



نشریه علمی

بوم شناسی کشاورزی (فصلنامه)

جلد ۱۸ شماره ۱

بهار ۱۴۰۵

شماره پیاپی ۶۷

شماره پیاپی ۶۷

عنوان مقالات

- اثر رژیم‌های آبیاری، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ مایکوریزا بر عملکرد کمی و کیفی و خصوصیات فیزیولوژیکی
مریم گلی (*Salvia officinalis* L.) در کشت مخلوط با نعنای فلفلی (*Mentha piperita* L.) ۳
عبدالله جوانمرد، علی استادی و حاتیه شب‌خیز
- بررسی عوامل محدودکننده عملکرد کلزا (*Brassica napus* L.) در میاتکاله شهرستان بهشهر به روش آنالیز مقایسه کارکرد (CPA) ۴۱
آیه جعفری، افشین سلطانی، ابراهیم زینلی و صفورا جعفر نوده
- استعدادسنجی اراضی و برآورد پتانسیل تولید برنج (*Oryza sativa* L.) در بخش یانه‌سر شهرستان بهشهر ۶۵
کریم ریاحی، حسین کاظمی، افشین سلطانی و فردین صادق زاده
- ارزیابی تأثیر ورمی کمپوست جامد، عصاره ورمی کمپوست و جلبک دریایی بر برخی صفات فیزیولوژیکی و شیمیایی گیاه ترش
فرزانه ریگی، مهدی دهمرده، محمد رضا اصغری پور، مصطفی حیدری مجد و علیرضا سیروس مهر ۸۳
(*Hibiscus sabdariffa* L.)
- بررسی انتقال مجدد ماده خشک و سهم فتوسنتز جاری در دانه گندم (*Triticum aestivum* L.) در سه روش کشت و
مقادیر مختلف بقایای گیاهی ۱۰۳
معصومه شیبی، اسفندیار فاتح و امیر آینه بند
- اثر تلفیق کودهای آلی-شیمیایی و کود زیستی بر عملکرد، کیفیت اسانس و کارایی جذب برخی عناصر در رازیانه
(*Foeniculum vulgare* Mill.) ۱۲۱
مانده عطایی نژاد، محمدرضا مرادی تلاوت، سید عطاءاله سیادت، علی مشتقی و علی قاطعی
- تدوین الگوی کشت محصولات عمده کشاورزی دشت جیرفت براساس ردپای آب و ارزیابی چرخه حیات LCA ۱۴۱
مجتبی ماندگاری کهن، حلیمه پیری و مهدی کیخا

نشریه بوم شناسی کشاورزی (فصلنامه)

دانشگاه فردوسی مشهد

با شماره پروانه ۸۹/۲۲۵۱۵ مورخه ۸۹/۹/۲۸ از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی

درجه علمی پژوهشی شماره ۸۹/۳/۱۱/۵۲۴۷۹ مورخه ۸۹/۹/۸ از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

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

جلد ۱۸ شماره ۱ بهار ۱۴۰۵

صاحب امتیاز و ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول: دکتر بهنام کامکار، استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

سرمدیر: دکتر پرویز رضوانی مقدم، استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر داخلی: دکتر سرور خرم دل، دانشیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

اعضای هیئت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا)

دکتر امیربهزاد بذرگر، دانشگاه گوتلف، کانادا

دکتر مرتضی برمکی، استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی

دکتر محمد پسرکلی، استاد پژوهشی، دانشکده علوم گیاهی، دانشگاه آریزونا

دکتر همت اله پیردشتی، استاد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

دکتر امیرحجاریپور، پژوهشگر، دانشگاه جولیوس کوهن، آلمان

دکتر سرور خرم دل، دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر عادل دباغ محمدی نسب، استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

دکتر مهدی راستگو، استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر پرویز رضوانی مقدم، استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر احمد زارع فیض آبادی، استاد، مرکز تحقیقات کشاورزی خراسان رضوی

دکتر سعید زهتاب سلماسی، استاد، دانشگاه نیو مکزیکو، ایالات متحده آمریکا

دکتر حمید شاهنده، پژوهشگر علوم خاک، گروه علوم خاک و گیاهان زراعی، دانشگاه تگزاس A & M

دکتر امید عبدی، گروه علوم جنگل، دانشگاه هلسینکی، فنلاند

دکتر فرشید قادری فر، استاد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

دکتر منصور قربانپور، استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه اراک

دکتر بهنام کامکار، استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر محمدرضا مرادی تلاوت، استاد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

دکتر احمد مصدق منشادی، دانشیار، گروه علوم زراعی، دانشگاه منابع طبیعی و علوم زیستی، وین

دکتر مهدی نصیری محلاتی، استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

نشانی: مشهد، میدان آزادی، پردیس دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، دبیرخانه نشریات علمی، دفتر نشریه بوم شناسی کشاورزی، صندوق

پستی: ۹۱۷۷۵-۱۱۶۳

نمابر: ۰۵۱-۳۸۷۸۷۴۳۰

تلفن: ۰۵۱-۳۸۸۰۴۶۵۴

آدرس سایت: <https://agry.um.ac.ir>

پست الکترونیکی: agroecology@um.ac.ir

این نشریه در پایگاه‌های زیر نمایه می‌شود:

DOAJ, CABI, Google Scholar, AGRIS, Internet Archive, Ebsco, Europub

پایگاه استنادی جهان اسلام (ISC)، بانک اطلاعات نشریات کشور (MAGIRAN)

مقالات این شماره در سایت <https://agry.um.ac.ir> به صورت مقاله کامل نمایه شده است.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

