{Y}_m$ به ترتیب مقادیر اندازه گیری، برآورد شده و میانگین مقادیر اندازه گیری شده SAW توسط مدل و n تعداد داده ها برای SAW در هر مدل می باشد. از میان مدل های ایجاد شده برای برآورد SAW، مناسب ترین مدل NF، GEP و RF با ترکیب متغیرهای ورودی در داده های آموزشی براساس محک

مدل جنگل تصادفی (RF) اولین بار توسط بریمن (Breiman, 2001) ارائه شد. جنگل تصادفی یک الگوریتم یادگیری گروهی می باشد که مسائل رگرسیونی با ابعاد بزرگ را مدیریت می کند؛ این مدل یک روش گروهی بر پایه درختی است که در آن همه درختان به مجموعه ای از متغیرهای تصادفی وابسته هستند و جنگل از درختان رگرسیونی زیاد واقع در کنار یکدیگر رشد می یابد (Shiri et al., 2017). در مدل RF برای هر درخت یک زیر مجموعه ای از متغیرهای ورودی اعمال می شود. تعداد ورودی ها در هر درخت و نیز تعداد درختان بهینه، به روش سعی و خطا تعیین می گردد. در این پژوهش برای اجرای مدل RF از نرم افزار Weka استفاده شد؛ بهترین اجرای مدل RF برای برآورد آب قابل استفاده خاک (SAW)، با ۲ متغیر کمکی موجود در زیر مجموعه تصادفی هر گره (mtree= 2) و تعداد ۱۰۰ درخت به دست آمد.

در همه مدل های به کار رفته در تحقیق حاضر از مجموع ۱۰۲ داده برای هر متغیر، ۸۲ داده برای آموزش مدل و ۲۰ داده برای آزمون مدل به طور تصادفی انتخاب گردید. دامنه تغییرات داده های سری آموزش و سری آزمون در جدول ۱ بیانگر آن است که متغیرهای استفاده شده در پژوهش حاضر از پراکنش خوبی برخوردار هستند همچنین میانگین متغیرها در سری آموزش و سری آزمون تقریباً نزدیک هم می باشد. برای ارزیابی دقت و کارایی مدل های NF، GEP و RF در برآورد SAW، از آماره های R^2 ، RMSE، ME و NS (Ghorbani et al., 2019) استفاده شد. مقادیر بالای R^2 (نزدیک به ۱) بیانگر دقت بالایی

های آماری مذکور تعیین گردید. آزمون مدل‌ها در تشخیص دقت مدل به ازای داده‌هایی که در آموزش مدل استفاده نشده‌اند به کار می‌رود.

نتایج و بحث

نتایج مدل‌های نروفازی (NF) برای برآورد آب قابل استفاده خاک (SAW)

برای برآورد آب قابل استفاده خاک (SAW)، شش مدل نروفازی (NF) براساس متغیرهای ورودی استفاده شده در توابع رگرسیونی (جدول ۳) ایجاد گردید. در جدول ۵ مقادیر معیارهای ضریب تبیین (R^2)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا (ME) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) برای ارزیابی مدل‌های NF از نظر دقت برآورد SAW ارائه شده است. ممکن است به کارگیری R^2 به تنهایی برای سنجش اعتبار مدل‌ها گول‌زننده باشد و الزاماً R^2 نزدیک به یک شاید بیانگر برازش دقیق مقادیر برآورد و اندازه‌گیری شده یک متغیر دیرپافت نباشد؛ به عبارت دیگر، بالا بودن R^2 همیشه نشان‌دهنده پایین بودن خطا نیست (Kozak, Pachepsky, Sokolowski, 1996; Sokolowska, & Stepniewski, 1996). لذا در این پژوهش، رتبه-بندی هر سه مدل هوشمند مورد استفاده (NF، GEP و RF) از نظر دقت برآورد SAW، بر اساس پایین بودن RMSE و بالا بودن NS در داده‌های آزمون انجام شد. واسیم و همکاران (Waseem, Mani, Andiego, & Usman, 2017) درجه‌بندی زیر را برای آماره نش-ساتکلیف (NS) از نظر ارزیابی عملکرد برآورد مدل ارائه نمودند: مقدار NS بین ۱ و ۰/۷۵ (بسیار خوب)، مقدار NS بین ۰/۷۵ و ۰/۶۵ (خوب)، مقدار NS بین ۰/۶۵ و ۰/۵۰ (قابل قبول) و مقدار NS کوچکتر ۰/۵۰ (نامطلوب). بر مبنای پایین بودن آماره RMSE و بالا بودن آماره NS در سری آزمون، مشاهده گردید مدل NF شماره ۲ (جدول ۵) با سه متغیر ورودی کربن آلی، جرم مخصوص ظاهری و رس از نظر برآورد SAW دارای دقت بالاتری در مقایسه با سایر مدل‌های NF بود. مقادیر R^2 ، RMSE، ME و NS این مدل برای داده‌های آموزشی به ترتیب برابر ۰/۶۶، ۱/۸۷ % $g\ g^{-1}$ و ۰/۰۰ و برای داده‌های آزمون برابر ۰/۷۳، ۲/۵۱ % $g\ g^{-1}$ و ۰/۰۹ و ۰/۷۱ محاسبه گردید (جدول ۵). مقدار جزئی مثبت ME برای داده‌های آزمون بیانگر برآورد اندکی بیش از مقدار واقعی SAW توسط مدل شماره ۲ می‌باشد و براساس آماره NS، عملکرد این مدل خوب ($NS = 0.71$) ارزیابی می‌شود. همچنین معادله رگرسیونی این مدل (جدول ۳) نشان می‌دهد که کربن آلی و رس با علامت مثبت و جرم مخصوص ظاهری با علامت منفی وارد مدل گردیدند. تأثیر مثبت متغیر کربن آلی به علت داشتن ضریب رگرسیون بالاتر در برآورد SAW به مراتب بیشتر از متغیر رس می‌باشد؛ همبستگی معنی‌دار و مثبت متغیرهای کربن آلی و رس و همبستگی معنی‌دار و منفی متغیر جرم مخصوص ظاهری با SAW

(جدول ۲)، این موضوع را تأیید می‌کند. در رتبه‌های بعدی تخمین، مدل شماره ۱ با دو متغیر ورودی کربن آلی و جرم مخصوص ظاهری ($RMSE = 2.77\ %\ g\ g^{-1}$ و $NS = 0.65$) و مدل شماره ۴ با دو متغیر ورودی جرم مخصوص ظاهری و شن ($RMSE = 2.87\ %\ g\ g^{-1}$ و $NS = 0.62$) از نظر برآورد SAW قرار دارد (جدول ۵)؛ پس در مجموع براساس آماره‌های ارزیابی شش مدل نروفازی فوق، مدل شماره ۲ برای برآورد SAW ارجح‌تر است. در پژوهش قبلی امیرعابدی و همکاران (Amirabedi et al., 2013) نیز بر روی داده‌های تحقیق حاضر، بهترین مدل MLR ($RMSE = 3.07\ %\ g\ g^{-1}$) و بهترین مدل ANN ($RMSE = 3.05\ %\ g\ g^{-1}$) با سه متغیر ورودی کربن آلی، رس و جرم مخصوص ظاهری برای برآورد SAW در خاک‌های زراعی دشت اردبیل تشخیص داده شد؛ بنابراین، استفاده از مدل نروفازی در تحقیق حاضر در مقایسه با مدل‌های رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی (Amirabedi et al., 2013) به علت کاهش RMSE باعث بهبود تخمین آب قابل استفاده خاک گردید. این نتایج با یافته‌های شیری و همکاران (Shiri et al., 2017) در خصوص کارایی بهتر روش نروفازی (ضرایب تبیین برابر ۰/۸۵ و ۰/۹۶) در مقایسه با روش رگرسیون خطی چندگانه (ضرایب تبیین برابر ۰/۴۱ و ۰/۴۱) در برآورد رطوبت‌های FC و PWP در خاک‌های استان فارس همخوانی دارد.

نتایج مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) برای برآورد آب قابل استفاده خاک (SAW)

شش مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) با همان ترکیب متغیرهای ورودی مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه (جدول ۳) برای برآورد آب قابل استفاده خاک (SAW) طراحی گردید. در جدول ۶ مقادیر آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا (ME) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) برای ارزیابی عملکرد مدل‌های GEP در تخمین SAW آورده شده است. همانند مدل‌های NF، برای رتبه‌بندی عملکرد مدل‌های GEP در برآورد SAW نیز از ملاک پایین بودن RMSE و بالا بودن NS در مقایسه‌ها استفاده گردید. بر این اساس، مشاهده می‌شود مدل GEP شماره ۵ در سری آزمون (جدول ۶) با سه متغیر ورودی کربن آلی، جرم مخصوص ظاهری و میانگین هندسی قطر ذرات (dg) از نظر برآورد SAW به علت داشتن RMSE کم و NS زیاد، دارای دقت تخمین بالاتری در مقایسه با سایر مدل‌های GEP بود.

جدول ۵- معیارهای ارزیابی مدل های نروفازی (NF) آب قابل استفاده خاک (SAW)

Table 5- Evaluation criteria for NF models of SAW

شماره Number	متغیرهای ورودی Input variables	آزمون Testing set				آموزش Training			
		R ²	RMSE (% g g ⁻¹)	ME (% g g ⁻¹)	NS	R ²	RMSE (% g g ⁻¹)	ME (% g g ⁻¹)	NS
1	OC, BD	0.66	2.77	-0.08	0.650.56	2.11	0.00	0.56	
2	OC, BD, clay	0.73	2.51	0.09	0.710.66	1.87	0.00	0.66	
3	OC, sand	0.51	3.29	0.07	0.500.48	2.31	0.00	0.48	
4	BD, sand	0.63	2.87	-0.07	0.620.47	2.32	0.00	0.47	
5	OC, BD, dg	0.62	2.99	0.88	0.590.72	1.70	0.00	0.72	
6	OC, BD, σg	0.64	2.96	-0.07	0.590.65	1.90	0.00	0.65	

NS: ضریب نش-ساتکلِف، RMSE: مجذور میانگین مربعات خطا، R²: ضریب تبیین. توصیف متغیرها در زیر جدول ۱ آورده شده است.

R²: coefficient of determination; RMSE: root mean square error; NS: Nash-Sutcliff coefficient. The description of the variables is available in Table 1.

SAW می باشد؛ همبستگی معنی دار و مثبت متغیر کربن آلی و همبستگی معنی دار و منفی متغیرهای جرم مخصوص ظاهری و dg با SAW (جدول ۲) نیز مؤید این قضیه است. به نظر می رسد با افزایش ماده آلی خاک به علت تأثیر مثبت آن در خاکدانه سازی، رطوبت FC و در نتیجه SAW افزایش می یابد در حالی که افزایش سهم ذرات درشت خاک (شن) از طریق افزایش dg و نیز افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک احتمالاً به علت تخریب خاکدانه سازی و تضعیف ساختمان خاک موجب کاهش رطوبت FC و در نتیجه کاهش SAW می گردد (Jury & Horton, 2004).

مقادیر R²، RMSE، ME و NS این مدل برای سری آموزش به ترتیب برابر ۰/۵۵، ۲/۱۵ % g g⁻¹ و ۰/۰۴ % g g⁻¹ و برای سری آزمون به ترتیب برابر ۰/۷۶، ۳/۱۰ % g g⁻¹ و ۱/۴۱ % g g⁻¹ و ۰/۵۶ به دست آمد (جدول ۶). مقدار منفی ME برای داده های آزمونی نشان دهنده تخمین کمتر از مقدار واقعی SAW توسط مدل شماره ۵ می باشد ولی با این حال براساس آماره NS، عملکرد این مدل قابل قبول (NS = 0.56) است (Waseem et al., 2017). معادله رگرسیونی این مدل (جدول ۳) بیانگر آن است که کربن آلی با علامت مثبت و جرم مخصوص ظاهری و dg با علامت منفی وارد مدل گردیدند و تأثیر منفی متغیر dg به مراتب بالاتر از جرم مخصوص ظاهری در برآورد

جدول ۶- معیارهای ارزیابی مدل های برنامه ریزی بیان ژن آب قابل استفاده خاک (SAW)

Table 6- Evaluation criteria for GEP models of SAW

شماره Number	متغیرهای ورودی Input variables	آزمون Testing set				آموزش Training			
		R ²	RMSE (% g g ⁻¹)	ME (% g g ⁻¹)	NS	R ²	RMSE (% g g ⁻¹)	ME (% g g ⁻¹)	NS
1	OC, BD	0.74	3.23	-1.58	0.52	0.53	2.18	-0.02	0.53
2	OC, BD, clay	0.69	3.42	-1.61	0.46	0.56	2.12	-0.07	0.56
3	OC, sand	0.51	3.91	-1.81	0.30	0.46	2.35	0.01	0.46
4	BD, sand	0.68	3.32	-1.01	0.49	0.46	2.35	-0.12	0.46
5	OC, BD, dg	0.76	3.10	-1.41	0.56	0.55	2.15	0.04	0.55
6	OC, BD, σg	0.74	3.32	-1.69	0.49	0.55	2.13	-0.04	0.55

NS: ضریب نش-ساتکلِف، RMSE: مجذور میانگین مربعات خطا، ME: میانگین خطا، R²: ضریب تبیین. توصیف متغیرها در زیر جدول ۱ آورده شده است.

R²: coefficient of determination; RMSE: root mean square error; ME: mean error; NS: Nash-Sutcliff coefficient. The description of the variables is available in Table 1.

در رتبه‌های بعدی تخمین SAW، مدل شماره ۱ با دو متغیر ورودی کربن آلی و جرم مخصوص ظاهری ($g\ g^{-1}$) $RMSE = 3.23\%$ و $NS = 0.52$ و مدل‌های شماره ۴ و ۶ (هر دو) با متغیرهای ورودی کربن آلی، جرم مخصوص ظاهری، شن و σ_g ($g\ g^{-1}$) $RMSE = 3.32\%$ و $NS = 0.49$ قرار دارد (جدول ۶). بنابراین براساس مقادیر آماره‌های ارزیابی شش مدل GEP اشاره شده در (جدول ۶)، مدل شماره ۵ نسبت به سایر مدل‌های GEP در برآورد SAW اراضی دشت اردبیل بهترین عملکرد را نشان داد که تفاوت چندانی با عملکرد بهترین مدل MLR ($RMSE = 3.07\%$) و بهترین مدل ANN ($RMSE = 3.05\%$) در برآورد SAW در پژوهش امیرعابدی و همکاران (Amirabedi et al., 2013) ندارد؛ به عبارت دیگر، استفاده از روش GEP در مقایسه با روش‌های رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی نتوانست باعث بهبود تخمین آب قابل استفاده خاک گردد. جعفری و همکاران (Jafari et al., 2021) گزارش نمودند مدل GEP توانست رطوبت حجمی خاک را از روی متغیرهای زودیافت خاک شامل رس، سیلت، جرم مخصوص ظاهری، تخلخل کل و مکش خاک در اراضی جنگلی فنلاند با ضریب تبیین ۰/۹۳ و مجذور میانگین مربعات خطای ۴/۱۰ درصد حجمی پیش‌بینی نماید. نتایج پژوهش چیم و همکاران (Cheema et al., 2024) نیز نشان داد که مدل GEP کارایی لازم را برای برآورد منحنی رطوبتی خاک در دامنه خشک تا اشباع از روی ویژگی‌های سهل‌الوصول خاک با دقت بالا و خطای پایین دارد.

نتایج مدل‌های جنگل تصادفی (RF) برای برآورد آب قابل استفاده خاک (SAW)

شش مدل جنگل تصادفی (RF) با ترکیب متغیرهای ورودی استفاده شده در توابع رگرسیونی (جدول ۳) برای برآورد آب قابل استفاده خاک (SAW) توسعه داده شد. جدول ۷ مقادیر آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، مجذور میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، میانگین خطا (ME) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) برای مقایسه عملکرد مدل‌های RF از نظر صحت تخمین SAW نشان می‌دهد. همانند دو مدل هوشمند قبلی، رتبه‌بندی مدل‌های RF از نظر دقت برآورد SAW نیز بر اساس پایین بودن آماره $RMSE$ و بالا بودن آماره NS انجام گرفت. همانند روش GEP (جدول ۶)، مدل RF شماره ۵ در سری آزمون (جدول ۷) با سه متغیر ورودی کربن آلی، جرم مخصوص ظاهری و میانگین هندسی قطر ذرات (dg) توانست SAW را به علت داشتن $RMSE$ کم

و NS زیاد در مقایسه با سایر مدل‌های RF با دقت بالایی برآورد نماید. مقادیر R^2 ، $RMSE$ ، ME و NS این مدل برای سری آموزش به‌ترتیب برابر ۰/۹۴، $g\ g^{-1}$ ۰/۹۲، $g\ g^{-1}$ ۰/۰۰ و ۰/۹۲ و برای سری آزمون به‌ترتیب برابر ۰/۶۸، $g\ g^{-1}$ ۳/۳۰، $g\ g^{-1}$ ۱/۴۵ و ۰/۵۰ تعیین گردید (جدول ۷). مقدار منفی ME برای سری آزمون‌ی بیانگر برآورد کمتر از مقدار واقعی SAW توسط مدل شماره ۵ می‌باشد و مطابق آماره NS ، عملکرد این مدل رضایت‌بخش ($NS = 0.50$) است (Waseem et al., 2017). معادله رگرسیونی مدل ۵ در جدول ۳ نیز بیانگر تأثیر مثبت کربن آلی و تأثیر منفی dg و جرم مخصوص ظاهری در تخمین SAW می‌باشد که با نتایج همبستگی این سه متغیر ورودی با SAW (جدول ۲) در یک راستا می‌باشد. در رتبه‌های بعدی تخمین SAW توسط روش جنگل تصادفی، مدل شماره ۲ با سه متغیر ورودی کربن آلی، جرم مخصوص ظاهری و رس ($g\ g^{-1}$) $RMSE = 3.33\%$ و $NS = 0.49$ و مدل شماره ۴ با دو متغیر ورودی جرم مخصوص ظاهری و شن ($g\ g^{-1}$) $RMSE = 3.42\%$ و $NS = 0.46$ قرار دارد (جدول ۷). به‌طور کلی نتایج ضد و نقیضی در خصوص قابلیت روش جنگل تصادفی (RF) در برآورد منحنی رطوبتی خاک گزارش شده است. در مجموع براساس مقادیر آماره‌های ارزیابی شش مدل RF مورد استفاده در تحقیق حاضر (جدول ۷)، مدل شماره ۵ نسبت به سایر مدل‌های RF در برآورد SAW از خطای کمی برخوردار بود که در مقایسه با بهترین مدل MLR ($RMSE = 3.07\%$) و بهترین مدل ANN ($RMSE = 3.05\%$) در برآورد SAW (Amirabedi et al., 2013) عملکرد ضعیفی از خود نشان داد. این نتایج با یافته‌های کیانی و بیات (Kiani & Bayat, 2024) همخوانی ندارد که نشان دادند مدل جنگل تصادفی در مقایسه با مدل رگرسیونی به‌طور معنی‌دار از صحت تخمین بالاتری در تخمین منحنی رطوبتی خاک از روی ویژگی‌های زودیافت خاک برخوردار بود. راستگو و همکاران (Rastgou, Bayat, Mansoorizadeh, & Gregory, 2020) گزارش نمودند مدل RF به علت بیش‌برازشی، عدم قطعیت در تعیین مقیاس و ناپایداری در مرحله آزمون از قابلیت اطمینان کمتری در مقایسه با مدل رگرسیون غیرخطی چند متغیره در برآورد نقاط منحنی رطوبتی خاک برخوردار بود. نتایج پژوهش شجاعی و همکاران (Shojaei et al., 2023) نیز نشان داد که مدل جنگل تصادفی در مقایسه با مدل شبکه عصبی مصنوعی دارای دقت کمی در پیش‌بینی رطوبت‌های ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی از روی ویژگی‌های زودیافت خاک بود.

جدول ۷- معیارهای ارزیابی مدل جنگل تصادفی آب قابل استفاده خاک (SAW)

Table 7- Evaluation criteria for RF models of SAW

شماره	متغیرهای ورودی	آزمون				آموزش			
		R ²	RMSE	ME	NS	R ²	RMSE	ME	NS
Number	Input variables	(% g g ⁻¹)	(% g g ⁻¹)	(% g g ⁻¹)		(% g g ⁻¹)	(% g g ⁻¹)	(% g g ⁻¹)	
1	OC, BD	0.60	3.54	-1.68	0.420.91	1.01	0.00	0.90	
2	OC, BD, clay	0.72	3.33	-1.66	0.490.93	0.96	-0.03	0.91	
3	OC, sand	0.40	4.08	-1.86	0.230.92	1.03	0.00	0.89	
4	BD, sand	0.56	3.42	-1.29	0.460.92	1.08	0.01	0.89	
5	OC, BD, dg	0.68	3.30	-1.45	0.500.94	0.92	0.00	0.92	
6	OC, BD, σg	0.72	3.37	-1.78	0.480.93	0.96	0.05	0.92	

NS: ضریب نش-ساتکلیف، RMSE: مجذور میانگین مربعات خطا، ME: میانگین خطا، R²: ضریب تبیین. توصیف متغیرها در زیر جدول ۱ آورده شده است.

R²: coefficient of determination; RMSE: root mean square error; ME: mean error; NS: Nash-Sutcliffe coefficient. The description of the variables is available in Table 1.

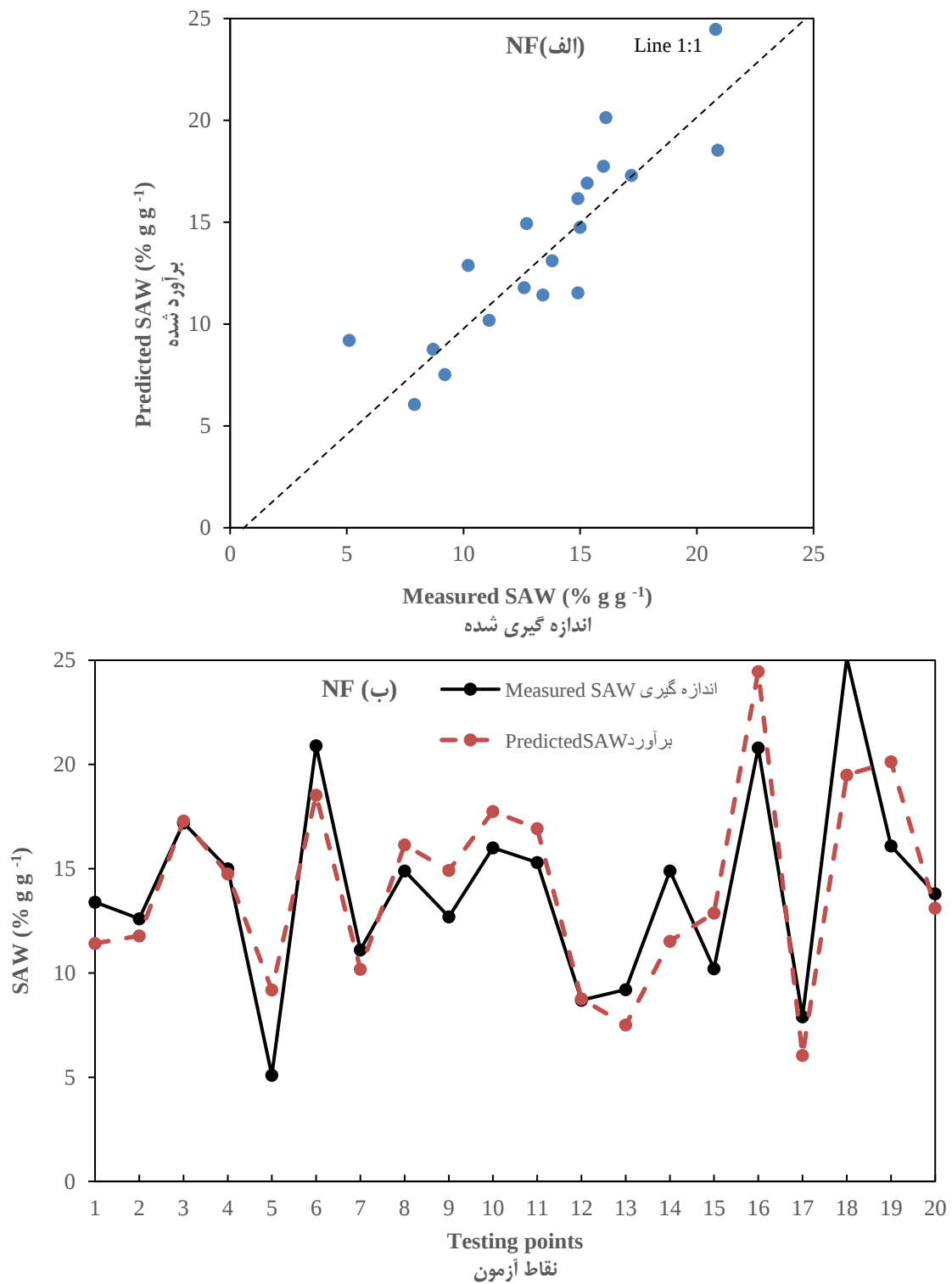
GEP و RF کمتر است. بنابراین می توان چنین استنباط نمود که در این پژوهش، مدل های نروفازی در برآورد SAW از روی متغیرهای زود یافت خاک به علت استفاده از روابط غیر خطی پیچیده به مراتب موفق تر عمل نموده اند در حالی که مدل های جنگل تصادفی از عملکرد ضعیفی در این زمینه برخوردار بوده اند. شیر و همکاران (Shiri et al., 2017) نیز بیان نمودند که مدل نروفازی (R² = ۰/۸۴۷ و ۰/۹۶۰) در مقایسه با مدل های برنامه ریزی بیان ژن (R² = ۰/۸۳۸ و ۰/۸۷۳)، جنگل تصادفی (R² = ۰/۷۸۴ و ۰/۷۱۴) و رگرسیون خطی چندگانه (R² = ۰/۴۱۱ و ۰/۴۱۴) از دقت بالاتری در برآورد به ترتیب رطوبت های FC و PWP از روی متغیرهای زود یافت شامل رس، سیلت، جرم مخصوص ظاهری و dg در خاک های استان فارس برخوردار بود. همچنین این نتایج با یافته های جعفری و همکاران (Jafari et al., 2021) در یک راستا می باشد که گزارش نمودند مدل های مبتنی بر شبکه های عصبی مصنوعی در مقایسه با مدل برنامه ریزی بیان ژن توانستند با دقت بالاتری آب قابل استفاده خاک را از روی متغیرهای زود یافت خاک تخمین بزنند.

نتیجه گیری

عملکرد سه مدل هوشمند نروفازی (NF)، برنامه ریزی بیان ژن (GEP) و جنگل تصادفی (RF) در برآورد آب قابل استفاده خاک (SAW) با شش ترکیب متفاوت از متغیرهای زود یافت و سهل الوصول خاک شامل شن، رس، میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات، کربن آلی و جرم مخصوص ظاهری خاک در اراضی زراعی دشت اردبیل مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت.

مقایسه عملکرد مدل های NF، GEP و RF در برآورد SAW

مقایسه مقادیر اندازه گیری و برآورد شده آب قابل استفاده خاک (SAW) بر اساس نقاط آزمونی (۲۰ داده تصادفی) برای بهترین مدل در روش های نروفازی (NF)، برنامه ریزی بیان ژن (GEP) و جنگل تصادفی (RF) به ترتیب در شکل ۲، ۳ و ۴ (ب) نشان داده شده است. مقادیر آماره های مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) برای مدل های شش گانه NF (جدول ۵)، GEP (جدول ۶) و RF (جدول ۷) ارائه شده برای برآورد SAW در داده های آزمونی نشان می دهد که مدل های NF به دلیل داشتن NS زیاد (از ۰/۵۰ تا ۰/۷۱) و RMSE کم (از ۲/۵۱ تا ۳/۲۹ g g⁻¹) در مقایسه با مدل های GEP (NS از ۰/۳۰ تا ۰/۵۶ و RMSE از ۳/۱۰ تا ۳/۹۱ g g⁻¹) و RF (NS از ۰/۲۳ تا ۰/۵۰ و RMSE از ۳/۳۰ تا ۴/۰۸ g g⁻¹) دارای دقت بالا و خطای پایین در برآورد SAW بودند. همچنین مطابق تقسیم بندی واسیم و همکاران (Waseem et al., 2017) برای ضریب نش-ساتکلیف (NS)، می توان استنباط نمود که در تحقیق حاضر مدل های شش گانه NF (جدول ۵) به علت برخورداری از مقادیر بالای ۰/۵۰ برای آماره NS، دارای عملکرد قابل قبول تا بسیار خوب از نظر برآورد آب قابل استفاده خاک هستند در حالی که برخی مدل های GEP (جدول ۶) و RF (جدول ۷) به علت داشتن مقادیر کوچکتر از ۰/۵۰ برای آماره NS، دارای عملکرد نامطلوب برای برآورد آب قابل استفاده خاک در اراضی دشت اردبیل هستند. شکل ۲، ۳ و ۴ (الف) نیز نمودار ۱:۱ مقادیر اندازه گیری و برآورد شده SAW را با استفاده از بهترین مدل NF (مدل شماره ۲ در جدول ۵)، بهترین مدل GEP (مدل شماره ۵ در جدول ۶) و بهترین مدل RF (مدل شماره ۵ در جدول ۷) برای داده های آزمونی نشان می دهد؛ با توجه به این شکل مشاهده می شود که پراکنش داده ها حول محور ۱:۱ در بهترین مدل NF در مقایسه با بهترین مدل های

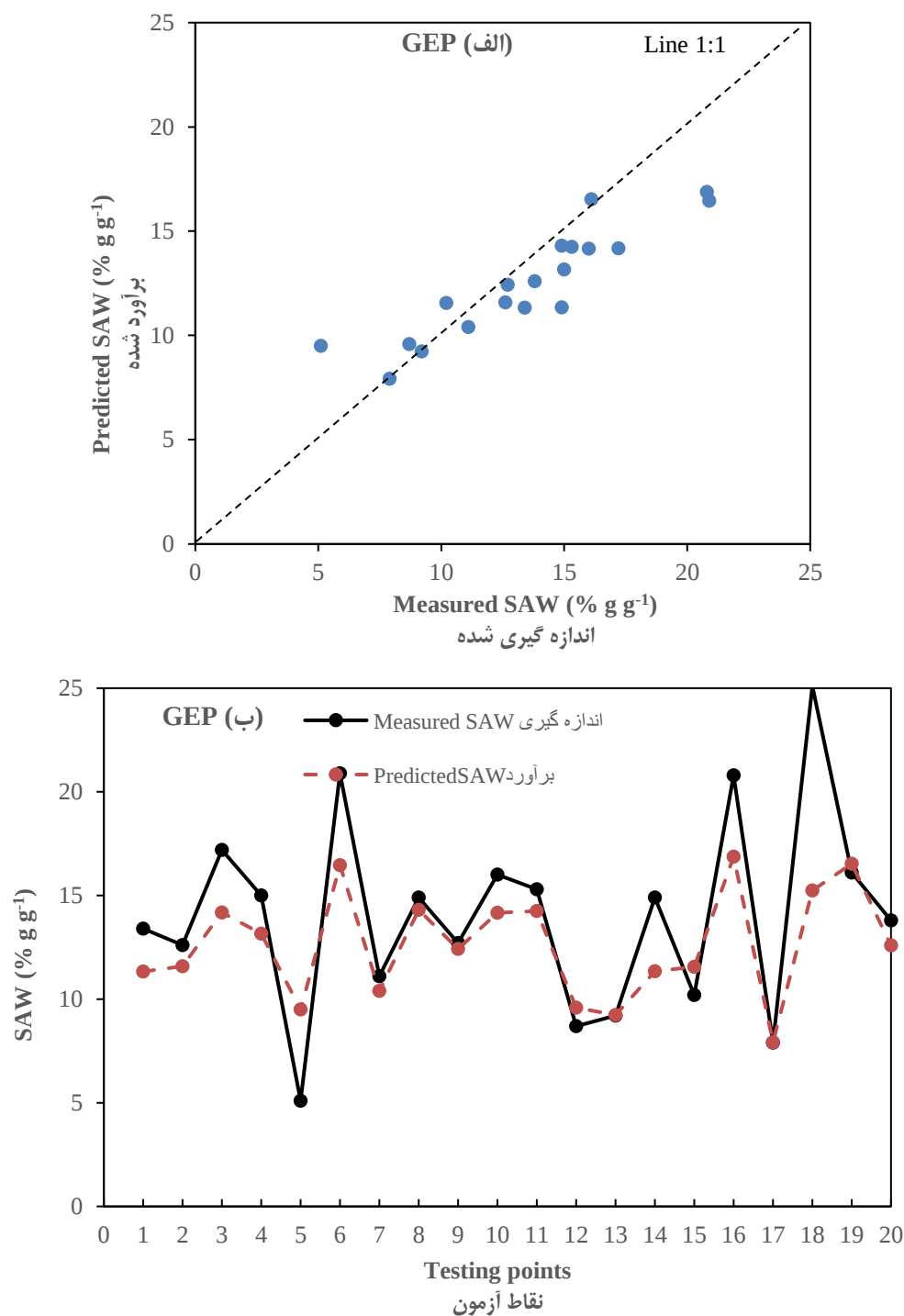


شکل ۲- مقایسه مقادیر اندازه گیری و برآورد شده آب قابل استفاده خاک (SAW) با استفاده از بهترین مدل نروفازی (NF) بر اساس داده های آزمونی (n=20)

اطلاعات مربوط به مدل و متغیرهای ورودی در جدول ۵ آورده شده است.

Figure 2- Comparison of predicted and measured values of soil available water (SAW) using the best NF model based on testing data (n=20)

Table 5 provides detailed information about model and input variables.

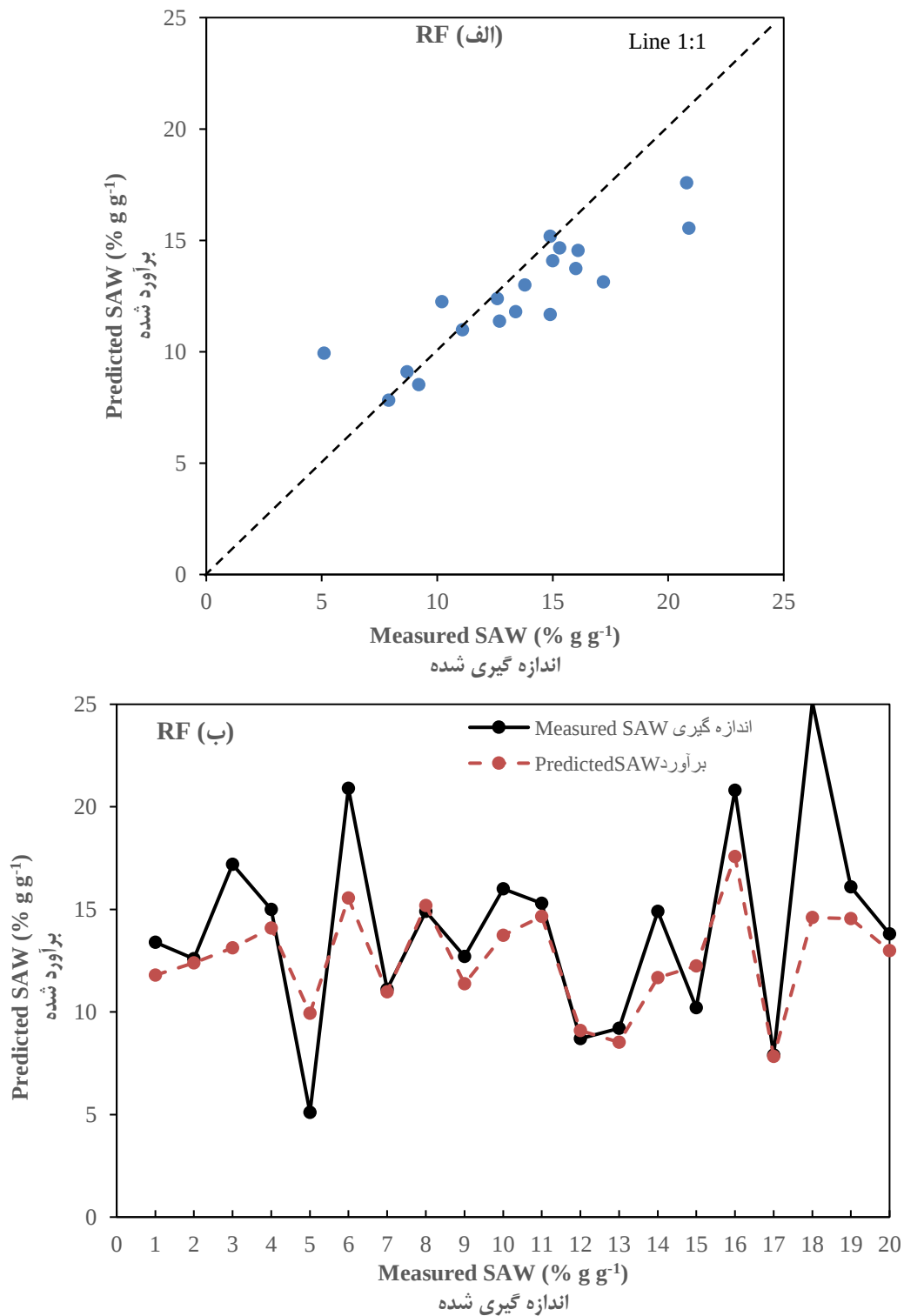


شکل ۳- مقایسه مقادیر اندازه گیری و برآورد شده آب قابل استفاده خاک (SAW) با استفاده از بهترین مدل برنامه ریزی بیان ژن (GEP) بر اساس داده های آزمونی (n=20)

اطلاعات مربوط به مدل و متغیرهای ورودی در جدول ۶ آورده شده است.

Figure 3- Comparison of predicted and measured values of soil available water (SAW) using the best GEP model based on testing data (n=20)

Table 6 provides detailed information about model and input variables.



شکل ۴- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده آب قابل استفاده خاک (SAW) با استفاده از بهترین مدل جنگل تصادفی (RF) بر اساس داده‌های آزمونی (n=20)

اطلاعات مربوط به مدل و متغیرهای ورودی در جدول ۷ آورده شده است.

Figure 4- Comparison of predicted and measured values of soil available water (SAW) using the best RF model based on testing data (n=20)

Table 7 provides detailed information about model and input variables.

کربن آلی، جرم مخصوص ظاهری و رس به دلیل داشتن مقادیر بالای آماره NS و مقادیر پایین آماره RMSE، عملکرد مناسب تری در مقایسه با بهترین مدل های GEP و RF در برآورد SAW داشت؛ به نظر می رسد می توان از این مدل برای برآورد آب قابل استفاده خاک در سایر مناطق نیمه خشک کشور و جهان با شرایط اقلیمی مشابه دشت اردبیل نیز با دقت مناسب بهره برد که البته این موضوع نیاز به راستی آزمایی دارد. پیشنهاد می شود در مطالعات بعدی از رگرسیون غیر خطی چندگانه و سایر مدل های هوشمند مانند ماشین بردار پشتیبان نیز در برآورد SAW در منطقه مورد مطالعه استفاده گردد.

رابطه همبستگی مثبت و معنی دار بین SAW با کربن آلی و رس و نیز رابطه همبستگی منفی و معنی دار بین SAW با شن و جرم مخصوص ظاهری خاک یافت شد. نتایج مدل سازی نشان داد که کربن آلی، جرم مخصوص ظاهری و رس از مهم ترین و اثرگذارترین متغیرهای ورودی در برآورد SAW در منطقه مورد مطالعه بودند. همچنین ارزیابی و مقایسه نتایج مدل ها بیانگر آن بود که هر شش مدل نروفازی (NF) مورد استفاده در پژوهش به علت برخورداری از مقادیر نش-سانکلیف (NS) بالاتر از ۵۰/۰، دارای عملکرد قابل قبول در برآورد SAW هستند. در مجموع، بهترین مدل نروفازی با متغیرهای ورودی

References

- 1- Amirabedi, H., Asghari, Sh., Mesri, T., & Keivan behjo, F. (2013). Estimating of field capacity, permanent wilting point and available water content in Ardabil plain using regression and artificial neural network models. *Applied Soil Research*, 1(1), 60-72. (In Persian with English abstract)
- 2- Bauer, A., & Black, A.L. (1992). Organic carbon effects on available water capacity of three soil textural groups. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 248-254. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600010038x>
- 3- Blake, G.R., & Hartge, K.H. (1986). *Bulk density*. p. 363-375. In: Klute A. (ed). *Methods of Soil Analysis Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, WI. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13>
- 4- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45, 5-32.
- 5- Cheema, S.J., Shah, S.H.H., Farooque, A.A., Jamei, M., Abbas, F., Esau, T.J., & Grewal, K.S. (2024). A comprehensive analytical and computational assessment of soil water characteristics curves in Atlantic Canada: Application of a novel SelectKbestbased GEP model. *Agricultural Water Management*, 298, 108868. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108868>
- 6- Ferreira, C. (2006). *Gene Expression Programming: Mathematical modeling by an artificial intelligence*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, p. 478.
- 7- Gardner, W.H. (1986). *Water content*. p. 493-544. In: Klute A. (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 1*. 2nd ed. Agronomy. Monograph. 9. ASA, Madison, WI.
- 8- Gee, G.W., & Or, D. (2002). *Particle-size analysis*. p. 255-293. In: Dane J. H., & Topp G. C. (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 4*. SSSA Book Series No. 5. Soil Science Society of America, Madison, WI. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c12>
- 9- Ghorbani, M.A., Deo, R.C., Kashani, M.H., Shahabi M., & Ghorbani, S. (2019). Artificial intelligence-based fast and efficient hybrid approach for spatial modeling of soil electrical conductivity. *Soil and Tillage Research*, 186, 152-164. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.09.012>
- 10- Jafari, M.M., Ojaghlo, H., & Karbasi, M. (2021). Comparison of the performance of artificial neural networks and gene expression programming in estimating the forest soil water characteristic curve. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(8), 2093-2109.
- 11- Jury, W., & Horton, R. (2004). *Soil Physics*. John Wiley and Sons, Inc.
- 12- Kiani, R., & Bayat, H. (2024). Capability of regression and random forest methods to estimate soil water retention curve by developing pseudo-continuous pedotransfer functions. *Journal of Soil and Plant Science (Water and Soil Science)*, 34(4), 15-36. <https://doi.org/10.3390/w12123425>
- 13- Kozak, E., Pachepsky, Y.A., Sokolowski, S., Sokolowska, Z., & Stepniewski, W. (1996). A modified number-based method for estimating fragmentation fractal dimensions of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 60, 1291-1297. <https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000050002x>
- 14- Merdun, H., Cinar, O., Meral, R., & Apan, M. (2006). Comparison of artificial neural network and regression pedotransfer functions for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*, 90, 108-116. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.08.011>
- 15- Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1982). *Total carbon, organic carbon, and organic matter*. p. 539-579. In: A.L. Page et al. (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 2*. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>
- 16- Ostovari, Y., Asgari, K., & Cornelis, W. (2015). Performance evaluation of pedotransfer functions to predict field

- capacity and permanent wilting point using UNSODA and HYPERS datasets. *Arid Land Research Management*, 29, 383-398. <https://doi.org/10.1080/15324982.2015.1029649>
- 17- Rastgou, M., Bayat, H., Mansoorizadeh, M., & Gregory, A.S. (2020). Estimating the soil water retention curve: comparison of multiple nonlinear regression approach and random forest data mining technique. *Computer and Electronics in Agriculture*, 174, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105502>
- 18- Shirazi, M.A., & Boersma, L. (1984). A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society American Journal*, 48(1), 142-147. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800010026x>
- 19- Shiri, J., Keshavarzi, A., Kisi, O., & Karimi, S. (2017). Using soil easily measured parameters for estimating soil water capacity: Soft computing approaches. *Computers and Electronics in Agriculture*, 141, 327-339. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.08.012>
- 20- Shojaei, S., Farhadi Bansoulehi, B., Fatehi, Sh., & Rahmani, M. (2023). Comparison of pedotransfer functions based on machine learning methods to estimate soil moisture at field capacity and permanent wilting point (Case study: Ravansar District, Kermanshah Province). *Journal of Water and Soil Conservation*, 30(1), 27-47. <https://doi.org/10.3390/w13192639>
- 21- Waseem, M., Mani, N., Andiego, G., & Usman, M. (2017). A review of criteria of fit for hydrological models. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(11), 1765-1772.
- 22- Zhang, R., & Zhang, S. (2024). Coefficient of permeability prediction of soils using gene expression programming. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 128 (107504). <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107504>

The Effect of Tree and Shrub Cover (Vegetation) on Soil Characteristics of Rudbar in Guilan

Y. Kooch^{1*}, M. Fooladi Doghazlo¹, K. Haghverdi²

1- Department of Range Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, I. R. Iran

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

2- Department of Wood and Paper Science and Technology, Ka.C., Islamic Azad University, Karaj, Iran

Received: 07 March 2025

Revised: 19 May 2025

Accepted: 24 May 2025

Available Online: 24 May 2025

How to cite this article:

Kooch, Y., Fooladi Doghazlo, M., & Haghverdi, K. (2025). Analysis of the effect of tree and shrub cover (vegetation) on soil characteristics Rudbar in Guilan. *Journal of Water and Soil*, 39(2), 155-171. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92519.1475>

Introduction

Vegetation, as a key factor in ecosystems, has significant impacts on soil properties through multiple ecological processes. Vegetative cover enhances soil structure and composition by stabilizing organic matter, reducing erosion, regulating moisture levels, promoting nutrient cycling, and supporting microbial activity. While extensive research has elucidated the effects of various vegetation types on the physical and chemical properties of soil, the biological attributes of soil under different vegetation covers, particularly tree and shrub species, remain underexplored. This study aims to comprehensively evaluate the characteristics of the organic and mineral soil layers in areas dominated by *Quercus macranthera* tree cover, *Crataegus microphylla* shrub cover, *Berberis integerrima* shrub cover, and a mixed *Crataegus microphylla* and *Berberis integerrima* shrub cover in Rudbar County, Guilan Province, Iran. By examining these diverse vegetation types, the study seeks to elucidate their differential impacts on soil health and ecosystem functionality, providing insights for sustainable land management.

Materials and Methods

To investigate the influence of vegetation cover on soil properties, a rigorous site selection process was employed. Following preliminary field assessments, study areas were chosen to ensure continuity of vegetation cover and minimal variations in topographic factors, including elevation above sea level, slope gradient, and aspect. This approach minimized confounding variables, allowing for accurate comparisons across vegetation types. In each habitat, two 100 m × 100 m plots were implemented, with a minimum separation of 500 meters to account for spatial variability. Within each one-hectare plot, five soil samples (30 cm × 30 cm surface area, 10 cm depth) were collected from the organic and mineral layers at the four corners and the center of the plot. In total, 10 litter samples and 10 soil samples were collected from each vegetation type and transported to the laboratory for detailed analysis. Laboratory assays evaluated a suite of physical, chemical, and biological parameters, including soil aggregate stability, nutrient content, enzymatic activities, and microbial community dynamics, to provide a comprehensive understanding of soil responses to vegetation cover.

Results and Discussion

The findings revealed marked differences in soil properties across the studied vegetation types. The *Q. macranthera* tree cover exhibited the highest amount of essential nutrients in the organic layer, including nitrogen,



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

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92519.1475>

phosphorus, potassium, calcium, and magnesium, reflecting its capacity to enhance nutrient cycling. In contrast, the *B. integerrima* shrub cover consistently exhibited the lowest nutrient concentrations, indicating minimal contribution to soil fertility. Analysis of soil physical and chemical properties further highlighted these differences. The *Q. macranthera* cover demonstrated significantly greater soil aggregate stability, higher clay content, increased proportions of coarse and fine aggregates, more favorable pH levels, and elevated concentrations of total nitrogen, ammonium, nitrate, phosphorus, potassium, calcium, as well as greater fine root biomass. Enzymatic activities, including urease, acid phosphatase, arylsulfatase, and invertase, were also significantly higher under *Q. macranthera*, indicating robust microbial and biochemical processes. Conversely, *B. integerrima* cover recorded the lowest values for these parameters, highlighting its limited impact on soil structure and function. Particulate and dissolved organic nitrogen levels were similarly highest under *Q. macranthera*, reinforcing its role in organic matter dynamics. Biological soil properties mirrored these trends. The *Q. macranthera* cover supported the highest densities of soil microfauna, including Acarina, Collembola, and nematodes, as well as abundant protozoa, fungal, and bacterial populations. Metrics of microbial activity, such as basal respiration, substrate-induced respiration, microbial biomass nitrogen, and microbial biomass phosphorus, were also maximized under this tree cover, reflecting a thriving soil microbial community. In contrast, *B. integerrima* cover exhibited the lowest values for these biological indicators, suggesting a less supportive environment for soil biota. Temporal analysis of carbon mineralization revealed significant variations at weeks 2, 4, 5, 8, and 12, with no notable changes at weeks 1 and 17. The highest carbon mineralization rates were observed under *Q. macranthera*, while *B. integerrima* showed the lowest. Nitrogen mineralization followed a similar pattern, with significant changes on days 7, 14, 21, 28, and 35, and the highest rates under *Q. macranthera*. These results collectively indicate that vegetation type, combined with topographic factors like elevation, significantly shapes the physical, chemical, and biological characteristics of soil in Rudbar County.

Conclusion

This study demonstrates that *Q. macranthera* tree cover significantly enhances soil quality compared to *C. microphylla*, *B. integerrima*, and their mixed shrub covers. The superior physical, chemical, and biological properties observed under *Q. macranthera* highlight its critical role in fostering soil microbial communities, improving nutrient cycling, and maintaining soil fertility. Enhanced carbon and nitrogen mineralization rates further underscore the importance of this tree species in driving biogeochemical processes essential for ecosystem health. These findings have important implications for land-use planning, forest management, and ecological restoration in Rudbar County. By prioritizing *Q. macranthera* in reforestation and conservation strategies, land managers can optimize soil productivity and ecosystem resilience. Future research should focus on long-term monitoring of these soil-vegetation interactions and explore additional environmental factors, such as climate and land-use history, to further refine management practices. The integration of such data will support the development of sustainable strategies that balance ecological health with agricultural and forestry objectives, ensuring the long-term vitality of Rudbar County's ecosystems.

Keywords: Carbon and nitrogen mineralization, Soil fertility, enzymatic activity, Soil physical and chemical properties

تأثیر پوشش‌های درختی و درختچه‌ای بر ویژگی‌های خاک منطقه رودبار گیلان

یحیی کوچ^۱ - مهین فولادی دوقزلو^۱ - کتابون حق‌وردی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳

چکیده

پوشش‌های گیاهی به‌عنوان عوامل کلیدی در اکوسیستم‌ها، اثرات قابل توجهی بر ویژگی‌های خاک دارند. در همین راستا پژوهش حاضر با هدف بررسی ویژگی‌های مختلف لایه‌آلی و بخش معدنی خاک در اراضی دارای پوشش درختی با غالبیت اوری، پوشش درختچه‌ای ولیک، زرشک، آمیخته ولیک و زرشک در شهرستان رودبار استان گیلان انجام شد. بدین منظور در هر یک از رویشگاه‌های مورد مطالعه ۱۰ نمونه لایه آلی (لاشه ریزه) و ۱۰ نمونه خاک از عمق ۰-۱۰ سانتی‌متری جهت تجزیه و تحلیل به آزمایشگاه انتقال داده شد. یک بخش از نمونه‌های خاک جهت انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی، پس از هوا خشک شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شده و بخش دوم نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های زیستی تا زمان آزمایش در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. طبق نتایج پژوهش حاضر بیشترین مقادیر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم لایه آلی در پوشش درختی اوری و کمترین مقدار این ویژگی‌ها در پوشش درختچه‌ای زرشک مشاهده شد. همچنین بیشترین مقدار پایداری خاکدانه‌ها، خاکدانه درشت، بیشترین مقادیر pH و ویژگی‌های حاصل‌خیزی خاک در پوشش درختی اوری مشاهده شد. بیشترین و کمترین میزان معدنی شدن کربن و نیتروژن به ترتیب به پوشش درختی اوری و پوشش درختچه‌ای زرشک تعلق داشت. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که حضور پوشش‌های درختی، اثرات مثبتی بر ویژگی‌های خاک دارد. این پوشش‌ها با بهبود ساختار فیزیکی، افزایش مواد آلی و فعالیت‌های میکروبی کیفیت خاک را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند. در همین راستا پیشنهاد می‌شود برای احیاء اراضی تخریب یافته با شرایط اکولوژی مشابه از پوشش درختی (اوری) استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: حاصل‌خیزی خاک، فعالیت آنزیمی، معدنی‌شدن کربن و نیتروژن، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

مقدمه

(2021). در مناطق مرتفع، که شرایط آب و هوایی و ویژگی‌های خاک می‌تواند به‌طور قابل توجهی متفاوت باشد، وجود پوشش گیاهی حتی ضروری‌تر می‌شود (Zhao & Riaz, 2024). فشارهای منحصر به فرد ارتفاع از جمله نوسانات دما، در دسترس بودن رطوبت، و ترکیب خاک وجود شکل‌های تخصصی رشد گیاهان، به ویژه درختان و درختچه‌ها را ضروری می‌کند، که می‌تواند خاک را تثبیت کند و محیطی مساعد را برای سایر اشکال پوشش گیاهی ایجاد کند (Dolezal, Dvorsky, 2016). وجود پوشش‌های درختی و درختچه‌ای در اکوسیستم‌های کوهستانی، نقشی اساسی در تأثیرگذاری بر ویژگی‌های

پوشش گیاهی نقش مهمی در شکل‌دهی اکوسیستم‌های زمینی ایفا می‌کند و بر تعداد زیادی از عملکردها و خدمات اکولوژیکی تأثیر می‌گذارد (Feng, Yang, Liu, Liu, Xia, Wu, & Zhang, 2024). پوشش گیاهی به‌عنوان عامل اصلی تعیین‌کننده سلامت خاک، تنوع زیستی و چرخه عناصر غذایی عمل می‌کند و زیستگاهی را برای ارگانیسم‌های بی‌شماری فراهم می‌کند، در عین حال از خاک در برابر تغییرات شدید محیطی محافظت می‌کند (Timmis & Ramos, 2021).

۱- گروه مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

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

۲- گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

مرور منابع حاکی از آن است که مطالعات بیشین بیشتر بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تمرکز داشته‌اند (Moscatelli, Marabottini, Massaccesi, & Marinari, 2022; Babur, Uslu, Battaglia, et al., 2021; Tufa, Melese, & Tena, 2019) از آنجایی که ویژگی‌های زیستی خاک، از جمله تنوع و فعالیت میکروبی نقش حیاتی در پایداری ساختمان خاک، چرخه عناصر غذایی و حفظ سلامت اکوسیستم‌ها دارند، و تأثیر مستقیمی بر فرآیندهای بیولوژیکی و شیمیایی خاک می‌گذارند و به بهبود ظرفیت خاک برای حمایت از پوشش گیاهی و کاهش فرسایش کمک می‌کنند (Mohamed, Sofy, Almoneafy, et al., 2021). در تحقیق حاضر علاوه بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بر ویژگی‌های زیستی خاک، از جمله فعالیت‌های میکروبی، تنوع و تراکم میکروارگانیسم‌ها تحت پوشش‌های گیاهی مختلف پرداخته شده است و شناخت بیشتری از تأثیرات بلند مدت پوشش‌های گیاهی بر بهبود یا کاهش سلامت خاک فراهم می‌آورد. از این رو تحقیق حاضر با هدف بررسی تأثیر انواع پوشش‌های درختی و درختچه‌ای از جمله اوری (Quercus macranthera) و زرشک (Crataegus) (Fisch. and C. A. Mey) آمیخته ولیک و زرشک (Crataegus microphylla C. Koch. and Berberis integerrima Bunge) ولیک (Crataegus microphylla C. Koch) و زرشک (Berberis integerrima Bunge) بر برخی از ویژگی‌های لایه آلی و معدنی خاک در شهرستان دودبار استان گیلان، مورد بررسی قرار گرفت.

منطقه مورد مطالعه

لايه آلى خاك ايفا مى كند (Kooch, Heidari, Haghverdi, Gómez-Brandón, & Kartalaei, 2024). اين نوع پوشش گياهى نه تنها از طريق بستر برگ و زيست توده ريشه به مواد آلى كمك مى كند، بلكه باعث بهبود ساختمان و حفظ رطوبت خاك مى شود (Poirier, Roumet, & Munson, 2018). همانطور كه اين گياهان رشد مى كنند و پوسيده مى شوند، خاك را با تركيبات آلى غنى مى كنند و يك تعامل پيچيده از زندگى ميكروبي را تقويت مى كنند كه براى چرخه عناصر غذايى ضرورى است (Bhattacharyya & Furtak, 2022).

محتوای ماده آلی خاک به‌عنوان یک شاخص اساسی برای کیفیت و باروری خاک شناخته می‌شود. مواد آلی با فراهم آوردن انرژی، فعالیت‌های زیستی خاک را تقویت کرده و به طور مستقیم ویژگی‌های خاک را بهبود می‌بخشند، همچنین مانع از آلودگی و تخریب خاک می‌شوند (Qu, Huang, Ma, Zhang, & Biere, 2016). این ترکیبات به شدت تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی مانند شیوه‌های مختلف مدیریت زمین قرار دارند. با توجه به تفاوت‌های موجود در میزان مواد آلی در انواع مختلف پوشش‌های گیاهی، آگاهی از تأثیر گونه‌های مختلف گیاهی بر مواد آلی خاک امری ضروری است. پوشش‌های گیاهی مختلف از جمله پوشش‌های درختی و درختچه‌ای با ایجاد تغییرات در ویژگی‌های خاک، بر کیفیت و مقدار مواد آلی تأثیر می‌گذارند (Liu, Huang, An, Sun, Bhople, & Chen, 2018). از نظر اکولوژیکی، ویژگی‌های فیزیکی خاک اهمیت زیادی دارند، به‌طوری‌که خصوصیات زیستی و شیمیایی خاک تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی آن قرار می‌گیرند. وجود پوشش‌های گیاهی از گونه‌های مختلف نقش قابل توجهی در تغییرپذیری ویژگی‌های فیزیکی خاک ایفا می‌کند. به‌طوری‌که حضور پوشش‌های درختی می‌تواند باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری، افزایش تخلخل، افزایش نفوذپذیری و کاهش فرسایش خاک شود (Osman, 2013).

پوشش‌های گیاهی از جمله درختان و درختچه‌ها، نه تنها به تثبیت خاک و جلوگیری از فرسایش آن کمک می‌کنند، بلکه نقش اساسی در بهبود خصوصیات شیمیایی خاک ایفا می‌کنند. یکی از مهم‌ترین اثرات پوشش‌های گیاهی بر خاک، افزایش محتوای کربن آلی و نیتروژن در خاک است. به‌طور خاص، مواد آلی تولید شده توسط گیاهان می‌تواند به بهبود ساختمان خاک و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی آن کمک کند که این امر به نوبه خود بر دسترسی به عناصر غذایی خاک تأثیر می‌گذارد (Gerke, 2022). در نتیجه، وجود چنین پوشش گیاهی پیامدهای عمیقی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، از جمله pH دارد (Zhao & Riaz, 2024). علاوه بر این، ویژگی‌های بیولوژیکی و بیوشیمیایی خاک به شدت تحت تأثیر پوشش درختان قرار می‌گیرد. سیستم ریشه این گیاهان مسیرهایی را برای نفوذ آب، کاهش فرسایش و تهویه خاک ایجاد می‌کند (Eslaminejad, Heydari, Kakhki, et

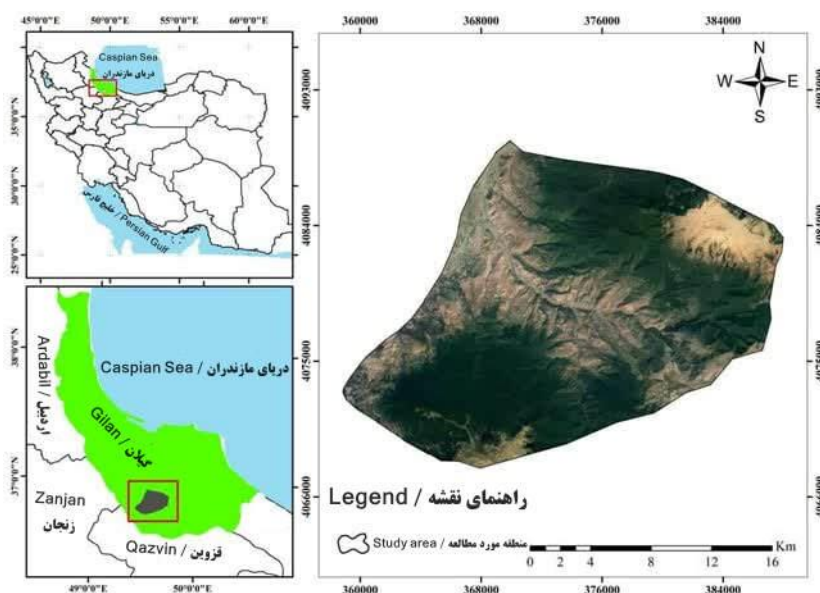
مورد مطالعه دو قطعه یک هکتاری (100×100 متر) با فواصل حداقل ۵۰۰ متر انتخاب شدند. در هر یک از قطعات یک هکتاری، تعداد ۵ نمونه (از چهار گوشه و مرکز این قطعات نمونه یک هکتاری) از لایه آلی و معدنی خاک (سطح 30×30 سانتی‌متر تا عمق ۱۰ سانتی‌متری) برداشت و در مجموع از هر یک از رویشگاه‌های مورد مطالعه تعداد ۱۰ نمونه لاشبرگ و ۱۰ نمونه خاک جهت تجزیه و تحلیل به آزمایشگاه انتقال داده شد. یک بخش از نمونه‌های خاک جهت انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی پس از هوا خشک شدن از الک ۲ میلی متری عبور داده شده و بخش دوم نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های زیستی تا زمان آزمایش در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد (Kooch & Noghre, 2020). ضخامت لایه بستر در عرصه، مقدار کربن لایه آلی (لاشبرگ یا لاشه‌ریزه) به روش احتراق (Nilsson, Wardle, & Dahlberg, 1999) و مقدار نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و مینیزیم لاشبرگ به روش معدنی‌سازی نمونه‌ها (Bremner & Mulvaney, 1982) در محیط آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. سپس، برای اندازه‌گیری رطوبت خاک قبل از هوا خشک شدن به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند (Tavakoli, Kooch, & Akbarinia, 2018). دمای خاک نیز با استفاده از دماسنج دیجیتال برای عمق مورد مطالعه در زمان نمونه‌برداری اندازه‌گیری گردید (Zancan, Trevisan, & Paoletti, 2006). به‌علاوه، جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه و جرم مخصوص حقیقی به روش پیکنومتری اندازه‌گیری و سپس تخلخل خاک محاسبه شد (Blake & Hartge, 1986).

و میانگین دمای سالانه برابر با ۲۱٫۸ درجه سانتی‌گراد برآورد شده‌است. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه، این منطقه در کلاسه مرطوب تا نیمه‌مرطوب سرد قرار می‌گیرد. در ارتفاعات پایین‌تر (۹۸۰ تا ۱۸۰۰ متر از سطح دریا)، گونه‌های جنگلی نظیر راش، ممرز، بلندمازو، افرا پلت و توسکا غالب هستند، در حالی‌که در ارتفاعات بالاتر از ۱۸۰۰ متر، گونه‌هایی همچون اوری، لور، ولیک و زرشک غلبه دارند. متوسط شیب منطقه نیز حدود ۴۵ درصد محاسبه شده‌است (Seddighi Chafjiri, Hasan Zad Navroudi, Taheri Abkenar, & Pourbabaei, 2021). توده‌های جنگلی مورد مطالعه در این تحقیق عبارتند از:

- ۱- پوشش جنگلی با غالبیت (پوشش بیش از ۹۰ درصد) اوری
- ۲- پوشش درختچه‌ای با غالبیت (پوشش بیش از ۹۰ درصد) ولیک
- ۳- پوشش درختچه‌ای با غالبیت (پوشش بیش از ۹۰ درصد) زرشک
- ۴- پوشش درختچه‌ای آمیخته ولیک (پوشش حدود ۵۰ درصد) و زرشک (پوشش حدود ۴۰ درصد)

روش نمونه‌برداری، تجزیه آزمایشگاهی لایه آلی و معدنی خاک

به‌منظور بررسی اثرات پوشش‌های اراضی بر ویژگی‌های مختلف لایه آلی و معدنی خاک، پس از بررسی‌های اولیه و بازدیدهای میدانی، بخش‌هایی از اراضی فوق‌الذکر انتخاب شد که به صورت پیوسته با هم بوده و حداقل اختلاف ارتفاع از سطح دریا، حداقل تغییر درصد و جهت شیب در آن‌ها مشاهده شد. بدین منظور در هر یک از رویشگاه‌های



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در استان گیلان، شمال ایران
Figure 1- Location of the study area in Guilan Province, Northern Iran

به روش کشت (Wollum, 1982) در محیط آزمایشگاه ثبت شد. تنفس پایه خاک با استفاده از روش بطری درسته (Bayranvand & Kooch, 2016) و تنفس برانگیخته خاک، همانند روش تنفس پایه با اضافه کردن میزان ۱ میلی لیتر گلوکز ۱ درصد برای هر نمونه خاک ۱۰ گرمی اندازه گیری شد (Anderson & Domsch, 1990). کربن و نیتروژن زی توده میکروبی خاک نیز به روش تدخین استخراج اندازه گیری شد (Brookes, Landman, Pruden, & Jenkinson, 1985). همچنین، اندازه گیری آمونیوم به روش Indophenol blue و قرائت عصاره در طول موج ۶۴۵ نانومتر توسط دستگاه طیف سنج انجام شد (که اساس آن بر واکنش بین فنل و آمونیوم است) و اندازه گیری نیترات با دستگاه فتومتر (در طول موج ۴۲۰ نانومتر) به روش نیترات صورت گرفت (Robertson, Coleman, Sollins, & Bledsoe, 1999). در نهایت، برای سنجش فرآیندهای آمونیفیکاسیون، نیتریفیکاسیون و معدنی شدن نیتروژن از روش کیسه مدفون استفاده شد (Singh, Singh, & Kashyap, 2009).

تحلیل آماری داده ها

جهت تجزیه، تحلیل و همچنین مقایسه داده ها ابتدا نرمال بودن آن ها با استفاده از آزمون کولموگروف اسمیرنوف و همگنی واریانس با آزمون لون بررسی شد. تفاوت یا عدم تفاوت مقادیر ویژگی های لایه آلی و معدنی خاک در ارتباط با پوشش های اراضی، با تجزیه واریانس یک طرفه انجام شد. در نهایت مقایسه چندگانه میانگین در نمونه های برداشتی با آزمون دانکن در نرم افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام گرفت. تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) با استفاده از زبان Python (نسخه ۳،۱۱) و پکیج Scikit-learn انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی های لایه آلی

طبق نتایج پژوهش حاضر ویژگی های ضخامت، نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم لایه آلی تغییرات معنی داری را نشان دادند. درحالی که پارامترهای کربن و نسبت کربن به نیتروژن دارای اختلاف معنی داری در بین پوشش های گیاهی اراضی نمی باشند. کمترین و بیشترین مقدار ضخامت لاشبرگ به ترتیب به پوشش درختی اوری و ولیک تعلق داشت. همچنین، بیشترین مقادیر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم لایه آلی در پوشش درختی اوری و کمترین مقادیر این ویژگی ها در پوشش درختچه ای زرشک مشاهده شد (جدول ۱). همچنین یافته های حاصل از تحلیل مؤلفه های اصلی نشان می دهد که بین نوع پوشش گیاهی و ویژگی های مرتبط با لایه آلی خاک، ارتباط

در نهایت، پایداری خاکدانه ها به روش یودر (Kemper & Rosenau, 1986) و بافت خاک به روش هیدرومتری اندازه گیری شد (Six, Callewaert, Lenders, et al., 2002). واکنش به روش پتانسیومتری از طریق دستگاه pH متر الکتریکی، هدایت الکتریکی به وسیله EC سنج، کربن آلی خاک به روش والکلی بلاک (Allison, 1975) و نیتروژن کل به روش کج لال (Bremner & Mulvaney, 1982) اندازه گیری شدند. میزان ذخیره کربن و نیتروژن بر اساس داده های کربن آلی، نیتروژن کل، جرم مخصوص ظاهری و عمق نمونه برداری خاک محاسبه شد (Wang & Wang, 2006). به علاوه، فسفر به روش اولسن (Chapman & Pratt, 1962)، پتاسیم، کلسیم و منیزیم قابل جذب خاک با استفاده از روش جذب اتمی اندازه گیری شد (Bower, Reitemeier, & Fireman, 1952). کربن و نیتروژن آلی ذره ای با روش کاهش وزن به وسیله سوزاندن تعیین شد (Nelson & Sommers, 1983). پس از تعیین مقدار خاکدانه های میکرو (ذرات کوچکتر از ۰/۲۵ میلی متر) و ماکرو (ذرات بزرگتر از ۰/۲۵ میلی متر) به روش الک تر، روش والکلی بلاک برای اندازه گیری مقادیر کربن و نیتروژن موجود در خاکدانه های میکرو و ماکرو مورد استفاده قرار گرفت (Elliott & Cambardella, 1991). کربن و نیتروژن آلی محلول به وسیله دستگاه تجزیه کربن آلی (Shimadzu TOC-550A) اندازه گیری شد. سپس، مقدار زی توده درشت ریشه ها (قطر بالای ۲ میلی متر) و ریز ریشه ها (قطر کمتر از ۲ میلی متر) در متر مربع برای هر رویشگاه به دست آمد (Neatrou, Jones, & Golladay, 2005). سپس، از روش انکوباسیون آزمایشگاهی برای سنجش فعالیت آنزیم های اوره آز، فسفاتاز، آریل سولفاتاز و اینورتاز استفاده شد (Alef & Nannipieri, 1995). برای شناسایی کرم های خاکی از روی شکل ظاهری، هر یک از آن ها ابتدا به صورت دستی از خاک جدا و پس از شستشو در آب در ظروف حاوی الکل نگهداری شد. با توجه به ویژگی های ریخت شناسی (اندازه، طول و رنگ بدن) و همچنین ویژگی هایی نظیر محل قرارگیری و شکل گلیتوم، محل قرارگیری اندام های جنسی روی سگمنت ها و گلیتوم، شکل و نوع اندام های جنسی و دیگر مشخصات ظاهری، کرم های خاکی مورد شناسایی قرار گرفت (Bayranvand & Kooch, 2016). به علاوه، نمونه های جمع آوری شده کرم های خاکی تمیز و شمارش شد، در پاکت های مقوایی قرار داده شده و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک شد و سپس وزن آن ها به وسیله ترازو تا دقت میلی گرم اندازه گیری شد (Kooch, Samadzadeh, & Hosseini, 2017). شمارش کنه ها و پادمان ها به روش قیف برلیز، نماتدهای خاکی با استفاده از تکنیک قیف بیرمن و سانتریفیوژ (Alef & Nannipieri, 1995)، پروتوزوئرها و خاک به وسیله میکروسکوپ با بزرگنمایی ۵۰۰ اندازه گیری شد (Adl, Acosta-Mercado, & Anderson, & Lynn, 2006). جمعیت باکتری ها و قارچ های خاکی

آنزیم‌هایی می‌شوند که در آزادسازی عناصر تثبیت‌شده مانند فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم مؤثر هستند. همچنین ترکیبات ترش‌ریشه می‌توانند pH خاک را به گونه‌ای تغییر دهند که دسترسی زیستی این عناصر افزایش یابد. این تعاملات، به‌ویژه در خاک‌های جنگلی تحت پوشش اوری، باعث بهبود دسترسی عناصر غذایی برای گیاه و تقویت ساختمان خاک می‌شود که در نهایت به بهبود پایداری اکوسیستم منجر می‌گردد (Sardans & Peñuelas, 2021; Wang, Jia, Qi, Li, (Degen, Han, & Shang, 2022).

ویژگی‌های معدنی خاک

طبق نتایج حاصل از تجزیه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بیشترین و کمترین مقدار درصد پایداری خاکدانه‌ها، خاکدانه درشت، خاکدانه ریز، pH، نیتروژن کل، آمونیوم، نترات، فسفر، پتاسیم، کلسیم، زی‌توده ریز ریشه، آنزیم‌های اوره آز، اسید فسفاتاز، آریل سولفاتاز و اینورتاز، نیتروژن آلی ذره‌ای، نیتروژن آلی محلول به ترتیب در پوشش درختی اوری و درختچه‌ای زرشک مشاهده شد. همچنین بیشترین مقدار نسبت کربن به نیتروژن به رویشگاه اوری و کمترین مقدار آن به پوشش آمیخته ولیک و زرشک متعلق بود.

معناداری وجود دارد. در میان پوشش‌های بررسی‌شده، درخت اوری (*Quercus macranthera*) به واسطه ویژگی‌های برگ و سیستم ریشه‌ای خود، نقش برجسته‌ای در بهبود وضعیت لایه آلی خاک ایفا کرده است. برگ‌های گونه *Quercus macranthera* از نظر ترکیب شیمیایی، به‌ویژه در میزان نیتروژن، با سایر گونه‌ها تفاوت قابل‌توجهی دارند. این برگ‌ها حاوی مقادیر بالاتری از نیتروژن هستند که این ویژگی آن‌ها را مستعد تجزیه سریع‌تر در خاک می‌سازد. ورود این برگ‌ها به خاک، موجب افزایش فعالیت میکروبی می‌گردد، چرا که میکروارگانیسم‌ها از ترکیبات نیتروژن‌دار به‌عنوان منبع انرژی و رشد بهره می‌برند. افزایش فعالیت میکروبی منجر به تسریع در فرآیندهای معدنی‌شدن و تجزیه مواد آلی می‌شود. در نتیجه، نیتروژن آلی افزایش می‌یابد. این فرآیندها در مجموع موجب افزایش غلظت نیتروژن در خاک زیرپوشش این گونه شده و شرایط حاصل‌خیزی خاک را بهبود می‌بخشند (Kim, 2007; Jordan, Ponder, Jr, & Hubbard, 2003). همچنین ریشه‌های *Quercus macranthera* با ترشح ترکیبات آلی و به‌ویژه فنولی‌ها نقش کلیدی در بهبود چرخه عناصر غذایی خاک ایفا می‌کنند. این ترکیبات از طریق تحریک میکروارگانیسم‌های خاص در ناحیه ریزوسفیر، موجب افزایش فعالیت‌های زیستی از جمله تولید

جدول ۱- مقایسه میانگین (میانگین $\pm$ انحراف معیار) ویژگی‌های لایه آلی در رویشگاه‌های مورد مطالعه

Table 1- Compare Mean for organic layer characteristics in the studied habitats

ویژگی‌های لایه آلی Organic properties	رویشگاه Habitat				تجزیه واریانس ANOVA	
	<i>Quercus macranthera</i> اوری	<i>Crataegus microphylla</i> and <i>Berberis integerrima</i> آمیخته ولیک و زرشک	<i>Crataegus microphylla</i> ولیک	<i>Berberis integerrima</i> زرشک	F-value آماره F	Sig سطح معناداری
ضخامت لاشبرگ Thickness (cm)	6.16 $\pm$ 0.83c	7.01 $\pm$ 0.53bc	27.78 $\pm$ 0.49ab	8.45 $\pm$ 0.7a	4.038	0.014
کربن لایه آلی (%) Carbon	28.55 $\pm$ 3.05a	27.69 $\pm$ 2.6a	27.78 $\pm$ 2.46a	31.78 $\pm$ 2.96a	0.479	0.698
نیتروژن لایه آلی (%) Nitrogen	2.53 $\pm$ 0.16a	1.69 $\pm$ 0.13b	1.58 $\pm$ 0.17b	1.26 $\pm$ 0.1b	7.408	0.005
نسبت کربن به نیتروژن لایه آلی C/N ratio	14.69 $\pm$ 4.01b	18.21 $\pm$ 3.48ab	18.97 $\pm$ 2.03ab	26.69 $\pm$ 3.29a	2.358	0.087
فسفر Phosphorus (%)	3.88 $\pm$ 0.16a	3.18 $\pm$ 0.17b	3.13 $\pm$ 0.25b	3.15 $\pm$ 0.19b	3.274	0.032
پتاسیم Potassium (%)	2.31 $\pm$ 0.33a	1.75 $\pm$ 0.12ab	1.6 $\pm$ 0.11b	1.43 $\pm$ 0.2b	3.077	0.039
کلسیم Calcium (%)	2.73 $\pm$ 0.42a	1.86 $\pm$ 0.12b	1.82 $\pm$ 0.21b	1.48 $\pm$ 0.16b	4.28	0.011
منیزیم Magnesium (%)	0.69 $\pm$ 0.05a	0.65 $\pm$ 0.05a	0.56 $\pm$ 0.06ab	0.43 $\pm$ 0.06b	3.483	0.025

لازم به ذکر است که سایر ویژگی‌های مورد بررسی دارای اختلاف معنی‌داری در بین رویشگاه‌های مورد مطالعه نبودند (جدول ۲).

مطابق با نتایج PCA، عناصر غذایی قابل جذب از جمله فسفر، کلسیم و پتاسیم همبستگی بالایی با نقاط مربوط به گونه اوری داشته‌اند. این نتایج نشان‌دهنده ارتباط مثبت بین پوشش درختی و افزایش عناصر غذایی در خاک است. تحلیل PCA همچنین نشان داد که ویژگی‌های فیزیکی نظیر درصد پایداری خاکدانه‌ها در مناطق با پوشش اوری وضعیت بهتری نسبت به گونه‌های ولیک و زرشک داشتند که می‌تواند ناشی از تأثیرات ساختاری ریشه باشد. پوشش درخت اوری مقادیر بالاتری از درصد پایداری خاکدانه‌ها، درصد رس، خاکدانه درشت و ریز را نشان می‌دهد که به بیوماس و سیستم ریشه عمیق‌تر نسبت داده می‌شود. این ساختار ریشه باعث تجمع بهتر خاک و کاهش فرسایش شده که منجر به بهبود پایداری خاکدانه‌ها می‌شود. خاک‌های تحت پوشش درختان به دلیل تأثیر بر ساختمان خاک (از جمله کاهش فرسایش و افزایش مواد آلی) ممکن است ترکیب متفاوت‌تری از رس، سیلت و شن داشته باشند، در حالی که میزان رس خاک معمولاً به نوع خاک و شرایط آب و هوایی بستگی دارد. اما پوشش گیاهی می‌تواند به طور غیرمستقیم و با تأثیر بر فرایندهای هیدرولوژیکی و فیزیکی خاک باعث تثبیت خاک در برابر فرسایش و حفظ ساختار خاک می‌شود (Zhou, Luukkanen, Tokola, & Nieminen, 2008; Mohammad & Adam, 2010). گونه‌ی درختی *Quercus macranthera* در مقایسه با گونه‌ی درختچه‌ای *Berberis integerrima* تأثیر مثبت‌تری بر کیفیت خاک و چرخه عناصر غذایی دارد. طبق بررسی پوربابایی و همکاران (Pourbabaei, Salehi, Ebrahimi, & Khodaparasrt, 2020)، پوشش درختان اوری به‌ویژه در ارتفاعات، با فراهم‌سازی لاشبرگ غنی‌تر و تجزیه‌پذیر، موجب افزایش کربن آلی، نیتروژن، بهبود pH و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک می‌شود. این درختان همچنین محیط مناسبی برای فعالیت‌های میکروبی و ارتقاء زیست‌توده خاک فراهم می‌کنند. در حالی که بر اساس پژوهش کوچ و نقره (Kooch & Noghre, 2020) گونه‌هایی مانند *Berberis integerrima* اگرچه نقش مهمی در حفاظت خاک و کنترل فرسایش دارند، اما به دلیل نرخ برگ‌ریزی پایین‌تر و بیومس محدود، تأثیر کمتری بر شاخص‌های شیمیایی و زیستی خاک دارند. در مجموع، برتری درختان بلند قامت و دیرزیستی همچون اوری در بهبود پایداری

اکوسیستم‌های خاکی و تسهیل چرخه عناصر غذایی، نسبت به گونه‌های درختچه‌ای، قابل توجه است (Gilhen-Baker, Roviello, Beresford-Kroeger, & Roviello, 2022). مطابق با نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، بسیاری از ویژگی‌های شیمیایی خاک، از جمله غلظت عناصر غذایی نظیر فسفر، کلسیم، نیتروژن و پتاسیم و همچنین شاخص‌هایی مانند هدایت الکتریکی، pH و فعالیت‌های مختلف آنزیمی همبستگی بالایی با نمونه‌های تحت پوشش گونه‌ی *Quercus macranthera* (اوری) داشتند. جهت‌گیری بردارهای این ویژگی‌ها در نمودار PCA نشان می‌دهد که این پارامترها به طور هم‌زمان در جهت تمایز تیپ پوششی اوری از سایر تیپ‌ها عمل کرده‌اند. بنابراین، نتایج PCA به طور واضح نقش کلیدی پوشش درختی اوری را در تقویت ویژگی‌های شیمیایی خاک و فراهمی عناصر غذایی برجسته می‌کند، و در عین حال مؤید آن است که تیپ‌های درختچه‌ای در این زمینه کارایی کمتری دارند.

از نظر شیمیایی، پوشش درخت اوری سطوح بالایی از نیتروژن، آمونیوم، نیترات، فسفر، پتاسیم و فعالیت‌های مختلف آنزیمی (مانند اوره آر و اسید فسفاتاز) را نشان می‌دهد. این اتفاق در درجه اول به دلیل نرخ‌های بالاتر تجزیه مواد آلی است که توسط فعالیت میکروبی غنی‌تر در مناطق جنگلی تسهیل می‌شود. وجود گونه‌های درختی متنوع به فرآیند چرخه عناصر غذایی پیچیده‌تر کمک می‌کند و دسترسی عناصر غذایی را در خاک افزایش می‌دهد. در مقابل، زیستگاه درختچه زرشک مقادیر کمتری را در این شاخص‌های شیمیایی نشان می‌دهد. کاهش فعالیت آنزیمی در این زیستگاه نشان‌دهنده یک جامعه میکروبی کمتر فعال است که باعث کاهش بیشتر در دسترس بودن عناصر غذایی و حاصل‌خیزی کلی خاک می‌شود (Długosz, Dębska, & Piotrowska-Długosz, 2024). درختان خزان‌کننده، مقدار قابل توجهی از لاشبرگ را تولید می‌کنند که پس از تجزیه، می‌تواند قلیایی بودن خاک را افزایش دهد. فرآیند تجزیه باعث آزاد شدن کاتیون‌های اساسی مانند کلسیم و منیزیم می‌شود که می‌توانند pH خاک را در طول زمان افزایش دهند (Bélanger & Chaput-Richard, 2023). ریشه و تاج بزرگ‌تر درختان به حفظ رطوبت خاک و تجمع مواد آلی کمک می‌کند و محیط مساعدتری برای رشد ریشه و افزایش زی‌توده ریز ریشه فراهم می‌کند (Toca, Morrison, Artz, Gimona, & Quaife, 2022).