- ۳ اثر رژیم‌های آبیاری، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ مایکوریزا بر عملکرد کمی و کیفی و خصوصیات فیزیولوژیکی مریم‌گلی (*Salvia officinalis* L.) در کشت مخلوط با نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.)
عبدالله جوانمرد، علی استادی و حانیه شب‌خیز
- ۴۱ بررسی عوامل محدودکننده عملکرد کلزا (*Brassica napus* L.) در میانکاله شهرستان بهشهر به‌روش آنالیز مقایسه کارکرد (CPA) آتیه جعفری، افشین سلطانی، ابراهیم زینلی و صفورا جعفر نوده
- ۶۵ استعدادسنجی اراضی و برآورد پتانسیل تولید برنج (*Oryza sativa* L.) در بخش یانه‌سر شهرستان بهشهر کریم ریاحی، حسین کاظمی، افشین سلطانی و فردین صادق زاده
- ۸۳ ارزیابی تأثیر ورمی کمپوست جامد، عصاره ورمی کمپوست و جلبک دریایی بر برخی صفات فیزیولوژیکی شناسی چای ترش (*Hibiscus sabdariffa* L.)
فرزانه ریگی، مهدی دهمرده، محمد رضا اصغری پور، مصطفی حیدری مجد و علیرضا سیروس مهر
- ۱۰۳ بررسی انتقال مجدد ماده خشک و سهم فتوسنتز جاری در دانه گندم (*Triticum aestivum* L.) در سه روش کشت و مقادیر مختلف بقایای گیاهی
معصومه شبیبی، اسفندیار فاتح و امیر آینه بند
- ۱۲۱ اثر تلفیق کودهای آلی-شیمیایی و کود زیستی بر عملکرد، کیفیت اسانس و کارآیی جذب برخی عناصر در رازیانه (*Foeniculum vulgare* Mill.)
مائه عطایی نژاد، محمدرضا مرادی تلاوت، سید عطاءاله سیادت، علی مشتطی و علی قاطعی
- ۱۴۱ تدوین الگوی کشت محصولات عمده کشاورزی دشت جیرفت براساس ردپای آب و ارزیابی چرخه حیات LCA
مجتبی ماندگاری کهن، حلیمه پیری و مهدی کیخا



Effects of Irrigation Regimes, Titanium Dioxide Nanoparticles, and Mycorrhizal Fungi on the Quantitative and Qualitative Yield and Physiological Traits of Sage (*Salvia officinalis* L.) in Intercropping with Peppermint (*Mentha piperita* L.)

Abdollah Javanmard^{ID 1*}, Ali Ostadi^{ID 1} and Haniyeh Shabkhiz^{ID 1}

1- Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran
(*- Corresponding author's Email: a.javanmard@maragheh.ac.ir)

How to cite this article:

Received: 29-09-2025
Revised: 09-12-2025
Accepted: 14-12-2025
Available Online: 04-04-2026

Javanmard, A., Ostadi, A., & Shabkhiz, H. (2026). Effects of irrigation regimes, titanium dioxide nanoparticles, and mycorrhizal fungi on the quantitative and qualitative yield and physiological traits of sage (*Salvia officinalis* L.) in intercropping with peppermint (*Mentha piperita* L.). *Journal of Agroecology*, 17(4), 1–37. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/AGRY.2025.95607.1254>

Introduction

Currently, due to the adverse effects of climate change and rising global temperatures, agricultural yields are declining, with the most severe impacts in arid and semi-arid regions. Drought stress is one of the most critical abiotic factors limiting plant growth and productivity in many areas, including Iran. With limited water resources and an average annual rainfall of only 250 mm, approximately two-thirds less than the global average (Biglari et al., 2019). Iran is particularly vulnerable. The severity and duration of drought stress significantly alter the ecophysiological, biochemical, and molecular characteristics of plants, adversely affecting both the quantity and quality of growth and yield (Salehi-Lisar & Bakhshayeshan-Agdam, 2020). Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), as biofertilizers, enhance plant tolerance to various biotic and abiotic stresses, including drought, nutrient deficiency, heavy metal toxicity, and salinity. In medicinal plants, the application of AMF has been shown to improve photosynthesis, enhance water uptake, increase chlorophyll and carotenoid levels, and boost antioxidant enzyme activity under stressful conditions (Varma et al., 2018). Within the framework of sustainable agriculture, the use of nanotechnology-based alternatives to conventional fertilizers is considered a promising strategy to increase crop productivity and help meet the food demands of the rapidly growing global population (Liu et al., 2015). Among nanomaterials, titanium dioxide nanoparticles (TiO₂ NPs) have been recognized as effective plant growth stimulant (Ingle, 2021). Additionally, intercropping one of the most important sustainable agricultural practices plays a crucial role in enhancing biodiversity and improving overall productivity.

Materials and Methods

This study was carried out at the Research Farm of the Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Maragheh. The experiment followed a split-split plot design within a randomized complete block design (RCBD) with three replications, conducted over two consecutive years. The main factor



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

 <https://doi.org/10.22067/agry.2026.94366.1245>

consisted of three irrigation regimes: 25% (MAD₂₅), 50% (MAD₅₀), and 75% (MAD₇₅) maximum allowable depletion (MAD) of soil available water (SAW), representing normal irrigation, mild water stress, and severe water stress, respectively. The sub-factor was planting pattern, including peppermint monoculture, sage monoculture, and peppermint-sage intercropping. The sub-sub factor involved fertilizer treatments, including: (i) no fertilizer (control), (ii) TiO₂ nanoparticles (100 mg.L⁻¹), (iii) arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation, and (iv) combined application of AMF and TiO₂ (AMF + TiO₂). Each plot consisted of five planting rows, with inter-row and intra-row spacings of 40 and 25 cm, respectively, for peppermint and sage. The AMF inoculum (*Funneliformis mosseae*) was obtained from Varian Biotechnological Company, Karaj, Iran. At planting, 80 g of soil containing fungal hyphae (equivalent to 1000 spores per 10 g of soil) was applied to each row. Peppermint and sage seedlings were established at a density of 10 plants.m⁻². The first irrigation was applied immediately after transplanting. To facilitate seedling adaptation and optimal establishment, drought stress treatments were initiated one month after planting. Soil moisture content was monitored using a moisture meter to ensure accurate application of drought stress. At full flowering, dry matter yield, essential oil (EO) content and yield, EO composition, and photosynthetic pigments were measured. Data were tested for normality before analysis. A combined analysis of variance was performed using a two-way split-split plot design in SAS (version 9.4). Mean comparisons were conducted using the least significant difference (LSD) test at the 5% probability level, and graphical illustrations were generated in Microsoft Excel.

Results and Discussion

The results indicated that sage dry matter yield decreased by 27% and 64.1% under mild and severe drought stress, respectively. Considering the interaction effect of cropping pattern and fertilizer sources, the highest sage dry matter yield (172.7 g m⁻²) was observed in monoculture with the combined application of AMF + TiO₂. The combined application of AMF + TiO₂ increased sage dry matter yield by 36.1% compared to the control (absence of fertilizer). The highest essential oil (EO) content in sage (1.33%) was obtained under intercropping with the integrated application of AMF + TiO₂. Notably, EO content under mild drought stress was 41.2% higher than that under normal irrigation. Chemical analysis of EO compounds revealed that the maximum levels of dominant compounds, namely *cis*-thujone and 1, 8-cineole, were achieved in intercropping with AMF + TiO₂ under both mild and severe stress conditions. Enhanced secondary metabolite production serves as an effective defense mechanism in medicinal and aromatic plants, mitigating the adverse effects of drought stress. Typically, EO formation and accumulation increase under environmental stress, protecting the plant against excessive light and water deficiency. The observed increase in sage EO with AMF + TiO₂ application is associated with improved photosynthetic activity, enhanced absorption and availability of key EO-forming nutrients such as nitrogen and phosphorus, and the development of additional EO-secreting glands.

Conclusion

In summary, the integrative application of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) combining TiO₂ in the intercropping system of sage with peppermint is highly recommended as a sustainable and effective approach to improve both the yield and quality of essential oils, particularly under drought stress conditions. This strategy not only enhances plant resilience against water deficit but also promotes more efficient nutrient uptake, leading to healthier growth and higher production of valuable secondary metabolites. Implementing this combined approach can be a practical, eco-friendly solution for farmers seeking to optimize essential oil production while maintaining soil health and long-term agricultural sustainability.

Keywords: Bio-fertilizer, Drought stress, Essential oil, Medicinal plants, Sustainable agriculture

مقاله پژوهشی

جلد ۱۸، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص ۳۷-۱

اثر رژیم‌های آبیاری، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ مایکوریزا بر عملکرد کمی و کیفی و خصوصیات فیزیولوژیکی مریم‌گلی (*Salvia officinalis* L.) در کشت مخلوط با نعناع‌فلفلی (*Mentha piperita* L.)

عبدالله جوانمرد^{۱*}، علی استادی^۱ و حانیه شب‌خیز^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳

چکیده

به منظور بررسی اثر رژیم‌های مختلف آبیاری، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ مایکوریزا بر کمیت و کیفیت اسانس مریم‌گلی (*Salvia officinalis* L.) در کشت مخلوط با نعناع‌فلفلی (*Mentha piperita* L.)، آزمایشی به صورت کرت‌های دو بار خردشده برپایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ اجرا شد. عامل اول رژیم‌های مختلف آبیاری در سه سطح، آبیاری پس از ۲۵ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی به عنوان آبیاری نرمال، آبیاری پس از ۵۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی به عنوان تنش ملایم و آبیاری پس از ۷۵ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی به عنوان تنش شدید بود. عامل فرعی الگوهای مختلف کشت (کشت خالص نعناع‌فلفلی، کشت خالص مریم‌گلی، کشت مخلوط نعناع‌فلفلی و مریم‌گلی) و عامل فرعی شامل منابع مختلف کودی (عدم مصرف نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ مایکوریزا به عنوان شاهد، نانو دی‌اکسید تیتانیوم، قارچ مایکوریزا و کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم) بود. نتایج نشان داد که عملکرد ماده خشک مریم‌گلی در تنش ملایم و شدید نسبت به حالت نرمال آبیاری به ترتیب ۲۷ و ۶۴/۱ درصد کاهش یافت. بیشترین عملکرد ماده خشک مریم‌گلی (۱۷۲/۷ گرم در مترمربع) در کشت خالص با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد. با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم، عملکرد ماده خشک مریم‌گلی ۳۶/۱ درصد نسبت به عدم مصرف کود افزایش یافت. همچنین بیشترین درصد اسانس مریم‌گلی (۱/۳۳ درصد) در کشت مخلوط و با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم حاصل شد. علاوه بر این، درصد اسانس مریم‌گلی در تنش ملایم ۴۱/۲ درصد بیشتر از آبیاری نرمال بود. براساس تجزیه شیمیایی ترکیب‌های اسانس، بیشترین میزان ترکیب (سیس-توجن و ۸۱ سینئول) غالب مریم‌گلی در کشت مخلوط و با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم در تنش ملایم حاصل شد. نتایج این تحقیق می‌تواند به بهینه‌سازی مدیریت آبیاری و استفاده از تکنولوژی‌های نوین کشاورزی برای افزایش بهره‌وری و کیفیت گیاهان دارویی در کشاورزی پایدار کمک کند.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، کشاورزی پایدار، کود زیستی، گیاهان دارویی، میزان اسانس

مقدمه

محصولات در شرایط اکولوژیک رو به افزایش می‌باشد. زیرا این سیستم‌های کشاورزی براساس اصول اکولوژیکی بوده و در آن کیفیت محصولات مهم‌تر از کمیت آن‌ها می‌باشد. مریم‌گلی (*Salvia officinalis* L.) جزء گیاهان چندساله دارویی و متعلق به خانواده نعنائیان^۲ و بومی منطقه مدیترانه است، اما در حال حاضر در سراسر

تمایل به تولید گیاهان دارویی و معطر و تقاضا برای این

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: a.javanmard@maragheh.ac.ir)
<https://doi.org/10.22067/AGRY.2025.95607.1254>

جهان کشت می‌شود (Farruggia et al., 2024). اندام‌های هوایی گیاه و به‌ویژه برگ‌ها دارای محتوای قابل توجه اسانس هستند. مقدار اسانس بسته به شرایط اقلیمی متفاوت است و معمولاً بین ۱ تا ۲/۵ درصد گزارش می‌شود. مهم‌ترین ترکیب‌های تشکیل‌دهنده اسانس مریم‌گلی شامل سیس‌توجن، کامفور، ترنس‌توجن و ۸۱-سینئول می‌باشند (Farahpour et al., 2020). مریم‌گلی در طب سنتی به عنوان داروی مؤثر برای معالجه عوارض نیش حشرات، ضدسم، ضد میکروب، ضد روماتیسم، ضدنفخ و ضدسرطان مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین خصوصیات ضدالتهابی بارز ترپنوئیدهای مریم‌گلی سبب شده است که با استفاده از عصاره این گیاه، مولکول‌های دارویی قدرتمندی برای درمان بیماری‌های التهابی مزمن مانند روماتیسم، آسم، التهابات روده‌ای و تصلب شرائین و غیره طراحی و ساخته می‌شود (Govahi et al., 2015). برگ‌های مریم‌گلی حاوی انواع مختلفی از فلاونوئیدها و ترکیبات فنلی می‌باشند و دارای خواص دارویی مهمی همچون فعالیت آنتی‌اکسیدانی و ضدالتهابی هستند (El-Haddad et al., 2020).