جدول ۲- مقایسه میانگین (میانگین $\pm$ انحراف معیار) ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در رویشگاه‌های مورد مطالعه

Table 2- Compare Mean for soil physical and chemicals characteristic in the studied habitats

ویژگی‌های معدنی خاک Soil mineral properties	رویشگاه Habitat				تجزیه واریانس ANOVA	
	<i>Quercus macranthera</i> اوری	<i>Crataegus microphylla</i> and <i>Berberis integerrima</i> آمیخته ولیک و زرشک	<i>Crataegus microphylla</i> ولیک	<i>Berberis integerrima</i> زرشک	F-value آماره F	Sig. سطح معناداری
رطوبت خاک Moisture (%)	44.39 $\pm$ 1.54a	39.7 $\pm$ 3.28ab	33.34 $\pm$ 2.68bc	26.79 $\pm$ 2.05c	9.54	0.00
دمای خاک Temperature (°C)	22.14 $\pm$ 1.2a	26.3 $\pm$ 2.2bc	29.88 $\pm$ 1.95ab	32.45 $\pm$ 2.49c	4.908	0.005
جرم مخصوص ظاهری Bulk density (g cm ⁻³)	1.4 $\pm$ 0.08a	1.52 $\pm$ 0.07a	1.54 $\pm$ 0.06a	1.57 $\pm$ 0.06a	1.153	0.34
جرم مخصوص حقیقی Particle density (g cm ⁻³)	2.31 $\pm$ 0.08a	2.36 $\pm$ 0.09a	2.38 $\pm$ 0.08a	2.39 $\pm$ 0.06a	0.177	0.911
تخلخل Porosity (%)	37.73 $\pm$ 5.22a	34.66 $\pm$ 3.57a	34.36 $\pm$ 3.35a	33.33 $\pm$ 3.83a	0.216	0.884
پایداری Stability (%)	74.67 $\pm$ 2.51a	67.53 $\pm$ 2.13ab	60.96 $\pm$ 4.48b	59.79 $\pm$ 2.29b	5.192	0.004
شن Sand (%)	24.6 $\pm$ 1.66a	28.1 $\pm$ 4.22a	27.7 $\pm$ 2.78a	29.5 $\pm$ 4.7a	0.337	0.798
سیلت Silt (%)	32.3 $\pm$ 4.47a	31.1 $\pm$ 6.66a	43 $\pm$ 3.59a	39.6 $\pm$ 4.78a	1.312	0.285
رس Clay (%)	43.1 $\pm$ 4.42a	40.8 $\pm$ 4.83ab	29.3 $\pm$ 1.62c	30.9 $\pm$ 2.99bc	3.526	0.024
خاکدانه درشت Macro-aggregate (g kg ⁻¹)	53.4 $\pm$ 2.95a	43.2 $\pm$ 3.31ab	37.7 $\pm$ 6.81bc	26.8 $\pm$ 2.65c	6.722	0.001
کربن در خاکدانه درشت C in Macro-aggregate (g kg ⁻¹)	0.33 $\pm$ 0.05a	0.28 $\pm$ 0.03ab	0.22 $\pm$ 0.02ab	0.2 $\pm$ 0.02b	2.181	0.107
کربن در خاکدانه ریز C in Micro-aggregate (%)	0.22 $\pm$ 0.04a	0.18 $\pm$ 0.01a	0.17 $\pm$ 0.02a	0.14 $\pm$ 0.02a	1.348	0.274
خاکدانه ریز Micro-aggregate (%)	38.3 $\pm$ 6.52a	32.1 $\pm$ 2.22ab	24.4 $\pm$ 2.16bc	19.5 $\pm$ 2.24c	4.82	0.006
نیتروژن در خاکدانه درشت N in Macro-aggregate (g kg ⁻¹)	0.28 $\pm$ 0.04a	0.26 $\pm$ 0.04ab	0.12 $\pm$ 0.03b	0.15 $\pm$ 0.05ab	2.83	0.052
نیتروژن در خاکدانه ریز N in Micro-aggregate (g kg ⁻¹)	0.21 $\pm$ 0.04a	0.14 $\pm$ 0.05a	0.11 $\pm$ 0.02a	0.1 $\pm$ 0.02a	1.569	0.213
واکنش pH	7.02 $\pm$ 0.11a	6.89 $\pm$ 0.14a	6.19 $\pm$ 0.11b	6.03 $\pm$ 0.26b	8.36	0.00
هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	0.37 $\pm$ 0.03a	0.35 $\pm$ 0.03ab	0.29 $\pm$ 0.03ab	0.26 $\pm$ 0.03b	2.442	0.079
کربن C (%)	3.08 $\pm$ 0.21a	2.65 $\pm$ 0.33a	2.38 $\pm$ 0.34a	2.31 $\pm$ 0.4a	1.098	0.362
نیتروژن Total N (%)	0.44 $\pm$ 0.03a	0.28 $\pm$ 0.04b	0.22 $\pm$ 0.03b	0.21 $\pm$ 0.06b	5.504	0.003
نسبت کربن به نیتروژن لایه آلی C/N ratio	7.44 $\pm$ 0.81b	10.13 $\pm$ 1.37ab	11.21 $\pm$ 1.49ab	15.34 $\pm$ 3.08a	3.021	0.042
آمونیم NH ₄ (mg kg ⁻¹)	37.85 $\pm$ 2.29a	33.2 $\pm$ 3.45a	19.83 $\pm$ 0.92b	16.72 $\pm$ 1.58b	20.26	0.00
نترات NO ₃ (mg kg ⁻¹)	44.29 $\pm$ 2.85a	38.91 $\pm$ 4.06a	27.41 $\pm$ 4.03b	24.75 $\pm$ 1.85b	7.776	0.00
فسفر Available P (mg kg ⁻¹)	28.85 $\pm$ 1.65a	20.65 $\pm$ 1.78b	15.48 $\pm$ 1.24b	14.89 $\pm$ 2.85b	10.703	0.00
پتاسیم Available K (mg kg ⁻¹)	392.1 $\pm$ 19.88a	329.8 $\pm$ 27.02a	252.5 $\pm$ 30.02b	204.1 $\pm$ 27.87b	9.845	0.00
کلسیم Available Ca (mg kg ⁻¹)	267.1 $\pm$ 18.85a	229.1 $\pm$ 21.95a	122.4 $\pm$ 12b	121.4 $\pm$ 19.64b	16.235	0.00
منیزیم Available Mg (mg kg ⁻¹)	44.6 $\pm$ 5.62a	37.8 $\pm$ 5.3a	34 $\pm$ 2.37a	31.8 $\pm$ 4.81a	1.421	0.252

ویژگی‌های زیستی

طبق نتایج پژوهش حاضر بیشترین مقدار فراوانی کنه خاک‌زی، فراوانی پادمان خاک‌زی، نماد کل خاک‌زی، فراوانی پروتوزوئر خاک‌زی، جمعیت قارچ، جمعیت باکتری، تنفس پایه، تنفس میکروبی برانگیخته، زی‌توده میکروبی نیتروژن، زی‌توده میکروبی فسفر، مربوط به پوشش درختی اوری و کمترین مقدار این ویژگی‌ها متعلق به پوشش درختچه‌ای زرشک بود. اما سایر ویژگی‌های مورد بررسی از جمله فراوانی اپی‌ژئیک، زی‌توده اپی‌ژئیک، فراوانی آنسئیک، زی‌توده آنسئیک، فراوانی، اندوژئیک، زی‌توده اندوژئیک، فراوانی کل کرم‌خاکی، زی‌توده کل کرم‌خاکی، کربن زی‌توده میکروبی، نسبت زی‌توده میکروبی نیتروژن به نیتروژن کل، نسبت زی‌توده میکروبی فسفر به فسفر کل، نسبت کربن به نیتروژن زی‌توده میکروبی، نسبت زی‌توده میکروبی کربن به زی‌توده میکروبی فسفر، نسبت زی‌توده میکروبی نیتروژن به زی‌توده میکروبی فسفر، ضریب متابولیکی، سهم میکروبی، قابلیت دسترسی کربن دارای اختلاف معنی‌داری نبودند (جدول ۳).

بر اساس تحلیل PCA، شاخص‌های زیستی خاک از جمله فعالیت آنزیم‌های خاک، تنفس میکروبی و کربن زیست‌توده‌ای، بیشترین ارتباط را با نمونه‌های تحت پوشش گونه اوری داشتند، که این موضوع نشان‌دهنده فعالیت میکروبی بالاتر و فرآیندهای زیستی کارآمدتر در این تیپ پوششی است. مقادیر بالاتر برخی از ویژگی‌های خاک از جمله فراوانی فون خاک، زیست‌توده میکروبی و سرعت تنفس در زیر پوشش درختی در مقایسه با سایر پوشش‌ها اغلب به عوامل اکولوژیکی متعددی بستگی دارد، پوشش تاجی درختان یک خرد اقلیم پایدارتر را فراهم می‌کند که باعث افزایش حفظ رطوبت خاک و کاهش میزان تبخیر می‌شود. این امر برای حفظ جمعیت میکروبی و جانوری و همچنین افزایش تجمع مواد آلی از طریق بستر برگ و ترشحات ریشه بسیار مهم است. تحقیقات نشان می‌دهد که وجود درختان منجر به افزایش کیفیت و کمیت لاشبرگ می‌شود که به نوبه خود از یک جامعه میکروبی متنوع پشتیبانی می‌کند و فرآیندهای چرخه عناصر غذایی را در خاک افزایش می‌دهد (Xiang, Qiang, Liu, Liu, Ai, & Ma, 2023).

همچنین، سیستم‌های ریشه درختان در مقایسه با درختچه‌ها عمیق‌تر به خاک نفوذ می‌کنند و دسترسی بهتر به آب و عناصر غذایی را تسهیل می‌کنند. این ریشه‌زایی عمیق‌تر می‌تواند منجر به بهبود ساختمان و هوادهی خاک شود که برای فعالیت میکروبی حیاتی است (Li, Liang, Peng, Cui, Huang, & Lin, 2017). اینکه خاک زیر درختچه‌ها در مقایسه با خاک زیر درختان دمای بالاتری دارد، را می‌توان به عوامل متعددی نسبت داد که عمدتاً مربوط به تاج پوشش و اثرات خرد اقلیم است. درختچه‌ها معمولاً پوشش پوشش تاجی کمتری

نسبت به درختان دارند و اجازه می‌دهند نور خورشید بیشتری به زمین برسد که می‌تواند دمای خاک را افزایش دهد. علاوه بر این، شاخ و برگ متراکم درختان اغلب منجر به سایه بیشتر می‌شود و میزان نور مستقیم خورشید را که به سطح خاک زیر آنها نفوذ می‌کند، کاهش می‌دهد پوشش‌های درختی به‌عنوان یک پوشش طبیعی برای میکروارگانیسم‌ها عمل می‌کنند. این محیط‌ها معمولاً از اثرات مستقیم تغییرات شدید آب و هوایی مانند تابش شدید نور خورشید یا وزش باد محافظت می‌کنند، که می‌تواند باعث افزایش جمعیت میکروارگانیسم‌ها از جمله قارچ‌ها و باکتری‌ها شود (Edmondson, Stott, Davies, Gaston, & Leake, 2016).

در بررسی تغییرات معدنی شدن کربن، نتایج نشان داد که در هفته‌های دوم، چهارم، پنجم، هشتم و دوازدهم تغییرات معنی‌داری وجود داشت، در حالی که در هفته‌های اول و هفدهم این تغییرات معنی‌دار نبودند. بالاترین میزان معدنی شدن کربن در خاک تحت پوشش درخت اوری و کمترین مقدار مربوط به زرشک بود (جدول ۴). نوسانات معنی‌دار در نرخ معدنی شدن کربن طی هفته‌های مختلف می‌تواند ناشی از تغییر در دسترسی به مواد آلی قابل تجزیه، فعالیت میکروبی، و شرایط محیطی نظیر دما و رطوبت خاک باشد. در هفته‌های ابتدایی، معمولاً به‌دلیل وجود مواد آلی تازه و ساده‌تر، فعالیت میکروبی بالا بوده و در نتیجه معدنی شدن کربن به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. در مقابل، در هفته‌هایی که این منابع کاهش یافته یا شرایط برای فعالیت میکروبی نامساعد شده‌اند، ممکن است تغییرات مشاهده‌شده از نظر آماری معنی‌دار نباشد (Sharma, Setia, Rishi, Kumar, Singh, & Pateriya, 2025; Mendoza, De Neve, Deroo, Li, François, & Sleutel, 2025).

معدنی شدن بیشتر کربن در خاک‌های تحت پوشش اوری در مقایسه با سایر رویشگاه‌ها می‌توان به عوامل متعددی در ارتباط با ویژگی‌های گیاهی و پویایی میکروبی خاک نسبت داد. همانطور که اشاره شد درخت اوری، به‌عنوان یک گونه درختی، به‌طور معمول مواد آلی بیشتری را از طریق لاشبرگ و زیست‌توده ریشه به خاک وارد می‌کند، که فعالیت میکروبی را افزایش می‌دهد و منجر به افزایش میزان معدنی شدن کربن می‌شود. علاوه بر این، اثرات ریزوسفر درختان اغلب باعث ایجاد یک جامعه میکروبی متنوع‌تر و فعال‌تر می‌شود و تجزیه مواد آلی به دی اکسید کربن را تسهیل می‌کند. وجود ویژگی‌های بیوشیمیایی خاص خاک مرتبط با گونه‌های درختی، مانند اوری و سطوح بالاتر کربن آلی محلول در آب، نیز نقش مهمی در افزایش معدنی شدن کربن در این رویشگاه‌ها دارد (Uluşu & Darıcı, 2023).

جدول ۳- مقایسه میانگین (میانگین $\pm$ اشتباه معیار) ویژگی‌های زیستی خاک در رویشگاه‌های مورد مطالعه

Table 3- Compare Mean for Biology characteristic in the studied habitats

ویژگی‌های زیستی خاک Soil biological properties	رویشگاه Habitat				تجزیه واریانس ANOVA	
	<i>Quercus macranthera</i> اوری	<i>Crataegus microphylla</i> and <i>Berberis integerrima</i> آمیخته ولیک و زرشک	<i>Crataegus microphylla</i> ولیک	<i>Berberis integerrima</i> زرشک	F-value آماره F	Sig سطح معناداری
فراوانی اپی‌ژئیک Epigeic density (n m ⁻²)	1.9 $\pm$ 0.348a	1.2 $\pm$ 0.326a	1 $\pm$ 0.365a	0.8 $\pm$ 0.46a	1.583	0.21
زی‌توده اپی‌ژئیک Epigeic biomass (mg m ⁻²)	24.74 $\pm$ 4.88a	14.27 $\pm$ 4.03ab	9.73 $\pm$ 3.58b	9.48 $\pm$ 5.41b	2.476	0.077
فراوانی آنسئیک Anecic density (n m ⁻²)	2.4 $\pm$ 0.65a	1.5 $\pm$ 0.5a	1.2 $\pm$ 0.51a	0.8 $\pm$ 0.55a	1.485	0.234
زی‌توده آنسئیک Anecic biomass (mg m ⁻²)	27.92 $\pm$ 8.66a	20.3 $\pm$ 6.79a	15.41 $\pm$ 6.51a	10.06 $\pm$ 6.94a	1.086	0.367
فراوانی اندوژئیک Endogeic density (n m ⁻²)	0.9 $\pm$ 0.34a	0.6 $\pm$ 0.26a	0.5 $\pm$ 0.26a	0.2 $\pm$ 0.13a	1.181	0.33
زی‌توده اندوژئیک Endogeic biomass (mg m ⁻²)	12.07 $\pm$ 5.02a	8.23 $\pm$ 3.83a	7.25 $\pm$ 3.77a	2.14 $\pm$ 1.45a	1.187	0.328
فراوانی کل کرم‌خاکی Earthworm density (n m ⁻²)	5.2 $\pm$ 0.86a	3.3 $\pm$ 0.36ab	2.7 $\pm$ 0.95ab	1.8 $\pm$ 0.98b	2.987	0.043
زی‌توده کل کرم‌خاکی Earthworm biomass (mg m ⁻²)	64.74 $\pm$ 14.14a	42.81 $\pm$ 6.01ab	32.4 $\pm$ 11.61ab	21.69 $\pm$ 11.72b	2.654	0.063
فراوانی کنه خاک‌زی Acarina density (n m ⁻²)	61974.5 $\pm$ 8971.15a	43521.1 $\pm$ 8302.21ab	31328.9 $\pm$ 5191.73bc	20463.5 $\pm$ 2448.67c	6.948	0.00
فراوانی پادمان خاک‌زی Collembola density (n m ⁻²)	32908.4 $\pm$ 6339.69a	21936.2 $\pm$ 2294.95b	17626.7 $\pm$ 1283.15b	12149.5 $\pm$ 1471.7b	6.286	0.001
نماتد کل خاک‌زی Total nematode (in 100 gr soil)	753.4 $\pm$ 32.23a	464.3 $\pm$ 28.22b	346.3 $\pm$ 62.24bc	302.5 $\pm$ 65.76c	16.43	0.00
فراوانی پروتوزوئر خاک‌زی Protozoa density (in 100 gr soil)	453.7 $\pm$ 47.14a	312.8 $\pm$ 33.86b	209.3 $\pm$ 14.36c	206.6 $\pm$ 21.21c	13.465	0.00
جمعیت قارچ Total fungi ($\times 10^7$ g soil)	3.4 $\pm$ 0.19a	1.59 $\pm$ 0.23b	1.01 $\pm$ 0.05c	0.59 $\pm$ 0.06c	59.355	0.00
جمعیت باکتری Total bacteria ($\times 10^7$ g soil)	6.449 $\pm$ 0.49a	2.4 $\pm$ 0.21b	2.22 $\pm$ 0.34b	1.91 $\pm$ 0.21b	40.983	0.00
تنفس پایه BR (mg CO ₂ g ⁻¹ day ⁻¹)	0.55 $\pm$ 0.03a	0.41 $\pm$ 0.03a	0.26 $\pm$ 0.02c	0.23 $\pm$ 0.01c	23.746	0.00
تنفس میکروبی برآنگیخته SIR (mg CO ₂ g ⁻¹ day ⁻¹)	1.28 $\pm$ 0.12a	1.09 $\pm$ 0.08ab	0.84 $\pm$ 0.14c	0.82 $\pm$ 0.07c	3.954	0.015
زی‌توده میکروبی کربن MBC (mg kg ⁻¹)	441.1 $\pm$ 82.06a	308.2 $\pm$ 57.3ab	318.7 $\pm$ 75.68ab	201.4 $\pm$ 22.35b	2.367	0.086
زی‌توده میکروبی نیتروژن MBN (mg kg ⁻¹)	54.25 $\pm$ 6.77a	33.29 $\pm$ 4.56b	27.12 $\pm$ 4.13b	23.59 $\pm$ 3.75b	7.69	0.00
نسبت زی‌توده میکروبی نیتروژن به نیتروژن کل MBN/Total N	129.73 $\pm$ 18a	139.7 $\pm$ 29.42a	122.1 $\pm$ 9.47a	167.07 $\pm$ 25.28a	0.804	0.499
زی‌توده میکروبی فسفر MBP (mg kg ⁻¹)	67 $\pm$ 7.3a	49.2 $\pm$ 6.82b	31.4 $\pm$ 2.56c	26.7 $\pm$ 1.49c	12.418	0.00
نسبت زی‌توده میکروبی فسفر به فسفر کل MBP/ P	2.38 $\pm$ 0.32a	2.4 $\pm$ 0.3a	2.11 $\pm$ 0.22a	2.44 $\pm$ 0.45a	0.202	0.893
نسبت زی‌توده میکروبی کربن به زی‌توده میکروبی MBC/MBN ratio	10.65 $\pm$ 2.91a	9.6 $\pm$ 1.14a	12.93 $\pm$ 2.30a	9.85 $\pm$ 1.49a	0.202	0.893
نسبت زی‌توده میکروبی کربن به زی‌توده میکروبی فسفر MBC/MBP	6.81 $\pm$ 0.98a	7.81 $\pm$ 1.96a	10.9 $\pm$ 2.60a	7.65 $\pm$ 0.81a	0.529	0.664
نسبت زی‌توده میکروبی نیتروژن به زی‌توده میکروبی فسفر MBN/MBP	0.94 $\pm$ 0.17a	0.76 $\pm$ 0.12a	0.88 $\pm$ 0.11a	0.93 $\pm$ 0.18a	1.049	0.382
ضریب متابولیسمی q CO ₂	1.87 $\pm$ 0.39a	1.67 $\pm$ 0.28a	1.08 $\pm$ 0.2a	1.08 $\pm$ 0.12a	1.786	0.167

سهم میکروبی Microbial ratio	145.91 ± 27.61a	133.73 ± 28.55a	155.15 ± 34.63a	108.7 ± 18.72a	0.518	0.672
قابلیت دسترسی کربن CAI	0.45 ± 0.04a	0.4 ± 0.04a	0.43 ± 0.09a	0.32 ± 0.05a	0.814	0.494
زی توده ریز ریشه Fine root biomass (g m ⁻²)	73.58 ± 10.73a	68.24 ± 4.7a	40.22 ± 2.49b	37.55 ± 5.24b	8.129	0.00
آنزیم اسید فسفاتاز Acid phosphatase (μg PNP g ⁻¹ h ⁻¹)	317.3 ± 13.84a	222.7 ± 32.92b	213 ± 31.51b	157 ± 16.2b	6.987	0.00
آنزیم آریل سولفاتاز Arylsulphatase (μg PNP g ⁻¹ h ⁻¹)	206.4 ± 31.29a	178.3 ± 23.44ab	126.4 ± 7.33b	108.2 ± 4.97b	5.136	0.004
آنزیم اینورتاز Invertase (μg Glucose g ⁻¹ 3 h ⁻¹)	212.7 ± 28.95a	162.7 ± 30.76ab	119.7 ± 9b	100.1 ± 3.79b	5.313	0.003
نسبت آنزیم اورداز به کربن آلی Urease/OC	7.74 ± 1.73a	7.81 ± 5.12a	7 ± 3.35a	7.03 ± 3.07a	0.156	0.925
نسبت آنزیم اسید فسفاتاز به کربن آلی Acid phosphatase/OC	109 ± 35.28a	103.72 ± 74.31a	113.3 ± 79.75a	81.15 ± 32.4a	0.577	0.633
نسبت آنزیم آریل سولفاتاز به کربن آلی Arylsulfatase/OC	68.63 ± 35.11a	73.79 ± 35.78a	63.44 ± 29.64a	58.6 ± 25.99a	0.422	0.738
نسبت آنزیم اینورتاز به کربن آلی Invertase/OC	73.02 ± 37.24a	66.17 ± 39.75a	60.31 ± 32.81a	53.96 ± 24.29a	0.572	0.637
نسبت آنزیم اورداز به زی توده میکروبی کربن Urease/MBC	0.07 ± 0.03a	0.06 ± 0.03a	0.05 ± 0.04a	0.07 ± 0.03a	0.292	0.83
نسبت آنزیم اسید فسفاتاز به زی توده میکروبی کربن Acid phosphatase/MBC	1.04 ± 0.73a	1.01 ± 0.8a	0.83 ± 0.57a	0.84 ± 0.36a	0.292	0.81
نسبت آنزیم آریل سولفاتاز به زی توده میکروبی کربن Arylsulfatase/MBC	0.52 ± 0.14a	0.69 ± 0.39a	0.51 ± 0.26a	0.58 ± 0.17a	0.946	0.428
نسبت آنزیم اینورتاز به زی توده میکروبی کربن Invertase/MBC	0.61 ± 0.32a	0.57 ± 0.27a	0.47 ± 0.18a	0.54 ± 0.24a	0.528	0.665
میانگین هندسی فعالیت آنزیمی GME	1.47 ± 0.25a	1.47 ± 0.25a	1.47 ± 0.25a	1.47 ± 0.25a	0	1
کربن آلی ذره‌ای Particulate organic C (mg kg ⁻¹)	3.27 ± 0.6a	2.65 ± 0.32a	2.4 ± 0.45a	2.12 ± 0.23a	1.307	0.286
نیتروژن آلی ذره‌ای Particulate organic N (mg kg ⁻¹)	0.66 ± 0.05a	0.59 ± 0.08a	0.34 ± 0.03b	0.28 ± 0.05b	8.709	0.00
نسبت کربن به نیتروژن آلی ذره‌ای Particulate organic C/N ratio	5.08 ± 0.97a	5.81 ± 1.56a	7.69 ± 1.89a	10.66 ± 2.63a	1.778	0.168
کربن آلی محلول Dissolved organic C (mg kg ⁻¹)	23.03 ± 4.5a	20.27 ± 6.49a	15.04 ± 2.08a	14.56 ± 2.96a	0.895	0.452
نیتروژن آلی محلول Dissolved organic N (mg kg ⁻¹)	33.59 ± 4.78a	28.24 ± 3.34a	17.19 ± 1.29b	14.18 ± 1.58b	8.742	0.00
نسبت کربن به نیتروژن آلی محلول Dissolved organic C/N ratio	0.87 ± 0.22a	0.74 ± 0.19a	0.93 ± 0.17a	1.15 ± 0.28a	0.584	0.629

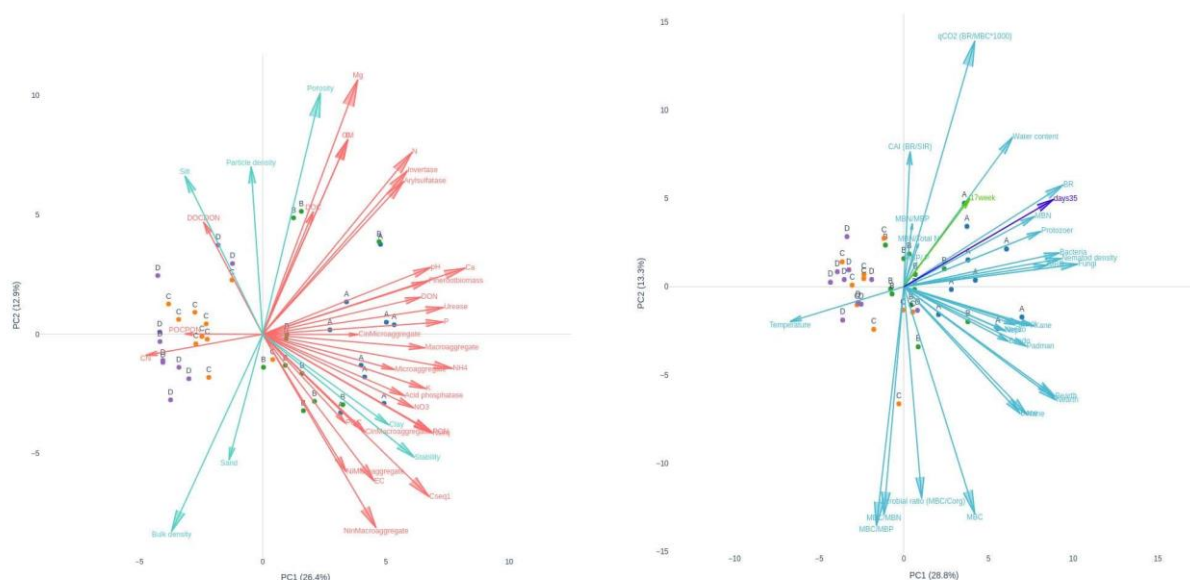
کمک می‌کند و اهمیت پوشش درختی را برای افزایش حاصل‌خیزی خاک و بهره‌وری اکوسیستم برجسته می‌کند (Yengwe, Gebremikael, Buchan, Lungu, & De Neve, 2018). همچنین نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی بیانگر آن است که نوع پوشش گیاهی اثر قابل توجهی بر ویژگی‌های مختلف خاک دارد. پوشش گیاهی اوری (A) با بهبود شاخص‌های مهمی همچون ماده آلی، فسفر، رطوبت، تنفس میکروبی و فعالیت آنزیمی بهترین عملکرد را در ارتقاء کیفیت خاک داشته است. در مقابل، تیپ‌های زرشک (C) و ولیک (D) سطوح پایین‌تری از حاصل‌خیزی خاک را از نظر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی مورد بررسی نشان دادند (شکل ۲).

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، تغییرات معنی‌داری در معدنی شدن نیتروژن در روزهای هفت، چهارده، بیست و یک، بیست و هشت و سی و پنج مشاهده شد. بالاترین میزان معدنی شدن نیتروژن مربوط به پوشش درختی اوری و کمترین آن به پوشش درختچه‌ای زرشک تعلق داشت (جدول ۴). معدنی شدن نیتروژن در خاک پوشیده از درختان به عوامل متعددی در ارتباط با فعالیت میکروبی خاک و تجزیه مواد آلی بستگی دارد. هنگامی که درختان برگ‌ها و سایر مواد آلی را به سطح خاک اضافه می‌کنند، این ورودی‌ها جمعیت میکروبی را در خاک افزایش می‌دهند که نقش مهمی در تجزیه مواد آلی و آزاد کردن نیتروژن به شکل معدنی دارد که گیاهان می‌توانند از آن استفاده کنند. این فرآیند اغلب در خاک زیر پوشش تاجی درختان بارزتر است. وجود لاشبرگ درختان به‌طور قابل توجهی به افزایش میزان نیتروژن در خاک اطراف

جدول ۴- مقایسه میانگین (میانگین $\pm$ اشتباه معیار) معدنی شدن کربن و نیتروژن در رویشگاه‌های مورد مطالعه

Table 4- Compare Mean of soil C and N mineralization in the studied habitats

معدنی شدن کربن و نیتروژن Carbon and nitrogen mineralization	رویشگاه Habitat	تجزیه واریانس ANOVA	
		F-value آماره F	Sig سطح معناداری
معدنی شدن کربن C mineralization (mg kg ⁻¹ soil)	<i>Quercus macranthera</i> اوری		
	Week 1	59.4 $\pm$ 3.52a	2.338
	Week 2	136.8 $\pm$ 7.79a	5.435
	Week 4	151.3 $\pm$ 11.51a	7.852
	Week 5	218.7 $\pm$ 21.96a	9.054
	Week 8	239.3 $\pm$ 23.04a	13.399
	Week 12	304 $\pm$ 21.23a	4.011
معدنی شدن نیتروژن N mineralization (mg kg ⁻¹ soil)	<i>Crataegus microphylla</i> و لیک		
	Week 1	55.9 $\pm$ 4.47ab	0.089
	Week 2	116.6 $\pm$ 10.88ab	0.003
	Week 4	147.8 $\pm$ 7.53a	0.00
	Week 5	202.9 $\pm$ 18.06a	0.00
	Week 8	227.2 $\pm$ 24.37a	0.00
	Week 12	279.1 $\pm$ 19.69a	0.014
معدنی شدن کربن و نیتروژن Carbon and nitrogen mineralization	<i>Crataegus microphylla</i> و لیک		
	Week 1	53.3 $\pm$ 2.8ab	0.089
	Week 2	98.9 $\pm$ 5.44b	0.003
	Week 4	121.4 $\pm$ 7.66b	0.00
	Week 5	191.2 $\pm$ 14.17a	0.00
	Week 8	121 $\pm$ 9.84b	0.00
	Week 12	283.1 $\pm$ 24.88a	0.014
معدنی شدن کربن و نیتروژن Carbon and nitrogen mineralization	<i>Berberis integerrima</i> زرشک		
	Week 1	46.4 $\pm$ 3.38b	0.089
	Week 2	96.4 $\pm$ 6.98b	0.003
	Week 4	102.5 $\pm$ 4.82b	0.00
	Week 5	107.2 $\pm$ 9.30b	0.00
	Week 8	117.5 $\pm$ 8.87b	0.00
	Week 12	207.4 $\pm$ 17.6b	0.014



شکل ۲- ارتباط پوشش‌های گیاهی مورد مطالعه: اوری (A)، آمیخته ولیک و زرشک (B)، زرشک (C) و ولیک (D) با ویژگی‌های لایه آلی، فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در آنالیز مؤلفه‌های اصلی

Figure 2- Relationship between the studied Vegetation covers: *Quercus macranthera* (A), *Berberis integerrima* and *Crataegus microphylla* (B), *Berberis integerrima* (C) and *Crataegus microphylla* (D) with the characteristics of the organic, physical and chemical, and the biological characteristics soil of the soil in principal component analysis

نتیجه گیری

به طور کلی نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تغییرات ارتفاع و نوع پوشش های گیاهی درختی و درختچه ای باعث ایجاد تغییرات معنی داری در ویژگی های لایه آلی و معدنی خاک در شهرستان رودبار استان گیلان شد. نتایج این پژوهش نشان داد که ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک در مناطق تحت پوشش درخت اوری نسبت به سایر پوشش های گیاهی بررسی شده، شرایط مساعدتری را نشان می دهند. به طوری که بیشترین مقادیر ویژگی های نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم لایه آلی در پوشش درختی اوری مشاهده شد. همچنین پوشش درختی اوری با افزایش پایداری خاکدانه ها شاخص های فرسایش پذیری را به طور قابل توجهی کاهش داده است. لازم به ذکر

است که پوشش درختی اوری نسبت به سایر پوشش های مورد بررسی موجب بهبود ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و زیستی شد. این یافته اهمیت گونه های گیاهی خاص را در شکل دهی جوامع بیولوژیکی خاک و پویایی آن ها، با پیامدهای بالقوه برای سلامت خاک و عملکرد اکوسیستم را برجسته می کند. تغییرات مشاهده شده در نرخ معدنی شدن کربن و نیتروژن بیشتر بر نقش حیاتی پوشش درختی در افزایش فرایندهای چرخه عناصر غذایی، که برای حفظ حاصل خیزی خاک ضروری هستند، تأکید می کند. در همین راستا پیشنهاد می شود در برنامه ریزی کاربری اراضی و استراتژی های مدیریت جنگل از پوشش های درختی (اوری) جهت افزایش سلامت اکولوژیکی و بهره وری خاک استفاده شود.

References

1. Adl, S.M., Acosta-Mercado, D., Anderson, T.R., & Lynn, D.H. (2006). Protozoa, supplementary material. *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 2(1), 455-470. <https://doi.org/10.1201/9781420005271.ch36>
2. Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry* (Issue 631.46 M592ma). Academic Press.
3. Allison, L.E. (1975). Organic carbon. In: Black CA. *Methods of soil analysis*. American Society of Agronomy, Part, 2.
4. Anderson, T.H., & Domsch, K.H. (1990). Application of eco-physiological quotients (qCO₂ and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Biology and Biochemistry*, 22(2), 251-255. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(90\)90094-G](https://doi.org/10.1016/0038-0717(90)90094-G)
5. Babur, E., Uslu, Ö.S., Battaglia, M.L., Diatta, A., Fahad, S., Datta, R., & Danish, S. (2021). Studying soil erosion by evaluating changes in physico-chemical properties of soils under different land-use types. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 20(3), 190-197. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.01.005>
6. Bayranvand, M., & Kooch, Y. (2016). The effect of broad-leaved tree species on abundance and diversity of earthworms in the flat forest ecosystem. *Journal of Soil Biology*, 4(1), 15-26.
7. Bélanger, N., & Chaput-Richard, C. (2023). Experimental warming of typically acidic and nutrient-poor boreal soils does not affect leaf-litter decomposition of temperate deciduous tree species. *Soil Systems*, 7(1), 14. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010014>
8. Bhattacharyya, S.S., & Furtak, K. (2022). Soil-Plant-Microbe interactions determine soil biological fertility by altering rhizospheric nutrient cycling and biocrust formation. *Sustainability*, 15(1), 625. <https://doi.org/10.3390/su15010625>
9. Blake, G.R., & Hartge, K.H. (1986). Particle density. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of soil analysis*. Part 1. Physical and mineralogical methods, 2nd ed. SSSA Book Ser. 5. ASA and SSSA, Madison, WI, 377-382. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c14>
10. Bower, C.A., Reitemeier, R.F., & Fireman, M. (1952). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Science*, 73, 251-261. <https://doi.org/10.1097/00010694-195204000-00001>
11. Bremner, J.M., & Mulvaney, C.S. (1982). Nitrogen-total total. In 'Methods of Soil Analyses. Part 2: Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy, Madison, 595-624. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c31>
12. Brookes, P.C., Landman, A., Pruden, G., & Jenkinson, D.S. (1985). Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 17(6), 837-842. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90144-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90144-0)
13. Chapman, H.D., & Pratt, P.F. (1962). Methods of analysis for soils, plants and waters. *Soil Science*, 93(1), 68. <https://doi.org/10.1097/00010694-196201000-00015>
14. Coonan, E.C., Kirkby, C.A., Kirkegaard, J.A., Amidy, M.R., Strong, C.L., & Richardson, A.E. (2020). Microorganisms and nutrient stoichiometry as mediators of soil organic matter dynamics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 117(3), 273-298. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10076-8>

15. Długosz, J., Dębska, B., & Piotrowska-Długosz, A. (2024). The effect of soil tillage systems on the soil microbial and enzymatic properties under soybean (*Glycine max* L. Merrill) cultivation—implications for sustainable soil management. *Sustainability*, 16(24), 11140. <https://doi.org/10.3390/su162411140>
16. Dolezal, J., Dvorsky, M., Kopecky, M., Liancourt, P., Hiiesalu, I., Macek, M., & Schweingruber, F. (2016). Vegetation dynamics at the upper elevational limit of vascular plants in Himalaya. *Scientific Reports*, 6(1), 24881. <https://doi.org/10.1038/srep24881>.
17. Edmondson, J.L., Stott, I., Davies, Z.G., Gaston, K.J., & Leake, J.R. (2016). Soil surface temperatures reveal moderation of the urban heat island effect by trees and shrubs. *Scientific Reports*, 6(1), 33708. <https://doi.org/10.1038/srep33708>
18. Elliott, E.T., & Cambardella, C.A. (1991). Physical separation of soil organic matter. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 34(1-4), 407-419. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(91\)90124-G](https://doi.org/10.1016/0167-8809(91)90124-G)
19. Eslaminejad, P., Heydari, M., Kakhki, F.V., Mirab-Balou, M., Omidipour, R., Muñoz-Rojas, M., & Lucas-Borja, M.E. (2020). Plant species and season influence soil physicochemical properties and microbial function in a semi-arid woodland ecosystem. *Plant and Soil*, 456, 43-59. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04691-1>.
20. Feng, Q., Yang, H., Liu, Y., Liu, Z., Xia, S., Wu, Z., & Zhang, Y. (2024). Interdisciplinary perspectives on forest ecosystems and climate interplay: a review. *Environmental Reviews*, 33, 1-21. <https://doi.org/10.1139/er-2024-0010>
21. Gerke, J. (2022). The central role of soil organic matter in soil fertility and carbon storage. *Soil Systems*, 6(2), 33. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6020033>
22. Gilhen-Baker, M., Roviello, V., Beresford-Kroeger, D., & Roviello, G.N. (2022). Old growth forests and large old trees as critical organisms connecting ecosystems and human health. A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(2), 1529-1538. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01372-y>
23. Harman, G., Khadka, R., Doni, F., & Uphoff, N. (2021). Benefits to plant health and productivity from enhancing plant microbial symbionts. *Frontiers in Plant Science*, 11, 610065. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.610065>
24. Jordan, D., Ponder, F., Jr., & Hubbard, V.C. (2003). Effects of soil compaction, forest leaf litter and nitrogen fertilizer on two oak species and microbial activity. *Applied Soil Ecology*, 23(1), 33-41. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(03\)00003-9](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(03)00003-9)
25. Kemper, W.D., & Rosenau, R.C. (1986). Aggregate stability and size distribution. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5, 425-442. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>
26. Kim, J.S. (2007). Litter decomposition and nitrogen release in three quercus species at temperate broad-leaved forest. *Forest Science and Technology*, 3(2), 123-131. <https://doi.org/10.1080/21580103.2007.9656328>
27. Kooch, Y., & Noghre, N. (2020). Nutrient cycling and soil-related processes under different land covers of semi-arid rangeland ecosystems in northern Iran. *Catena*, 193, 104621. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104621>
28. Kooch, Y., Heidari, F., Haghverdi, K., Gómez-Brandón, M., & Kartalaei, Z.M. (2024). 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>
29. Kooch, Y., Samadzadeh, B., & Hosseini, S.M. (2017). The effects of broad-leaved tree species on litter quality and soil properties in a plain forest stand. *Catena*, 150(3), 223-229. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.023>
30. Li, Z., Liang, D., Peng, Q., Cui, Z., Huang, J., & Lin, Z. (2017). Interaction between selenium and soil organic matter and its impact on soil selenium bioavailability: A review. *Geoderma*, 295, 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.02.019>
31. Liu, D., Huang, Y., An, S., Sun, H., Bhople, P., & Chen, Z. (2018). Soil physicochemical and microbial characteristics of contrasting land-use types along soil depth gradients. *Catena*, 162, 345-353. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.028>
32. Mendoza, O., De Neve, S., Deroo, H., Li, H., François, A., & Sleutel, S. (2025). Soil organic carbon mineralization is controlled by the application dose of exogenous organic matter. *Soil*, 11(1), 105-119. <https://doi.org/10.5194/soil-11-105-2025>
33. Mohamed, H. I., Sofy, M.R., Almoneafy, A.A., Abdelhamid, M.T., Basit, A., Sofy, A.R., & Abou-El-Enain, M.M. (2021). Role of microorganisms in managing soil fertility and plant nutrition in sustainable agriculture. *Plant Growth-promoting Microbes for Sustainable Biotic and Abiotic Stress Management*, 93-114. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66587-6_4
34. Mohammad, A.G., & Adam, M.A. (2010). The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses. *Catena*, 81(2), 97-103. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.01.008>
35. Moscatelli, M.C., Marabottini, R., Massaccesi, L., & Marinari, S. (2022). Soil properties changes after seven years of ground mounted photovoltaic panels in Central Italy coastal area. *Geoderma Regional*, 29, e00500. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00500>

36. Neatrour, M.A., Jones, R.H., & Golladay, S.W. (2005). Correlations between soil nutrient availability and fine-root biomass at two spatial scales in forested wetlands with contrasting hydrological regimes. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(12), 2934–2941. <https://doi.org/10.1139/x05-217>
37. Nelson, D.W.A., & Sommers, L. (1983). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 9, 539–579. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>
38. Nilsson, M.-C., Wardle, D.A., & Dahlberg, A. (1999). Effects of plant litter species composition and diversity on the boreal forest plant-soil system. *Oikos*, 16–26. <https://doi.org/10.2307/3546566>
39. Osman, K.T., & Osman, K.T. (2013). Physical properties of forest soils. *Forest Soils: Properties and Management*, 19-44. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02541-4_2
40. Poirier, V., Roumet, C., & Munson, A.D. (2018). The root of the matter: Linking root traits and soil organic matter stabilization processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 246-259. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.02.016>
41. Pourbabaie, H., Salehi, A., Ebrahimi, S.S., & Khodaparasr, F. (2020). Variations of soil physicochemical properties and vegetation cover under different altitudinal gradient, western Hyrcanean forest, north of Iran. <https://doi.org/10.17221/136/2019-JFS>
42. Qu, L., Huang, Y., Ma, K., Zhang, Y., & Biere, A. (2016). Effects of plant cover on properties of rhizosphere and inter-plant soil in a semiarid valley, SW China. *Soil Biology and Biochemistry*, 94, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.11.004>
43. Robertson, G.P., Coleman, D.C., Sollins, P., & Bledsoe, C.S. (1999). *Standard soil methods for long-term ecological research* (Vol. 2). Oxford University Press on Demand. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195120837.001.0001>
44. Sardans, J., & Peñuelas, J. (2021). Potassium control of plant functions: Ecological and agricultural implications. *Plants*, 10(2), 419. <https://doi.org/10.3390/plants10020419>
45. Seddighi Chafjiri, A.N., Hasan Zad Navroudi, I., Taheri Abkenar, K., & Pourbabaie, H. (2021). Effect of protection on quantity and quality characteristics of Persian oak (*Quercus macranthera* C. A. Mey) in Roudbar forests of Guilan province. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(11), 263-275.
46. Sharma, M., Setia, R., Rishi, M., Kumar, V., Singh, R., & Pateriya, B. (2025). Short-term carbon mineralization from soils under different land uses in northwest India. *Soil Advances*, 3, 100038. <https://doi.org/10.1016/j.soilad.2025.100038>
47. Singh, J.S., Singh, D.P., & Kashyap, A.K. (2009). A comparative account of the microbial biomass-N and N-mineralization of soils under natural forest, grassland and crop field from dry tropical region, India. *Plant Soil Environ*, 55(6), 223-230. <https://doi.org/10.17221/1021-PSE>
48. Six, J., Callewaert, P., Lenders, S., De Gryze, S., Morris, S.J., Gregorich, E.G., Paul, E.A., & Paustian, K. (2002). Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6), 1981-1987. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1981>
49. Tavakoli, M., Kooch, Y., & Akbarinia, M. (2018). Frequency and diversity of worms in topsoil of degraded and reclaimed forest habitats of the Caspian region. *Iranian Journal of Forest*, 10(3), 293–306. (In Persian)
50. Timmis, K., & Ramos, J.L. (2021). The soil crisis: the need to treat as a global health problem and the pivotal role of microbes in prophylaxis and therapy. *Microbial Biotechnology*, 14(3), 769-797. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13771>
51. Toca, L., Morrison, K., Artz, R., Gimona, A., & Quaife, T. (2022). High resolution C-band SAR backscatter response to peatland water table depth and soil moisture: a laboratory experiment. *International Journal of Remote Sensing*, 43(14), 5231-5251. <https://doi.org/10.1080/01431161.2022.2131478>
52. Tufa, M., Melese, A., & Tena, W. (2019). Effects of land use types on selected soil physical and chemical properties: The case of Kuyu District, Ethiopia. *Eurasian Journal of Soil Science*, 8(2), 94-109. <https://doi.org/10.18393/ejss.510744>
53. Ulusu, F., & Darıcı, C. (2023). The influence of tannins purified from Eastern Mediterranean Region plants (*Pinus brutia* Ten. and *Quercus coccifera* L.) on carbon mineralization: Antimicrobial and antimutagenic evaluation. *Anatolian Journal of Botany*, 7(1), 60-69. <https://doi.org/10.30616/ajb.1259084>
54. Wang, Q., & Wang, S. (2006). Microbial biomass in subtropical forest soils: effect of conversion of natural secondary broad-leaved forest to *Cunninghamia lanceolata* plantation. *Journal of Forestry Research*, 17(3), 197–200. <https://doi.org/10.1007/s11676-006-0046-9>
55. Wang, W., Jia, T., Qi, T., Li, S., Degen, A.A., Han, J., & Shang, Z. (2022). Root exudates enhanced rhizobacteria complexity and microbial carbon metabolism of toxic plants. *Iscience*, 25(10). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105243>
56. Wollum, A.G. (1982). Cultural methods for soil microorganisms. *Methods of Soil Analysis: part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 9, 781-802. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c37>

57. Xiang, T., Qiang, F., Liu, G., Liu, C., Liu, Y., Ai, N., & Ma, H. (2023). Soil quality evaluation of typical vegetation and their response to precipitation in Loess Hilly and Gully Areas. *Forests*, 14(9), 1909. <https://doi.org/10.3390/f14091909>.
58. Yengwe, J., Gebremikael, M.T., Buchan, D., Lungu, O., & De Neve, S. (2018). Effects of *Faidherbia albida* canopy and leaf litter on soil microbial communities and nitrogen mineralization in selected Zambian soils. *Agroforestry Systems*, 92, 349-363. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0063-4>
59. Zancan, S., Trevisan, R., & Paoletti, M.G. (2006). Soil algae composition under different agro-ecosystems in North-Eastern Italy. *Agric Ecosyst Environ*, 112(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.06.018>
60. Zhao, S., & Riaz, M. (2024). Plant–soil interactions and nutrient cycling dynamics in tropical rainforests. In *Environment, Climate, Plant and Vegetation Growth*, 229-264. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69417-2_8
61. Zhou, P., Luukkanen, O., Tokola, T., & Nieminen, J. (2008). Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. *Catena*, 75(3), 319-325. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.010>

Investigation on Changes in Canola (*Brassica napus*) Growth Indices Due to Soil Application of Sulfur and Selenium

F. Nourgholipour^{1*}, M. Mohammadi², H. Mir Seyed Hosseini², R. Soleimani³

1- Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran

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

2- Department of Soil Science and Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

3- Ilam Agricultural Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Ilam, Iran

Received: 28 March 2025
Revised: 18 May 2025
Accepted: 19 May 2025
Available Online: 19 May 2025

How to cite this article:

Nourgholipour, F., Mohammadi, M., Mir Seyed Hosseini, H., & Soleimani, R. (2025). Investigation on changes in canola (*Brassica napus*) growth indices due to soil application of sulfur and selenium. *Journal of Water and Soil*, 39(2), 173-191. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92811.1476>

Introduction

The global cultivation area of canola (*Brassica napus* L.) has expanded due to its adaptability to various climates and its distinct growing season compared to other oilseed crops. Additionally, its ability to be cropped in rotation with other plants, such as cereals, has contributed to its popularity. Canola has the largest cultivated area among oilseed crops in Iran. Proper consumption of nutrients is crucial for improving growth and increasing seed yield in canola plants. The use of sulfur as an essential nutrient, along with selenium in low concentrations as a beneficial nutrient, plays a significant role in enhancing plant tolerance to environmental stresses. Sulfur and selenium are both elements of group 16 of the periodic elements table and have similar physical and chemical properties, and it is believed that selenium utilizes the same pathways for sulfur immobilization and uptake in plants. Given the similarity of selenium to sulfur, sulfur metabolic pathways are shared, so the effect of selenium on growth is expected to be largely influenced by sulfur nutrition. This study aims to investigate the effects of sulfur and selenium application on nutrient absorption and their interaction on canola plant growth indices.