امروزه به واسطه اثرات منفی تغییرات اقلیمی و افزایش دمای جهانی، عملکرد محصولات کشاورزی رو به کاهش است، به‌طوری‌که در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، این کاهش عملکرد بیشتر می‌باشد. تنش خشکی از مهم‌ترین عوامل غیرزیستی محدودکننده رشد و عملکرد در بسیاری از نواحی جهان از جمله ایران می‌باشد. ایران از لحاظ ذخایر منابع آبی دارای محدودیت بوده و متوسط بارندگی سالانه در ایران ۲۵۰ میلی‌متر می‌باشد که حدود دو سوم کمتر از میانگین جهانی است (Biglari et al., 2019). در طی مراحل رشدی گیاه، بروز تنش خشکی باعث کاهش رشد ریشه، افت جذب آب و مواد غذایی، بزرگ شدن سلول‌ها، سنتز کلروفیل، گسترش برگ، فتوسنتز، ارتفاع بوته و سطح برگ می‌شود (Gao et al., 2020). تنش خشکی با توجه به مدت زمان، دوام و اندازه کمبود آن منجر به تغییر در صفات فیزیولوژیکی، ریخت‌شناختی، بوم‌شناختی، بیوشیمیایی و مولکولی گیاهان شده و می‌تواند بر کمیت و کیفیت رشد و عملکرد گیاهان تأثیر منفی داشته باشد (Salehi-Lisar & Bakhshayeshan-Agdam, 2020). افزون بر این، تنش کم‌آبی به دلیل کاهش هدایت روزنه‌ای باعث کاهش جذب CO₂، اندازه برگ، ارتفاع ساقه و توسعه ریشه می‌شود. همچنین تنش خشکی، روابط آبی گیاه را مختل نموده، کارایی مصرف آب را کاهش داده و باعث ایجاد

اختلال در تولید رنگدانه‌های فتوسنتزی شده و همچنین تبادل گازی با محیط را کاهش می‌دهد که این عوامل در نهایت منجر به کاهش رشد و بهره‌وری گیاه می‌گردد (Anjum et al., 2011). نتایج پژوهش‌های قبلی نشان‌دهنده این است که تولید اسانس در اغلب گیاهان دارویی تحت تنش خشکی ملایم افزایش می‌یابد. در شرایط تنش ملایم، بسته شدن روزنه‌ها و کاهش فتوسنتز رخ نمی‌دهد و پیش‌ماده‌های لازم برای سنتز اسانس‌ها در گیاه به‌میزان کافی وجود دارد. در نتیجه تولید ترپنوئیدها و ترکیب‌های فرار گیاه به‌دلیل نقش محافظتی این ترکیب‌ها در برابر دما و نور بالا، افزایش می‌یابد (Lusia et al., 2006). در مطالعه‌ای روی گیاه مرزنجوش (*Origanum vulgare* L.)، مشاهده شد که با افزایش سطوح تنش خشکی، وزن تر و عملکرد اسانس به‌طور معنی‌داری کاهش پیدا کرد (Said-Al Ahl & Hussein, 2010). در پژوهشی دیگری روی مریم‌گلی گزارش شد که تنش خشکی متوسط منجر به افزایش درصد و عملکرد اسانس گیاه نسبت به شاهد شد. همچنین بیشترین میزان آلفا توجن ۸۱-سینئول و کامفور در تنش خشکی متوسط حاصل گردید (Govahi et al., 2015).

کودهای زیستی حاوی قارچ‌ها و باکتری‌های مفید حل‌کننده عناصر غذایی هستند که معمولاً با اسیدی کردن خاک و یا ترشح آنزیم‌ها باعث آزادسازی این عناصر از ترکیب‌های پیچیده معدنی و آلی شده و در نتیجه منجر به افزایش جذب آن‌ها توسط گیاه می‌شوند. قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار، یکی از عوامل بیولوژیک خاک‌های زراعی می‌باشند که به‌دلیل افزایش سطح مؤثر ریشه و به‌دنبال آن سطح جذب و توانایی افزایش جذب فسفر و سایر عناصر غذایی به واسطه فعالیت آنزیم فسفاتاز و ترکیب‌های آلی حل‌کننده فسفات نامحلول موجب استفاده تجاری از این قارچ‌ها به‌عنوان کودهای زیستی شده است (Willmann et al., 2013). همچنین قارچ میکوریزا، مقاومت گیاه در برابر تعدادی از تنش‌های زیستی و غیرزیستی از قبیل خشکی، کمبود مواد غذایی، رسوب فلز سمی و شوری را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این نتایج پژوهش‌های قبلی نشان داده است که کاربرد قارچ میکوریزا به‌ویژه در گیاهان دارویی منجر به افزایش فتوسنتز، جذب رطوبت بیشتر از خاک، افزایش کلروفیل و کاروتنوئید و فعالیت بیشتر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در شرایط تنش شده است (Varma et al., 2018). تاراف و همکاران (Tarraf et al., 2017) با کاربرد قارچ میکوریزا روی مریم‌گلی گزارش کردند که

کاربرد قارچ مایکوریزا منجر به افزایش تعداد برگ، وزن خشک برگ، تراکم غده‌های ترشح‌کننده اسانس، درصد و ترکیب‌های اسانس نسبت به عدم مصرف کود گردید. در مطالعه دیگری با بررسی اثر انواع قارچ‌های مایکوریزا در بهبود رشد، زیست‌توده و متابولیت‌های ثانویه گونه‌ای از مریم‌گلی (*Salvia miltiorrhiza* Bge) گزارش شد که همزیستی با قارچ‌های مایکوریزا سبب افزایش رشد ریشه و متابولیت‌های ثانویه گردید (Wu et al., 2021). عبدالهی ارپناهی و فیضیان (Abdollahi Arpanahi & Feizian, 2020) با کاربرد قارچ مایکوریزا (*Rhizophagus intraradices*, *Funneliformis mosseae*) روی آویشن باغی (*Thymus vulgaris* L.) مشاهده کردند که تلقیح با قارچ مایکوریزا، اثرات سوء تنش خشکی را کاهش داد، به‌طوری‌که در شرایط تنش، تلقیح با قارچ مایکوریزا به افزایش وزن خشک ریشه، ساقه، درصد و عملکرد اسانس منجر گردید، همچنین بیشترین میزان تیمول در شرایط بدون تنش و تلقیح با قارچ مایکوریزا به دست آمد. در تحقیقی دیگر که روی دو ژنوتیپ ریحان (*Ocimum gratissimum* L.) و IC599368 و IC589192 مشخص شد که کاربرد قارچ مایکوریزا (*Rhizophagus intraradices*) باعث افزایش وزن خشک برگ‌ها و درصد اسانس در هر دو ژنوتیپ نسبت به گیاهانی شد که قارچ دریافت نکرده بودند. دلیل آن است که قارچ مایکوریزا با تشکیل ارتباط همزیستی با ریشه‌های گیاه، توانایی جذب آب و عناصر غذایی مانند فسفر و نیتروژن را افزایش می‌دهد. این افزایش دسترسی به مواد مغذی باعث رشد برگ‌ها و تولید بیشتر متابولیت‌های ثانویه مانند اسانس می‌شود. همچنین بیشترین میزان ترکیبات ارزشمند بتا- کاربوفیلین و بتا- الیمین نیز در گیاهان همزیست با قارچ مایکوریزا مشاهده شد که نشان می‌دهد این قارچ نه تنها رشد گیاه را بهبود می‌بخشد، بلکه کیفیت شیمیایی اسانس‌ها را نیز افزایش می‌دهد (Thokchom et al., 2020).

فناوری نانو به‌عنوان نوعی فناوری مدرن، پیشتاز در رفع مشکلات و کمبودها در بسیاری از عرصه‌های علمی، به‌خوبی جایگاه خود را در علوم کشاورزی به اثبات رسانده است. نانو تکنولوژی نوعی راهبرد جدید می‌باشد که نشان داده است می‌تواند مقاومت محصولات را در برابر تنش خشکی افزایش دهد. نانوذره‌ها موادی با اندازه ۱ تا ۱۰۰ نانومتر تعریف می‌شوند که به راحتی جذب گیاه می‌شوند. نانوذره‌ها دارای خصوصیات فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد از جمله مساحت سطح بالا، حداکثر جذب، واکنش پذیری بالا، پایداری و آلودگی کمتر

می‌باشند (Toksha et al., 2021). در کشاورزی پایدار، استفاده از تکنولوژی جدید نانو برای ساخت کودها به‌عنوان یک روش امیدبخش در افزایش تولید و تأمین نیاز غذایی جمعیت رو به رشد جهان در نظر گرفته می‌شود (Liu et al., 2015). پاسخ گیاه به نانوذره‌ها برحسب نوع گونه، مرحله رویشی و ماهیت نانوذره متفاوت می‌باشد. افزایش مقاومت در برابر تنش‌های غیرزیستی از جمله تنش خشکی با کاربرد نانو ذره دی‌اکسید تیتانیوم در برخی از گیاهان به اثبات رسیده است (Manzer et al., 2015). نانو دی‌اکسید تیتانیوم به‌عنوان محرک رشد گیاه شناخته می‌شود. واکنش گیاهان به این نانوذره در سطوح مختلف رخ می‌دهد (Ingle, 2021). به طوری که، نانو دی‌اکسید تیتانیوم می‌تواند فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش و از تجمع انواع گونه‌های فعال اکسیژن و آسیب به بخش‌های حیاتی سلول ممانعت نماید. همچنین نانو دی‌اکسید تیتانیوم منجر به افزایش جذب عناصر غذایی (فسفر و نیتروژن)، محتوای کلروفیل (a و b)، فتوسنتز و رشد گیاه می‌گردد (Chaudhary & Singh, 2020). همچنین تأثیر نانو دی‌اکسید تیتانیوم در افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه در گیاهان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (Khater et al., 2021; Shabbir et al., 2019). نانو دی‌اکسید تیتانیوم دارای خاصیت فتوکاتالیستی می‌باشد و جذب نور را بهبود می‌بخشد و باعث انتقال انرژی نورانی به الکترون‌ها و تبدیل آن‌ها به انرژی شیمیایی و در نهایت افزایش تثبیت کربن دی‌اکسید می‌گردد. همچنین نانو دی‌اکسید تیتانیوم می‌تواند با افزایش فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز و فسفاتاز، جذب نیتروژن و فسفر را بهبود بخشیده و باعث افزایش فعالیت آنزیمی، فتوسنتز و تولید متابولیت‌های ثانویه گردد (Ingle, 2021; Ahmad et al., 2018). در پژوهشی با ارزیابی سطوح مختلف نانو دی‌اکسید تیتانیوم (صفر، ۱۰ و ۴۰ پی‌پی‌ام) در شرایط آبیاری نرمال و تنش خشکی روی بادرشبی (*Dracocephalum moldavica* L.) گزارش کردند که بیشترین عملکرد اسانس با محلول پاشی ۱۰ پی‌پی‌ام نانو دی‌اکسید تیتانیوم تحت شرایط تنش خشکی به دست آمد (Mohammadi et al., 2016). غلامی و همکاران (Golami et al., 2018) گزارش کردند که کاربرد ۲۰ پی‌پی‌ام نانو دی‌اکسید تیتانیوم منجر به افزایش عملکرد و ترکیب‌های اسانس (۸۱ سینئول، اندو ویرنئول، کاربوفیلین و آلفا- هیومولین) رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) گردید.

هرچند کشت خالص دارای عملکرد بالایی است و در تأمین

رازیانه بیشتر بود. علاوه بر این، بیشترین میزان اسیدهای چرب غیراشباع (اسید اولئیک و لینولئیک) در الگوی کشت مخلوط دو ردیف رازیانه + دو ردیف لوبیا و با کاربرد باکتری‌های محرک رشد به دست آمد (Rezaei-Chiyaneh et al., 2020). بر این اساس، با توجه به اهمیت موارد ذکر شده، این پژوهش با هدف بررسی اثرات رژیم‌های مختلف آبیاری، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ میکوریزا بر کمیت و کیفیت اسانس مریم‌گلی در کشت مخلوط با نعنای فلفلی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال‌های زراعی ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ در مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه با طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۶ دقیقه شرقی و عرض ۳۷ درجه و ۲۳ دقیقه شمالی و با ارتفاع ۱۴۸۵ متر از سطح دریا اجرا شد. قبل از اجرای آزمایش، سه نمونه خاک به‌صورت تصادفی از قسمت‌های مختلف محل اجرای آزمایش برداشته و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن اندازه‌گیری شد (جدول ۱). علاوه بر این، مجموع بارش و میانگین دمای ماهانه سال‌های مورد آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است.