Materials and Methods

The experiment was conducted in greenhouse conditions as a factorial in a completely randomized design with 12 treatments and three replications. For cultivation, plastic pots with a diameter of 20 cm were utilized. Four kilograms of sieved soil were added to each pot. One hundred mg kg⁻¹ of nitrogen from urea source was applied in the pre-planting stage and 100 mg of nitrogen was applied in two stages (after establishment on day 21 and then in the stem elongation before flowering stage). Triple superphosphate at a rate of 80 mg of phosphorus per kg of soil was added to the pots in powder form before planting and iron at a rate of 5 mg kg⁻¹ in the form of iron chelate solution was added to the pots. The experimental treatments included elemental sulfur fertilizer at two levels of zero and 20 mg kg⁻¹ (inoculated with *Thiobacillus* inoculum), two sources of selenium fertilizer (sodium selenate and selenite) at three levels of zero, 30, and 60 µg kg⁻¹ in soil form before planting. The amount of sulfur and selenium available in the soil before planting was 3.8 and 0.025 mg kg⁻¹, respectively. The cultivated canola variety was Dalgan and grown in greenhouse conditions for 5 months. This cultivar is open-pollinated. The sulfur was in powder form with a purity of 99%, which was added to the soil of the sulfur-containing treatments, along with *Thiobacillus* inoculum (with a population of 1×10⁸ cells per ml) two weeks before planting. After the seed growth and maturation period (5 months), at the final stage of growth (physiological maturity with a two-digit growth code of 80), the seed components were separated from the aerial parts. The dry weight of the seed and the aerial



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

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92811.1476>

parts of the plant were weighed separately.

Results and Discussion

Sulfur application significantly increased shoot dry weight, root dry weight, leaf area, and canola grain weight compared to conditions without sulfur application (48.8% increase in shoot weight, 28.1% in root weight, 15.7% in leaf area, and 51.3% increase in grain weight). Grain weight had a correlation of 0.94** with grain sulfur uptake and 0.9** with shoot sulfur uptake. Therefore, the growth characteristics of roots, shoots, and sulfur concentration in shoots and seeds have a significant impact on grain weight. Application of selenium from selenate source resulted in higher selenium absorption in shoots and canola grain compared to selenite source. In grain, sulfur application increased selenium absorption from both sources. Grain sulfur uptake had a correlation of -0.42** with seed selenium concentration, 0.94** with seed weight, 0.86** with shoot sulfur concentration, -0.43* with shoot selenium concentration, 0.87** with shoot sulfur uptake, 0.7** with shoot weight, 0.69** with leaf area, and 0.83** with root weight. The highest grain selenium concentration was observed at the rate of 60 $\mu\text{g kg}^{-1}$ from selenate source (0.48 mg kg^{-1}). If increasing the selenium concentration of the grain is desired for enrichment purposes (from 0.12 $\mu\text{g g}^{-1}$ in the sulfur-free and selenium-free treatments), a sulfur treatment of 20 mg kg^{-1} and a selenate content of 60 $\mu\text{g kg}^{-1}$ could be considered to achieve a concentration of 0.42 $\mu\text{g g}^{-1}$. This is because the grain weight of this treatment (3.87 g pot^{-1}) was closest to the high levels of grain weight in the sulfur treatment of 20 mg kg^{-1} and selenium-free condition (4.32 g pot^{-1}).

Conclusion

Grain selenium concentrations of 0.10-0.11 mg kg^{-1} and sulfur concentrations of 0.325-0.33% produced suitable canola yield. The highest canola grain weight was obtained with a concentration of 19.86 mg kg^{-1} sulfur and 0.0267 mg kg^{-1} selenium in the soil.

Acknowledgements

We would like to thank the Soil Science Department of the Agricultural College of the University of Tehran for providing the facilities to conduct this experiment.

Keywords: Concentration and uptake, Grain, Interaction, Root, Shoot

مقاله پژوهشی

جلد ۳۹، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۴، ص. ۱۹۱-۱۷۳

بررسی تغییر برخی شاخص‌های رویشی گیاه کلزا در اثر کاربرد خاکی گوگرد و سلیوم

فریدون نورقلی پور^{۱*} - مریم محمدی^۲ - حسین میر سید حسینی^۲ - رضا سلیمانی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹

چکیده

کلزا دارای بیشترین مساحت کشت از بین گیاهان زراعی دانه روغنی در ایران است. گوگرد چهارمین عنصر ضروری مورد نیاز گیاه کلزا بعد از نیتروژن، فسفر و پتاسیم است. عنصر سلیوم به عنوان عنصر مفید برای گیاهان در نظر گرفته می شود. با توجه به شباهت سلیوم به گوگرد، مسیرهای متابولیکی گوگرد به اشتراک گذاشته می شود، بنابراین انتظار می رود اثر سلیوم بر رشد تا حد زیادی تحت اثر تغذیه با گوگرد قرار گیرد. این پژوهش با هدف بررسی تغییرات شاخص‌های رشد اندام هوایی و دانه گیاه کلزا رقم دلگان با کاربرد گوگرد و سلیوم اجرا شد. آزمایش در شرایط گلخانه، به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی و در سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل کود گوگرد عنصری در دو سطح صفر و ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم تلقیح شده با مایه تلقیح تیوباسیلوس، دو منبع کودی سلیوم (سلنات و سلنیت سدیم) در سه سطح صفر، ۳۰ و ۶۰ میکروگرم سلیوم بر کیلوگرم به صورت خاکی پیش از کشت بود. بر اساس نتایج، کاربرد گوگرد باعث افزایش معنی دار وزن خشک شاخساره و دانه کلزا نسبت به شرایط عدم کاربرد گوگرد شد (۴۸/۸ درصد افزایش در شاخساره و ۵۱/۳ درصد افزایش در دانه). میانگین غلظت گوگرد شاخساره بیشتر از غلظت گوگرد دانه بود (۰/۷۲۸ درصد در مقابل ۰/۲۴۳ درصد). کاربرد سلیوم از منبع سلنات در مقایسه با سلنیت، باعث جذب بیشتر سلیوم در اندام هوایی (۲/۹۱۸ در مقابل ۲/۳۶ میکروگرم در گلدان) و دانه کلزا (۰/۸۶ میکروگرم در گلدان در مقابل ۰/۸ میکروگرم در گلدان) شد. بیشترین میزان عملکرد دانه کلزا با غلظت ۱۹/۸۶ میلی گرم بر کیلوگرم گوگرد و ۰/۲۶۷ میلی گرم بر کیلوگرم سلیوم در خاک به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: اندام هوایی، برهمکنش، جذب، دانه، ریشه، غلظت

مقدمه

کلزا با نام علمی *Brassica napus* L. به تیره شب بو یا چلیپاییان تعلق دارد. کشت این گیاه در جهان به دلیل سازگاری اقلیمی و تفاوت زمانی فصل رشد آن با سایر گیاهان دانه روغنی، همچنین امکان کاربرد آن در تناوب زراعی با گیاهان دیگر از جمله غلات، افزایش یافته است (Frieß, Breckling, Pascher, & Schröder, 2020). دانه این گیاه دارای ۴۵-۴۰ درصد روغن است. روغن کلزا به دلیل ترکیب مناسب اسیدهای چرب غیراشباع و درصد پایین اسیدهای چرب اشباع همانند زیتون، جزء باکیفیت‌ترین روغن‌های خوراکی است

(Botella-Martínez, Pérez-Álvarez, Sayas-Barberá, Navarro Rodríguez de Vera, Fernández-López, & Viuda-Martos, 2023). بر اساس آمار جهانی در سال ۲۰۲۳ میلادی میزان تولید دانه کلزا در جهان تقریباً ۹۱/۹ میلیون تن و مساحت کشت آن ۴۳/۵ میلیون هکتار بود که بعد از دانه سویا در رده دوم گیاهان زراعی دانه روغنی قرار دارد (Statista, 2024). در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ سطح کشت این محصول در ایران حدود ۱۵۴ هزار هکتار بود (Agricultural Statistics, 2023). مصرف متعادل و مناسب عناصر غذایی می تواند باعث بهبود رشد و افزایش عملکرد دانه این گیاه گردد

۱- مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
 (*- نویسنده مسئول: Email: nourfg@yahoo.com)

۲- گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳- مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران

(Ren, Zou, Wang, Li, Cong, & Lu, 2016).

گوگرد چهارمین عنصر ضروری مورد نیاز گیاه کلزا بعد از نیتروژن، فسفر و پتاسیم است و به دلیل افزایش کاربرد کودهای بدون گوگرد و نیاز بالای گیاهان روغنی، کمبود این عنصر در خاک‌های زراعی جهان رو به افزایش است (Sharma, Cox, Oglesby, & Dhillon, 2024). به طور کلی گوگرد برای عملکرد مطلوب دانه در تمام گونه‌ها و ارقام کلزا ضروری بوده و نیاز این گیاه به گوگرد حدود سه برابر بیشتر از غلات می‌باشد (Canola council of Canada, 2024). از آنجایی که کلزا و دانه آن دارای مقدار زیادی پروتئین می‌باشند که از اسیدهای آمینه ساده گوگرددار تشکیل شده است، بنابراین، این عنصر نقش اساسی در سنتز پروتئین کلزا ایفا می‌کند. نقش مهم دیگر گوگرد، شرکت در ساختمان سولفولیپیدها است که در غشای سلول وجود دارند و درواقع روغن گیاه را تشکیل می‌دهند (Sharma et al., 2024).

سلیوم با عدد اتمی ۳۴، شصت و هفتمین عنصر فراوان در پوسته جامد زمین است که در مقادیر کم (در حدود ۰/۱ - ۲ میلی گرم بر کیلوگرم و با میانگین ۰/۴ میلی گرم بر کیلوگرم) در اغلب خاک‌ها وجود دارد (Niaik & Dubey, 2016). در خاک‌هایی که مقدار سلیوم خاک کمتر از ۰/۶ میلی گرم بر کیلوگرم است، محصولاتی تولید خواهند شد که مقدار سلیوم آن‌ها برای تغذیه دام ناکافی خواهد بود (کمتر از ۰/۱ میلی گرم در کیلوگرم محصول) (Bitterli, Bañuelos, & Schulin, 2010). ولی وقتی غلظت سلیوم خاک بیشتر از ۵ میکروگرم بر کیلوگرم باشد، کاهش قابل ملاحظه وزن ماده خشک در ذرت و خردل هندی (*Brassica juncea*) ملاحظه خواهد شد. این مقدار در خاک برای گندم ۴ و برای برنج ۱۰ میکروگرم بر کیلوگرم خاک است (Moulick, Mukherjee, Das, Roy, Majumdar, et al., 2024). در گیاه غلظت بیشتر از ۱۰۴/۸ میکروگرم بر گرم در گیاه خردل، ۷۶/۹ در ذرت و ۱۸/۹ میکروگرم در گرم ساقه گندم، باعث کاهش معنی‌دار رشد این گیاهان خواهد شد (Moulick et al., 2024). با توجه به غلظت سلیوم و نوع گونه‌ی گیاهی، این عنصر می‌تواند برای گیاهان مفید و یا سمی باشد (Abou Seeda, Yassen, Abou El-Nour, Gad Mervat, & Sahar, 2020). در بیشتر مطالعات شکل‌های سلیت (IV, Selenite) و سلمات (VI, Selenate) را به عنوان غالب‌ترین و فراوان‌ترین شکل‌های سلیوم برای جذب گیاهان مطرح کرده‌اند. تحرک و حالیت گونه‌های سلیوم در خاک و رسوبات به شدت وابسته به واکنش‌های جذب/واحد، pH، پتانسیل اکسیداسیون-احیا، مقدار ترکیبات آلی و غیر آلی و فرآیندهای انحلال می‌باشد (Alfthan, Eurola, Ekholm, Root, Korkalainen, et al., 2015). محدوده‌ی کمبود و سمیت سلیوم برای موجودات زنده بسیار باریک است. خط بحرانی تشخیص بین ضرورت و سمیت، میان موجودات زنده و حتی بین گونه‌های مختلف نیز متفاوت بوده و وابسته به سطح کاربرد و اشکال مورد استفاده سلیوم می‌باشد (Hawrylak-Nowak,

Matrasses, & Pogorzelec, 2015). سلیوم یک عنصر مفید برای گیاهان است، به طوری که در مقادیر کم و کافی به عنوان آنتی اکسیدان عمل می‌نماید (Kumar, Singh, Singh, Awasthi, et al., 2014). درحالی که در غلظت‌های بالا به عنوان فعال کننده اکسیدان عمل می‌کند (Gupta & Gupta, 2017). مطالعات انجام گرفته نشان می‌دهد که سلیوم اثر مثبتی بر افزایش تحمل گیاه به تنش‌های محیطی از جمله شوری (با اثر بر مالون دی آلدئید (MDA) در اندام هوایی، پرولین، نشت الکترولیت و سطح پراکسید هیدروژن (Hussain, Ahmed, Akram, et al., 2024)، خشکی (از طریق اثر بر ترکیبات بیوشیمیایی مختلف (Ahmad, Anjum, Skalicky, et al., 2021) و دیگر عوامل محیطی دارد (Hawrylak-Nowak, Hasanuzzaman, & Matraszek-Gawron, 2018). ولی سؤال اینجاست که آیا این ترکیبات اثر مثبتی بر رشد گیاه کلزا در شرایط طبیعی رشد دارند (شرایط بدون تنش شوری و خشکی)؟

گوگرد و سلیوم هر دو از عناصر گروه شانزدهم جدول تناوبی بوده و خواص فیزیکی و شیمیایی مشابهی دارند و اعتقاد بر آن است که سلیوم از مسیرهای آلی سازی و جذب گوگرد در گیاهان استفاده می‌کند (Gupta & Gupta, 2017). با توجه به شباهت سلیوم به گوگرد، مسیرهای متابولیکی گوگرد به اشتراک گذاشته می‌شود، بنابراین انتظار می‌رود اثر سلیوم بر رشد تا حد زیادی تحت اثر تغذیه با گوگرد قرار گیرد (Golob, Gadzo, Stibilj, et al., 2016; Tian, Hui, Thannhauser, Pan, & Li, 2017).

تصور می‌شود که علت اصلی سمیت ناشی از سلیوم در بسیاری از گیاهان جایگزینی سلیو-آمینواسیدها به جای گوگرد در پروتئین‌ها باشد که این امر باعث تاخوردگی نادرست پروتئین (protein misfolding) می‌گردد (Lima, Pilon-Smits, & Schiavon, 2018). سمیت پیشنهاد شده برای سلیوم به طور مستقیم با نسبت گوگرد به سلیوم مرتبط است (White, 2015). جذب سلیوم توسط سلول‌های ریشه از ریزوسفر توسط ناقل‌های سولفات با میل ترکیبی بالا تسهیل می‌شود. نقش این ناقلین کم است اما سهم نسبی آنها زمانی که گیاهان گوگرد کافی برای رشد ندارند، به میزان زیادی افزایش می‌یابد (White, 2015).

با توجه به نیاز گیاه کلزا به گوگرد و ضرورت برقراری تعادل در تغذیه گوگرد و سلیوم در کشت این گیاه و اطلاعات اندک در خصوص برهمکنش این عناصر بر رشد گیاه کلزا، این بررسی به منظور مشاهده اثر عنصر گوگرد بر خصوصیات کمی و کیفی گیاه کلزا در حضور شکل‌های مختلف سلیوم انجام شد. با توجه به گزارش‌های ارائه شده در خصوص اثر سلیوم بر افزایش تحمل گیاه به تنش‌های محیطی، این آزمایش به منظور بررسی اثرات آن در شرایط بدون تنش بر رشد گیاه کلزا انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های خاک

نمونه‌های خاک (عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر) از ایستگاه تحقیقات اسماعیل‌آباد قزوین (۳۶°۱۵'۱۶" شمالی و ۴۹°۵۴'۱۹" شرقی، ارتفاع ۱۲۷۸ متر) با مقدار گوگرد قابل‌دسترس پایین انتخاب گردید. در این ایستگاه مقدار بارندگی سالیانه ۳۱۵ میلی‌متر و میانگین دمای سالیانه ۹ درجه سانتی‌گراد است. بر اساس طبقه‌بندی آمریکایی، خاک به‌صورت *coarse-loamy, mixed, mesic, Typic Xerorthents* طبقه‌بندی گردید. بافت خاک (Gee & Bauder, 1986)، درصد کربن آلی (Nelson & Sommers, 1996)، عناصر غذایی کم‌مصرف (Lindsay & Norvell, 1978)، کربنات کلسیم معادل (Loeppert & Suarez, 1996)، pH و هدایت الکتریکی (Rhoades, 1982)، پتاسیم قابل جذب (Sparks, Page, Helmke, et al., 1996) و فسفر قابل جذب خاک (Olsen & Sommers, 1982)، پیش از کشت اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری سولفات در عصاره خاک با روش مونو کلسیم فسفات (۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل UNICO-2000 در طول موج ۴۲۰ نانومتر انجام گرفت (Schulte & Eik, 1988). اندازه‌گیری سلیوم قابل جذب خاک با کاربرد روش آمونیوم بی‌کربنات DTPA انجام گرفت (Soltanpour & Workman, 1980). عصاره‌گیری با کاربرد محلول AB-DTPA انجام شد و با دستگاه ICP-AES مدل MPX قرائت نمونه‌ها صورت گرفت.

نتایج تجزیه خاک

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده‌شده در آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار سلیوم قابل جذب خاک ۰/۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که مقدار آن کمتر از محدوده آلودگی خاک برای این عنصر می‌باشد (Bowie & Thornton, 1985). خاک انتخاب‌شده قلیایی، بدون محدودیت شوری، دارای کربن آلی خیلی کم، بافت سبک

و مقدار فسفر و گوگرد قابل‌دسترس کم بود. کمبود آهن و منگنز قابل جذب نیز در خاک وجود دارد.

تیمارهای آزمایش

آزمایش در شرایط گلخانه و به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی (factorial CRD) با ۱۲ تیمار و در سه تکرار و با ۳۶ واحد آزمایشی (گلدان) در اتاق رشد پردیس کشاورزی دانشگاه تهران واقع در کرج انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل دو سطح گوگرد صفر و 20 mg kg^{-1} و دو منبع سلیوم (سلنات سدیم $(\text{Na}_2 \text{SeO}_4)$ و سلیت سدیم $(\text{Na}_2 \text{SeO}_3)$) در سه مقدار سلیوم شامل تیمار صفر، تیمار $30 \text{ } \mu\text{g kg}^{-1}$ و تیمار $60 \text{ } \mu\text{g Se kg}^{-1}$ انجام شد. سلیوم به‌صورت خاکی پیش از کشت استفاده شد. کلزای کشت شده رقم دلگان و کشت در شرایط گلخانه‌ای به‌مدت ۵ ماه، انجام شد. گوگرد استفاده شده به صورت پودری با درجه خلوص ۹۹ درصد بود که به همراه مایه تلقیح باکتری تیوباسیلوس (با جمعیت 10^8 سلول در هر میلی‌لیتر) تهیه شده از مؤسسه تحقیقات خاک و آب کرج، دو هفته قبل از کشت به خاک تیمارهای حاوی گوگرد اضافه شد.

آماده سازی گلدان‌ها و کشت گیاهان

در کشت گلخانه‌ای از گلدان‌های پلاستیکی با قطر دهانه ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. به هر گلدان ۴ کیلوگرم خاک الک شده اضافه گردید و در کف گلدان‌ها، کاغذ صافی گذاشته و سپس با خاک پر شد. ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن از منبع اوره در مرحله پیش‌کشت و ۱۰۰ میلی‌گرم نیتروژن در دو مرحله شامل پس از استقرار در روز ۲۱ و سپس مرحله انتهای ساقه دهی-قبل گلدهی) مصرف شد. سوپر فسفات تریپل به مقدار ۸۰ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک پیش از کشت به‌صورت پودری و آهن نیز به مقدار ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌صورت محلول از کیلیت آهن به گلدان‌ها اضافه شد.

جدول ۱- برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده‌شده قبل از کشت

Table 1- Some physical and chemical properties of the soil before planting

CCE	OC	EC	pH	N _{Total}	SP	Soil texture	Clay	Silt	Sand
کربنات کلسیم معادل	کربن آلی	قابلیت هدایت الکتریکی	اسیدیته	نیتروژن	درصد اشباع	بافت خاک	رسی	سیلت	شن
(%)		(dS m ⁻¹)		(%)	(%)			(%)	
4.43	0.37	0.65	7.88	0.041	30	Sandy loam	11	19	70
*Cu	Mn	Zn	Fe	Pb	Cd	Se _{ava}	K _{ava}	P _{ava}	S _{ava}
مس	منگنز	روی	آهن	سرب	کادمیم	سلیوم	پتاسیم	فسفر	گوگرد
(mg kg ⁻¹)									
1	4.3	1	1.45	0.23	0.014	0.025	259	5.6	3.68

هوایی گیاه و نیز دانه کلزا، مورد بررسی قرار گرفت. غلظت عناصر در شاخساره و دانه کلزا، جداگانه قرائت شد.

نتایج و بحث

اثر تیمارهای آزمایش بر وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه و شاخص سطح برگ

با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۲) اثر اصلی سطح گوگرد و اثر اصلی سطح سلیوم بر وزن خشک شاخساره ($P < 0.05$) معنی‌دار بود. اثر متقابل سطح گوگرد $\times$ سطح سلیوم $\times$ منبع سلیوم بر وزن خشک ریشه ($P < 0.01$) و شاخص سطح برگ ($P < 0.01$) معنی‌دار بود. با توجه به نتایج (شکل ۱ا)، کاربرد گوگرد (۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) باعث افزایش معنی‌دار وزن خشک شاخساره گیاه کلزا شد (۴۸/۸ درصد). در تیمارهایی که گوگرد در آنها استفاده شده بود، مقدار گوگرد قابل جذب خاک (در نمونه خاک پس از برداشت گیاه) به ۲۰/۶۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم رسید در حالی که مقدار آن در نمونه خاک شاهد (بدون گوگرد) ۸/۶۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. بر اساس مطالعات فیض اله زاده اردبیلی (Faizolah Zadeh Ardabili, 2013) با عصاره گیر مونیو کلسیم فسفات (۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر فسفر)، حد بحرانی گوگرد قابل جذب خاک به روش تصویری کیت و نلسون در کشت گلخانه‌ای ۲۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم بدست آمد و با کاربرد ۱۵ و ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گوگرد به خاک، وزن خشک کلزا به ترتیب ۱۳/۷ و ۲۲ درصد نسبت به شاهد بدون کاربرد گوگرد افزایش یافت. با توجه به این که در مطالعه فعلی از روش مونیو کلسیم فسفات برای اندازه گیری گوگرد قابل جذب خاک استفاده شد، مقدار گوگرد قابل جذب خاک در تیمار شاهد (بدون گوگرد) کمتر از حد بحرانی ارائه شده برای این گیاه است. هر چه تجمع گوگرد در بافت گیاهی بیشتر باشد تخصیص این عنصر به وظایف ضروری گیاه از جمله اثر محافظتی در برابر تنش‌ها و همچنین تولید روغن افزایش می‌یابد. مقدار کافی گوگرد به شکل سولفات در خاک به صورت قابل توجهی رشد رویشی و تولید ماده خشک را افزایش می‌دهد (Mohammad, Al-Mohammad, & Mustafa, 2024). این افزایش می‌تواند از طریق افزایش مقدار کلروفیل و افزایش فعالیت فتوسنتزی در گیاه کلزا حاصل گردد (Chaudhary, Sindhu, Dhanker, & Kumari, 2023). کاربرد سلیوم در سطح ۶۰ میکروگرم در کیلوگرم خاک، باعث افزایش وزن خشک شاخساره نسبت به تیمار بدون سلیوم شد (۹/۷ درصد) (شکل ۱ب). اختلاف تیمار ۳۰ میکروگرم در کیلوگرم خاک، با تیمار شاهد معنی‌دار نبود. چون مسیر جذب سلنات و سلنیت به ترتیب از طریق ناقلین سولفات و فسفات انجام می‌شود، تفاوت در فعالیت این ناقلین می‌تواند بر مقدار جذب سلیوم مؤثر باشد (Nie, Luo, Ma, et al., 2024). نتایج تحقیقات روی اسفناج نیز افزایش عملکرد وزن خشک گیاه را با کاربرد ۱۰ و ۲۰

تیمارهای گوگرد و مایه تلقیح تیوباسیلوس و تیمارهای سلیوم با توجه به نوع تیمار به گلدان‌ها اضافه شد. ۱۰ بذر در هر گلدان کشت شد. آبیاری گلدان‌ها با توزین آن‌ها و در حد ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه در طول دوره رشد صورت گرفت. پس از استقرار گیاهان، تعداد بوته‌ها به ۴ عدد در هر گلدان کاهش یافت. در طول دوره رشد، دمای گلخانه در محدوده ۲۰-۲۲ درجه سانتی‌گراد در ابتدای رشد بود و در انتهای دوره رشد (مرحله زایشی) به حدود ۲۴-۲۸ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. ساعات روشنایی با توجه به دوره رشد بین ۱۲ تا ۱۶ ساعت در روز بود.

ویژگی‌های اندازه گیری شده گیاه

پس از سپری شدن دوره رشد و رسیدگی دانه‌ها (۵ ماه)، در مرحله انتهایی رشد (رسیدگی فیزیولوژیک با کد دورقمی رشد ۸۰) (Bleiholder, Weber, Lancashire, et al., 2001) اجزای دانه از اندام هوایی تفکیک شد. وزن خشک دانه و اندام هوایی گیاه، جداگانه توزین شد. نمونه‌های دو قسمت اندام هوایی و دانه در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت خشک شد. وزن خشک نمونه‌ها اندازه‌گیری گردید. سطح برگ با کاربرد دستگاه تعیین سطح برگ مدل CI 202 Area Meter CID, Inc USA اندازه‌گیری شد. شاخص سطح برگ از تقسیم سطح برگ به سطح سایه‌انداز (سطح گلدان) به دست آمد. غلظت و جذب عناصر سلیوم و گوگرد در شاخساره و دانه محاسبه شد. برای این منظور غلظت عنصر مربوطه در گرم وزن خشک شاخساره و دانه هر کدام به صورت جداگانه، محاسبه گردید. غلظت عناصر پرمصرف و ثانویه به صورت درصد و غلظت عناصر کم‌مصرف به صورت میلی‌گرم بر کیلوگرم محاسبه شد. همچنین میزان جذب هر عنصر، حاصل ضرب غلظت آن عنصر در عملکرد گیاه بود. مقدار گوگرد کل در نمونه‌های گیاهی به روش برینزا و همکاران (Brienza, Sartini, Neto, & Zagatto, 1995) در طول موج ۴۲۰ نانومتر قرائت شد. قرائت سلیوم کل در نمونه‌های گیاه با روش هضم تر با کاربرد پراکسید هیدروژن و اسید نیتریک انجام شد (Szeles, 2007). میزان سلیوم عصاره‌ها با دستگاه ICP-AES مدل MPX قرائت شد.

تحلیل آماری

برای تجزیه آماری نتایج از نرم‌افزار SAS 9.4 (SAS institute, USA NC, Cary) استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها در سطح ۵ درصد به روش آزمون دانکن برای نتایجی که اثرات تیمارها بر آن‌ها در جدول تجزیه واریانس معنی‌دار شده بود، انجام شد. رسم شکل‌ها با استفاده از نرم‌افزار اکسل انجام شد.

نتایج تجزیه نمونه خاک پیش از کشت، اثر تیمارهای آزمایش بر شاخص‌های رشدی، غلظت و جذب عناصر سلیوم و گوگرد در اندام

مؤثر نخواهد بود. در شرایط کاربرد گوگرد، تأمین سلیوم (۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم) برای افزایش رشد ریشه کلزا مؤثر خواهد بود. سلیوم در مقایسه با عناصری چون سرب، کادمیوم، نیکل و کروم، عمدتاً در اندام هوایی انباشته می‌شود تا اینکه در ریشه انباشته شود (Cabannes, Buchner, Broadley, & Hawkesford, 2011). وایت و همکاران (White, 2015) بیان کردند که جذب سلنات به وسیله ریشه‌ها و توزیع آن در گیاهان، بسیار سریع‌تر از سلنیت است. وزن خشک ریشه بیشترین همبستگی را با جذب گوگرد دانه و جذب گوگرد اندام هوایی کلزا داشت (**۰/۹۳ و **۰/۸). همبستگی آن با غلظت گوگرد شاخساره **۰/۷۶، با وزن خشک اندام هوایی **۰/۷۶، با وزن دانه **۰/۷۹ و با غلظت گوگرد دانه **۰/۷۳ و با سطح برگ *۰/۳۷ بود.

در شرایط بدون مصرف گوگرد، کمترین شاخص سطح برگ از مصرف سلیوم از منبع سلنیت (۳۰ و ۶۰ میکروگرم در گلدان) مشاهده شد (۱۵/۷ درصد کاهش نسبت به تیمار بدون گوگرد و سلیوم) و سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری با شاهد نداشتند. در شرایط کاربرد گوگرد، بیشترین مقدار شاخص سطح برگ از تیمار ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم گوگرد و بدون سلیوم حاصل شد. کاربرد سلیوم در تیمارهای محتوی گوگرد، باعث کاهش سطح برگ شد. شاخص سطح برگ کلزا با غلظت و جذب گوگرد دانه دارای همبستگی **۰/۶۹، با وزن دانه **۰/۶۱، با غلظت و جذب گوگرد شاخساره **۰/۴۶، با وزن ریشه *۰/۳۷ و با سلیوم دانه دارای همبستگی *۰/۳۷- بود. پس همانند وزن خشک اندام هوایی و ریشه، اثر غلظت گوگرد اندام هوایی و وزن ریشه بر این شاخص (سطح برگ) مثبت است.

میلی گرم بر لیتر سلنیت سدیم نشان داد اما با افزایش به سطح ۳۰ میلی گرم بر لیتر، اثر کاهشی داشت (Fouda, 2016). نتایج تحقیقات شارما و همکاران (Sharma, Bansel, & Dhillon, 2010) نشان داد که وزن ماده خشک در کلزای تیمار شده با سلنات سدیم در مراحل روزت و گلدهی در مقایسه با تیمارهای شاهد و کلزای تیمار شده با سلنیت سدیم، کاهش یافته بود. وزن خشک اندام هوایی کلزا با مقدار جذب گوگرد در شاخساره، بیشترین همبستگی را داشت (**۰/۹). همبستگی این شاخص با غلظت گوگرد شاخساره **۰/۷، با وزن خشک ریشه **۰/۷۶، با غلظت و جذب گوگرد دانه **۰/۵۳ و **۰/۷ و با وزن دانه کلزا **۰/۸ و با جذب سلیوم دانه *۰/۴۳ بود. پس غلظت گوگرد اندام هوایی و وضعیت رشد ریشه به نحو مؤثری بر این شاخص مؤثر بود.

با توجه به نتایج (شکل ۱c)، وزن خشک ریشه در تیمارهای محتوی گوگرد بیشتر از تیمارهای بدون گوگرد بود (معادل ۲۸/۱ درصد افزایش). در شرایط بدون گوگرد بیشترین وزن خشک ریشه از تیمار ۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلنیت به دست آمد. ولی کاربرد گوگرد به مقدار ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم، همراه با کاربرد ۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم از منبع سلنات باعث تولید بیشترین وزن خشک ریشه شد که اختلاف آن با شاهد (دارای گوگرد و بدون سلیوم) ۱۵ درصد بود. در تیمارهای دیگر محتوی گوگرد، کاربرد سلیوم باعث کاهش وزن خشک ریشه شد. پس در زمان عدم استفاده از گوگرد می‌توان ۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلیوم از منبع سلنیت را برای بهبود رشد ریشه مصرف نمود ولی سلنات

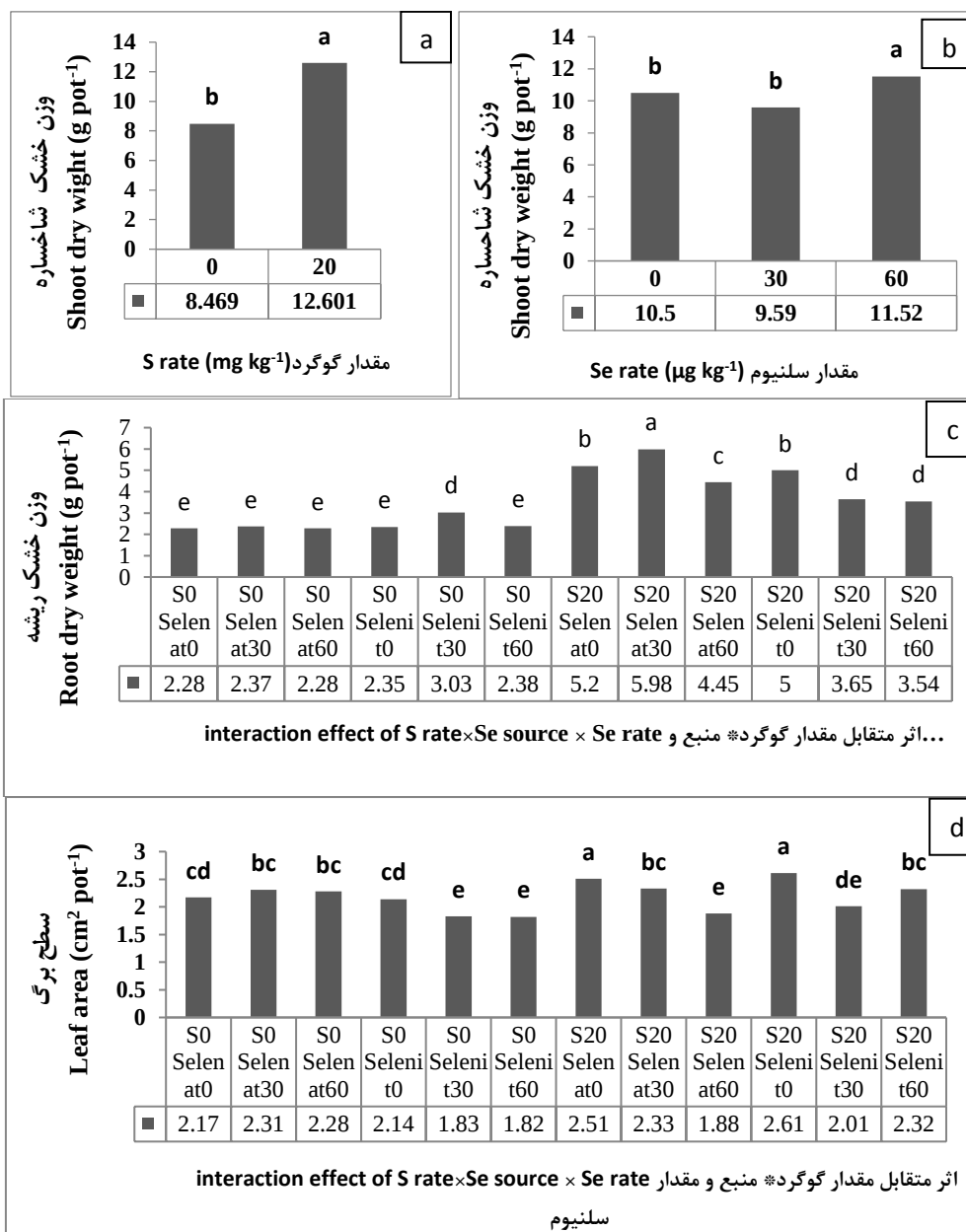
جدول ۲- تجزیه واریانس ویژگی‌های رشدی گیاه کلزا

Table 2- Analysis of variance of growth characteristics of canola plant

منابع تغییرات Source of variance	درجه آزادی df	شاخص سطح برگ Leaf area index	وزن خشک ریشه Root dry weight	وزن خشک شاخساره Shoot dry weight
سطح گوگرد S rate	1	0.255**	40.24**	153.594**
شکل سلیوم Se form	1	0.1001*	2.331**	1.979ns
سطح سلیوم Se rate	2	0.224**	1.1334**	11.186**
سطح گوگرد*شکل سلیوم Se form* S rate	1	0.407**	5.538**	4.23 ^{ns}
سطح گوگرد*سطح سلیوم S rate* Se rate	2	0.081*	0.594*	3.556 ^{ns}
شکل سلیوم*سطح سلیوم Se rate *Se form	2	0.205**	0.242 ^{ns}	0.149 ^{ns}
سطح گوگرد*شکل سلیوم*سطح سلیوم S rate*Se rate*Se form	2	0.1247**	1.146**	0.267 ^{ns}
خطا Error	24	0.0174	0.149	1.220
ضریب تغییرات C.V. (%)	-	6.1	11.0	10.5

علامت ** و * بیانگر معنی‌داری تیمارها در سطح ۱ و ۵ درصد و ns بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها

** and * indicates the significance of the treatments at the 1 and 5 percent levels, and ^{ns} indicates no significant difference between the treatments.



شکل ۱- اثر تیمارها بر وزن خشک شاخساره، وزن خشک ریشه و شاخص سطح برگ

(ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن)

Figure 1- Effect of treatments on shoot dry weight, root dry weight and leaf area index

Columns with at least one common letter do not have significant differences at the 5% level of Duncan's test

اثر تیمارهای آزمایش بر غلظت و جذب گوگرد اندام هوایی گیاه کلزا

کاربرد گوگرد به مقدار ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم باعث افزایش معنی دار غلظت گوگرد اندام هوایی کلزا شد (معادل ۸۵ درصد افزایش) (شکل ۱a). در شرایط مصرف گوگرد، کاربرد هر دو سطح ۳۰ و ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلنیوم، باعث کاهش غلظت گوگرد اندام هوایی کلزا نسبت به شاهد شد (به ترتیب ۲۳/۲ و ۱۸/۴ درصد). این امر می‌تواند ناشی از

اثر تیمارها بر غلظت و جذب عناصر گوگرد و سلنیوم در شاخساره گیاه کلزا

با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) اثر متقابل دو گانه سطح گوگرد × سطح سلنیوم ($P < 0.01$) و منبع سلنیوم × سطح سلنیوم ($P < 0.05$) بر شاخص غلظت گوگرد اندام هوایی کلزا، معنی‌دار بود. اثر متقابل دو گانه سطح گوگرد × سطح سلنیوم ($P < 0.01$) بر مقدار جذب گوگرد اندام هوایی کلزا، معنی‌دار بود.

۰/۶۴** و همبستگی آن با جذب گوگرد دانه ۰/۸۶** بود. با توجه به نتایج (شکل ۴۱) با کاربرد گوگرد جذب گوگرد توسط گیاه افزایش یافت (از ۵۱/۶ میلی گرم در گلدان به ۱۴۲/۶ میلی گرم در گلدان). هم در تیمار عدم کاربرد گوگرد و هم در زمان استفاده از گوگرد، کاربرد سلیوم باعث کاهش جذب گوگرد در اندام هوایی شد. جذب گوگرد اندام هوایی با شاخص وزن خشک ریشه دارای همبستگی ۰/۸**، با وزن شاخساره ۰/۹** با سطح برگ ۰/۴۶*، با غلظت گوگرد شاخساره ۰/۹۴** با غلظت سلیوم شاخساره ۰/۴*، با غلظت گوگرد دانه ۰/۷۴**، با وزن دانه ۰/۹**، جذب گوگرد دانه ۰/۸۷** بود.

اثر تیمارهای آزمایش بر غلظت و جذب سلیوم اندام هوایی گیاه کلزا

در خاک استفاده شده در این آزمایش مقدار سلیوم خاک پس از برداشت در منبع سلیت ۰/۰۳۹۲ میلی گرم بر کیلوگرم و در منبع سلیت ۰/۰۳۷۸ میلی گرم بر کیلوگرم بود. مقدار سلیوم خاک در سطوح ۰، ۳۰ و ۶۰ میکروگرم در کیلوگرم سلیوم استفاده شده نیز به ترتیب ۰/۰۲۵، ۰/۰۴۱ و ۰/۰۵ میلی گرم بر کیلوگرم بود.

اثر متقابل بین سلیوم و گوگرد در گیاه باشد. در شرایط بدون کاربرد گوگرد استفاده از سلیوم در سطح ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم، باعث کاهش معنی دار غلظت گوگرد اندام هوایی گیاه شد (۶۳/۴ درصد) ولی در سطح ۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم، غلظت گوگرد را کاهش نداد. با کاربرد هر دو منبع سلیوم، غلظت گوگرد اندام هوایی نسبت به تیمار بدون گوگرد کاهش یافت (در هر دو سطح ۳۰ و ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلیوم). مقدار کاهش غلظت گوگرد در سطح ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلیوم از منبع سلیت بیشتر از منبع سلیت بود (شکل ۴۲). در مطالعات هاوریلاک-نواک (Hawrylak-Nowak, 2013) دو منبع مختلف سلیت و سلیت و مقدار مختلف آنها به نحو متفاوتی بر غلظت گوگرد گیاه کاهو اثر گذاشتند. نتایج آنها نشان داد که وجود سلیوم در محیط رشد (غلظت ۱۵ میلی مولار) می تواند بر تجمع و توزیع گوگرد بین ریشه ها و اندام های هوایی کاهو به روش های متفاوتی برای دو منبع سلیت و سلیت مؤثر باشد. غلظت گوگرد اندام هوایی با شاخص وزن خشک ریشه دارای همبستگی ۰/۷۶**، با وزن شاخساره ۰/۷۱** با سطح برگ ۰/۴۷*، با غلظت سلیوم شاخساره ۰/۶۴**، با جذب سلیوم شاخساره ۰/۳۶*، با غلظت گوگرد دانه ۰/۷۹**، با غلظت سلیوم دانه ۰/۵۲*، با وزن دانه ۰/۸۴**، غلظت سلیوم شاخساره

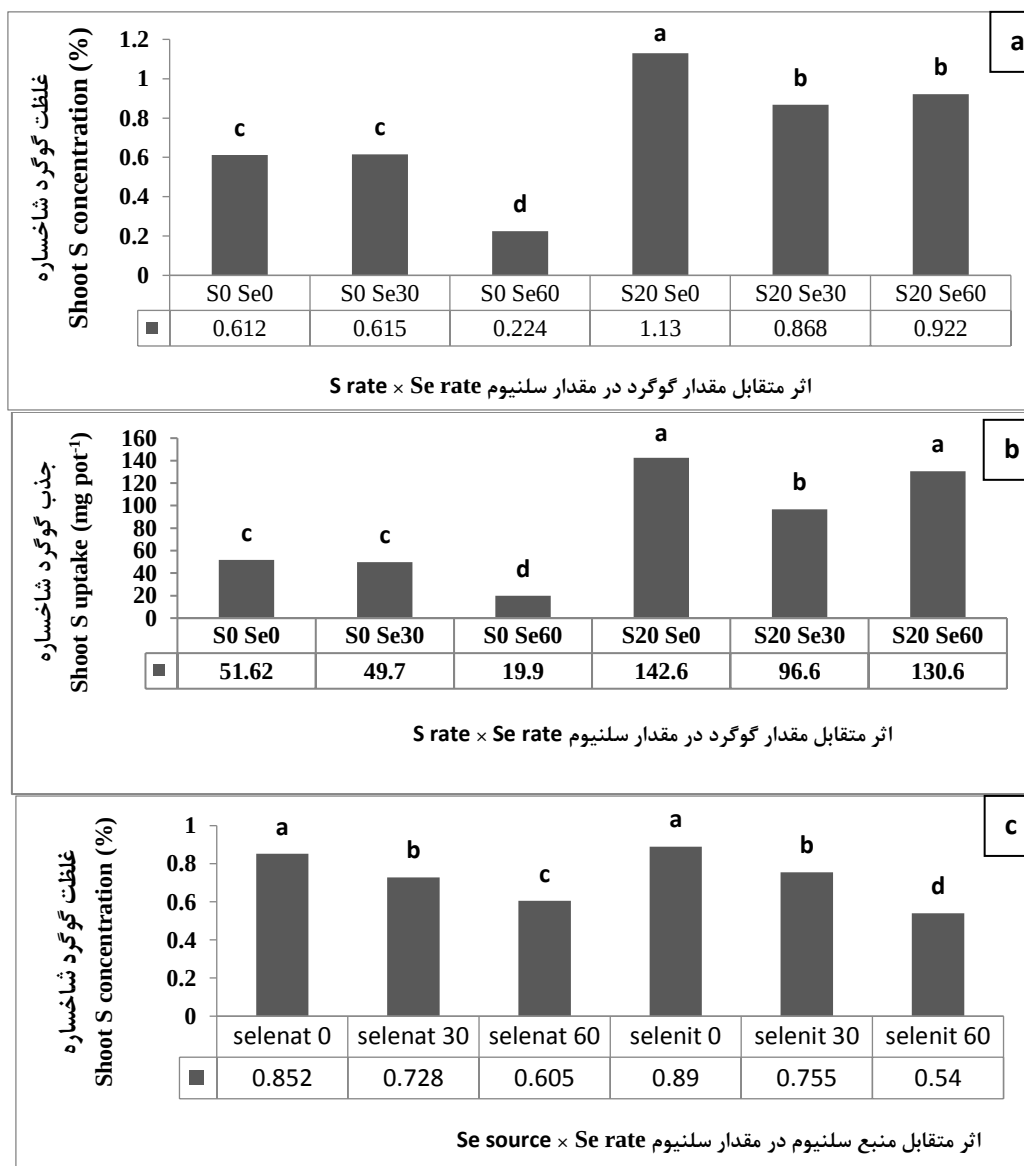
جدول ۳- تجزیه واریانس خصوصیات غلظت و جذب عناصر در شاخساره گیاه کلزا

Table 3- Analysis of variance of concentration and absorption of nutrients in canola shoot

منابع تغییرات Source of variance	درجه آزادی df	جذب سلیوم Se uptake	غلظت سلیوم Se concentration	جذب گوگرد S uptake	غلظت گوگرد S concentration
سطح گوگرد S rate	1	0.09 ^{ns}	0.081**	61794.8**	2.1603**
شکل سلیوم Se form	1	2.804**	0.0202**	225.04 ^{ns}	0.000003 ^{ns}
سطح سلیوم Se rate	2	66.63**	0.518**	2106.9**	0.268**
سطح گوگرد*شکل سلیوم Se form* S rate	1	0.049 ^{ns}	0.0027**	264.3 ^{ns}	0.0002 ^{ns}
سطح گوگرد*سطح سلیوم S rate* Se rate	2	0.038 ^{ns}	0.027**	3190.1**	0.150**
شکل سلیوم*سطح سلیوم Se rate *Se form	2	0.748 ^{ns}	0.005**	107.17 ^{ns}	0.0096*
سطح گوگرد*شکل سلیوم S rate*Se form	2	0.008 ^{ns}	0.0008 ^{ns}	8.18 ^{ns}	0.004 ^{ns}
خطا Error	24	0.259	0.0003	215.4	0.003
ضریب تغییرات C.V. (%)	-	19	7.2	17.9	6.9

علامت ** و * بیانگر معنی داری تیمارها در سطح ۱ و ۵ درصد و ^{ns} بیانگر عدم اختلاف معنی دار بین تیمارها

** and * indicates the significance of the treatments at the 1 and 5 percent levels, and ^{ns} indicates no significant difference between the treatments



شکل ۲- اثر متقابل تیمارها بر غلظت و جذب گوگرد اندام هوایی کلزا

(ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن)

Figure 2- Effect of treatments on sulfur concentration and uptake in rapeseed shoots
Columns with at least one common letter have no significant difference at the 5% Duncan test level

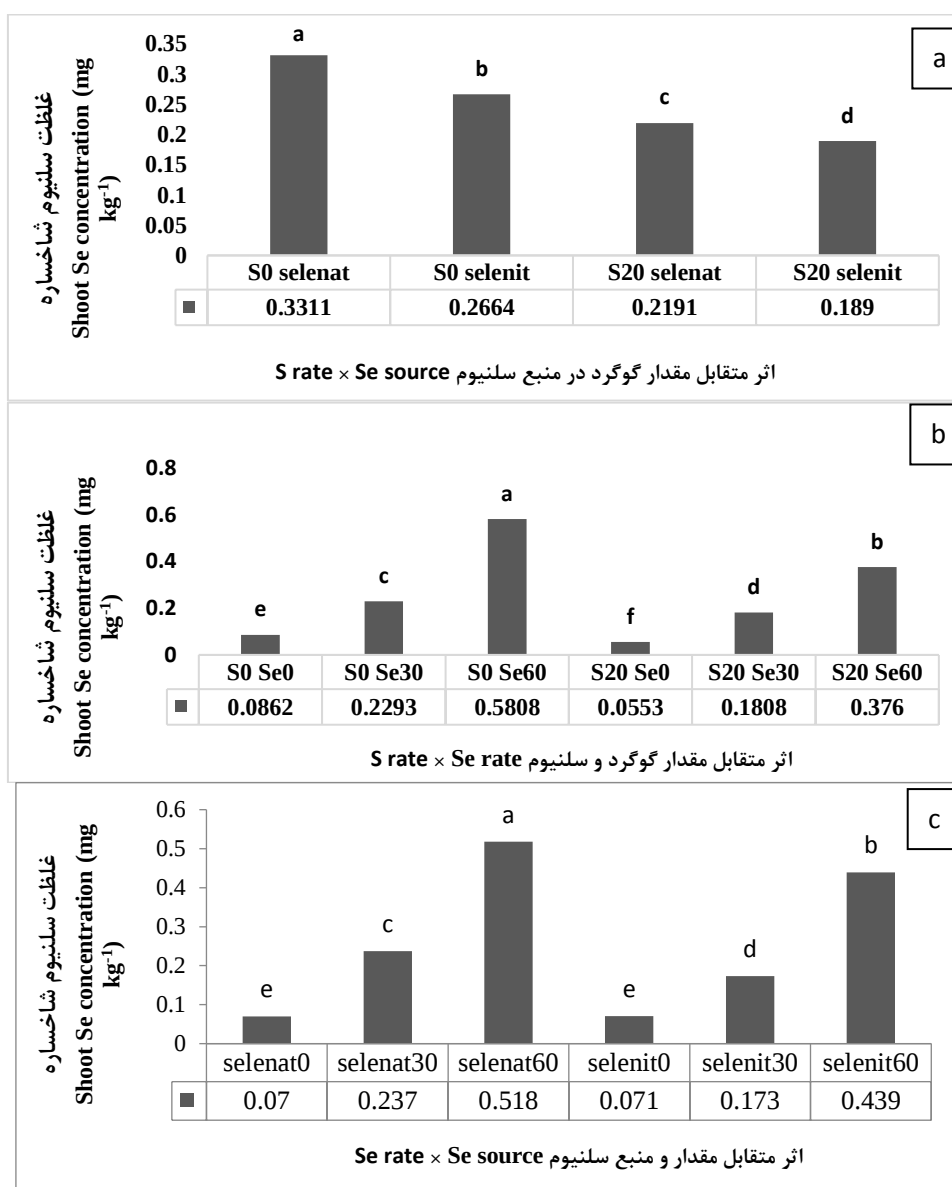
مثال در تیمار ۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلینیوم و بدون گوگرد، غلظت سلینیوم اندام هوایی ۰/۲۲۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در تیمار ۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلینیوم و همراه با گوگرد، غلظت سلینیوم اندام هوایی ۰/۱۸۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود (معادل ۲۰/۹۶ درصد کاهش). این کاهش در تیمار ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلینیوم معادل ۳۵/۳ درصد بود (از ۰/۵۸۱ به ۰/۳۷۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) (شکل ۲b). در مطالعات لیو و همکاران (Liu, Yang, Deng, et al., 2017) نیز کاربرد گوگرد باعث کاهش غلظت سلینیوم از هر دو منبع سلمات و سلیت شد. هر چه تجمع گوگرد در بافت گیاهی بیشتر باشد (در نتیجه

با توجه به نتایج (شکل ۳a) در زمان کاربرد سلمات مقدار غلظت سلینیوم بیشتر از زمان کاربرد سلیت بود (چه در زمان کاربرد گوگرد و چه بدون کاربرد گوگرد). در تیمارهای محتوی سلینیوم از هر دو منبع سلمات و سلیت، کاربرد گوگرد باعث کاهش معنی‌دار غلظت سلینیوم اندام هوایی کلزا شد (به ترتیب ۳۳/۸ درصد در سلمات و ۲۸/۹ درصد در سلیت). در تیمارهای محتوی سلینیوم، کاربرد گوگرد باعث کاهش معنی‌دار غلظت سلینیوم اندام هوایی کلزا شد. در مطالعات کیکرت و همکاران (Kikkert, Hale, & Berkelaar, 2013) کاربرد سولفات در خاک باعث کاهش جذب سلینیوم در اندام هوایی کلزا شد. به‌طور

تیمار ۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم سelenite دارای گوگرد، غلظت سelenium اندام هوایی ۰/۱۷۳ میلی گرم بر کیلوگرم بود (معادل ۲۷ درصد کاهش غلظت). در تیمار ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم سelenium، این اختلاف ۱۵/۳ درصد بود. میزان سelenium در گیاهان تیمار شده با سelenat سدیم به دلیل تحرک بیشتر آن نسبت به سelenite سدیم بیشتر است. نتایج پژوهشگران نشان داد که کاربرد سelenium به منبع سelenat سدیم، نسبت به سelenite سدیم سبب افزایش قابل توجه میزان سelenium در شاخه و ریشه گیاه کلزا می‌شود (Sharma et al., 2010).

مصرف گوگرد، آستانه مقاومت گیاه نسبت به سمیت سelenium بیشتر می‌گردد، زیرا مقدار بیشتری از گوگرد را برای تخصیص به عملکردهای ضروری گیاه از جمله اثر محافظتی در اختیار دارد (Kikkert et al., 2013).

با توجه به نتایج (شکل ۳c) کاربرد سelenium از منبع سelenat باعث ایجاد غلظت بیشتر سelenium در اندام هوایی کلزا نسبت به منبع سelenite شد و این تفاوت معنی‌دار در هر دو سطح سelenium استفاده شده مشاهده شد. به‌طور مثال در تیمار ۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم سelenat و بدون گوگرد، غلظت سelenium اندام هوایی ۰/۲۳۷ میلی گرم بر کیلو گرم و در



شکل ۳- اثرات متقابل سطوح گوگرد و سelenium بر غلظت سelenium در اندام هوایی گیاه کلزا

(ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن)

Figure 3- Effect of sulfur levels on selenium concentration in rapeseed shoots

Columns with at least one letter in common have no significant difference at the 5% Duncan test level

همبستگی 0.47^{**} ، با غلظت سلیوم دانه 0.96^{**} ، با جذب سلیوم دانه 0.81^{**} ، با جذب گوگرد دانه 0.43^{**} ، با غلظت گوگرد شاخساره 0.63^{**} ، با جذب سلیوم شاخساره 0.92^{**} و با جذب گوگرد شاخساره دارای همبستگی 0.4^{**} بود.

کاربرد سلیوم از منبع سلتات باعث جذب مقدار بیشتر سلیوم در اندام هوایی کلزا نسبت به منبع سلتات شد (۲/۹۱۸ در مقابل ۲/۳۶ میکروگرم در گلدان) که این اختلاف معنی‌دار بود (نتایج ارائه نشد). بین سطوح سلیوم مصرف شده و مقدار جذب آن توسط گیاه اختلاف معنی‌دار وجود داشت، به‌طوری‌که با افزایش سطح مصرف سلیوم میزان جذب نیز افزایش پیدا کرد (از ۰/۷۱۱ میکروگرم در گلدان در ۱/۹۳۹ در تیمار ۳۰ میکروگرم در کیلوگرم و ۵/۲۶۵ میکروگرم در گلدان در تیمار ۶۰ میکروگرم در کیلوگرم). تفاوت بین سطح ۳۰ و ۶۰ میکروگرم در کیلوگرم نیز از لحاظ جذب سلیوم اندام هوایی کلزا معنی‌دار بود. همبستگی جذب سلیوم شاخساره با غلظت سلیوم شاخساره 0.92^{**} ، با غلظت سلیوم دانه 0.94^{**} ، با جذب سلیوم دانه 0.93^{**} و با غلظت گوگرد شاخساره 0.36^{**} بود.

میل ترکیبی بین گیرنده‌های سولفات و سلتات علت تفاوت بین سلتات و سلتیت است که سبب تسهیل در جذب و انتقال سلیوم می‌شود (Zhang, Pan, Chen, & Hu, 2003). در بررسی انجام گرفته به وسیله کیکرت و برکلار (Kikkert & Berkelaar, 2013) نیز غلظت سلیوم در تیمار سلتیت و سلتات در گیاهان کلزا و نیز گندم متفاوت بود. غلظت سلیوم در اندام هوایی با افزایش غلظت سلیوم مصرفی متفاوت بود. غلظت سلیوم در گیاهان کلزا بیشتر از گندم بود (۳ تا ۱۷ برابر). چون مسیر جذب سلتات و سلتیت به‌ترتیب از طریق ناقلین سولفات و فسفات انجام می‌شود، تفاوت در فعالیت این ناقلین می‌تواند بر مقدار جذب سلیوم از دو منبع مؤثر باشد (Kikkert & Berkelaar, 2013). تفاوت در میزان انتقال سلیوم از دو منبع در درون اندام گیاهی نیز می‌تواند باعث ایجاد تفاوت در غلظت و جذب سلیوم در گیاه کلزا گردد. در گزارش کیکرت و برکلار (Kikkert & Berkelaar, 2013) نیز به میزان جذب و انتقال از طریق ریشه اشاره شده است. در روش محلول پاشی، مقدار انتقال سلیوم به میزان بارگذاری آوند آبکش و مقدار تنفس گیاه بستگی دارد. غلظت سلیوم شاخساره با غلظت گوگرد دانه دارای

جدول ۴- تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده در دانه کلزا

Table 4- Analysis of variance of measured traits in canola seed

منابع تغییرات Source of variance	درجه آزادی df	جذب سلیوم Se uptake	غلظت سلیوم Se concentration	وزن دانه Grain weight	جذب گوگرد S uptake	غلظت گوگرد S concentration
S rate سطح گوگرد	1	0.351^{**}	0.013^{**}	15.406^{**}	324.99^{**}	0.069^{**}
Se form شکل سلیوم	1	0.032^{ns}	0.002^{**}	0.016^{ns}	19.47^{**}	0.022^{**}
Se rate سطح سلیوم	2	2.92^{**}	0.327^{**}	0.568^{*}	32.93^{**}	0.0136^{**}
Se form* S rate سطح گوگرد*شکل سلیوم	1	0.065^{*}	0.0004^{**}	0.334^{ns}	3.92^{ns}	0.0027^{**}
S rate* Se rate سطح گوگرد*سطح سلیوم	2	0.034^{*}	0.0017^{**}	0.407^{ns}	13.79^{**}	0.001^{**}
Se rate* Se form شکل سلیوم*سطح سلیوم	2	0.008^{ns}	0.0005^{**}	0.026^{ns}	5.024^{*}	0.0061^{**}
Se rate* Se form* سطح گوگرد*شکل سلیوم	2	0.023^{ns}	0.00009^{*}	0.106^{ns}	3.171^{ns}	0.003^{**}
S rate*Se rate*Se form						
Error خطا	24	0.009	0.00002	0.121	1.226	0.00005
C.V. ضریب تغییرات (%)	-	11.7	1.6	10.8	13.6	2.8

علامت ** و * بیانگر معنی‌داری تیمارها در سطح ۱ و ۵ درصد و ns بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها

** and * indicates the significance of the treatments at the 1 and 5 percent levels, and ns indicates no significant difference between the treatments

غلظت گوگرد هم در اندام هوایی و دانه بر شاخص وزن دانه بسیار مؤثر است.

اثر تیمارهای آزمایش بر غلظت و جذب گوگرد دانه کلزا

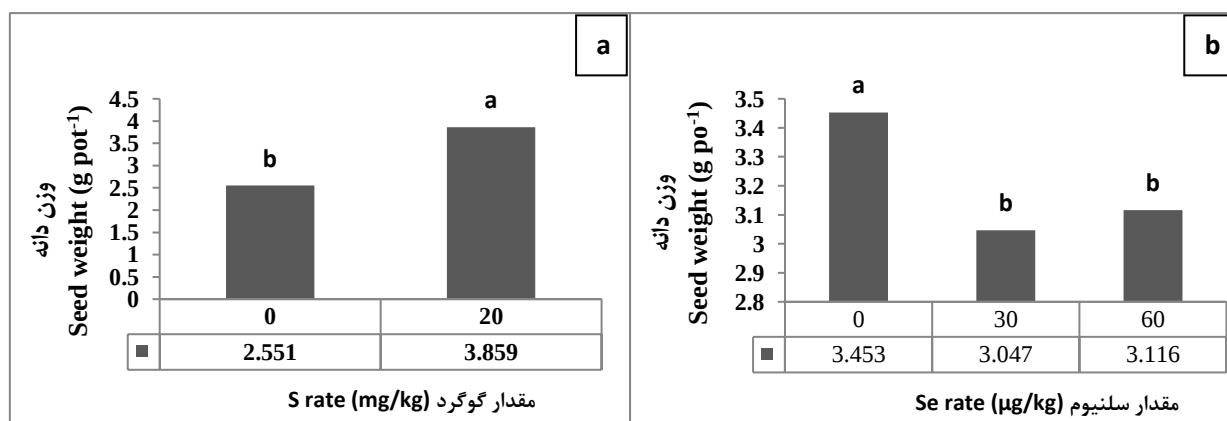
بر اساس نتایج (شکل ۴۵) در شرایط بدون کاربرد گوگرد، کاربرد سلیوم از منبع سلیت و در هر دو سطح ۳۰ و ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم، باعث کاهش غلظت گوگرد دانه کلزا نسبت به تیمار شاهد (بدون گوگرد و سلیوم) شد. مقدار کاهش غلظت در سطح ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم بیشتر بود. ولی کاربرد سلیوم از منبع سلیت و در هر دو سطح ۳۰ و ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم، باعث افزایش غلظت گوگرد دانه کلزا شد. تفاوت دو سطح ۳۰ و ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم در این منبع از بابت غلظت گوگرد دانه معنی‌دار نبود. در تیمار بدون گوگرد و بدون سلیوم، غلظت گوگرد دانه ۰/۲۱۷ درصد بود که با کاربرد گوگرد و بدون سلیوم به ۰/۳۳ درصد رسید (۵۲/۱ درصد افزایش). با افزودن گوگرد به تیمارهای محتوی سلیت و سلیت، غلظت گوگرد دانه کلزا افزایش یافت ولی مقدار افزایش در تیمار محتوی سلیت بیشتر از سلیت بود. به‌طور مثال در تیمار گوگرد ۲۰ و سلیت ۳۰، غلظت گوگرد دانه ۰/۳۱۸ درصد و در تیمار گوگرد ۲۰ و سلیت ۳۰، غلظت گوگرد دانه ۰/۲۶ درصد بود. اثر کاربرد گوگرد به تنهایی در افزایش غلظت گوگرد دانه بیشتر از کاربرد همزمان گوگرد و سلیوم بود. در شرایط کاربرد گوگرد، کمترین غلظت گوگرد دانه از تیمار سلیت ۶۰ بدست آمد. در شرایط بدون گوگرد نیز این تیمار (سلیت ۶۰) کمترین غلظت گوگرد دانه را داشت (۰/۱۰۸ درصد).

اثر تیمارهای آزمایش بر وزن دانه، غلظت و جذب عناصر گوگرد و سلیوم در دانه کلزا

با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۴)، اثر اصلی مقدار گوگرد و اثر اصلی سطح سلیوم بر شاخص وزن دانه کلزا، معنی‌دار بود (به ترتیب $P < 0.01$ و $P < 0.05$). اثر متقابل سه گانه سطح گوگرد × منبع سلیوم × سطح سلیوم بر غلظت گوگرد دانه معنی‌دار بود ($P < 0.01$). اثر متقابل سطح گوگرد × سطح سلیوم ($P < 0.01$) و نیز اثر متقابل سطح سلیوم × منبع سلیوم ($P < 0.05$) بر جذب گوگرد دانه، معنی‌دار بود (جدول ۴). اثر متقابل سه گانه سطح گوگرد × سطح سلیوم × منبع سلیوم بر غلظت سلیوم دانه معنی‌دار بود ($P < 0.05$). اثر متقابل سطح گوگرد × سطح سلیوم ($P < 0.05$) و اثر متقابل سطح گوگرد × منبع سلیوم ($P < 0.05$) بر شاخص جذب سلیوم دانه معنی‌دار بود.

اثر تیمارهای آزمایش بر وزن دانه کلزا

با توجه به نتایج (شکل ۴۶) افزودن گوگرد باعث افزایش وزن دانه از ۲/۵۵۱ گرم در گلدان به ۳/۸۵۹ گرم در گلدان شد (۵۱/۳ درصد افزایش). کاربرد سلیوم در هر دو سطح ۳۰ و ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم، باعث کاهش وزن دانه کلزا نسبت به تیمار شاهد شد (به ترتیب ۱۱/۸ و ۹/۸ درصد) (شکل ۴۶b). وزن دانه با غلظت گوگرد دانه دارای همبستگی 0.77^{**} ، با جذب گوگرد دانه 0.94^{**} ، با غلظت گوگرد شاخساره 0.84^{**} ، جذب گوگرد شاخساره 0.9^{**} ، با سطح برگ 0.61^{**} ، با وزن ریشه 0.79 و با وزن شاخساره دارای همبستگی 0.8^{**} بود. به این ترتیب مشاهده می‌گردد که ویژگی‌های رشدی ریشه، اندام هوایی و

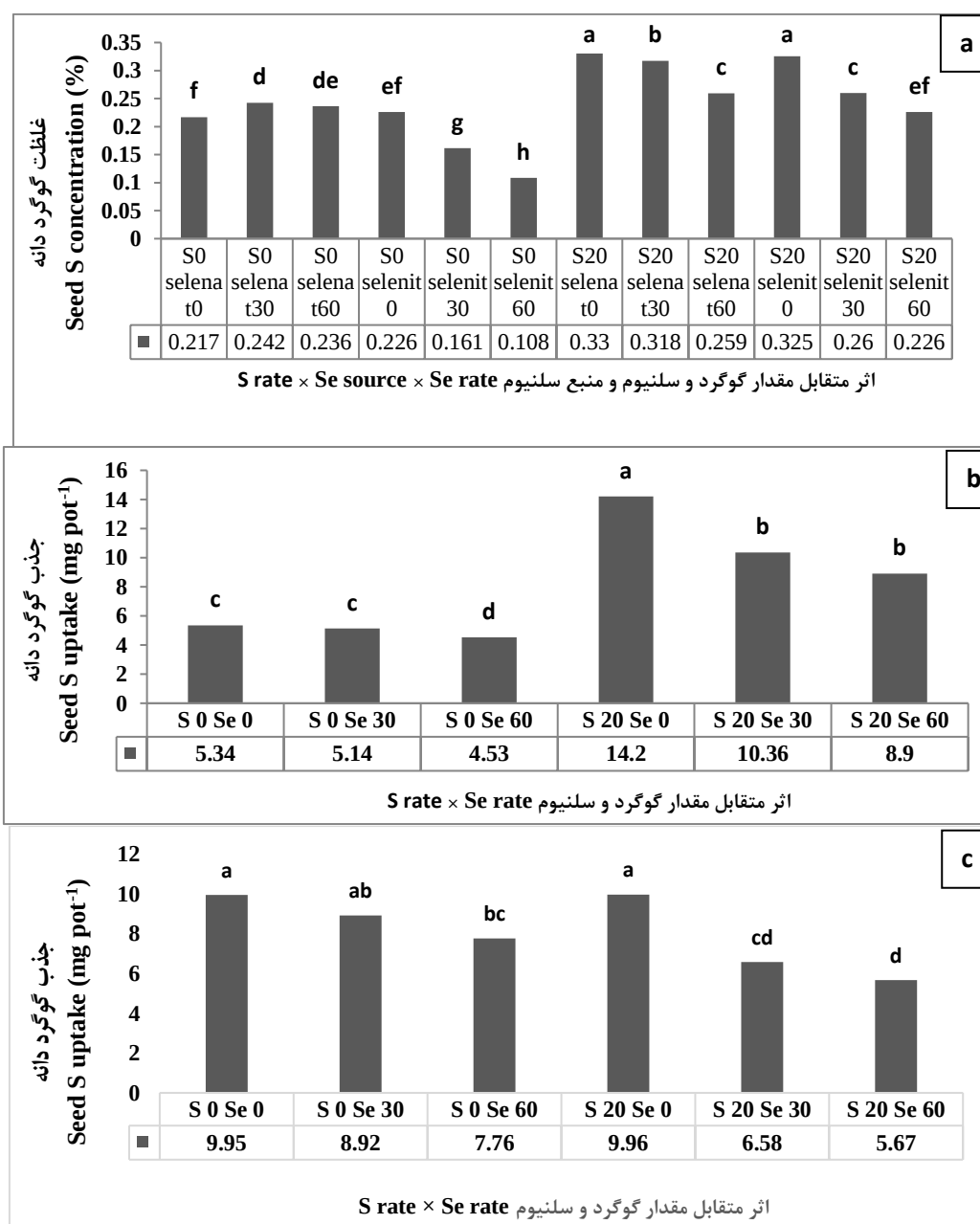


شکل ۴- اثرات اصلی سطوح گوگرد و سلیوم بر وزن دانه کلزا

(ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن)

Figure 4- Effects of sulfur level, and selenium level on canola grain weight

Columns with at least one letter in common have no significant difference at the 5% Duncan test level



شکل ۵- اثرات متقابل سطوح مختلف گوگرد و سلینیوم بر غلظت و جذب گوگرد دانه کلزا

(ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن)

Figure 5- Effect of treatments on sulfur concentration and absorption in canola seed

Columns with at least one common letter do not have significant differences at the 5% Duncan test level

(شکل ۵b). هم در شرایط کاربرد گوگرد و هم در شرایط بدون گوگرد، استفاده از سلینیوم باعث کاهش جذب گوگرد دانه شد. در شرایط بدون کاربرد گوگرد، کاربرد ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلینیوم، مقدار جذب گوگرد دانه را به صورت معنی‌داری نسبت به سطح ۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلینیوم، کاهش داد (۱۱/۹ درصد کاهش) (شکل ۵b). جذب گوگرد دانه با کاربرد سطح ۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلینیوم از منبع سلمات نسبت به شاهد کاهش نیافت ولی در سطح ۶۰ میکروگرم بر

غلظت گوگرد دانه دارای همبستگی 0.48^* با غلظت سلینیوم دانه، 0.77^{**} با وزن دانه، 0.92^{**} با جذب گوگرد دانه، 0.79^{**} با غلظت گوگرد شاخساره، 0.47^{**} با غلظت سلینیوم شاخساره، 0.74^{**} با جذب گوگرد شاخساره، 0.53^{**} با وزن شاخساره، 0.69^{**} با سطح برگ و 0.73^{**} با وزن ریشه بود. با کاربرد گوگرد (۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم)، مقدار جذب گوگرد دانه از 5.34 میلی گرم در گلدان در تیمار شاهد (بدون گوگرد) به 14.2 میلی گرم در گلدان، افزایش یافت (۱۶۶ درصد افزایش)

غلظت سلینیوم دانه را برای گیاه کلزا ۲-۱/۸ میکروگرم بر گرم وزن خشک دانه بدست آوردند. سلینیوم بیشتر در کوتیلدون و ریشه جنین دانه کلزا تجمع یافته بود. در بررسی انجام گرفته به‌وسیله هاشم و همکاران (Hashem, Hassanein, Bekheta, & El-Kady, 2013) محلول پاشی سلینیوم در کلزا، موجب افزایش مقدار سلینیوم در دانه و در نتیجه روغن استحصال شده از آن شد. نتایج مطالعه لیو و همکاران (Liu et al., 2017) نیز نشان داد که بذر کلزای تیمار شده با سلیت یا سلمات، بیش از ۹۹ درصد Se را در کنجاله دانه کلزا انباشته کرد. این به این دلیل است که Se جذب شده در گیاهان عمدتاً به شکل گونه‌های آلی وجود دارد. پس از ورود به گیاه، سلیت یا سلمات می‌تواند جایگزین گروه سولفیدریل در پروتئین‌های حاوی گوگرد شود. اجزای اصلی روغن کلزا لیپیدها هستند که تجمع سلینیوم را مشکل می‌کند. مقادیر کمی از Se موجود در روغن کلزا نیز در صورت پخت با دمای بالا، تبخیر می‌شود (Liu et al., 2017).

غلظت سلینیوم دانه با غلظت گوگرد دانه دارای همبستگی 0.48^{**} -، با جذب سلینیوم دانه 0.9^{**} ، با جذب گوگرد دانه 0.42^{**} -، با غلظت گوگرد شاخساره 0.52^{**} -، با غلظت سلینیوم شاخساره 0.96^{**} ، با جذب سلینیوم کاه 0.94^{**} و با سطح برگ 0.37^{**} - بود.

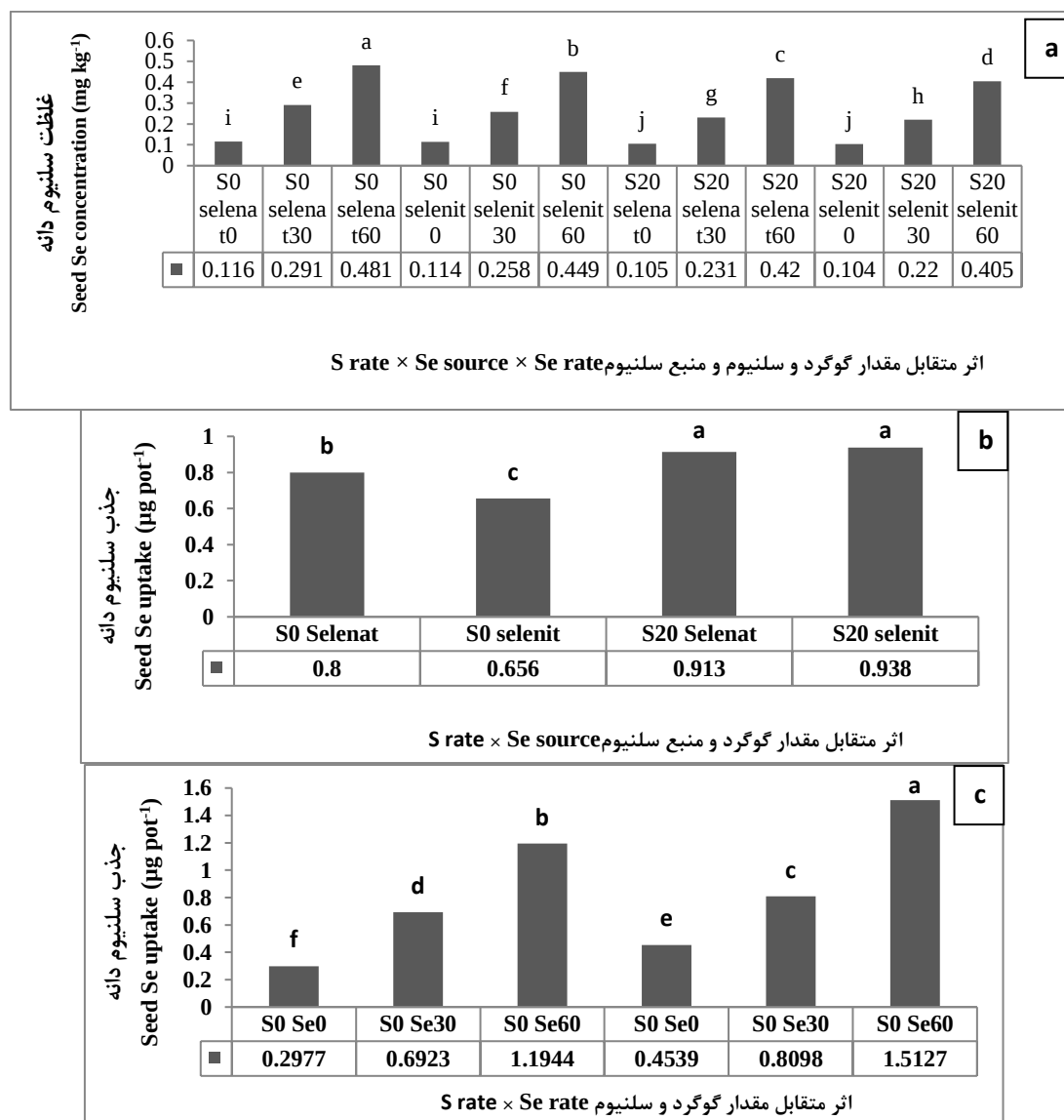
در شرایط عدم مصرف گوگرد، مقدار جذب سلینیوم از منبع سلمات ۲۲ درصد بیشتر از منبع سلیت بود (۰/۸ میکروگرم در گلدان در برابر ۰/۶۵۶ میکروگرم در گلدان) (شکل ۵۶b). کاربرد گوگرد به مقدار ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، مقدار جذب سلینیوم دانه کلزا را نسبت به شرایط عدم مصرف گوگرد افزایش داد. در شرایط کاربرد گوگرد، جذب سلینیوم دانه در دو منبع تفاوت معنی‌داری با هم نداشت (۰/۹۳۸) در مقابل ۰/۹۱۳ میکروگرم در گلدان).

با افزایش سطح سلینیوم مصرف شده از ۳۰ به ۶۰ میکروگرم در کیلوگرم، جذب سلینیوم دانه نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت و این افزایش معنی‌دار بود (از ۰/۲۹۸ میکروگرم در گلدان در تیمار شاهد به ۰/۶۹۳ میکروگرم در گلدان در تیمار ۳۰ میکروگرم در کیلوگرم و ۱/۱۹ میکروگرم در گلدان در تیمار ۶۰ میکروگرم در کیلوگرم) (شکل ۵۶c). تفاوت سطح ۳۰ و ۶۰ میکروگرم در کیلوگرم نیز باهم معنی‌دار بود. مقدار جذب سلینیوم دانه در تیمارهای دارای گوگرد نسبت به شرایط عدم مصرف گوگرد افزایش یافت. چرا که در شرایط کاربرد گوگرد مقدار وزن دانه نیز افزایش یافت. جذب سلینیوم دانه با غلظت سلینیوم دانه دارای همبستگی 0.9^{**} ، با غلظت سلینیوم شاخساره 0.81^{**} ، جذب سلینیوم شاخساره 0.93^{**} و با وزن شاخساره 0.43^{**} بود.

کیلوگرم از این منبع نسبت به تیمار شاهد کاهش معنی‌دار یافت (۲۲ درصد کاهش). در هر دو سطح ۳۰ و ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلینیوم از منبع سلیت، کاهش جذب گوگرد دانه نسبت به شاهد مشاهده شد (شکل ۵۵c). اثر منفی سلیت بر جذب گوگرد دانه کلزا بیشتر از منبع سلمات بود. جذب گوگرد دانه دارای همبستگی 0.42^{**} - با غلظت سلینیوم دانه، 0.94^{**} با وزن دانه، 0.86^{**} با غلظت گوگرد شاخساره، 0.43^{**} - با غلظت سلینیوم شاخساره، 0.87^{**} با جذب گوگرد شاخساره، 0.7^{**} با وزن شاخساره، 0.69 با سطح برگ و 0.83^{**} با وزن ریشه بود.

اثر کاربرد گوگرد و سلینیوم بر غلظت و جذب سلینیوم دانه کلزا

با توجه به نتایج (شکل ۵۶a) در زمان عدم کاربرد گوگرد و یا در زمان کاربرد گوگرد، با افزایش سطح سلینیوم استفاده شده، غلظت سلینیوم دانه نیز افزایش یافت. در هر سطح سلینیوم استفاده شده، غلظت سلینیوم دانه در تیمارهای محتوی گوگرد، کمتر از تیمارهای بدون گوگرد بود. پس برای کاهش اثرات غلظت زیاد سلینیوم می‌توان از گوگرد استفاده نمود. در تیمار ۳۰ سلمات، کاربرد گوگرد، غلظت سلینیوم دانه را ۲۰/۷ درصد کاهش داد (از ۰/۲۹ به ۰/۲۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم). به نظر می‌رسد مقدار جابجایی از اندام برگ و ساقه به دانه در تیمار سلمات بیشتر از سلیت بوده است. بیشترین غلظت سلینیوم دانه مربوط به سطح ۶۰ از منبع سلمات بود (۰/۴۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم). در تیمارهای بدون گوگرد، غلظت سلینیوم دانه در تیمار سلیت به‌صورت معنی‌داری کمتر از منبع سلمات بود (۰/۴۰۴ در مقابل ۰/۴۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) (شکل ۵۶a). در بررسی انجام گرفته به‌وسیله لیو و همکاران (Liu, Zhao, Hu, Zhao, Guo, 2016)، غلظت سلینیوم دانه در تیمار محتوی سلمات بیشتر از تیمار محتوی سلیت بود و کاربرد گوگرد باعث کاهش غلظت سلینیوم از هر دو منبع شد. این نتایج نشان می‌دهد که منبع سلمات مناسب‌تر از منبع سلیت برای افزایش غلظت سلینیوم دانه است. نتایج مشابه این در بررسی اکانایاک و همکاران (Ekanayake, Vial, 2015) (Schatz, McGee, & Thavarajah, 2012) در گیاه عدس در کانادا نیز مشاهده شد که مقدار جذب سلینیوم در سلمات بیشتر از منبع سلیت بود. غلظت سلیت دانه عدس در زمان کاربرد سلینیوم بین ۰/۹-۱/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در گیاه شاهد ۰/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود (مقدار سلینیوم خاک پیش از کشت ۸۴-۶۳ میکروگرم بر کیلوگرم بود). بانوالوس و همکاران (Bañuelos, Walse, Yang, et al., 2012)



شکل ۶- اثر متقابل تیمارها بر غلظت سلیوم دانه کلزا

ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن

Figure 6- Effect of treatments on selenium concentration in canola seed

Columns with at least one letter in common have no significant difference at the 5% Duncan test level.

نتیجه‌گیری

افزایش غلظت سلیوم دانه برای موارد غنی‌سازی مدنظر باشد می‌توان کاربرد ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گوگرد و ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلنات را در نظر گرفت که نزدیک‌ترین مقدار وزن دانه به تیمار ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گوگرد و بدون سلیوم بود. استفاده از گوگرد به‌دلیل اثر آنتاگونیستی آن بر غلظت سلیوم، اثرگذار بود.

سپاسگزاری

از گروه خاکشناسی پردیس کشاورزی دانشگاه تهران و موسسه تحقیقات خاک و آب، بابت امکانات ارائه شده برای اجرای این آزمایش

کاربرد گوگرد سبب افزایش معنی‌دار وزن خشک شاخساره، وزن خشک ریشه، سطح برگ و دانه کلزا نسبت به شرایط عدم کاربرد گوگرد شد (۴۸/۸ درصد افزایش در شاخساره، ۲۸/۱ درصد در ریشه، ۱۵/۷ درصد در سطح برگ و ۵۱/۳ درصد افزایش در وزن دانه). وزن دانه با جذب گوگرد دانه دارای همبستگی 0.94^{***} و با جذب گوگرد شاخساره 0.9^{**} بود. کاربرد سلیوم از منبع سلنات باعث جذب مقدار بیشتر سلیوم در اندام هوایی و دانه کلزا نسبت به منبع سلیت شد. در دانه، کاربرد گوگرد باعث افزایش جذب سلیوم از هر دو منبع شد. در صورتی‌که

تشکر و قدردانی می‌گردد.