نیازهای غذایی جمعیت رو به رشد نقش مهمی ایفا می‌کند، ولی به هزینه و انرژی بالایی نیاز داشته و از نظر بوم‌شناختی باعث بروز مشکلاتی از جمله آلودگی آب‌های زیرزمینی، افزایش آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز، از بین رفتن منابع طبیعی و کاهش تنوع زیستی می‌شود. بنابراین، بازنگری در روش‌های متداول کشاورزی و راهکارهای مربوط به استفاده بیشتر و بهتر از منابع و افزایش کارایی تولید ضروری است (Nasiri Mahallati et al., 2015). کشت مخلوط به‌عنوان یکی از مهم‌ترین سیستم‌های کشاورزی پایدار، می‌تواند برای افزایش تنوع و سود حاصل از آن‌ها در واحد سطح و زمان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد. افزایش تولید در کشت مخلوط را می‌توان به کاهش رشد علف‌های هرز، کاهش خسارت آفات و بیماری‌ها، سرعت رشد بیشتر و استفاده بهتر از منابع در دسترس نسبت داد. نظام کشت مخلوط، با افزایش تعداد گونه‌ها در واحد سطح، به‌عنوان یک راه حل برای افزایش تولید در کشاورزی پیشرفته پیشنهاد شده است (Monti et al., 2016). نتایج پژوهشی نشان داد که درصد اسانس رازیانه (*Foeniculum vulgare* L.) در کلیه الگوهای کشت مخلوط با لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) بیشتر از کشت خالص آن بود. همچنین بیشترین میزان درصد اسانس در الگوی کشت مخلوط ۲ ردیف رازیانه + ۲ ردیف لوبیا به دست آمد و ۲۱ درصد نسبت به کشت خالص

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

Table 1- Some physical and chemical properties of the soil where the experiment was conducted

بافت Texture	ظرفیت زراعی Field capacity y (%)	نقطه پژمردگی دائم Permanent wilting point (%)	نیتروژن کل Total nitrogen (g.kg ⁻¹)	فسفر قابل جذب Absorbable phosphorus (mg.kg ⁻¹)	پتاسیم قابل جذب Absorbable potassium (mg.kg ⁻¹)	ظرفیت تبادل کاتیونی Cation exchange capacity (cmol.kg ⁻¹)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	ماده آلی Organic matter (g.kg ⁻¹)
Sandy clay loam لوم رسی شنی	27.1	13.7	0.87	9.7	563.85	26.5	7.73	1.17	8.1

جدول ۲- میانگین دما و مجموع بارش ماهانه در طول دوره رشد

Table 2- Mean temperature and cumulative monthly precipitation throughout the growth period

میانگین دمای ماهانه (درجه سانتیگراد)	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
Monthly mean temperature (°C)	April	May	June	July	August	September
2019	10.4	18.5	25.7	27.6	27.8	22.1
2020	11.8	19.1	24.2	28	25.1	23.8
بارش ماهانه (میلیمتر)	Monthly precipitation (mm)					
2019	51.3	37.8	4.2	0	0	0
2020	63.3	12	2.6	0.1	1.2	0

دانشگاه تبریز انجام پذیرفت (شکل ۳). قبل از محلول‌پاشی، نانو دی‌اکسید تیتانیوم با آب مقطر (۱۰۰ میلی گرم در لیتر) مخلوط و به مدت دو ساعت در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد به وسیله همزن مکانیکی هم زده شد. سپس محلول به دست آمده به مدت یک ساعت در داخل دستگاه التراسونیک پروب‌دار قرار داده شد تا محلول پایدار تشکیل گردد. در نهایت محلول به دست آمده در مرحله قبل از گل‌دهی با غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر روی بوته‌های مریم‌گلی و نعناع‌فللی محلول‌پاشی شد.

به منظور آماده‌سازی زمین برای کاشت، شخم نیمه عمیق در اوایل پاییز توسط گاواهن برگردان‌دار انجام و در بهار پس از شخم سطحی، برای نرم کردن خاک از دو نوبت دیسک عمود بر هم استفاده شد. هر کرت شامل شش خط کاشت به طول سه متر با فواصل بین و روی ردیف به ترتیب ۴۰ و ۲۵ سانتی متر برای نعناع‌فللی و مریم‌گلی بود. مساحت کرت ۴/۸ مترمربع در نظر گرفته شد. قارچ مایکوریزای مورد استفاده در این پژوهش (*Funneliformis mosseae*) از شرکت زیست‌فناور پیش‌تاز واریان کرج تهیه شد. هنگام کاشت، ۸۰ گرم از خاک حاوی هیف‌های قارچ مایکوریزا، بقایای ریشه و اسپور (۱۰۰۰ اسپور در هر ۱۰ گرم خاک)، در هر خط کاشت استفاده گردید. تلقیح مایکوریزا در شرایط محیطی کاملاً کنترل شده انجام گردید تا از کلونیزاسیون مؤثر ریشه و یکنواختی تیمارها اطمینان حاصل شود. تلقیح در مرحله استقرار اولیه گیاه (کاشت/نشاکاری) و در خاکی با رطوبت مناسب برای فعالیت قارچ (۶۰-۷۰ درصد ظرفیت زراعی) صورت گرفت. دمای محیط رشد در محدوده بهینه فعالیت مایکوریزا (۲۲-۲۸ درجه سانتی‌گراد) حفظ شد و از کود فسفوری که می‌تواند کلونیزاسیون را کاهش دهد، استفاده نشد. نشاهای مریم‌گلی و نعناع‌فللی با تراکم ۱۰ بوته در مترمربع در عمق ۱۰ سانتی متری خاک به صورت همزمان کاشته شدند. بلافاصله اولین نوبت آبیاری پس از کاشت انجام پذیرفت. برای سازگاری بیشتر نشاهای منتقل شده به خاک و دستیابی به رشد بهینه، در ماه نخست هیچ گونه تنش اعمال نشد.

آزمایش به صورت کرت‌های دو بار خرد شده^۱ برپایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD) با سه تکرار اجرا شد. عامل اول رژیم‌های مختلف آبیاری در سه سطح، آبیاری پس از ۲۵ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (MAD_{25}) به عنوان آبیاری نرمال، آبیاری پس از ۵۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (MAD_{50}) به عنوان تنش ملایم و آبیاری پس از ۷۵ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (MAD_{75}) به عنوان تنش شدید می‌باشد. عامل فرعی الگوهای مختلف کشت (کشت خالص نعناع‌فللی، کشت خالص مریم‌گلی، کشت مخلوط یک ردیف نعناع‌فللی + یک ردیف مریم‌گلی) و عامل فرعی فرعی منابع مختلف کودی شامل عدم مصرف کود به عنوان شاهد، نانو دی‌اکسید تیتانیوم، قارچ مایکوریزا (*Funneliformis mosseae*) و کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم بود.