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

تضاد منافع

References

1. Abou Seeda, M.A., Yassen, A.A., Abou El-Nour, E.A.A., Gad Mervat, M., & Sahar, M. (2020). The essentiality of selenium for plants, and their role in plant physiology. A review. *Middle East Journal of Agriculture Research*, 9(1), 149-170. <https://doi.org/10.36632/mejar/2020.9.1.15>
2. Agricultural Statistics. (2023). *Agricultural Statistics*, Volume 1 (crops) 2023. Statistics Center, Information and Communication Technology, Economic Planning Deputy, Ministry of Agricultural Jihad. Tehran, Iran.
3. Ahmad, Z., Anjum, S., Skalicky, M., Waraich, E.A., Muhammad Sabir Tariq, R., Ayub, M.A., Hossain, A., Hassan, M.M., Brestic, M., Sohridul Islam, M., & Habib-Ur-Rahman, M. (2021). Selenium alleviates the adverse effect of drought in oilseed crops camelina (*Camelina sativa* L.) and canola (*Brassica napus* L.). *Molecules*, 26(6), 1699. <https://doi.org/10.3390/molecules26061699>
4. Alfthan, G., Eurola, M., Ekholm, P., Venäläinen, E.-R., Root, T., Korkalainen, K., Hartikainen, H., Salminen, P., Hietaniemi, V., Aspila, P., & Aro, A. (2015). Effects of nationwide addition of selenium to fertilizers on foods, and animal and human health in Finland: from deficiency to optimal selenium status of the population. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 31, 142 e 147. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2014.04.009>
5. Bañuelos, G.S., Walse, S.S., Yang, S.I., Pickering, I.J., Fakra, S.C., Marcus, M.A., & Freeman, J.L. (2012). Quantification, localization, and speciation of selenium in seeds of canola and two mustard species compared to seed-meals produced by hydraulic press. *Analytical Chemistry*, 84(14), 6024-6030. <https://doi.org/10.1021/ac300813e>
6. Bitterli, C., Bañuelos, G.S., & Schulin, R. (2010). Use of transfer factors to characterize uptake of selenium by plants. *Journal of Geochemical Exploration*, 107(2), 206-216. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.09.009>
7. Bleiholder, H., Weber, E., Lancashire, P., Feller, C., Buhr, L., Hess, M., & Klose, R. (2001). Growth stages of mono-and dicotyledonous plants, BBCH Monograph. *Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry*.
8. Botella-Martínez, C., Pérez-Álvarez, J.Á., Sayas-Barberá, E., Navarro Rodríguez de Vera, C., Fernández-López, J., & Viuda-Martos, M. (2023). Healthier oils: a new scope in the development of functional meat and dairy products: a review. *Biomolecules*, 13(5), 778. <https://doi.org/10.3390/biom13050778>
9. Bowie, S.H.U., & Thornton, I. (1985). Principles of environmental geochemistry. *Environmental Geochemistry and Health: Report to the Royal Society's British National Committee for Problems of the Environment*, pp.5-33. https://doi.org/10.1007/978-94-009-5265-2_2
10. Brienza, S.M.B., Sartini, R.P., Neto, J.G., & Zagatto, E.A.G. (1995). Crystal seeding in flow-injection turbidimetry: determination of total sulfur in plants. *Analytica Chimica Acta*, 308(1-3), 269-274. [https://doi.org/10.1016/0003-2670\(94\)00249-L](https://doi.org/10.1016/0003-2670(94)00249-L)
11. Cabannes, E., Buchner, P., Broadley, M.R., & Hawkesford, M.J. (2011). A comparison of sulfate and selenium accumulation in relation to the expression of sulfate transporter genes in *Astragalus* species. *Plant Physiology*, 157(4), 2227-2239. <https://doi.org/10.1104/pp.111.183897>
12. Canola council of Canada. (2024). Sulphur. Canola encyclopedia, nutrient management. <https://www.canolacouncil.org/canola-encyclopedia/fertility/sulphur/>.
13. Chaudhary, S., Sindhu, S.S., Dhanker, R., & Kumari, A. (2023). Microbes-mediated sulphur cycling in soil: Impact on soil fertility, crop production and environmental sustainability. *Microbiological Research*, 271, 127340. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127340>
14. Ekanayake, L.J., Vial, E., Schatz, B., McGee, R., & Thavarajah, P. (2015). Selenium fertilization on lentil (*Lens culinaris* Medikus) grain yield, seed selenium concentration, and antioxidant activity. *Field Crops Research*, 177, 9-14. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.002>
15. Faizolah zadeh Ardabili, M. (2013). Comparison of absorbable sulfur measurement methods in relation to its absorption by canola and obtaining the best N/S ratio in canola. Final Report, No: 83.96. Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.29252/aums.8.3.281>
16. Frieß, J.L., Breckling, B., Pascher, K., & Schröder, W. (2020). Case Study 2: Oilseed rape (*Brassica napus* L.). Gene Drives at Tipping Points: Precautionary Technology Assessment and Governance of New Approaches to Genetically Modify Animal and Plant Populations, pp.103-145. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38934-5_5
17. Fouda, K.F. (2016). Quality parameter and chemical composition of spinach plant as affected by mineral fertilization and selenite foliar application. *Egyptian Journal of Soil Science*, 56(1), 149-167.

- <https://doi.org/10.21608/ejss.2016.347>
18. Gee, G., & Bauder, J. (1986). Particle-size Analysis. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. SSSA and ASA, Madison, WI, 383-411. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>
19. Golob, A., Gadzo, D., Stibilj, V., Djikic, M., Gavric, T., Kreft, I., & Germ, M. (2016). Sulphur interferes with selenium accumulation in Tartary buckwheat plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 108, 32 e 36. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.07.001>
20. Gupta, M., & Gupta, S. (2017). An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants. *Frontiers in Plant Science*, 7, 2074. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02074>
21. Hashem, H.A., Hassanein, R.A., Bekheta, M.A., & El-Kady, F.A. (2013). Protective role of selenium in canola (*Brassica napus* L.) plant subjected to salt stress. *Egyptian Journal of Experimental Biology*, 9(2), 199–211.
22. Hawrylak-Nowak, B. (2013). Comparative effects of selenite and selenate on growth and selenium accumulation in lettuce plants under hydroponic conditions. *Plant Growth Regulation*, 70, 149-157. <https://doi.org/10.1007/s10725-013-9788-5>
23. Hawrylak-Nowak, B., Hasanuzzaman, M., & Matraszek-Gawron, R. (2018). Mechanisms of selenium-induced enhancement of abiotic stress tolerance in plants. *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance*, 269-295. https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8_12
24. Hawrylak-Nowak, B., Matraszek, R., & Pogorzelec, M. (2015). The dual effects of two inorganic selenium forms on the growth, selected physiological parameters and macronutrients accumulation in cucumber plants. *Acta Physiologia Plantarum*, 37, 1 e 13. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-1788-9>
25. Hussain, S., Ahmed, S., Akram, W., Ahmad, A., Yasin, N.A., Fu, M., Li, G., & Sardar, R. (2024). The potential of selenium to induce salt stress tolerance in *Brassica rapa*: Evaluation of biochemical, physiological and molecular phenomenon. *Plant Stress*, 11, 100331. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100331>
26. Kikkert, J., & Berkelaar, E. (2013). Plant uptake and translocation of inorganic and organic forms of selenium. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 65, 458-465. <https://doi.org/10.1007/s00244-013-9926-0>
27. Kikkert, J., Hale, B., & Berkelaar, E. (2013). Selenium accumulation in durum wheat and spring canola as a function of amending soils with selenite, selenate and or sulphate. *Plant and Soil*, 372, 629-641. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1773-2>
28. Kumar, A., Singh, R.P., Singh, P.K., Awasthi, S., Chakrabarty, D., Trivedi, P.K., & Tripathi, R.D. (2014). Selenium ameliorates arsenic induced oxidative stress through modulation of antioxidant enzymes and thiols in rice (*Oryza sativa* L.). *Ecotoxicology*, 23, 1153 e11 6 3. <https://doi.org/10.1007/s10646-014-1257-z>
29. Lima, L.W., Pilon-Smits, E.A., & Schiavon, M. (2018). Mechanisms of selenium hyper accumulation in plants: A survey of molecular, biochemical and ecological cues. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 1862(11), 2343-2353. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2018.03.028>
30. Lindsay, W.L., & Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society American Journal*, 42, 421-428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
31. Liu, X., Yang, Y., Deng, X., Li, M., Zhang, W., & Zhao, Z. (2017). Effects of sulfur and sulfate on selenium uptake and quality of seeds in rapeseed (*Brassica napus* L.) treated with selenite and selenate. *Environmental and Experimental Botany*, 135, 13-20. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.12.005>
32. Liu, X., Zhao, Z., Hu, C., Zhao, X., & Guo, Z. (2016). Effect of sulphate on selenium uptake and translocation in rape (*Brassica napus* L.) supplied with selenate or selenite. *Plant and Soil*, 399, 295-304. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2699-7>
33. Loeppert, R.H., & Suarez, D.L. (1996). Carbonate and Gypsum. In: Sparks, D. L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods*, SSSA and ASA, Madison, W. I.; 437-474. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c15>
34. Mohammad, B.A.J., Al-Mohammad, M.H., & Mustafa, S.B. (2024). Effect of nitrogen and sulfur fertilizers on growth and yield of canola. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1371(5), 052066. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1371/5/052066>
35. Moulick, D., Mukherjee, A., Das, A., Roy, A., Majumdar, A., Dhar, A., Pattanaik, B.K., Chowardhara, B., Ghosh, D., Upadhyay, M.K., & Yadav, P. (2024). Selenium—An environmentally friendly micronutrient in agro-ecosystem in the modern era: An overview of 50-year findings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 270, 115832. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115832>
36. Nelson, D., & Sommers, L. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Sparks D.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods*. SSSA and ASA, Madison, W. I, pp. 961-1010. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>
37. Nie, X., Luo, D., Ma, H., Wang, L., Yang, C., Tian, X., & Nie, Y. (2024). Different effects of selenium speciation on selenium absorption, selenium transformation and cadmium antagonism in garlic. *Food Chemistry*, 443, 138460. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138460>
38. Niaik, M.M., & Dubey, S.K. (2016). *Marine pollution and microbial remediation*. Springer.

39. Olsen, S.R., & Sommers, L.E. (1982). Phosphorus. In Page A. L. et al. (Eds.), Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties of Phosphorus. 2nd ed. Agronomy Monograph. 9. ASA and SSSA, Madison, WI. pp. 403-430. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c24>
40. Ren, T., Zou, J., Wang, Y., Li, X.K., Cong, R.H., & Lu, J.W. (2016). Estimating nutrient requirements for winter oilseed rape based on QUEFTS analysis. *The Journal of Agricultural Science*, 154(3), 425-437. <https://doi.org/10.1017/s0021859615000301>
41. Rhoades, J. (1982). Soluble salts. In: Page A. L. (Ed.), Methods of soil analysis, Part 2, Chemical and microbiological properties, SSSA and ASA, Madison, WI, 167-179. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c10>
42. Schulte, E.E., & Eik, K. (1988). Recommended sulfates-S test. PP: 17-20. In: W. C. Dahnke (ed.). Recommended chemical soil test procedures for the north central region. North Dakota Agricultural experiment Station Bulletin no 499, North Dakota State University. Fargo, ND. <https://doi.org/10.34107/yhpn9422.0492>
43. Sharma, R.K., Cox, M.S., Oglesby, C., & Dhillon, J.S. (2024). Revisiting the role of sulfur in crop production: a narrative review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15, 101013. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101013>
44. Sharma, S., Bansel, A., Dhillon, S., & Dhillon, S. (2010). Comparative effects of selenate and selenite on growth and biochemical composition of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Plant and Soil*, 329, 339-348. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0162-3>
45. Soltanpour, P.N., & Workman, S.M. (1980). Use of NH_4HCO_3 -DTPA soil test to assess availability and toxicity of selenium to alfalfa plants. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 11(12), 1147-1156. <https://doi.org/10.1080/00103628009367111>
46. Sparks, D.L., Page, A., Helmke, P., Loeppert, R., Soltanpour, P., Tabatabai, M., Johnston, C., & Sumner, M. (1996). Methods of soil analysis. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3>
47. Statista., (2024). Worldwide oilseed production in 2024/2025, by type (in million metric tons). <https://www.statista.com/statistics/267271/worldwide-oilseed-production-since-2008/>.
48. Szeles, E. (2007). Studying of Change of Selenium-Speciation in Soil and Plant Samples from a long-term field experiment. Doctoral Thesis University of Debrecen, <https://dea.lib.unideb.hu/server/api/core/bitstreams/6216ad4c-e794-410c-8e48-9a4b4c299438/content>.
49. Tian, M., Hui, M., Thannhauser, T.W., Pan, S., & Li, L., (2017). Selenium-induced toxicity is counteracted by sulfur in broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*). *Frontiers in Plant Science*, 8, 1425. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01425>
50. White, P.J. (2015). Selenium accumulation by plants. *Annals of Botany*, 117, 217-235. <https://doi.org/10.1093/aob/mcv180>
51. Zhang, Y., Pan, G., Chen, J., & Hu, Q. (2003). Uptake and transport of selenite and selenite by soybean seedlings of two genotypes. *Plant and Soil*, 253, 437-443.

Simulating Potato Plant Growth Stages in Iran under RCP Scenarios Using the WOFOST Model

F. Bayatani¹, Gh. Fallah-Ghalhari^{2*}

1- Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Jiroft University, Jiroft, Iran

2- Department of Geography and Tourism, University of Kashan, Kashan, Iran

(*- Corresponding Author Email: Fallah.g@kashanu.ac.ir)

Received: 04 March 2025
Revised: 01 June 2025
Accepted: 02 June 2025
Available Online: 02 June 2025

How to cite this article:

Bayatani, F., & Fallah-Ghalhari, Gh. (2025). Simulating potato plant growth stages in Iran under RCP scenarios using the WOFOST model. *Journal of Water and Soil*, 39(2), 193-218. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92402.1471>

Introduction

Increasing food security is at the heart of United Nations policies for sustainable development. On the other hand, the growth of the global population, the reduction of vital natural resources used in agriculture and environmental stress and continuous climate change undermine the achievement of this goal. In addition, plant diseases and pests cause the loss of 40% of agricultural production of some major crops on a global scale, which puts food security at serious risk. The intensity and frequency of extreme climatic events—such as heatwaves, droughts, and increased climate variability—are projected to rise due to climate change. As a result, pressure on agricultural production is expected to intensify, given the sensitivity of crop growth to shifting weather conditions. This study aims to assess the impacts of climate change on the phenological development of potatoes in Iran's major potato-growing regions.

Methodology

In order to prepare field data for calibration and determining the validity of the WOFOST model in potential conditions (conditions without water and food restrictions, disease and weed control), data from research projects of agricultural research centers in Hamedan, Isfahan regions Ardabil, Shiraz, Tabriz, Shahrekord, Jiroft, Kohnouj, Manojan and Sanandaj, which are the main centers of potato production in the country, were collected during 2012-2016 and used as a base or monitoring period. This information includes planting dates, phenological stages from planting to greening, greening to flowering and greening to physiological maturity of potato plants in each of the study areas. In order to calibrate the WOFOST model using field data, phenological and performance data in 2012, 2013 and 2015 and phenological and performance data in 2014 and 2016 were used to determine the validity of the model.

Results and Discussion

The WOFOST growth simulation model showed that the length of different phenological stages and potato tuber yield under potential conditions will be reduced in the study areas. The stage of germination to the physiological maturation of the tubers, due to its longer duration, the greatest reduction in the length of the period occurred in this stage. The simulation results indicated a decline in potato tuber yield across the studied regions. According to the results, the highest reduction in performance was observed in the third period (2071-2100). The



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

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92402.1471>

percentage of glandular function reduction was observed on average between 2 and 4.3%. In general, the results showed an increase in the average minimum and maximum temperatures of 0.37 to 0.9 degrees Celsius over the next three periods. The length of the phenological stages of the potato plant from emergence to physiological maturity has decreased in parallel with the increase in the mean minimum and maximum temperatures. The reduction in the length of the germination stage is between 0.2 to 1.9 days, the flowering stage is between 0.5 to 1.7 days, and the maturation stage to maturity is between 1.4 to 3.5 days. The greatest reduction during the phenological stages is related to the emergence stage to maturity of 3.5 days.

In general, the results of this study indicate an increase in the negative effects of climate change on the potato plants in three stations of Jiroft, Kahnooj, and Manojan. As temperatures rise and rainfall decreases, the growing season shortens and potato yields decline, leading to greater potential damage under future climate scenarios. Generally, for a one degree Celsius increase in average annual temperature, tuber yield will decrease by 4.99%.

The results of calibration and validation of the WOFOST model indicated the high accuracy of the model in simulating the phenological stages of the potato plant (planting to greening, greening to flowering and greening to physiological ripening), so that the average value of the Root Mean Square error (RMSE) for all three stages Potato growth in the studied areas was less than 10%. The results of this study showed that the length of the growth period in the studied areas will decrease under future climate conditions. The length of the growth period is reduced by 4.36 days on average in the studied areas. This reduction was also observed at different stages of growth, so that the stage of planting to greening had the least amount of reduction with an average decrease of one day, and the stage of greening to physiological ripening had the largest amount of reduction in the length of the growth period.

Keywords: Climate change, Potato physiological stages, SDSM model

شبیه‌سازی مراحل رشد گیاه سیب‌زمینی در ایران تحت سناریوهای RCP با استفاده از مدل WOFOST

فاطمه بیاتانی^۱ - غلامعباس فلاح قاله‌ری^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲

چکیده

در این تحقیق به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر مراحل رشد گیاه سیب‌زمینی در سطح کشور پرداخته شد. به این منظور ابتدا میانگین تولید و سطح زیر کشت هر استان طی سال‌های ۱۳۶۱-۱۳۹۵ محاسبه و سپس از میان استان‌هایی که بیشترین سطح زیر کشت و تولید را داشتند، ۱۰ ایستگاه به‌عنوان مراکز اصلی تولید سیب‌زمینی کشور انتخاب شدند. در ادامه جهت شبیه‌سازی اقلیم آینده از آمار دما، بارش، میانگین رطوبت‌نسبی، سرعت متوسط باد و ساعات آفتابی استفاده شد. برای شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی در آینده از داده‌های مدل گردش کلی CanESM2 تحت سناریوهای انتشار RCP، برای دوره ۲۰۱۱-۲۱۰۰ استفاده شد. برای ریزگردانی خروجی مدل CanESM2 از نرم‌افزار آماری SDSM و برای شبیه‌سازی مراحل رشد سیب‌زمینی از مدل WOFOST استفاده شد. نتایج نشان داد طول مراحل فنولوژیکی گیاه سیب‌زمینی در دوره آینده تحت سناریوهای RCP کاهش می‌یابد. به‌طور متوسط در مناطق مورد مطالعه حداکثر کاهش طول مرحله سبز شدن ۲/۳ روز، مرحله گلدهی ۲/۴ روز و مرحله سبز شدن تا رسیدگی ۶/۷ روز می‌باشد. بیشترین کاهش در طول مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی در سناریوی RCP8.5 در دوره سوم (۲۰۷۱-۲۱۰۰) ثبت شده است. از نظر ایستگاهی بیشترین کاهش طول مراحل فنولوژیکی مربوط به ایستگاه همدان و اردبیل و کمترین کاهش در ایستگاه‌های جنوبی رخ داد. بنابراین با توجه به نتایج حاصله می‌توان نتیجه گرفت که مناطق سردسیر کشور بیشتر از مناطق گرمسیر کشور تحت تأثیر اثرات تغییر اقلیم در رابطه با دوره رشد این محصول خواهند بود، همچنان که متغیرهای اقلیمی این مناطق تحت تأثیر شرایط گرمایش جهانی بیشترین افزایش دما (حداقل و حداکثر) و بیشترین کاهش بارش را داشتند.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، سیب‌زمینی، مدل SDSM، مراحل فیزیولوژیکی

مقدمه

Galloway, & D'Odorico, 2016, Godfray, Beddington, Crute, et al., 2010). به علاوه، بیماری‌ها و آفات گیاهی باعث اتلاف ۴۰ درصد از تولیدات کشاورزی در بعضی محصولات عمده در مقیاس جهانی می‌شود که امنیت غذایی را در مخاطره جدی قرار می‌دهد (Sayari, Willocquet, Pethybridge, Esker, McRoberts, & Nelson, 2019). شدت و فراوانی رخداد‌های حدی اقلیمی از قبیل امواج گرما و خشکسالی و تغییرپذیری اقلیمی ناشی از پدیده تغییر اقلیم در آینده نیز رو به فزونی خواهد گذاشت. بنابراین انتظار می‌رود فشار بر

افزایش امنیت غذایی در بطن سیاست‌های ملل متحد برای توسعه پایدار قرار دارد (UN, 2015). از طرف دیگر، رشد جمعیت جهانی، کاهش منابع طبیعی حیاتی مورد استفاده در کشاورزی و تنش‌های محیطی و تغییر اقلیم مداوم، دستیابی به این هدف را تضعیف می‌کند (González-Jiménez, Andersson, Wiik, & Zhan, 2023). تولید غذا می‌بایست بدون استفاده از منابع اضافی از قبیل انرژی و زمین قابل کشت انجام شود (Davis, Gephart, Emery, Leach,)

۱- گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

۲- گروه جغرافیا و گردشگری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

(*) نویسنده مسئول: (Email: Fallah.g@kashanu.ac.ir)

میانگین طول فصل رشد تا دوره ۲۰۵۰ برای گندم و گوجه‌فرنگی به ترتیب ۱۵ و ۱۲ روز کوتاه‌تر تخمین زده شده است (Saadi, Todorovic, Tanasijevic, Pereira, Pizzigalli, & Lionello, 2015). سازگاری ارقام سیب‌زمینی و نقش آنها در سازش با تغییرات اقلیمی آینده در کشور هندوستان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد از مجموع ۸۱ رقم، ۴۵ رقم در هند پذیرفته شده است و در هر ایالت ارقام مقاوم با تحمل بالا کشت می‌شوند که درجاتی از انعطاف‌پذیری واریته را ارائه می‌کنند. بلوغ زودرس مهم‌ترین و تحمل گرما کم اهمیت‌ترین صفت بوده است (Pradel, Gatto, Hareau, Pandey, & Bhardway, 2019).

در مطالعه‌ای به بررسی اثرات گرم شدن آب و هوا بر فنولوژی سیب زمینی در ۱۲ منطقه پنجاب پاکستان طی دوره دیدبانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۸ در دو کشت بهار و پاییز پرداخته شده است. نتایج این مطالعه حاکی از کاهش مدت زمان مراحل رشد در بهار به‌طور متوسط ۲/۴ روز در دهه (از کاشت تا غده‌زایی)، ۱/۸ روز در دهه (از غده‌زایی تا رسیدگی) و ۴/۲ روز در دهه (از کاشت تا رسیدگی) می‌باشد. در پاییز نیز این مدت زمان به‌ترتیب ۱/۹ روز در دهه، ۱ روز در دهه و ۲/۹ روز در دهه کاهش نشان داد. بر اساس مشاهدات هواشناسی محلی، میانگین دمای هوا از ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۸ در هر دهه ۰٫۸ درجه سلسیوس برای هر دو فصل بهار و پاییز افزایش یافته است. تفاوت‌های فنولوژیکی بهار و پاییز همبستگی منفی معناداری با افزایش دما در این دوره داشتند (Sahrish, Shakeel, Ghulam, et al., 2022).

مطالعه تأثیرات تغییرات اقلیمی بر تولید سیب‌زمینی در شرق آفریقا توسط (Thomas, Iwan, Annemarie, Fulco, & Teferi, 2025) انجام گرفته است. برای ارزیابی این تأثیرات، از مدل زراعی WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد بالقوه Yp و عملکرد تحت محدودیت آبی Yw در دوره‌ی دیدبانی (۲۰۱۰-۱۹۸۱)، آینده نزدیک (۲۰۳۶-۲۰۶۵) و آینده دور (۲۰۶۶-۲۱۰۰) تحت دو سناریوی اقلیمی SSP3.7 و SSP8.5 استفاده شد. این شبیه‌سازی‌ها با استفاده از یک مجموعه پنج‌تایی از مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) از پروژه ISIMIP انجام شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها به‌طور پیوسته کاهش قابل توجهی را در هر دو شاخص Yp و Yw در تمام دوره‌های آینده نشان می‌دهد.

جیانژائو و همکاران (Jianzhao, Huizi, Shenghai, et al., 2024) با استفاده از ۱۳ مدل آب و هوایی جهانی (GCMs) از سری مدل‌های جفت شده فاز ۶ (CMIP6) تحت دو سناریو انتشار SSP4.5 و SSP8.5 به ارزیابی تأثیرات تغییرات آب و هوایی بر تولید سیب‌زمینی جهت بهینه‌سازی تاریخ کاشت، آبیاری و مصرف کود در کشت سیب زمینی در ایستگاه ووچوان چین پرداختند. نتایج نشان داد در مقایسه با دوره پایه (۱۹۸۱-۲۰۱۰)، تاریخ‌های کاشت در دهه‌های ۲۰۴۰ (۲۰۳۱-۲۰۶۰) و ۲۰۸۰ (۲۰۷۱-۲۱۰۰) گسترده‌تر خواهد بود. تاریخ

تولیدات کشاورزی افزایش یابد، چون رشد محصولات کشاورزی به تغییر شرایط هواشناسی حساس است (Agovino, Casaccia, Ciommi, Ferrara, & Marchesano, 2018; UN, 2015; Lobell & Field, 2007). چندین روش آماری و فرایند محور رابطه بین تغییر اقلیم و تولیدات کشاورزی را توصیف می‌کنند. مدل‌های آماری مبتنی بر روابط تجربی بین عملکرد و عوامل محیطی در چندین مشاهدات تجربی در یک مکان یا منطقه خاص، رویکرد غالب در ارزیابی تلفات عملکرد بوده‌اند (Jones, Antle, Basso, et al., 2017). مدلسازی سیستم‌های کشاورزی در طول دهه‌های گذشته عمدتاً برای درک بهتر سهم مؤلفه‌های مختلف (تولید، کاربری زمین، منابع طبیعی، بیماری‌ها و عوامل انسانی) و برهمکنش‌های پیچیده بین آن‌ها برای تولید اولیه مورد استفاده قرار گرفته است (Jones et al., 2017).

سیب‌زمینی در میان مهم‌ترین محصولات کشاورزی مورد مصرف انسان در سطح جهان قرار دارد (Devaux, Goffart, Petsakos, et al., 2020). اما تولید سیب‌زمینی به‌طور پیوسته توسط عوامل غیرزیستی (حاصلخیزی خاک، ذخیره آب، یخبندان‌ها و خشکسالی‌ها) و عوامل زیستی تحت تأثیر قرار می‌گیرد که مورد دوم منجر به اتلاف ۲۰ درصدی تولید جهانی سیب‌زمینی می‌شود (Savary et al., 2019). اثرات تغییر اقلیم بر روی کشت سیب‌زمینی در هندوستان مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که دوره رشد محصول و راندمان آب قابل آبیاری کاهش، تبخیر- تعرق افزایش و موجب کاهش ۱۱ درصدی عملکرد سیب‌زمینی در دوره ۲۰۲۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ خواهد شد. مهم‌ترین گزینه در سازگاری با شرایط آینده، تغییر زمان کاشت در آینده خواهد بود (Naresh Kumar, Govindakrishnan, Swarooparani, Nitin, Surabhi, & Aggarwal, 2015). مطالعه اثرات بالقوه گرم شدن هوا بر روی فنولوژی محصول سیب‌زمینی و تنش دمایی در شمال اروپا نشان داد با کشت زودتر سیب‌زمینی می‌توان سیب‌زمینی را یک ماه زودتر برداشت کرد. ولی با این حال ظهور اولیه سیب‌زمینی با افزایش ریسک خطر سرمازدگی در بیشتر نقاط شمال اروپا همراه خواهد بود (Pulatov, Linderson, Hall, & Jönsson, 2015). اثرات احتمالی تغییر اقلیم بر روی رشد زیتون در منطقه مدیترانه مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این پژوهش حاکی از گسترش کشت بالقوه زیتون به سمت شمال و ارتفاعات بالاتر منطقه در ۵۰ سال آینده خواهد بود. با توجه به افزایش تبخیر- تعرق (به میزان ۸ درصد) و آب آبیاری مورد نیاز (با افزایش ۱۸/۵ درصد) و کاهش بارش، پرورش زیتون بصورت دیم دیگر امکان‌پذیر نخواهد بود (Pereira, Pizzigalli, & Lionello, 2014). با استفاده از خروجی مدل‌های اقلیمی اثرات تغییرات اقلیم بر روی آب مورد نیاز گندم زمستانه و گوجه‌فرنگی در منطقه مدیترانه شبیه‌سازی شد. با توجه به نتایج حاصل، بارش کاهش، افزایش دما (به میزان $1/5 \pm 0/27$) و تبخیر- تعرق مرجع سالیانه به میزان ۶/۷ درصد افزایش نشان می‌دهند.

Massah-Bovani, Ajorlou, Broomandnasab, & Andarzian, 2014). با مطالعه بر روی اثرات تغییر اقلیم بر روی کشت سیب‌زمینی در منطقه فریدون‌شهر اصفهان نتایج نشان داد که عملکرد غده سیب‌زمینی تحت شرایط اقلیم آینده کاهش خواهد یافت (Adavi, 2015). در مطالعه‌ای با بکارگیری مدل SWAP اثرات تغییر اقلیم بر محصولات کشاورزی در حوضه سیمینه‌رود شبیه‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از افزایش متوسط تنش آبی و دمایی و کاهش عملکرد محصولات است (Rezaee Zaman & Afruzi, 2015). با به کارگیری دو مدل GFDL-ESM2g و HadGEM2-es و سناریوهای RCP اثرات تغییر اقلیم بر ویژگی‌های زراعی و تولید سیب‌زمینی در ایران (همدان، اردبیل، اصفهان، قروه کردستان، شیراز، جیرفت، مشهد، گرگان، شاهرود و دزفول) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد همراه با افزایش میانگین دمای حداکثر بین ۱٫۲ تا ۷٫۵ درجه و دمای حداقل بین ۱٫۳ تا ۵٫۸ درجه طول مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی کاهش خواهد یافت. این کاهش بطور متوسط در مرحله سبز شدن به میزان ۳٫۲ روز، در مرحله گلدهی به میزان ۳٫۲ روز و مدت زمان پر شدن غده‌ها به میزان ۱۰٫۳ روز خواهد بود (Torkaman, 2016).

با توجه به اهمیت گیاه سیب‌زمینی در جیره غذایی بشر و تأثیر پذیری از شرایط اقلیمی و محیطی بخصوص دما و رطوبت و همچنین ضرورت بررسی تغییرات اقلیمی در دوره‌های آتی بررسی شرایط کشت گیاه سیب‌زمینی تحت شرایط تغییر اقلیم در کشور یک ضرورت می‌باشد. اطلاع از وضعیت اقلیمی آینده می‌تواند نقش بسیار مهمی در برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه منابع آبی در ادامه کشت گیاه سیب‌زمینی ایفا نماید.

روش پژوهش

جهت مطالعه و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر مراحل مختلف رشد و تولید محصولات زراعی بایستی وضعیت اقلیمی آینده برآورد گردد. در حال حاضر به وسیله‌ی مدل‌های گردش عمومی (GCM) و با استفاده از سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای وضعیت اقلیمی آینده مورد مطالعه و ارزیابی قرار می‌گیرد. تلفیق نتایج حاصل از مدل‌های اقلیمی با مدل‌های شبیه‌ساز رشد و نمو، امکان شبیه‌سازی مراحل مختلف فنولوژیکی و عملکرد گیاهان زراعی را در شرایط اقلیمی آینده فراهم می‌سازد (Carson, 1999).

مدل‌های اقلیم جهانی

مدل‌های اقلیم جهانی^۱، انواع خاصی از مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا^۲ هستند. در این مدل‌ها شبکه‌ی منظمی از نقاط، جهان را می‌پوشاند و شبیه‌سازی‌ها در نقاط شبکه‌ای، از طریق حل عددی مجموعه معادلات تفاضل محدود در هر گام زمانی، اجرا می‌شوند.

کاشت بهینه در سیب‌زمینی دیم تحت سناریوی SSP4.5 باید با تأخیر و تحت SSP8.5 با تقدیم انجام شود. تاریخ کاشت بهینه سیب‌زمینی آبی تحت هر دو سناریو SSP4.5 و SSP58.5 باید زودتر برنامه‌ریزی شود. اثرات تغییرات اقلیمی بر گیاه چغندر قند و گندم در مقیاس ماهانه در استان خراسان رضوی مورد ارزیابی قرار گرفت. دوره رشد و نیاز آبی با به کارگیری مدل OPTIWAT برآورد شده است. نتایج نشان داد نیاز آبی هر دو گیاه در تربت جام افزایش و در سرخس کاهش خواهد یافت. در سایر شهرستان‌های استان تغییر محسوسی در نیاز آبی این دو گیاه طی دوره مورد مطالعه رخ نخواهد داد (Ashraf, 2012). اثرات تغییر اقلیم بر حداقل و حداکثر دما، الگوی بارش و تبخیر- تعرق گیاهانی نظیر گندم، ذرت، گوجه‌فرنگی و چغندر قند در حوضه کشف‌رود تحت دو سناریو A2 و B2 و دو مدل گردش عمومی CGCM2 و HadCM3 مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این مطالعه حاکی از افزایش و با کاهش بارش بسته به نوع مدل استفاده شده می‌باشد. دما حداقل و حداکثر در هر دو مدل و سناریوی مورد استفاده افزایش یافت. میزان تبخیر- تعرق در دوره‌های آینده با مدل HadCM3 و با هر دو سناریو افزایشی بود در صورتی‌که در مدل CGCM2 با هر دو سناریو افزایش بسیار ناچیز بود (Sayari, 2011). تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر نیاز آبی محصولات عمده کشاورزی در شبکه آبیاری آیدوغموش (شامل گندم، جو، یونجه، سیب‌زمینی و ...) با استفاده از مدل HADCM3 مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج افزایش ریسک میزان نیاز آبی محصولات را نشان می‌دهد، به گونه‌ای که این افزایش تا حدود ۱۰ و ۱۳ درصد به ترتیب برای ریسک ۵۰ و ۲۵ درصد می‌رسد (Ashofteh, 2012). میزان نیاز آبی سویا برای دو کشت آبی و دیم در منطقه گرگان با بکارگیری مدل آب و هوا- محصول SSM شبیه‌سازی شد. نتایج حاکی از کاهش اندک تبخیر از سطح خاک و افزایش اندک تعرق از سطح گیاه برای دوره آینده خواهد بود. البته این افزایش تعرق در کشت دیم مشهودتر است. بطور کلی تبخیر- تعرق برای کشت آبی تغییر محسوسی نخواهد داشت ولی در کشت دیم تا حدود ۱۰ درصد افزایش را نشان می‌دهد (Ghorbani, Zakerinia, & Hezarjaribi, 2013). تغییر اقلیم بر محصول ذرت در سه دوره زمانی ۲۰۲۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ انجام شد. نتایج نشان داد که طول دوره کاشت تحت تأثیر تغییر اقلیم در اکثر سناریوهای مورد استفاده کاهش می‌یابد. عملکرد ذرت در دوره‌های آتی از ۱۱ تا ۳۸ درصد نسبت به شرایط کنونی کاهش می‌یابد و بطور کلی کاشت زود هنگام ذرت باعث تولید عملکرد بالاتری نسبت به تاریخ‌های کاشت در شرایط تغییر اقلیم خواهد شد (Moradi, Koocheki, & Nassiri Mahallati, 2015). مدل گیاهی CERES-Wheat برای شبیه‌سازی رشد گندم در شهر اهواز واسنجی شد. نتایج نشان داد در اثر تغییر اقلیم، دوره رشد کوتاه‌تر می‌شود (Dalghandi,

به صورت روزانه، ماهانه، فصلی و یا سالانه را دارا می باشد. ورودی این مدل داده های دیدبانی روزانه ایستگاه (پیش بینی شونده)، متغیرهای بزرگ مقیاس NCEP (پیش بینی کننده) در دوره مشابه دیدبانی (جدول ۲) و برونداد متغیرهای بزرگ مقیاس مدل های گردش عمومی تحت سناریوهای انتشار گوناگون برای دوره مطالعاتی آینده می باشد. مدل SDSM روابط آماری را بر مبنای روش رگرسیون خطی چندگانه بین متغیرهای اقلیمی بزرگ مقیاس (پیش بینی کننده ها) و محلی (پیش بینی شونده ها) محاسبه می کند (Wilby, Dawson, & Barrow, 2002).

مدل WOFOST^۸

مدل WOFOST در چارچوب مطالعات جهانی امنیت غذا و پتانسیل جهانی تولید غذا، توسط مرکز جهانی مطالعات غذایی در همکاری با دانشگاه واخنینگن و مرکز بیولوژیکی کشاورزی و حاصلخیزی خاک واخنینگن ایجاد گردید (Van Keuler & van Diepen, 1990; Spitters, Toussaint, & Goudriaan, 1990; Van Laar, Goudriaan, & van Keulen, 1992). هسته اصلی مدل رشد محصول WOFOST از مدل SUCROS گرفته شده است (Spitters et al., 1990; Van Laar et al., 1992). مدل WOFOST رشد گیاهان زراعی یک ساله را بصورت روزانه در شرایط پتانسیل، محدودیت آبیاری و مواد غذایی (نیتروژن) بر اساس خصوصیات گیاهی، پارامترهای روزانه هواشناسی و خصوصیات فیزیکی خاک شبیه سازی می کند (Boogaard, Van Diepen, Rotter, Cabrera, & Van Laar, 1998). مدل WOFOST، رشد و تجمع ماده خشک گیاه را بر مبنای سرعت روزانه فتوسنتز کانوپی شبیه سازی می کند. این مدل از پارامترها و توابع برای توصیف اثرات دما، تشعشع و تنش آبی بر فرآیندهای اصلی رشد محصول استفاده می کند. خروجی های مدل شامل عملکرد نهایی، شاخص سطح برگ، سرعت رشد محصول، میزان تجمع ماده خشک در هر یک از اندام ها و مراحل نمو با فواصل یک روزه هستند. در تحقیق حاضر برای ارزیابی دوره های فنولوژیکی سیب زمینی از مدل WOFOST استفاده شد.

متاسفانه فواید GCM ها، برای تحلیل های اقلیم منطقه ای به دلیل دقت پایین منطقه ای (معمولاً به اندازه ۵۰۰۰۰ کیلومتر مربع) و ناتوانی آن ها در حل مسائل و فرآیندهایی که در مقیاس خرد رخ می دهد، همچون ابرها و توپوگرافی، محدود می شود. به همین علت دو روش برای بدست آوردن اقلیم محلی از متغیرهای پیش بینی کننده ی جوی در سطح منطقه ای به وجود آمد. روش اول: ریزمقیاس نمایی آماری است که برای شبیه سازی اقلیم یک ایستگاه (در مقیاس محلی) برای دوره حاضر و آتی تحت سناریوهای تغییر اقلیم بکار می روند. در این روش یک ارتباط آماری با استفاده از رگرسیون ساده، چند متغیره، شبکه عصبی و بین رفتار واقعی ایستگاه و برونداد مدل گردش عمومی ایجاد می شود. روش دوم ریزمقیاس نمایی دینامیکی است که در آن مدل های اقلیم منطقه ای (RCMs)، ویژگی های دینامیکی اقلیم را در مقیاس زیر شبکه مدل های GCM با استفاده از شرایط جوی متغیر زمانی فراهم شده توسط یک GCM که به یک حوزه معین محدود می شود، شبیه سازی می کند (Fallah Ghalheri, 2014).

مدل CanESM2^۱

مدل CanESM2 یک مدل جامع جفت شده AOGCM^۲ از مرکز کانادایی تحلیل و مدل سازی اقلیم (CCCma) و جزء سری مدل های CMIP5 گزارش پنجم (AR5) و هیئت بین الدول تغییر اقلیم IPCC می باشد (Arora, Scinocca, Boer, et al., 2011). جدول ۱ مشخصات این مدل را نشان می دهد.

سناریوهای انتشار RCP^۴

هیئت بین الدول تغییر اقلیم در پنجمین گزارش خود AR5^۵ از سناریوهای RCP^۶ به عنوان نماینده های خطوط سیر غلظت های گوناگون گازهای گلخانه ای استفاده کرده است. سناریوهای انتشار دارای چهار خط سیر کلیدی با نام های RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 می باشند که بر اساس میزان واداشت تابشی آنها در سال ۲۱۰۰ نام گذاری شده اند.

مدل SDSM^۷

مدل SDSM یک مدل ریز مقیاس کننده آماری است که قابلیت توسعه سریع و کم هزینه داده های ریز مقیاس شده در مقیاس ایستگاهی

5- Fifth Assessment Report
6- Representative Concentration Pathways
7- Statistical Downscaling Model
8- World Food Studies

1- Canadian Earth System Model
2- Atmosphere/Ocean General Circulation Model or Atmosphere/Ocean Global Climate Model
3 The Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)
4- Representative Concentration Pathways

جدول ۱- مشخصات مدل CanESM2

Table 1- Specifications of the CanESM2 model

نام مدل Model Name	CanESM2
قدرت تفکیک اتمسفری (درجه) (طول×عرض) Atmospheric Resolution (degree) (length x width)	2.8°×2.81°
قدرت تفکیک اقیانوسی (درجه) (طول×عرض) Ocean Resolution (degree) (length x width)	1.41°×0.94°
گروه موسس Founding Group	(CCCMA) Canada
دوره شبیه‌سازی (تاریخی/آینده) Simulation Period (historical/future)	2011-2100/1850-2005
سناریوهای شبیه‌سازی Simulation Scenarios	RCP 8.5 و RCP6 ،RCP4.5 ،RCP2.6

آن به ۱+ نزدیکتر باشد، نشان‌دهنده کارایی بالای مدل در شبیه‌سازی داده‌ها است. به‌طور کلی مقدار عددی RMSE و ME برابر صفر و مقدار E و R² برابر با یک خواهند بود. نتایج مقادیر آزمون (T) بیشتر از مقدار ۰.۰۵ باشد نشان‌دهنده این مفهوم است که مقادیر شبیه‌سازی شده در سطح اطمینان ۹۵ درصد با مقادیر اندازه‌گیری شده اختلاف معنی‌داری ندارند. لذا مدل از دقت بالایی در شبیه‌سازی برخوردار است (Torkaman, 2016).

داده‌های هواشناسی و مزرعه‌ای مورد نیاز

داده‌های روزانه متغیرهای اقلیمی شامل بیشینه دما، کمینه دما، بارش، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و میانگین سرعت باد طی سال‌های ۱۹۸۱-۲۰۰۵ مربوط به ایستگاه‌های همدید مورد مطالعه از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. برای ارزیابی پیامدهای تغییر اقلیم بر طول دوره رشد و مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی از داده‌های مدل CanESM2 در دوره ۲۰۱۱-۲۰۹۹ تحت سه سناریوی واداشت تابشی (RCPs) استفاده شد. داده‌های مدل CanESM2 نیز توسط مدل SDSM ریزگردانی شدند.

به‌منظور تهیه داده‌های مزرعه‌ای جهت کالبراسیون و تعیین اعتبار مدل WOFOST در شرایط پتانسیل (شرایط بدون محدودیت آب و غذا، کنترل بیماری‌ها و علف‌های هرز)، داده‌های طرح‌های تحقیقاتی مراکز تحقیقات کشاورزی مناطق همدان، اصفهان، اردبیل، شیراز، تبریز، شهرکرد، جیرفت، کهنوج، منوجان و سنندج که مراکز اصلی تولید سیب زمینی کشور می‌باشند، طی سال‌های ۹۳-۱۳۸۹ جمع‌آوری و به‌عنوان دوره دیدبانی مورد استفاده قرار گرفت.

واسنجی و تعیین اعتبار مدل

جهت ارزیابی توانمندی و دقت مدل SDSM در شبیه‌سازی داده‌های دیدبانی (۱۹۸۱-۲۰۰۵) و هم‌منظور تعیین اعتبار و ارزیابی مدل WOFOST در شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی مختلف گیاه سیب‌زمینی از معیارهای آماری، همچون ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE^۱)، جذر میانگین مجذور خطای نرمال شده (RMSEn^۲)، حداکثر خطا (ME^۳)، ضریب کارایی مدل (E^۴)، ضریب تبیین (R²) و آزمون (T) (معادلات ۱-۳ تا ۱۳-۳) استفاده گردید.

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

$$RMSEn = 100 \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\frac{\bar{M}}{100}}} \quad (۲)$$

$$ME = \max |S_i - M_i| \frac{100}{\bar{M}} \quad (۳)$$

$$E = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})} \right)^2 \quad (۴)$$

در این معادلات، S_i و M_i به‌ترتیب مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده، $\bar{M}$ میانگین مقادیر M_i و n تعداد مشاهدات می‌باشد. RMSE میانگین انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری شده است که نشان‌دهنده اطمینان مدل می‌باشد. هر چه مقدار RMSE به صفر نزدیکتر باشد نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل می‌باشد. RMSEn به صورت درصد اختلاف نسبی مقادیر شبیه‌سازی شده در برابر مقادیر دیدبانی عنوان می‌شود و بر اساس تعریف، دقت شبیه‌سازی مدل در صورتی که مقدار RMSE کمتر از ۱۰٪ باشد، عالی، اگر بین ۱۰ تا ۲۰٪ باشد، خوب، اگر بین ۲۰ تا ۳۰٪ باشد، متوسط و اگر بالاتر از ۳۰٪ باشد، ضعیف برآورد می‌گردد (Taei Semiromi, Moradi, & Khodagholi, 2014). مقادیر بالای ME نشان‌دهنده بدترین حالت کارایی مدل می‌باشد. ضریب کارایی E بیانگر نسبت انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از اندازه‌گیری شده به انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده از میانگین می‌باشد. مقدار E بین -∞ تا ۱+ متغیر است. هر چه مقدار

3- Maximum Error

4- Coefficient of efficiency

1- Root Mean Square Error

2- Root Mean Square Error-Normalized

جدول ۲- فهرست متغیرهای NCEP

Table 2- List of NCEP variables

ردیف Row	متغیر پیش‌بینی کننده Predictor variable	توضیحات Description
1	P5_f	سرعت باد زمینگرد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Geostrophic airflow velocity at 500 hPa
2	P5_u	مؤلفه مداری سرعت باد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Horizontal wind at 500 hPa
3	P5_v	مؤلفه نصف‌النهاری سرعت باد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Zonal wind at 500 hPa
4	P5_z	تاوایی در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Vorticity at 500 hPa
5	P5th	سمت باد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Wind direction at 500 hpa
6	P5zh	واگرایی باد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Divergence at 500 hPa
7	P500	ارتفاع ژئوپتانسیل در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Geopotential height at 500 hPa
8	r500	رطوبت نسبی در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Relative humidity at 500 hPa
9	P_f	سرعت باد زمینگرد Surface geostrophic airflow
10	P_u	مؤلفه مداری سرعت باد Surface horizontal wind
11	P_v	مؤلفه نصف‌النهاری سرعت باد Surface zonal wind
12	P_z	تاوایی Surface vorticity
13	P_th	سمت باد Surface wind direction
14	P_zh	واگرایی باد Surface divergence
15	P8_f	سرعت باد زمینگرد در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال Geostrophic airflow velocity at 850 hPa
16	P8_u	مؤلفه مداری سرعت باد در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال Horizontal wind at 850 hPa
17	P8_v	مؤلفه نصف‌النهاری سرعت باد در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال Zonal wind at 850 hPa
18	P8_z	تاوایی در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال Vorticity at 850 hPa
19	P8th	سمت باد در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال Wind direction at 850 hpa
20	P8zh	واگرایی باد در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال Divergence at 850 hPa
21	P850	ارتفاع ژئوپتانسیل در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال Geopotential height at 850 hPa
22	r850	رطوبت نسبی در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال Relative humidity at 850 hPa
23	Mslp	میانگین فشار سطح دریا Mean sea level pressure
24	Rhum	رطوبت نسبی نزدیک سطح زمین Near surface relative humidity
25	Shum	رطوبت ویژه نزدیک سطح زمین Near surface specific humidity
26	temp	دمای هوا در ارتفاع ۲ متری 2-m air temperature

این اطلاعات شامل تاریخ کاشت، مراحل فنولوژیکی از کاشت تا سبز شدن، سبز شدن تا گلدهی و سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی گیاه سیبزمینی در هر یک از مناطق مطالعاتی می‌باشد. به‌منظور کالیبراسیون مدل WOFOST با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای، از داده‌های فنولوژیکی در سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ و از داده‌های فنولوژیکی در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳ برای تعیین اعتبار مدل استفاده شد. به‌منظور واسنجی و تعیین اعتبار مدل WOFOST در مناطق مورد مطالعه ابتدا لازم است تا پارامترها (ضرایب) گیاهی سیبزمینی برای شرایط مختلف اقلیمی تنظیم شوند. بر همین اساس ایجاد فایل گیاهی که حساس‌ترین قسمت کالیبراسیون مدل WOFOST است، انجام شد.

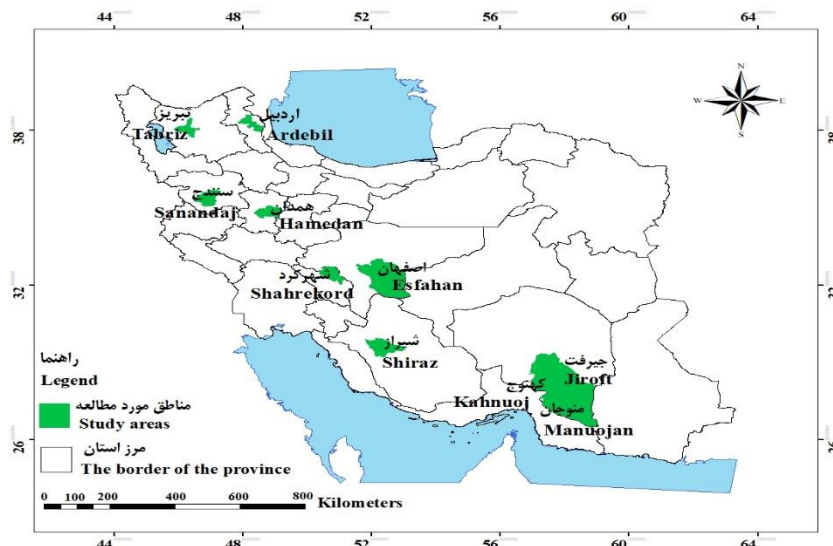
مناطق مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی در این پژوهش مناطقی از کشور هستند که بالاترین سطح تولید سیبزمینی را در کشور دارا می‌باشند. با توجه به تنوع اقلیمی در کشور محصول سیبزمینی به دو صورت بهار و پاییزه کشت و برداشت می‌شود. بنابراین در انتخاب ایستگاه‌های مورد مطالعه سعی بر این بوده است که هر دو کشت بهار و پاییزه مورد بررسی قرار گیرند. مناطق مورد مطالعه در این تحقیق شامل ایستگاه‌های اردبیل، تبریز، شهرکرد، همدان، اصفهان، سنندج و شیراز (کشت بهار) و جیرفت، مینوجان (کشت پاییزه) می‌باشند. مناطق نام برده جزو مراکز اصلی تولید سیبزمینی کشور محسوب می‌شوند. اساس انتخاب این مناطق بر پایه میانگین درصد سطح تولید و سطح زیر کشت هر

استان از تولید سیبزمینی کشور طی سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۶۱ بود (Agricultural Statistics, 2016). از میان استان‌هایی که بیشترین سطح زیر کشت و تولید را داشتند، ۱۰ ایستگاه به‌عنوان مراکز اصلی تولید سیبزمینی کشور انتخاب شدند (شکل ۱). مناطق نامبرده ۶۲٫۷۲ درصد سطح زیر کشت و ۶۸٫۲۷ درصد تولیدات سیبزمینی کشور را به خود اختصاص داده‌اند.

نتایج

مدل WOFOST به‌منظور پیش‌بینی مدت زمان مراحل کاشت تا سبز شدن، سبز شدن تا آغاز گلدهی و سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی، برای تمام ۱۰ ایستگاه تولید کننده سیبزمینی در کشور طی سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ واسنجی و در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳ صحت‌سنجی شد. بطور میانگین Tsum1 و Tsum2 به‌ترتیب ۵۰۲/۱ و ۸۱۵/۳۷ درجه-روز (Cd°) محاسبه گردید (جدول ۳). جدول ۴ مقادیر استفاده شده‌ی Tsum1 و Tsum2 را برای هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه در مرحله کالیبراسیون و در شرایط پتانسیل در مدل WOFOST نشان می‌دهد. بر اساس نتایج مقادیر اندازه‌گیری شده در مدت ۵ سال با تاریخ کاشت‌های مرسوم (جدول ۴) و (جدول ۵)، میانگین طول دوره کاشت تا سبز شدن ۲۳/۴۸ روز، میانگین دوره سبز شدن تا آغاز گلدهی ۲۹/۹۲ روز و میانگین طول دوره سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی ۱۰۹/۹۴ روز، برای هر ۱۰ ایستگاه مورد مطالعه محاسبه و تعیین گردید.



شکل ۱- موقعیت مناطق مورد مطالعه
Figure 1- Location of the study areas

مدل در مرحله کالیبراسیون طول دوره سبز شدن را ۲۳/۲۷ روز، دوره آغاز گلدهی را ۲۹/۸۳ روز و طول دوره رسیدگی فیزیولوژیکی را ۱۰۹/۷۳ روز، برای ۱۰ ایستگاه مورد مطالعه شبیه‌سازی نمود. در مرحله اعتبارسنجی مدل بطور میانگین طول دوره سبز شدن را ۲۳/۸ روز، دوره آغاز غده‌زایی را ۳۰/۰۵ روز و طول دوره رسیدگی فیزیولوژیکی را ۱۱۰/۲۵ روز برای تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه شبیه‌سازی و پیش بینی نمود. نتایج شاخص‌های آماری ارزیابی مدل در مراحل مختلف فنولوژیکی گیاه سیب‌زمینی در جدول‌های ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده دقت بالای مدل در مرحله کالیبراسیون و اعتبارسنجی است.

طول دوره کاشت تا سبز شدن

مقادیر جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای مرحله فنولوژی کاشت تا سبز شدن بطور متوسط ۱/۳ روز در مرحله کالیبراسیون (سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲) و ۱ روز در مرحله اعتبارسنجی (سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳) مدل به‌دست آمد. ایستگاه جیرفت و شهرکرد با ۱/۷ روز بیشترین میزان خطا و ایستگاه اردبیل با ۰/۶ روز کمترین خطا را در مرحله کالیبراسیون به خود اختصاص داده‌اند (جدول ۶). حداکثر انحراف (RMSEn) در مرحله‌ی سبز شدن بطور متوسط ۵/۷ درصد در مرحله‌ی کالیبراسیون مدل به‌دست آمد. در مرحله اعتبارسنجی این میزان تا ۴/۳ درصد کاهش یافت (جدول ۶). در شکل ۲ مقایسه‌ی مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در مراحل کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل برای مرحله‌ی فنولوژیکی سبز شدن نشان داده شده است.

جدول ۳- پارامترهای گیاهی مدل WOFOST در مرحله کالیبراسیون در شرایط پتانسیل

Table 3- Plant parameters of the WOFOST model in the calibration stage under potential conditions

پارامتر	توصیف پارامتر	مقدار	واحد
Parameter	Parameter description	Value	Unit
TBASEEM	دمای پایین‌تر از آستانه برای ظهور Temperatures below the threshold for emergence	5	° C
TSUMEM	مجموعه درجه روز از کاشت تا سبز شدن Daily degree set from planting to emergence	434.9	° Cd
TSUM1	مجموعه درجه روز از سبز شدن تا گلدهی Daytime collection from emergence to flowering	502.1	° Cd
TSUM2	مجموعه درجه روز از گلدهی تا بلوغ یا برداشت Daily degree set from flowering to maturity or harvest	815.37	° Cd
SLATB	سطح ویژه برگ Special surface of leaves	0.0020	Ha kg ⁻¹
AMAXTB	CO ₂ حداکثر سرعت جذب Maximum rate of CO ₂ uptake	35	Kg ha ⁻¹ hr ⁻¹
CVL	بهره‌وری تبدیل CO ₂ جذب شده به برگ Conversion Productivity CO ₂ Absorbed to Leaf	0.760	kg kg ⁻¹
CVR	بهره‌وری تبدیل CO ₂ جذب شده به ریشه Conversion Productivity CO ₂ Absorbed to Root	0.755	kg kg ⁻¹
CVS	جذب شده به ساقه CO ₂ بهره‌وری تبدیل Conversion Productivity CO ₂ Absorbed to Stem	0.758	kg kg ⁻¹

جدول ۴- مقادیر TSUM1 و TSUM2 در مرحله کالیبراسیون در شرایط پتانسیل

Table 4- TSUM1 and TSUM2 values in the calibration phase under potential conditions

ایستگاه	کهنوج	جیرفت	همدان	اصفهان	شیراز	شهرکرد	سنندج	تبریز	اردبیل	منوجان
Station	Kahnuoj	Jiroft	Hamedan	Esfahan	Shiraz	Shahrekord	Sanandaj	Tabriz	Ardebil	Manuojan
TSUM1	560	363.3	730	363.34	420	560	338.67	649	525.3	552.3
TSUM2	630	809.2	1143.07	730	737.57	835.55	747.9	1325	771.44	757.1

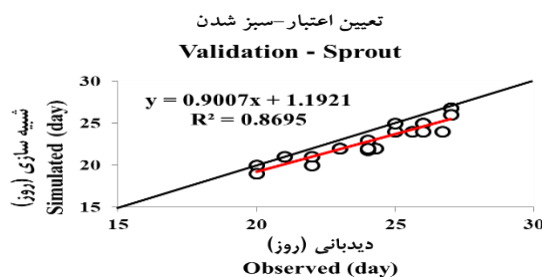
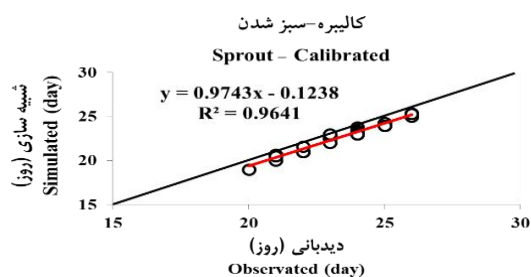
جدول ۵- شبیه‌سازی طول دوره مراحل فنولوژیکی بر اساس تاریخ کاشت (روز از اول ژانویه) بصورت میانگین طی سال‌های ۹۳-۱۳۸۹

Table 5- Simulation of the duration of phenological stages based on planting date (days from January 1) as an average during the years 2010-2014

شهر City	مرحله فنولوژیکی Phenological stages			
	تاریخ کاشت Date of planting (day)	کاشت تا سبز شدن Planting-Sprout (day)	سبز شدن تا گلدهی Sprout-flowering (day)	سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی Sprout-physiological maturity (day)
اردبیل Ardebil	140	24.8	26.8	118.8
تبریز Tabriz	130	21.4	27.2	107.8
سنندج Sanandaj	90	24.4	30.2	107
شهرکرد Shahrekord	140	25	28.2	120
شیراز Shiraz	60	22.4	27.4	109.4
اصفهان Esfahan	70	22.8	29.4	111.4
همدان Hamedan	90	23.4	27.6	116.8
جیرفت Jiroft	260	24.8	35	104.2
کهنوج Kahnuoj	260	23.6	34.4	101.6
منوجان Manujan	260	22.2	33	102.4
میانگین Avrage	---	23.48	29.9	109.9

کالیبراسیون و اعتبارسنجی حاکی از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی است. مقادیر شاخص حداکثر خطا (ME) نشان از دقت مدل در شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی گیاه سیب‌زمینی است (جدول ۶).

نتایج آزمون T در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی شده نزدیک به مقادیر واقعی است. مقدار ضریب تبیین برای مرحله‌ی سبز شدن بصورت میانگین ۰/۹۷ در مرحله‌ی کالیبراسیون مدل محاسبه شد. نتایج حاصل از ارزیابی ضریب کارایی در مراحل



شکل ۲- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده برای مرحله‌ی سبز شدن گیاه سیب‌زمینی (داده‌های سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ برای مرحله‌ی کالیبراسیون و داده‌های سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳ برای مرحله‌ی اعتبارسنجی)، خط یک به یک نیز در شکل نشان داده شده است.

Figure 2- Comparison of simulated values with measured values for the potato plant emergence stage (Data from 2010, 2011, and 2013 for the calibration stage and data from 2012 and 2014 for the validation stage), the one-to-one line is also shown in the figure.

جدول ۶- ارزیابی مدل WOFOST در شبیه‌سازی مرحله‌ی سبز شدن گیاه سیب‌زمینی با استفاده از شاخص‌های آماری

Table 6- Evaluation of the WOFOST model in simulating the germination stage of potato plants using statistical indicators

Table 3 Validation of the WOT-GM model in simulating the germination stage of potato plants using statistical indicators										
ایستگاه Station	دیدبانی Observation	شبیه سازی Simulation	تفاوت Difference	RMSE %	RMSE	R ²	T	ME	E	
کالیبراسیون Calibrated	اردبیل Ardebil	23.7	23.4	0.27	2.5	0.6	0.99	0.78	4.2	0.7
	تبریز Tabriz	21.3	20	1.3	6.6	1.4	0.96	0.6	9.4	0.4
	سنندج Sanandaj	23	22.1	0.87	4.05	0.93	0.98	0.75	5.2	0.5
	شهرکرد Shahrekind	24.7	23	1.7	7	1.7	0.99	0.67	8.1	0.3
	شیراز Shiraz	22.3	21	1.3	6.3	1.4	0.99	0.74	6.9	0.4
	اصفهان Esfahan	24	22.5	1.5	6.3	1.5	0.99	0.69	8.3	0.34
	همدان Hamedan	22.7	21.3	1.3	6.2	1.4	0.98	0.74	8.8	0.45
	جیرفت Jiroft	25	23.3	1.7	6.9	1.7	0.93	0.53	8	0.34
	کهنوج Kahnuoj	23.3	22.3	1	5.5	1.3	0.94	0.65	8.6	0.48
	منوجان Manuojan	22.7	21.7	1	5.7	1.3	1	0.61	8.8	0.46
اعتبار سنجی Validation	اردبیل Ardebil	26.5	25.4	1.1	2.2	0.6	1	0.61	3.7	-1.4
	تبریز Tabriz	21.5	20.5	1	3.8	0.82	1	0.7	4.6	0.55
	سنندج Sanandaj	26.5	25	1.5	4.9	1.3	1	0.44	7.5	-5
	شهرکرد Shahrekind	25.5	24.5	1	2.3	0.6	1	0.58	3.9	-1
	شیراز Shiraz	22.5	21.5	1	5.1	1.1	1	0.63	8.8	0.6
	اصفهان Esfahan	21	20.5	0.5	2.7	0.58	1	0.77	4.8	0.5
	همدان Hamedan	24.5	23.5	1	3.3	0.82	1	0.43	4.1	-3
	جیرفت Jiroft	24.5	23	1.5	5.3	1.3	1	0.56	6.3	0.4
	کهنوج Kahnuoj	24	23	1	7.9	2	1	0.46	10.6	-0.3
	منوجان Manuojan	21.5	21	0.5	5.7	1.3	1	0.31	8.8	-5

طول دوره سبزشدن تا گلدهی

مقدار جذر میانگین مربعات خطا RMSE برای مرحله فنولوژی سبزشدن تا گلدهی بطور متوسط ۰/۹۹ روز در مرحله کالیبراسیون (۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲) و ۰/۹۰ روز در مرحله اعتبارسنجی مدل (سال های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳) به دست آمد. در ایستگاه جیرفت با ۱/۷ روز

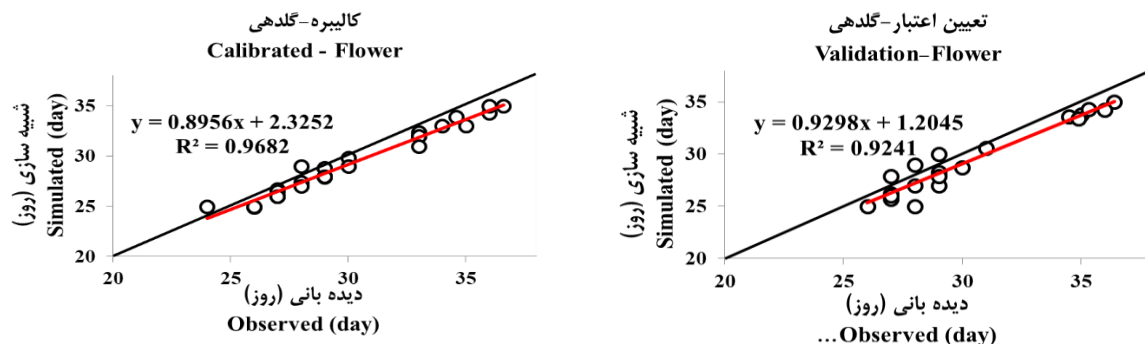
بیشترین میزان خطا و ایستگاه اصفهان با ۰/۳ روز کمترین خطا در مرحله کالیبراسیون محاسبه شد. در مرحله اعتبارسنجی ایستگاه سنندج، همدان و منوجان با ۱/۳ روز و ایستگاه کهنوج با ۰/۱۳ روز به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار RMSE بدست آمد (جدول ۷). بیشینه انحراف (RMSEn) در مرحله ی گلدهی بطور متوسط ۳/۳۳ درصد در مرحله ی کالیبراسیون و در مرحله اعتبارسنجی ۳/۲ درصد محاسبه شد

(جدول ۷). در مرحله کالیبراسیون حداکثر انحراف مربوط به ایستگاه جیرفت به میزان ۴/۹ درصد و در مرحله اعتبارسنجی حداکثر انحراف مربوط به ایستگاه همدان به میزان ۵/۴ درصد می‌باشد (جدول ۷). در شکل ۳ مقایسه‌ی مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در

مراحل کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل برای مرحله‌ی فنولوژیکی گلدهی نشان داده شده است. نتایج آزمون T در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان می‌دهد که مقادیر شبیه‌سازی شده نزدیک به مقادیر واقعی است.

جدول ۷- ارزیابی مدل WOFOST در شبیه‌سازی مرحله‌ی گلدهی گیاه سیب‌زمینی با استفاده از شاخص‌های آماری
Table 7- Evaluation of the WOFOST model in simulating the flowering stage of potato plants using statistical indicators

Table 7. Evaluation of the WOI-GSI model in simulating the flowering stage of potato plants using statistical indicators										
	ایستگاه	دیدبانی	شبیه‌سازی	تفاوت	RMSE %	RMSE	R ²	T	ME	E
	Station	Observation	Simulation	Difference						
کالیبراسیون Calibrated	اردبیل Ardebil	26.7	26	0.7	3.8	1	0.92	0.81	3.8	0.88
	تبریز Tabriz	27	25.7	1.3	3.7	1	0.99	0.81	3.7	0.5
	سنندج Sanandaj	30.7	29	1.7	4.6	1.4	0.99	0.42	6.5	0.54
	شهرکرد Shahrekord	28.3	27.7	0.6	2.3	0.65	0.88	0.58	3.5	0.36
	شیراز Shiraz	27.3	26.3	1	3.8	1	0.99	0.46	4	0.33
	اصفهان Esfahan	29	28.5	0.5	1.3	0.38	0.96	0.73	2.1	0.5
	همدان Hamedan	27.6	27	0.6	2.5	0.7	0.99	0.49	3.9	0.32
	جیرفت Jiroft	35.3	35	0.3	4.9	1.7	0.75	0.72	5.7	0.62
	کهنوج Kahnuoj	34.4	33.1	1.3	3.9	1.3	0.81	0.4	5.8	0.23
	منوجان Manuojan	32.3	33	0.7	2.5	0.82	0.78	0.98	3.1	0.98
	اردبیل Ardebil	27.5	25.5	2	3.3	0.9	1	0.96	4.4	0.6
	تبریز Tabriz	27.5	26.3	1.2	3.4	0.95	1	0.94	4.7	0.4
اعتبارسنجی Validation	سنندج Sanandaj	29.5	28.2	1.3	3.2	0.92	1	0.87	4.4	0.4
	شهرکرد Shahrekord	28	27	1	2.1	0.58	1	0.68	2.8	0.3
	شیراز Shiraz	27.5	26	1.5	4.7	1.3	1	0.49	7.3	0.3
	اصفهان Esfahan	30	29.4	0.5	2.8	0.77	1	0.95	3.6	0.8
	همدان Hamedan	27.5	27.4	0.1	5.4	1.3	1	0.3	6.7	0.96
	جیرفت Jiroft	34.5	34.4	0.1	2.6	0.9	1	0.96	3.47	0.6
	کهنوج Kahnuoj	34.5	34.4	0.15	0.37	0.13	1	0.86	0.58	0.4
	منوجان Manuojan	34	33.5	0.5	3.8	1.3	1	0.7	5.9	0.5



شکل ۳- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده برای مرحله‌ی گلدهی گیاه سیب‌زمینی (داده‌های سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ برای مرحله‌ی کالیبراسیون و داده‌های سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳ برای مرحله‌ی اعتبارسنجی)، خط یک به یک نیز در شکل نشان داده شده است.

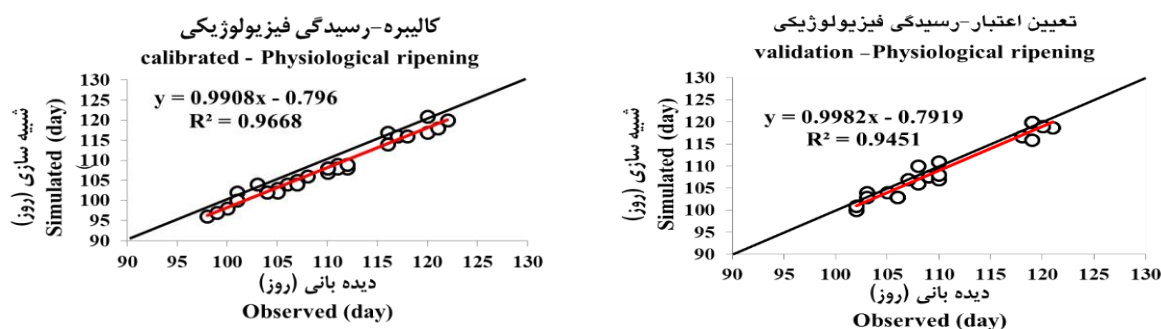
Figure 3- Comparison of simulated values with measured values for the flowering stage of potato plants (Data from 2010, 2011 and 2013 for the calibration stage and data from 2012 and 2014 for the validation stage), the one-to-one line is also shown in the figure.

ایستگاه منوجان با ۰/۵۸ روز به‌ترتیب بیشترین و کمترین مقدار RMSE بدست آمد (جدول ۸). حداکثر انحراف (RMSEn) در مرحله‌ی رسیدگی بطور متوسط ۲/۱۳ درصد در مرحله‌ی کالیبراسیون و در مرحله اعتبارسنجی ۱/۵ درصد محاسبه شد (جدول ۸). در شکل ۴ مقایسه‌ی مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در مراحل کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل برای مرحله‌ی فنولوژیکی سبزشدن تا رسیدگی نشان داده شده است. نتایج آزمون T در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان می‌دهد که مقادیر شبیه‌سازی شده نزدیک به مقادیر واقعی است. مقدار ضریب تبیین برای مرحله‌ی رسیدگی بطور متوسط ۰/۸۵ در مرحله‌ی کالیبراسیون مدل محاسبه گردید. نتایج حاصل از ارزیابی ضریب کارایی در مرحله‌ی کالیبراسیون و اعتبارسنجی حاکی از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی است. مقادیر شاخص حداکثر خطا ME نشان از دقت مدل در شبیه‌سازی مرحله رسیدگی گیاه سیب‌زمینی است (جدول ۸).

مقدار ضریب تبیین برای مرحله‌ی گلدهی بطور متوسط ۰/۸۹ در مرحله‌ی کالیبراسیون مدل محاسبه گردید. نتایج حاصل از ارزیابی ضریب کارایی در مرحله‌ی کالیبراسیون حاکی از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی است. مقادیر شاخص حداکثر خطا ME نشان از دقت مدل در شبیه‌سازی مرحله گلدهی گیاه سیب‌زمینی است (جدول ۷).

طول دوره سبزشدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی

بطور متوسط مقدار جذر میانگین مربعات خطا RMSE برای مرحله فنولوژی سبزشدن تا رسیدگی ۲/۳۴ روز در مرحله کالیبراسیون (۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲) و ۱/۶۴ روز در مرحله اعتبارسنجی (۱۳۹۱ و ۱۳۹۳) مدل به‌دست آمد. در ایستگاه جیرفت با ۳/۵۶ روز بیشترین میزان خطا و در ایستگاه اردبیل با ۱/۴ روز کمترین خطا در مرحله کالیبراسیون محاسبه شد. در مرحله اعتبارسنجی نیز ایستگاه جیرفت با ۴/۹ روز و



شکل ۴- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده برای مرحله‌ی رسیدگی فیزیولوژیکی گیاه سیب‌زمینی (داده‌های سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ برای مرحله‌ی کالیبراسیون و داده‌های سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳ برای مرحله‌ی اعتبارسنجی)، خط یک به یک نیز در شکل نشان داده شده است.

Figure 4- Comparison of simulated values with measured values for the physiological maturity stage of potato plants (Data from 2010, 2011 and 2013 for the calibration stage and data from 2012 and 2014 for the validation stage), the one-to-one line is also shown in the figure

جدول ۸- ارزیابی مدل WOFOST در شبیه‌سازی مرحله‌ی رسیدگی گیاه سیب‌زمینی با استفاده از شاخص‌های آماری
Table 8- Evaluation of the WOFOST model in simulating the potato plant maturity stage using statistical indicators

Table 3- Evaluation of the WOI GCM model in simulating the potato plant maturity stage using statistical indicators										
ایستگاه Station	دیدبانی Observation	شبیه سازی Simulation	تفاوت Difference	RMSE %	RMSE	R ²	T	ME	E	
کالیبراسیون Calibrated	اردبیل Ardebil	118.3	117.7	0.7	1.2	1.4	0.86	0.74	1.7	0.6
	تبریز Tabriz	107.3	105	2.3	2.2	2.4	0.96	0.36	2.8	0.45
	سنندج Sanandaj	107	104.7	2.3	2.2	2.4	0.96	0.4	2.8	0.61
	شهرکرد Shahreکرد	120	118	2	1.8	2.2	0.77	0.36	2.5	0.57
	شیراز Shiraz	110.3	107.7	2.7	2.4	2.7	0.88	0.15	2.7	0.1
	اصفهان Esfahan	112.7	110.7	2	2.6	2.9	0.76	0.6	3.5	0.68
	همدان Hamedan	115.7	113.3	3.3	2	2.4	0.98	0.54	2.6	0.83
	جیرفت Jiroft	103.7	110.3	4	3.4	3.6	0.81	0.3	4.8	0.52
	کهنوج Kahnuoj	101	100	1	1.7	1.7	0.72	0.94	2.5	0.92
	منوجان Manuojan	101.3	99.7	1.7	1.7	1.7	0.95	0.46	2	0.6
اعتبار سنجی Validation	اردبیل Ardebil	119.5	117.5	2	0.83	0.99	1	0.86	1.2	0.8
	تبریز Tabriz	108.5	107.5	1	1.1	1.2	1	0.6	1.8	0.56
	سنندج Sanandaj	107	106.5	0.5	1.9	2.1	1	0.9	2.8	0.5
	شهرکرد Shahreکرد	120	119.3	0.65	1.2	1.5	1	0.64	1.9	0.35
	شیراز Shiraz	108	105	3	2.3	2.4	1	0.4	2.8	0.25
	اصفهان Esfahan	109.5	109.3	0.2	0.91	0.99	1	0.92	1.3	0.2
	همدان Hamedan	118.5	118.5	0.1	0.76	0.9	1	0.96	1	0.6
	جیرفت Jiroft	105	99.5	5.5	4.7	4.9	1	0.47	7.6	0.39
	کهنوج Kahnuoj	102.5	102.4	0.15	0.92	0.94	1	0.93	1.3	0.4
	منوجان Manuojan	104	103.5	0.5	0.55	0.58	1	0.7	0.96	0.5

کارایی مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM

عملکرد مدل SDSM در ریزمقیاس‌نمایی متغیرهای اقلیمی بوسیله‌ی شاخص‌های آماری (جدول ۹) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد مقدار ضریب تبیین R² در همه موارد از مقدار قابل توجهی برخوردار است (بالای ۰/۹۹). حداکثر خطا (ME) برای شبیه‌سازی

دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش، سرعت باد، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی بطور میانگین برای هر ۱۰ ایستگاه مورد مطالعه به ترتیب ۱/۳، ۰/۲۵، ۱۳/۶، ۷/۳، ۵ و ۲/۳ بدست آمد که نشان از خطای بیشتر شبیه سازی بارش نسبت به پارامترهای دیگر می‌باشد. شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در شبیه‌سازی بارش نیز نسبت به دیگر

پارامترها به مراتب بیشتر بوده (۱/۱) و خطای بیشتری را نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به نتایج **جدول ۹** توانایی مدل SDSM در شبیه‌سازی پارامترهای هواشناسی تأیید شده ولی با این حال مدل در شبیه‌سازی بارش دقت کمتری را نشان می‌دهد که با یافته‌های محققین (Jafarpour, 2016; Nazari, Taheriun, & Ahmadi, 2015;)

(Tai Samiromi et al., 2014) مطابقت دارد. در ادامه نتایج بدست آمده از ارزیابی مدل SDSM در **جدول ۹**، ارائه شده است. در **جدول ۱۰**، متغیرهای بزرگ مقیاس (پیش‌بینی کننده) استفاده شده مدل‌های گردش عمومی تحت سناریوهای انتشار RCP برای دوره مطالعاتی آینده به‌عنوان نمونه در ایستگاه اصفهان ذکر شده است.

جدول ۹- کارایی مدل SDSM در شبیه‌سازی بارش (P) و میانگین دمای حداقل (Tmin) و حداکثر (Tmax) در دوره دیدبانی با داده‌های NCEP
Table 9- Efficiency of the SDSM model in simulating precipitation (P) and average minimum (Tmin) and maximum temperatures (Tmax) during the observation period with NCEP data

ایستگاه Station	متغیر Variable	معیار دقت Accuracy criteria							
		درصد خطا Percentage error	Ens	R ²	RMSE%	RMSE	E	ME	T
اردبیل Ardebil	دمای حداقل T-min	-0.35	0.99	1	0.97	0.02	0.99	2.1	0.99
	دمای حداکثر T-max	-0.04	0.99	1	0.2	0.03	0.99	0.4	0.99
	بارش Precipitation	-3.76	0.99	0.99	0.56	1.65	0.99	16.3	0.92
	سرعت باد FF	0.3	0.99	0.99	0.2	0.009	0.98	0.3	0.93
	رطوبت نسبی HUM	-0.003	0.99	1	0.65	0.001	0.99	0.03	0.99
	ساعات آفتابی SUN	0.1	0.99	0.99	0.08	0.05	0.98	0.1	0.92
	دمای حداقل T-min	0.15	0.99	1	0.4	0.03	1	1	0.99
	دمای حداکثر T-max	0.006	0.99	1	0.16	0.03	1	0.34	0.99
	بارش Precipitation	-1.4	0.99	0.99	0.19	0.5	0.99	5.96	0.96
	سرعت باد FF	0.08	0.99	0.99	0.06	0.003	0.98	0.08	0.97
تبریز Tabriz	رطوبت نسبی HUM	-0.03	0.99	0.99	0.02	0.01	0.97	0.03	0.95
	ساعات آفتابی SUN	-0.1	0.99	0.99	0.07	0.005	0.94	0.1	0.92
	دمای حداقل T-min	-0.004	0.99	1	0.5	0.03	0.99	1.2	0.99
	دمای حداکثر T-max	-0.05	0.99	1	0.15	0.03	0.99	0.4	0.99
	بارش Precipitation	-0.99	0.99	0.99	0.26	1.2	1	6.7	0.98
	سرعت باد FF	-0.3	0.99	0.99	0.2	0.004	0.97	0.3	0.97
	رطوبت نسبی HUM	-0.7	0.99	0.99	5.4	0.6	0.98	7.7	0.95
	ساعات آفتابی SUN	0.7	0.99	0.99	1.8	0.1	0.98	2.5	0.98
	دمای حداقل T-min	-0.004	0.99	1	0.5	0.03	0.99	1.2	0.99
	دمای حداکثر T-max	-0.05	0.99	1	0.15	0.03	0.99	0.4	0.99
سنندج Sanandaj	بارش Precipitation	-0.99	0.99	0.99	0.26	1.2	1	6.7	0.98
	سرعت باد FF	-0.3	0.99	0.99	0.2	0.004	0.97	0.3	0.97
	رطوبت نسبی HUM	-0.7	0.99	0.99	5.4	0.6	0.98	7.7	0.95
	ساعات آفتابی SUN	0.7	0.99	0.99	1.8	0.1	0.98	2.5	0.98
	دمای حداقل T-min	-0.004	0.99	1	0.5	0.03	0.99	1.2	0.99

ایستگاه Station	متغیر Variable	معیار دقت Accuracy criteria							
		درصد خطا Percentage error	E _{ns}	R ²	RMSE%	RMSE	E	ME	T
همدان Hamedan	دمای حداقل T-min	0.3	0.99	1	1.8	0.04	1	4.6	0.99
	دمای حداکثر T-max	-0.03	0.99	1	0.15	0.03	0.99	0.3	0.99
	بارش Precipitation	-2.5	0.99	0.99	0.31	1.03	0.99	9.87	0.93
	سرعت باد FF	-2.9	0.99	0.99	10.7	0.3	0.97	15.3	0.92
	رطوبت نسبی HUM	-1.9	0.99	0.99	6.4	0.4	0.99	9.1	0.94
	ساعات آفتابی SUN	1.6	0.99	0.99	4.4	0.3	0.98	6.2	0.95
	دمای حداقل T-min	-0.54	0.99	1	0.18	0.02	0.99	0.46	0.99
اصفهان Esfahan	دمای حداکثر T-max	-0.37	0.99	1	0.15	0.04	0.99	0.3	0.99
	بارش Precipitation	-2.37	0.99	0.99	0.49	0.5	0.99	12.3	0.94
	سرعت باد FF	1.3	0.99	0.99	2.1	0.3	0.99	3.9	0.97
	رطوبت نسبی HUM	2	0.99	0.99	4.1	0.4	0.99	2.8	0.98
	ساعات آفتابی SUN	0.2	0.99	1	0.1	0.01	1	0.2	0.99
	دمای حداقل T-min	0.4	0.99	1	1.1	0.03	1	2.5	0.99
	دمای حداکثر T-max	-0.004	0.99	1	0.06	0.01	1	0.13	0.99
شهرکرد Shahrekord	بارش Precipitation	-2.8	0.99	0.99	0.41	1.3	0.99	14.05	0.94
	سرعت باد FF	2	0.99	0.99	1.4	0.2	0.99	2	0.97
	رطوبت نسبی HUM	-1	0.99	0.99	0.7	0.33	0.99	10	0.96
	ساعات آفتابی SUN	2.5	0.99	0.99	1.8	0.2	1	2.5	0.99
	دمای حداقل T-min	0.13	0.99	1	0.2	0.02	1	0.5	0.99
	دمای حداکثر T-max	0.07	0.99	1	0.1	0.03	1	0.24	0.99
	بارش Precipitation	-2.48	0.99	0.99	0.34	1.2	0.99	10.7	0.96
همدان Hamedan	سرعت باد FF	-1.9	0.99	0.99	13.6	0.6	0.99	19.2	0.94
	رطوبت نسبی HUM	0.9	0.99	0.99	0.7	0.3	1	0.8	0.99
	ساعات آفتابی SUN	2.3	0.99	0.99	1.7	0.15	0.99	2.4	0.98

ایستگاه Station	متغیر Variable	معیار دقت Accuracy criteria							
		درصد خطا Percentage error	E _{ns}	R ²	RMSE%	RMSE	E	ME	T
جیرفت Jiroft	دمای حداقل T-min	-0.02	0.99	1	0.13	0.02	0.99	0.21	0.99
	دمای حداکثر T-max	-0.02	0.99	1	0.1	0.03	0.99	0.24	0.99
	بارش Precipitation	-4.5	0.99	0.99	0.69	1.2	0.99	21	0.92
	سرعت باد FF	5.3	0.99	0.99	16.3	0.2	0.99	23	0.93
	رطوبت نسبی HUM	4.5	0.99	0.99	6.3	1.4	0.97	8.9	0.96
	ساعات آفتابی SUN	3.4	0.99	0.99	2.4	0.2	0.98	3.4	0.95
	دمای حداقل T-min	-0.03	0.99	1	0.1	0.02	0.99	0.2	0.99
	دمای حداکثر T-max	0.004	0.99	1	0.05	0.02	1	0.09	0.99
	بارش Precipitation	-1.7	0.99	0.99	0.37	0.68	0.99	10.8	0.97
	سرعت باد FF	-1.4	0.99	0.99	10.2	0.6	0.99	4.4	0.98
کهنوج Kahnuoj	رطوبت نسبی HUM	-2.6	0.99	0.99	4.4	1.7	0.99	6	0.98
	ساعات آفتابی SUN	2.7	0.99	0.99	2	0.2	0.99	2.6	0.98
	دمای حداقل T-min	-0.04	0.99	1	0.07	0.01	1	0.1	0.99
	دمای حداکثر T-max	-0.04	0.99	1	0.1	0.03	0.99	0.12	0.99
	بارش Precipitation	-1.77	0.99	0.99	0.77	1.58	0.99	28	0.97
	سرعت باد FF	-2.9	0.99	0.99	3.1	0.2	0.99	4.3	0.96
	رطوبت نسبی HUM	-3.6	0.99	0.99	3.4	1.4	0.99	4.7	0.96
	ساعات آفتابی SUN	3	0.99	0.99	2.1	0.2	0.99	3	0.95
	بارش Precipitation	-1.77	0.99	0.99	0.77	1.58	0.99	28	0.97
	سرعت باد FF	-2.9	0.99	0.99	3.1	0.2	0.99	4.3	0.96
منوجان Manuojan	رطوبت نسبی HUM	-3.6	0.99	0.99	3.4	1.4	0.99	4.7	0.96
	ساعات آفتابی SUN	3	0.99	0.99	2.1	0.2	0.99	3	0.95
	بارش Precipitation	-1.77	0.99	0.99	0.77	1.58	0.99	28	0.97
	سرعت باد FF	-2.9	0.99	0.99	3.1	0.2	0.99	4.3	0.96
	رطوبت نسبی HUM	-3.6	0.99	0.99	3.4	1.4	0.99	4.7	0.96

جدول ۱۰- متغیرهای پیش‌بینی کننده بزرگ مقیاس NCEP استفاده شده در شبیه‌سازی داده‌های دما و بارش در ایستگاه اصفهان

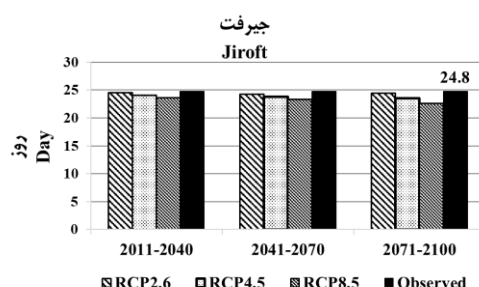
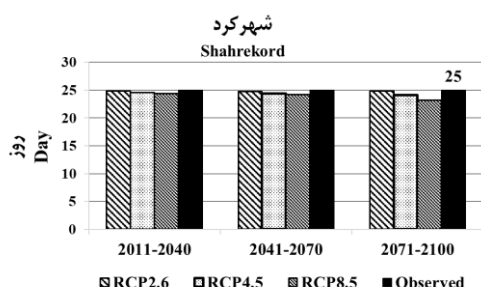
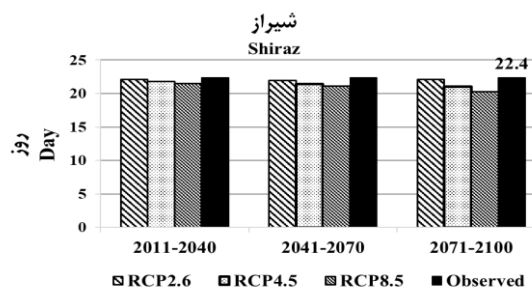
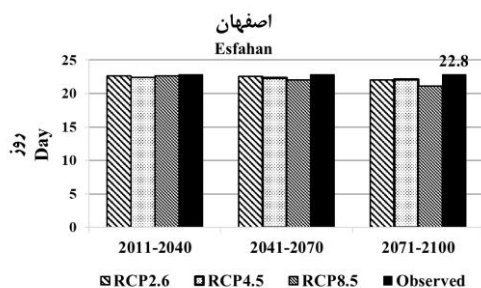
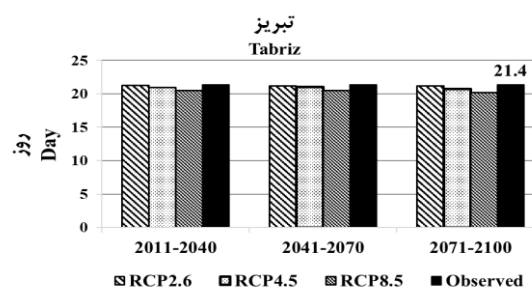
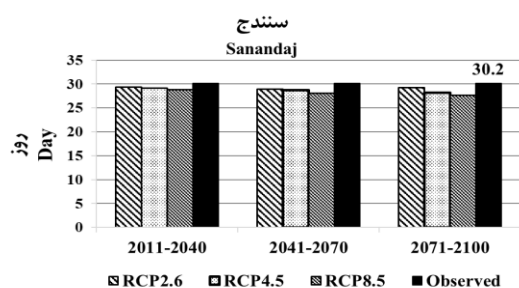
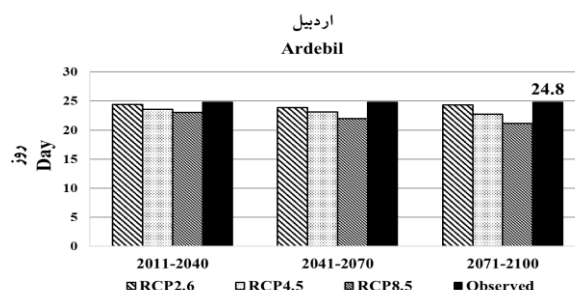
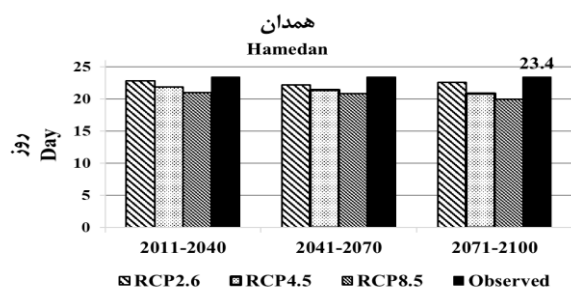
Table 10- NCEP large-scale predictor variables used in simulating temperature and precipitation data at Isfahan station

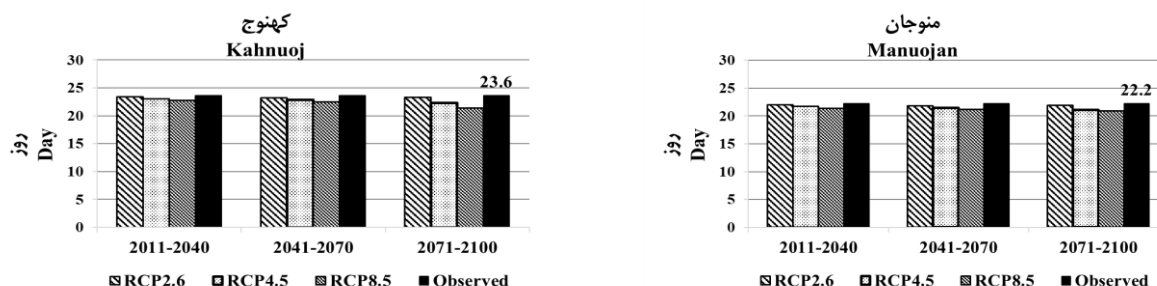
شهر اصفهان Esfahan City	پارامترهای NCEP Parameters NCEP
دمای حداقل T-min	P500, p1-u, mslp, p8-u, s500, shum, temp
دمای حداکثر T-max	Mslp, p500, p8-u, temp
بارش Precipitation	Prctp, mslp, s500, temp
سرعت باد FF	Mslp, p850, s00,temp, p1zh, p8-z
رطوبت نسبی HUM	Mslp, p1-z, p500, p850, temp, shum
ساعات آفتابی SUN	Mslp, p500, p8-u, s500, temp

بدست آمد. نتایج شبیه‌سازی مراحل مختلف فنولوژیکی، از کاشت تا سبزشدن، سبزشدن تا گلدهی و سبزشدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی در شرایط پتانسیل در مناطق مورد مطالعه تحت سناریوهای RCP، نشان داد که طول مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی در شرایط اقلیمی آینده کاهش خواهد یافت.