برای سنتز نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم، ابتدا مقدار مورد نظر از تیتانیوم ایزوپروپوکساید^۲ در شرایط سرد (صفر درجه سانتی‌گراد) با سرعت به هم زده شد تا رسوب تیتانیوم هیدرواکسید^۳ تشکیل شود. رسوب تیتانیوم هیدرواکسید سه بار با آب مقطر شست‌وشو و سپس در اسید نیتریک حل شد تا محلول شفاف و همگن تیتانیل نیترات^۴ به دست آید. در ادامه برای تولید نانو دی‌اکسید تیتانیوم، تیتانیل نیترات را با محلول اوره به نسبت مولی ۱:۱ در بشر ۲۵۰ میلی لیتری مخلوط و سپس در کوره الکتریکی با دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. بعد از دو ساعت، محصول جامد نانو دی‌اکسید تیتانیوم تولید و جمع‌آوری گردید. نانو دی‌اکسید تیتانیوم تولید شده تا زمان استفاده در آون خلاء نگهداری گردید (Nagaveni et al., 2004). عکس‌برداری TEM^۵ با دستگاه Zeiss EM-09 (شکل ۱) و بررسی توزیع اندازه ذرات به روش پراکندگی نور دینامیکی^۶ و با استفاده از دستگاه زتاسایزر^۷ و در مرکز تحقیقات کاربردی دارویی دانشگاه علوم پزشکی تبریز انجام پذیرفت. میانگین اندازه ذره‌ها مابین ۶۰ تا ۷۰ نانومتر بود (شکل ۲). همچنین عکس‌برداری SEM^۸ در آزمایشگاه مرکزی

1 - Split split plot

2 - Titanium isopropoxide

3 - $TiO(OH)_2$

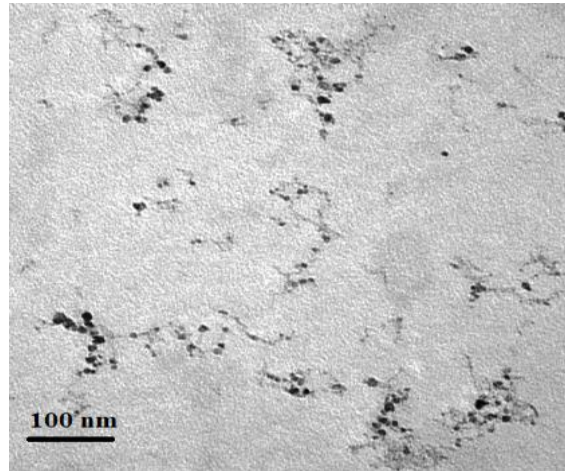
4 - Homogeneous titanyl nitrate $[TiO(NO_3)_2]$ solution

5 - Transmission electron microscopy

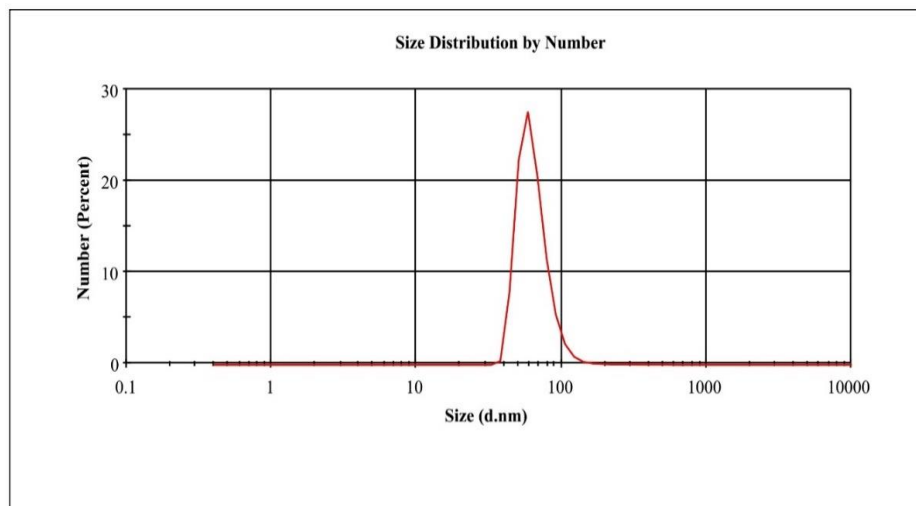
6 - Dynamic light scattering

7 - Zetasizer Nano ZS90- Malvern, ZEN3600

8 - Scanning electron microscopy



شکل ۱- عکس TEM از نانو دی اکسید تیتانیوم مورد استفاده در این آزمایش
Fig. 1- TEM image of the titanium dioxide nanoparticles used in this experiment



شکل ۲- اندازه نانو دی اکسید تیتانیوم مورد استفاده در این آزمایش
Fig. 2- Size of the titanium dioxide nanoparticles used in this experiment

که در آن، θ_{fc} ، d ، p ، I_d ، E_a و I_g به ترتیب ظرفیت زراعی خاک (۲۷/۱ درصد)، نقطه پژمردگی دائم (۱۳/۷ درصد)، عمق خاک (سانتی‌متر)، درصد تنش اعمال شده (۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد)، عمق خالص آبیاری (۲۰ سانتی‌متر)، کارایی آبیاری (۶۵ درصد در نظر گرفته شده است) و عمق ناخالص آبیاری در تنش‌های مختلف می‌باشد. برای تعیین زمان آبیاری در مراحل مختلف رشد از معادله ۴ استفاده گردید (Gheysari et al., 2015).

$$MAD = \theta_{fc} - (\theta_{fc} - \theta_{pwp}) \times a \quad \text{معادله (۴)}$$

که در آن، a تنش‌های اعمال شده در تیمارهای آبیاری (۰/۲۵، ۰/۵۰ و ۰/۷۵) می‌باشد. همچنین برای محاسبه حجم آبیاری، از

همچنین مبارزه با علف‌های هرز به صورت منظم و به طور دستی انجام شد. برای اعمال سطوح تنش خشکی از دستگاه رطوبت‌سنج^۱ استفاده گردید. تیمارهای آبیاری براساس بیشینه درصد تخلیه مجاز از آب در دسترس^۲ انجام شد. اعمال تنش‌ها با استفاده از معادله‌های زیر مورد محاسبه قرار گرفت (Bahreininejad et al., 2013).

$$SAW = (\theta_{fc} - \theta_{pwp}) \times d \quad \text{معادله (۱)}$$

$$I_d = SAW \times p \quad \text{معادله (۲)}$$

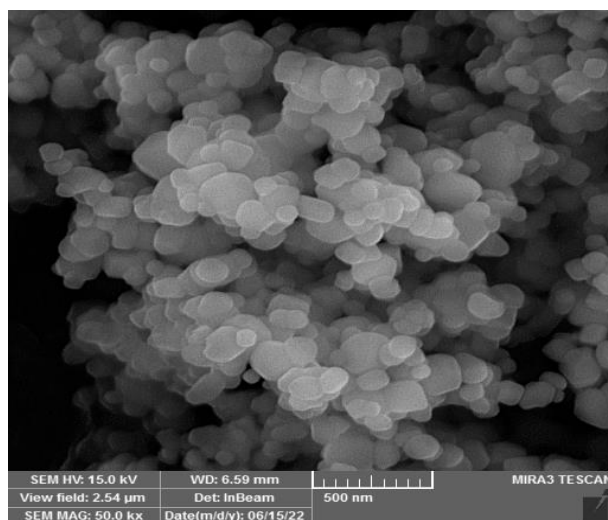
$$I_g = [I_d \times 100] / E_a \quad \text{معادله (۳)}$$

1- Time domain reflectometry

2- Soil available water

با توجه به اینکه نوع آبیاری مورد استفاده در این آزمایش قطره‌ای بود، برای محاسبه میزان زمان مورد نیاز برای رسیدن به حجم مطلوب هر کرت، نیاز به تعیین میزان سطح خیس‌شوندگی خاک (P_w) بود.