شبیه‌سازی طول مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی

در این مطالعه جهت شبیه‌سازی مراحل رشد و عملکرد غده سیب زمینی با استفاده مدل گردش کلی CanESM2، تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای مناطق تحت مطالعه در سه دوره اقلیمی ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ شبیه‌سازی دما (کمینه دما و بیشینه دما)، بارش، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت متوسط باد انجام گرفت. با کارگیری مدل شبیه‌ساز رشد ونمو WOFOST، شبیه‌سازی قابل قبولی از مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی





شکل ۵- شبیه‌سازی مدت زمان کاشت تا سبز شدن گیاه سیب‌زمینی بر اساس مدل CanESM2 برای سه دوره اقلیمی ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰، تحت سناریوهای RCP با استفاده از مدل WOFOST

Figure 5- Simulation of the time from planting to emergence of potato plants based on the CanESM2 model for three climate periods 2011-2040, 2070-2041, and 2071-2100, under RCP scenarios using the WOFOST model

سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۳ در مناطق مورد مطالعه انجام شده است (جدول ۳). بنابراین موضوع تغییر تاریخ کاشت یکی از آثار گرمایش جهانی و راهکار سازگاری با پدیده گرمایش جهانی می‌باشد. در شکل ۵ شبیه‌سازی طول دوره کاشت تا سبز شدن گیاه سیب‌زمینی در سه دوره اقلیمی ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سناریوهای RCP مشاهده می‌شود.

شبیه‌سازی مرحله فنولوژیکی سبز شدن تا گلدهی

گلدهی که اصلی‌ترین مرحله‌ی نمو گیاهان است، توسط دمای محیط تنظیم می‌شود. بنابراین افزایش دما در شرایط تغییر اقلیم الگوی گلدهی گیاهان را به شدت تحت تأثیر قرار خواهد داد (Bradley, Leopold, Ross, & Huffaker, 1999). نتایج شبیه‌سازی مرحله فنولوژیکی سبز شدن تا گلدهی با استفاده از مدل گردش کلی CanESM2 تحت سناریوهای RCP انجام شد (شکل ۶). نتایج حاصله بیانگر کاهش طول دوره‌ی گلدهی در مناطق مورد مطالعه تحت سناریوی RCP است. طول دوره سبز شدن تا گلدهی بطور میانگین بین ۰/۶ روز تا ۲/۴۲ روز کاهش مشاهده شد. بیشترین کاهش مربوط به سناریوی RCP8.5 در دوره‌ی ۲۰۷۱-۲۱۰۰ در مناطقی نظیر اردبیل و همدان به میزان ۴/۴ روز مشاهده شد. کمترین کاهش در سناریوی RCP8.5 در دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ در ایستگاه اصفهان با ۰/۱۸ روز و سناریوی RCP4.5 در دوره‌ی ۲۰۴۱-۲۰۷۰ در ایستگاه شهرکرد به میزان ۰/۲ روز مشاهده شد (شکل ۶). حداکثر کاهش طول دوره گلدهی در این دو ایستگاه در سناریوی RCP8.5 در دوره‌ی سوم به ترتیب ۱/۶ و ۱/۹ روز برای ایستگاه اصفهان و شهرکرد مشاهده می‌شود. این درحالی است که کمترین میزان کاهش دوره گلدهی در ایستگاه اردبیل و همدان به ۱/۱ و ۱/۶ روز در سناریوی RCP2.6 در دوره‌ی اول می‌رسد (شکل ۶). بطور متوسط میزان کاهش دوره‌ی گلدهی در سناریوی RCP2.6 بین ۰/۷ تا ۰/۸۲ روز، در سناریوی RCP4.5 در محدوده‌ی ۱/۰۱ تا ۱/۵۸ روز و در سناریوی RCP8.5 در محدوده‌ی

شبیه‌سازی مرحله فنولوژیکی کاشت تا سبز شدن

بازه زمانی تاریخ کاشت گیاهان معمولاً توسط دو عامل اقلیمی دما و بارش مشخص می‌شود. بنابراین بررسی این عوامل اقلیمی در دوره رشد گیاهان از اهمیت بالایی برخوردار است. مرحله کاشت تا سبز شدن نسبت به سایر مراحل فنولوژیکی گیاه سیب‌زمینی کمتر تحت تأثیر تغییر اقلیم و اثرات ناشی از آن قرار می‌گیرد. دلیل این امر تغییر تاریخ کاشت و شرایط خنک آب و هوایی در ابتدای زمان کاشت می‌باشد. البته قابل ذکر است که در مناطق گرمسیری که دارای زمستان‌های معتدل هستند و کشت پاییزه سیب‌زمینی انجام می‌شود، مرحله‌ی کاشت تا سبز شدن بیشتر از سایر مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی، تحت تأثیر اثرات ناشی از گرمایش جهانی خواهد بود. بر اساس نتایج شبیه‌سازی در تمام مناطق مورد مطالعه در دوره اقلیمی آینده، طول دوره کاشت تا سبز شدن بطور میانگین بین ۰/۲۷ روز تا ۲/۳ روز کاهش مشاهده شد. بیشترین کاهش مربوط به سناریوی RCP8.5 در دوره‌ی ۲۰۷۱-۲۱۰۰ بویژه در مناطق سردسیر کشور نظیر اردبیل، سنندج و همدان به ترتیب با ۳/۷ روز، ۳/۵ روز و ۳/۴ روز مشاهده شد. کمترین کاهش مربوط به سناریوی RCP2.6 و در دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ است، بطوری که در بعضی از مناطق مانند تبریز، اصفهان و شهرکرد میزان کاهش به کمتر از ۰/۲ روز می‌رسد. تا کنون تأثیر منفی کاهش طول دوره کاشت تا سبز شدن به علت گرمایش جهانی بر عملکرد نهایی غده‌های سیب‌زمینی گزارش نشده است (Torkaman, 2016). اما این موضوع می‌تواند به عنوان یک مزیت نسبی در مواجهه با سرمای ابتدای فصل کاشت در کشت بهاره محسوب شود با این وجود افزایش دما، ناشی از تغییر اقلیم طول دوره رشد را در مناطق گرمسیری به شدت کاهش خواهد داد. کاهش این دوره از سناریوی RCP2.6 به سناریوی RCP8.5 همراه با افزایش شدت واداشتهای تابشی، در دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ مشهودتر می‌باشد. بطور کلی شدت کاهش این مرحله از رشد گیاه، به تاریخ کاشت وابسته است. تاریخ‌های کاشت به کار رفته در شبیه‌سازی مدل در واقع تاریخ کاشت‌های متداولی است که توسط کشاورزان طی

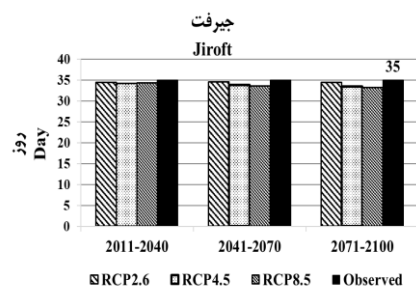
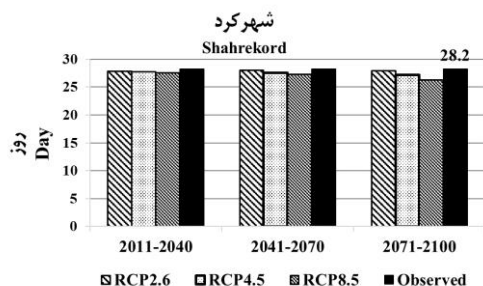
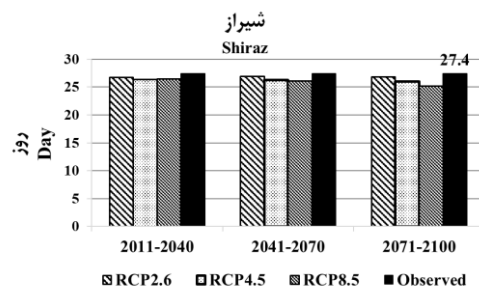
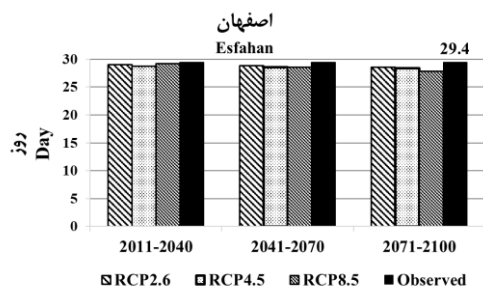
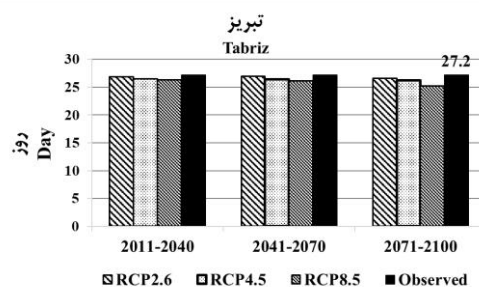
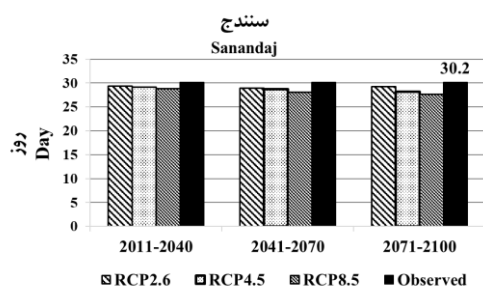
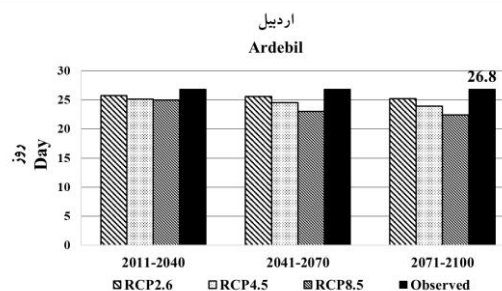
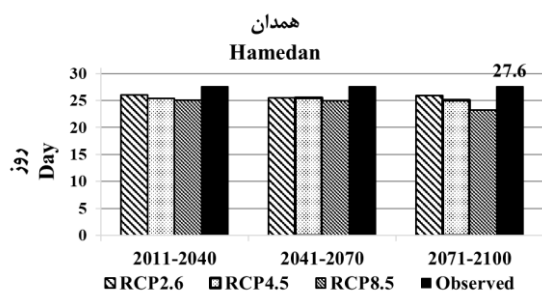
۱/۰۵ تا ۲/۴۲ روز است.

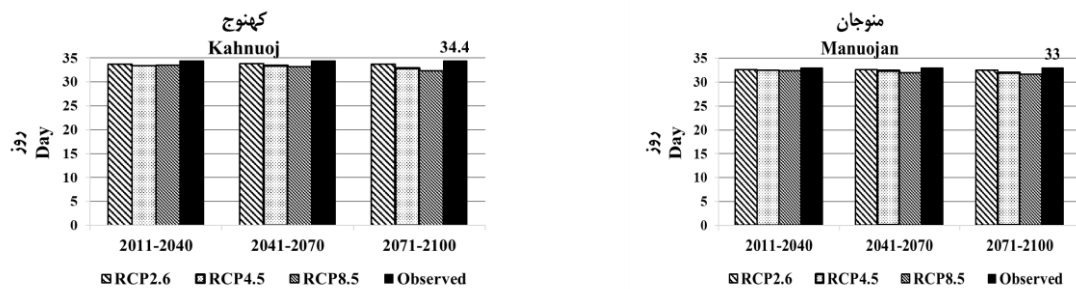
شبیه‌سازی مرحله‌ی فنولوژیکی سبزشدن تا رسیدگی

فیزیولوژیکی

مرحله‌ی سبزشدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی غده‌ها به علت طولانی‌تر بودن آن و همچنین همراه شدن این مرحله با روند افزایش دمای هوا، بیشترین کاهش طول دوره در این مرحله اتفاق افتاد. به‌طور

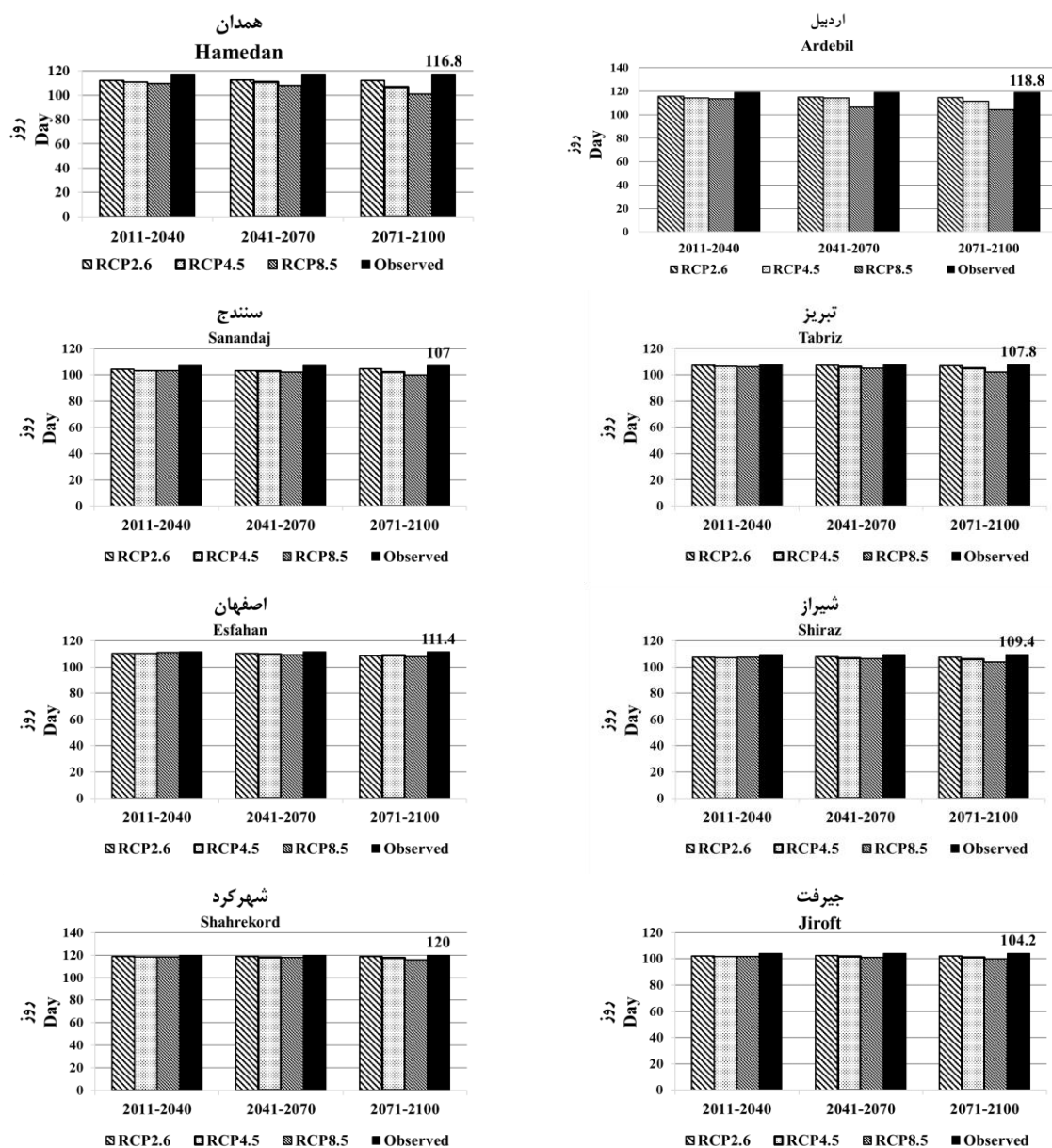
متوسط میزان کاهش طول دوره رسیدگی فیزیولوژیکی غده‌ها برای ۱۰ ایستگاه مورد مطالعه بین ۱/۹۶ روز در سناریوی RCP2.6 در دوره‌ی اول و ۶/۷ روز در سناریوی RCP8.5 در دوره سوم قرار گرفته است (شکل ۷). بیشترین کاهش طول این دوره در ایستگاه همدان با ۱۵/۸ روز و ایستگاه اردبیل با ۱۴/۶ روز هر دو در سناریوی RCP8.5 و در دوره‌ی سوم مشاهده شد. کمترین میزان کاهش طول دوره‌ی رسیدگی فیزیولوژیکی غده در ایستگاه تبریز به میزان ۰/۶ روز در سناریوی RCP2.6 در دوره‌ی اول مشاهده شد (شکل ۷).

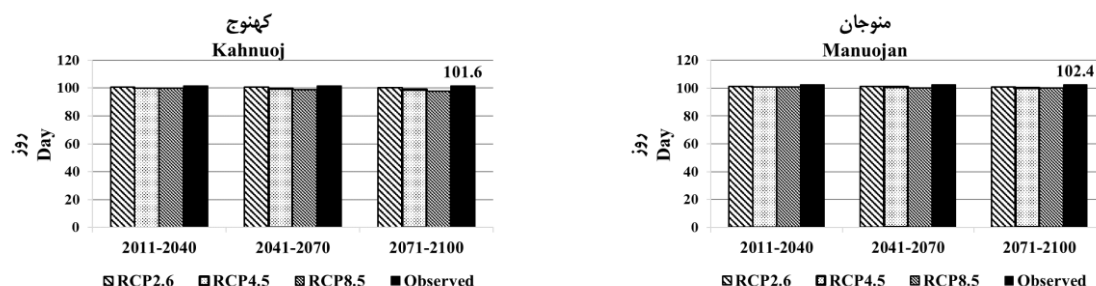




شکل ۶- شبیه‌سازی مدت زمان سبزشدن تا گلدهی گیاه سیب‌زمینی بر اساس مدل CanESM2 برای سه دوره اقلیمی ۲۰۴۰-۲۰۷۰، ۲۰۷۱-۲۱۰۰ و ۲۱۰۱-۲۱۳۰، تحت سناریوهای RCP با استفاده از مدل WOFOST

Figure 6- Simulation of the duration of germination to flowering of potato plant based on the CanESM2 model for three climate periods 2011-2040, 2070-2041 and 2071-2100, under RCP scenarios using the WOFOST model





شکل ۷- شبیه‌سازی مدت زمان سبزشدن تا رسیدگی گیاه سیب‌زمینی بر اساس مدل CanESM2 برای سه دوره اقلیمی ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۷۱ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰، تحت سناریوهای RCP با استفاده از مدل WOFOST

Figure 7- Simulation of the duration of germination to maturity of potato plant based on the CanESM2 model for three climate periods 2011-2040, 2070-2041 and 2071-2100, under RCP scenarios using the WOFOST model

(Sahrish et al., 2022) به اثرات گرم شدن آب و هوا بر فنولوژی سیب‌زمینی در کشور پاکستان در دو کشت بهاره و پاییزه پرداخته شد. نتایج حاکی از افزایش دما و کاهش مدت زمان مراحل رشد در بهار و پاییز می‌باشد. پالاتو و همکاران (Pulatov et al., 2015) با مطالعه اثرات بالقوه گرم شدن هوا بر روی فنولوژی محصول سیب‌زمینی و تنش دمایی در شمال اروپا نشان دادند که آب و هوای گرم‌تر و کاشت زودتر ممکن است برداشت را جلو بیاورد.

نتیجه‌گیری

از مصادیق بارز تغییر اقلیم، افزایش دما و کاهش بارش در اقلیم آینده است. بنابراین هرگونه تغییر در وضعیت اقلیم جهان، به‌طور مستقیم بر تولید محصولات کشاورزی و در نتیجه بر موضوع تأمین امنیت غذایی در سطح جهان تأثیرگذار است. گیاه سیب‌زمینی بعد از گندم، برنج و جو بالاترین سطح تولید را در جهان داراست و در داخل کشور رتبه سوم تولیدات کشاورزی را به خود اختصاص داده است. در همین راستا در این مطالعه به ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم بر طول مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی در ۱۰ ایستگاه اردبیل، تبریز، سمنجان، شهرکرد، اصفهان، همدان، شیراز، جیرفت، کهنوج و منوجان، که از مراکز اصلی تولید سیب‌زمینی در کشور محسوب می‌شوند، در آینده پرداخته شد. برای ایستگاه‌های مذکور، در این مطالعه جهت شبیه‌سازی اقلیم آینده، از داده‌های مدل گردش کلی CanESM2 تحت سناریوهای انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5، برای دوره ۲۰۱۱-۲۱۰۰ استفاده گردید. برای ریزگردانی خروجی مدل CanESM2 از نرم‌افزار آماری SDSM و برای شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی از مدل رشد و نمو WOFOST استفاده شد. نتایج حاصل از تعیین اعتبار مدل SDSM طی دوره واسنجی نشان داد که استفاده از متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده برای برآورد طول دوره‌های فنولوژیکی سیب‌زمینی در دوره‌های

این درحالی است که کاهش طول این دوره در دو ایستگاه اردبیل و همدان در سناریوی RCP2.6 و دوره‌ی اول به‌ترتیب ۳/۱۳ و ۴/۲ روز می‌باشد. در سایر ایستگاه‌ها (بدون احتساب ایستگاه اردبیل و همدان) بطور متوسط بین ۱/۳ تا ۴/۶ روز کاهش در طول این دوره مشاهده شد.

بحث

مقایسه نتایج بدست آمده از این پژوهش با مطالعات انجام گرفته در مورد اثرات تغییر اقلیم بر گیاه سیب‌زمینی حاکی از کاهش طول دوره‌های فنولوژیکی گیاه سیب‌زمینی در دوره‌های آتی تحت تأثیر شرایط تغییر اقلیم می‌باشد که همسو با نتایج بدست آمده از محققین (Sahrish et al., 2022; Pulatov et al., Torkaman, 2016;) می‌باشد. در این مطالعه دمای حداقل به‌طور میانگین بین ۰/۱ تا ۲/۹۹ درجه سانتی‌گراد و حداکثر دما به‌طور میانگین بین ۰/۱۷ تا ۲/۳ درجه سانتی‌گراد افزایش دما نشان می‌دهد. طول دوره کاشت تا سبزشدن بطور میانگین بین ۰/۲۷ روز تا ۲/۳ روز، طول دوره سبزشدن تا گلدهی بطور میانگین بین ۰/۶ روز تا ۲/۴۲ روز و دوره رسیدگی فیزیولوژیکی بین ۲ تا ۶/۷ روز کاهش مشاهده شد. (Torkaman, 2016) با به کارگیری دو مدل GFDL-ESM2g و HadGEM2-es و سناریوهای RCP اثرات تغییر اقلیم بر ویژگی‌های زراعی و تولید سیب زمینی در ایران (همدان، اردبیل، اصفهان، قزوین، کردستان، شیراز، جیرفت، مشهد، گرگان، شاه‌رود و دزفول) مورد ارزیابی قرار داد و نشان داد افزایش میانگین دمای حداکثر بین ۱/۲ تا ۷/۵ درجه سانتی‌گراد و دمای حداقل بین ۱/۳ تا ۵/۸ درجه سانتی‌گراد خواهد بود و طول دوره فنولوژیکی گیاه سیب‌زمینی بطور متوسط در مرحله سبزشدن به میزان ۳،۲ روز، در مرحله گلدهی به میزان ۳/۲ روز و مدت زمان پر شدن غده‌ها به میزان ۱۰/۳ روز کاهش خواهد یافت. در مطالعه‌ای که توسط

است. با توجه به نتایج حاصله می‌توان نتیجه گرفت که طول مراحل فنولوژیک گیاه سیب‌زمینی در مناطق سردسیر کشور بیشتر از مناطق گرمسیر کشور تحت تأثیر اثرات تغییر اقلیم خواهند بود، همچنان که پارامترهای اقلیمی این مناطق تحت تأثیر شرایط گرمایش جهانی بیشترین افزایش دما (حداقل و حداکثر) و بیشترین کاهش بارش را داشتند. ترکمان (Torkaman, 2016) نیز با مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر ویژگی‌های زراعی و تولید سیب‌زمینی در ایران دریافت که همراه با افزایش میانگین دمای حداقل و حداکثر طول مراحل فنولوژیکی سیب زمینی کاهش خواهد یافت که همسو با نتایج بدست آمده در این پژوهش می‌باشد.

با مطالعه اثرات تغییرات اقلیمی بر طول دوره‌های فنولوژیکی سیب زمینی در مناطق مورد مطالعه و کاهش طول دوره رشد محصول مهمترین گزینه در سازگاری با شرایط اقلیمی آینده، تغییر زمان کاشت و استفاده از رقم‌های زودرس در آینده خواهد بود. با تغییر در تاریخ کاشت سیب‌زمینی در هر دو کشت بهاره و پاییزه به ترتیب ریسک سرمازدگی ناشی از سرمای دیررس بهاره و سرمای زودرس پاییزه، افزایش می‌یابد. بنابراین برای کاهش ریسک سرمازدگی استفاده از رقم‌های زودرس یکی از اقدامات مهم در جهت سازگاری با شرایط اقلیمی آینده باشد.

آتی قابل اعتماد می‌باشند. مقدار ضریب تبیین R^2 در همه‌ی ایستگاه‌ها و برای شش متغیر بالای ۰/۹۹ بود و حداکثر خطا (ME) برای شبیه سازی دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش، سرعت باد، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی بطور میانگین برای هر ۱۰ ایستگاه مورد مطالعه به ترتیب ۱/۳، ۰/۲۵ و ۱۳/۶، ۷/۳، ۵ و ۲/۳ بدست آمد. نتایج واسنجی و تعیین اعتبار مدل WOFOST در بازه زمانی ۱۳۸۹-۱۳۹۳ حاکی از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی گیاه سیب‌زمینی (کاشت تا سبز شدن، سبز شدن تا گلدهی و سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی) بود، بطوری که مقدار متوسط ریشه میانگین مربعات خطا (RMSEn) برای هر سه مرحله رشد سیب‌زمینی در مناطق تحت مطالعه زیر ۱۰ درصد بود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد طول دوره کاشت تا سبز شدن بطور میانگین بین ۰/۲۷ روز تا ۲/۳ روز کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش مربوط به سناریوی RCP8.5 در دوره‌ی ۲۱۰۰-۲۰۷۱ بوژه در مناطق سردسیر کشور نظیر اردبیل، سمنان و همدان به ترتیب با ۳/۷ روز، ۳/۵ روز و ۳/۴ روز مشاهده شد. طول دوره سبز شدن تا گلدهی بطور میانگین بین ۰/۶ روز تا ۲/۴۲ روز کاهش مشاهده شد. به‌طور متوسط کمترین میزان کاهش طول دوره رسیدگی فیزیولوژیکی غده‌ها برای ۱۰ ایستگاه مورد مطالعه بین ۱/۹۶ روز در سناریوی RCP2.6 در دوره‌ی اول و ۶/۷ روز در سناریوی RCP8.5 در دوره سوم قرار گرفته

References

- Adavi, Z. (2013). *Simulating the effects of climate change on potato production in Fereydoon area of Isfahan city and providing adaptation solutions based on modeling approaches*. Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. <https://doi.org/10.29252/jcpp.9.2.79>
- Agricultural statistics, crop year 2015-2016, first volume, crops, Ministry of Jihad Agriculture, Information and Communication Technology Center.
- Agovino, M., Casaccia, M., Ciommi, M., Ferrara, M., & Marchesano, K. (2018). Agriculture, climate change and sustainability: the case of EU-28. *Ecol. Indic* 105, 525-543. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.064>
- Arora, V.K., Scinocca, J.F., Boer, G.J., Christian, J.R., Denman, K.L., Flato, G.M., Kharin, V.V., Lee, W.G., & Merryfield, W.J. (2011). Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. *Geophysical Research Letters*, 38(5), 1-6. <https://doi.org/10.1029/2010gl046270>
- Ashofteh, F. (2012). Climate change impact on the crop water requirement using HadCM3 model in Aidoghmosh irrigation network. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 3(6), 142-151. (In Persian with English abstract)
- Ashraf, B. (2011). *Estimating the water requirement of sugar beet and wheat in the period 2011-2030 using simulated data by the LARS-WG5 model (case study: Razavi Khorasan province)*, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. <https://doi.org/10.52547/fsct.19.124.257>
- Boogaard, H.L., Van Diepen, C.A., Rotter, R.P., Cabrera, J.C.M.A., & Van Laar, H.H. (1998). WOFOST 7.1 User guide for the WOFOST 7.1 Crop Growth Simulation Model 161 and WOFOST Control Center 1.5, Technical Document 52. DLO Winand Staring Center. Wageningen, The Netherlands. <https://doi.org/10.32614/cran.package.rwofost>
- Bradley, N.L., Leopold, A.C., Ross, J., & Huffaker, W. (1999). Phenological changes reflect climate change in Wisconsin: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96, 9701-9704. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.17.9701>
- Carson, D.J. (1999). Climate modelling: achievements and prospects: *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society* 125, 1-28. <https://doi.org/10.1256/smsqj.55301>
- Davis, K.F., Gephart, J.A., Emery, K.A., Leach, A.M., Galloway, J.N., & D'Odorico, P. (2016). Meeting future food demand with current agricultural resources: *Glob. Environment Change*, 39, 125-132. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.004>
- Delghandi, M., Massah-Bovani, A.R., Ajorlou, M.J., Broomandnasab, S., & Andarzian, B. (2014). Risk assessment

- of climate change impacts on production and phenology of wheat (case study: Ahvaz Region). *Journal of Water and Irrigation Management*, 4, 161-175. (In Persian with English abstract).
12. Devaux, A., Goffart, J.P., Petsakos, A., Kromann, P., Gatto, M., Okello, J., Suarez, V., & Hareau, G. (2020). Global food security, contributions from sustainable potato agrifood systems. In: Campos, H., Ortiz, O. (Eds.), *The Potato Crop: Its Agricultural, Nutritional and Social Contribution to Humankind*. Springer International Publishing, Cham, 3–35. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28683-5_1
13. Fallah Ghalheri, GH.A. (2014). Principles and Fundamentals of Meteorology. Mashhad, *Climatology Research Institute*.
14. Ghorbani, K.H., Zakerinia, M., & Hezarjaribi, A. (2013). The effect of climate change on water requirement of soybean in Gorgan. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2(1), 60-72. (In Persian with English abstract)
15. Godfray, H.C.J., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, SM., & Toulmin, C. (2010). Food security: the Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science*, 80(327), 812–818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>
16. González-Jiménez, J., Andersson, B., Wiik, L., & Zhan, J. (2023). Modelling potato yield losses caused by *Phytophthora infestans*: Aspects of disease growth rate, infection time and temperature under climate change, *Field Crops Research*, 299, 108977. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108977>
17. Jafarpour, S. (2016). Investigating the effects of climate change on water demand and yield of major crops in Ardabil plain. Master Thesis, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Mohaghegh Ardabili University of Ardabil, Iran. <https://doi.org/10.52547/jwmr.13.26.1>
18. Jianzhao, T., Huizi, B., Shenghai, Z., Dengpan, X., Zheng, T., De, L.L., Bin, W., & Puyu, F. (2024). Adaptations of potato production to future climate change by optimizing planting date, irrigation and fertilizer in the Agro-Pastoral Ecotone of Chin. *Climate Risk Management*, 44, 100604. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2024.100604>
19. Jones, J.W., Antle, J.M., Basso, B., Boote, K.J., Conant, R.T., Foster, I., Godfray, H.C.J., Herrero, M., Howitt, R.E., Janssen, S., Keating, B.A., Munoz-Carpena, R., Porter, C.H., Rosenzweig, C., & Wheeler, T.R. (2017). Brief history of agricultural systems modeling. *Agriculture Systematic*, 155, 240–254. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2016.05.014>
20. Lobell, D.B., & Field, C.B. (2007). Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters*, 2(1), 1-7. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/1/014002>
21. Moradi, R., Koocheki, A., & Nassiri Mahallati, M. (2015). Effect of climate change on maize production and shifting of planting date as adaptation strategy in Mashhad. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 23(4), 111-130. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1007/s11027-012-9410-6>
22. Naresh Kumar, S., Govindakrishnan, P., Swarooparani, D., Nitin, C., Surabhi, J., & Aggarwal, P. (2015). Assessment of impact of climate change on potato and potential adaptation gains in the Indo-Gangetic Plains of India. *International Journal of Plant Production*, 9, 151-170.
23. Nazari, S.H., Taheriun, M., & Ahmadi, A. (2015). Investigation of the effects of climate change on temperature and precipitation in the catchment area of Mahabad Dam (using CanESM2 model), the second national conference on architecture. New Urban Development, National Center of Iranian Architects, Urmia, 5 October 2015.
24. Pradel, W., Gatto, M., Hareau, G., Pandey, S.K., & Bhardway, V. (2019). Adoption of potato varieties and their role for climate change adaptation in India. *Climate Risk Management*, 23, 114-123, <https://doi.org/10.1016/j.crm.2019.01.001>
25. Pulatov, B., Linderson, M., Hall, K., & Jönsson, AM. (2015). Modeling climate change impact on potato crop phenology, and risk of frost damage and heat stress in northern Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214(215), 281-292. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.08.266>
26. Rezai Zaman, M., & Afrozi, A. (2015). Evaluation of the effects of climate change on crop yield and presenting a strategy for changing the cultivation pattern (case study: Simine River basin). *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 4, 51-64. (In Persian with English abstract).
27. Saadi, S., Todorovic, M., Tanasijevic, L., Pereira, L.S., Pizzigalli, C., & Lionello, P. (2014). Climate change and Mediterranean agriculture: Impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield. *Agricultural Water Management*, 147, 103-115. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.008>
28. Sahrish, N., Shakeel, A., Ghulam, A., Zartash, F., Sajjad, H., Mukhtar, A., Muhammad, A. K., Ahmad, K., Shah, F., Wajid, N., Sezai, E., Carol Jo, W., & Gerrit, H. (2022). Modeling the impact of climate warming on potato phenology. *European Journal of Agronomy*, 132, 126404. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126404>
29. Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S.J., Esker, P., McRoberts, N., & Nelson, A. (2019). The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution*, 3, 430–439. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>
30. Sayari, N. (2011). *Prediction of changes in temperature and precipitation under global warming and its impact on the water needs of agricultural plants in the Kashf Roud basin*, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
31. Spitters, C.J.T., Toussaint, H.A.J.M., & Goudriaan, J. (1990). Separating the diffuse and direct component of global

- radiation and its implications for modelling canopy photosynthesis. Part I: Components of incoming radiation. *Agricultural and Forest Meteorology* 38, 217-229. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(86\)90060-2](https://doi.org/10.1016/0168-1923(86)90060-2)
32. Tanasijevic, L., Todorovic, M., Pereira, L.S., Pizzigalli, C., & Lionello, P. (2014). Impacts of climate change on olive crop evapotranspiration and irrigation requirements in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 144, 54-68. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.019>
33. Taei Semiromi, S., Moradi, H.R., & Khodaghali, M. (2014). Simulation and prediction some of climate variable by using multi line SDSM and Global Circulation Models (Case study: Bar Watershed Nayshabour). *Human & Environment*, 39, 1-15.
34. Torkaman, M. (2016). *Effect of warming and future climate change on crop characteristics and potato production in Iran*. Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. <https://doi.org/10.26420/annagriccrops.2022.1109>
35. Thomas, K., Iwan, S., Annemarie, G., Fulco, L., & Teferi, D. (2025). Projected climate change impacts on Potato yield in East Africa. *European Journal of Agronomy*, 166, 127560. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2025.127560>
36. UN. (2015). WWAP (United Nations World Water Assessment Programme), 2015. The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. UNESCO, Paris. 2-122. <https://doi.org/10.18356/82cad0af-en>
37. Van Laar, H.H., Goudriaan, J., & van Keulen, H. (1992). Simulation of crop growth for potential and water-limited production situations (as applied to spring wheat). Simulation Reports CABO-TT 27. CABO-DLO, WAU-TPE, Wageningen.
38. Van Keulen, H., & van Diepen, C.A. (1990). Crop growth models and agroecological characterization. In: Scaife, A. (ed.): Proceedings of the first congress of the European Society of Agronomy, 5-7 December 1990, Paris. CEC, ESA, INRA. session 2:1-16. Paris.
39. Willby, R.L., Dawson, C.W., & Barrow, E.M. (2002). SDSM a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17, 145-157. [https://doi.org/10.1016/s1364-8152\(01\)00060-3](https://doi.org/10.1016/s1364-8152(01)00060-3)

Contents

The Effect of Compost and Vermicompost Derived from Olive Solid Pomace on Olive Yield and Oil Quality	105
S.H. Mousavi Dizkouhi, M. Barani Motlagh, E. Dordipour, E. Malekzadeh, F. Sadeghzadeh, M. Ghasem Nejhad	
The Effect of Glutathione on Iron Availability of Different Sources in Peanut Plant in a Calcareous Soil	121
F. Shahabi, R. Khorassani, Z. Gheslaghi	
Modeling Soil Available Water Using Neuro-fuzzy, Gene Expression Programming and Random Forest Methods	139
M. Hasanpour Kashani, Sh. Asghari	
The Effect of Tree and Shrub Cover (Vegetation) on Soil Characteristics of Rudbar in Guilan	155
Y. Kooch, M. Fooladi Doghazlo, K. Haghverdi	
Investigation on Changes in Canola (<i>Brassica napus</i>) Growth Indices Due to Soil Application of Sulfur and Selenium	173
F. Nourgholipour, M. Mohammadi, H. Mir Seyed Hosseini, R. Soleimani	
Simulating Potato Plant Growth Stages in Iran under RCP Scenarios Using the WOFOST Model	193
F. Bayatani, Gh. Fallah-Ghalhari	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 39

No. 2

May.-June. 2025

Published by: Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Manager in Charge: Valizadeh, R. (Ruminant Nutrition) Prof., Ferdowsi University of Mashhad

Editor in Chief: Fotovat, A. (Soil Science) Prof., Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

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

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

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

P.O. Box: 91775- 1163

Fax: +98 51 8787430

E-Mail: jswa3@um.ac.ir

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

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

Contents

The Effect of Compost and Vermicompost Derived from Olive Solid Pomace on Olive Yield and Oil Quality	105
S.H. Mousavi Dizkouhi, M. Barani Motlagh, E. Dordipour, E. Malekzadeh, F. Sadeghzadeh, M. Ghasem Nejhad	
The Effect of Glutathione on Iron Availability of Different Sources in Peanut Plant in a Calcareous Soil.....	121
F. Shahabi, R. Khorassani, Z. Gheshlaghi	
Modeling Soil Available Water Using Neuro-fuzzy, Gene Expression Programming and Random Forest Methods	139
M. Hasanpour Kashani, Sh. Asghari	
The Effect of Tree and Shrub Cover (Vegetation) on Soil Characteristics of Rudbar in Guilan	155
Y. Kooch, M. Fooladi Doghazlo, K. Haghverdi	
Investigation on Changes in Canola (<i>Brassica napus</i>) Growth Indices Due to Soil Application of Sulfur and Selenium	173
F. Nourgholipour, M. Mohammadi, H. Mir Seyed Hosseini, R. Soleimani	
Simulating Potato Plant Growth Stages in Iran under RCP Scenarios Using the WOFOST Model	193
F. Bayatani, Gh. Fallah-Ghalhari	