حاصل ضرب مقدار عمق ناخالص آبیاری محاسبه‌شده در مساحت هر کرت استفاده شد. براساس میانگین دو سال، حجم آبیاری نهایی در طول فصل رشد در آبیاری نرمال، تنش ملایم و شدید به‌ترتیب $۱/۱۶$ ، $۰/۸۷$ و $۰/۵۸$ مترمکعب (معادل ۱۱۶۰ ، ۸۷۰ و ۵۸۰ لیتر) بود.



شکل ۳- عکس SEM از نانو دی‌اکسید تیتانیوم مورد استفاده در این آزمایش
Fig. 3- SEM image of the titanium dioxide nanoparticles used in this experiment

درصد کلونی‌زاسیون ریشه

به‌منظور تعیین درصد کلونی‌زاسیون ریشه، نمونه‌برداری در آخر فصل رشد از تیمارهای تلقیح‌شده با قارچ مایکوریزا صورت گرفت. ابتدا ریشه‌ها را داخل آب قرار داده تا خیس شوند، سپس به‌آرامی با آب شست‌وشو داده شدند. در ادامه برای حذف محتویات داخل سلول، ریشه‌ها در داخل محلول پتاسیم هیدرواکسید^۱ ده درصد به‌مدت ۵ الی ۱۰ دقیقه روی چراغ بونزن حرارت داده شدند. سپس ریشه‌ها با آب مقطر شست‌وشو داده شد. پس از آن، ریشه‌ها در داخل محلول اسید هیدروکلریک^۲ دو درصد به‌مدت ۱۵ الی ۲۰ دقیقه اسیدی شدند. سپس برای رنگ‌آمیزی، ریشه‌ها در داخل لاکتوفنول کاتن بلو ۲۰ درصد به‌مدت ۱۰ دقیقه روی چراغ بونزن حرارت داده شد. بعد از رنگ آمیزی، ریشه‌ها با آب مقطر شست‌وشو داده شدند. سپس ریشه‌ها در یک محلول حاوی اسیدلاکتیک، گلیسرول و آب به نسبت ۱:۱:۱ (v:v:v) تا زمان سنجش نگه داشته شد (McGonigle et al., 1990; Koske & Gemm, 1989; Phillips & Hayman, 1970). نمونه‌های رنگ‌آمیزی‌شده توسط میکروسکوپ نوری الیمپوس مدل

$$P_w = \frac{W}{D} \quad \text{معادله (۵)}$$

که در آن، P_w ، W و D : به‌ترتیب درصد سطح خیس‌شده مزرعه، عرض خیس‌شده توسط قطره چکان و فاصله بین ردیف‌های کشت می‌باشد. برای اندازه‌گیری دبی از یک بشر با حجم مشخص استفاده گردید. مدت زمان لازم برای پر شدن بشر به‌وسیله کورنومتر اندازه‌گیری و دبی از طریق معادله ۶ محاسبه گردید.

$$Q = \frac{V}{t} \quad \text{معادله (۶)}$$

که در آن، Q ، V و t : به‌ترتیب دبی آب برحسب مترمکعب در ثانیه، حجم ظرف برحسب مترمکعب و مدت زمان لازم برای پر شدن ظرف برحسب ثانیه می‌باشد. با توجه به اینکه تعداد قطره چکان موجود در هر کرت و همچنین دبی آب ورودی به سطح هر کرت مشخص می‌باشد، زمان مورد نیاز برای رسیدن به حجم آبیاری مورد نظر برای هر کرت از طریق معادله ۷ محاسبه گردید (Li et al., 2024).

$$\text{دبی آب ورودی} \times \text{تعداد قطره چکان در هر کرت} = \frac{\text{حجم آب مورد نیاز}}{\text{زمان مورد نیاز}} \quad \text{معادله (۷)}$$

BH-2 مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند. درصد کلونیزاسیون به‌روش خطوط متقاطع محاسبه شد. بدین صورت که در مورد هر تیمار، ریشه‌های رنگ‌آمیزی‌شده به قطعات یک سانتی‌متری برش داده و به‌صورت تصادفی درون پلیت شیشه‌ای قرار داده شد. سپس یک صفحه شطرنجی به ابعاد 1×1 سانتی‌متر تهیه و زیر پلیت قرار گرفت، برای مشاهده و شمارش ریشه‌های آلوده و غیرآلوده از یک استیرو میکروسکوپ (بینوکولار) با بزرگنمایی $40 \times$ استفاده گردید. ریشه‌های آلوده و غیرآلوده که با خطوط عمودی و افقی صفحه شطرنجی تقاطعی را ایجاد کرده بودند، هرکدام جداگانه شمارش شدند و درصد کلونیزاسیون از معادله ۸ محاسبه شد (Giovannetti & Mosse, 1980).

معادله (۸)
$$\frac{\text{مجموع ریشه‌های آلوده}}{100 \times (\text{مجموع کل ریشه‌های آلوده و غیرآلوده})} = \text{درصد کلونیزاسیون}$$

استخراج اسانس

برای استخراج اسانس از دستگاه کلونجر طرح آپاراتوس استفاده شد. در مرحله گل‌دهی کامل، سرشاخه‌های گلدار مریم‌گلی برداشت شد و به اتاق تاریک و خنک جهت خشک شدن انتقال یافت. سپس به هر نمونه خشک‌شده در بالن 400 میلی‌لیتر آب مقطر اضافه نموده و اسانس‌گیری به‌مدت سه ساعت صورت گرفت، اسانس‌های استخراج شده با سدیم سولفات خشک آگیری و سپس داخل ویال شیشه‌ای در دمای چهار درجه سانتی‌گراد تا زمان آنالیز نگهداری شدند. درصد عملکرد اسانس براساس معادله‌های ۹ و ۱۰ محاسبه شدند (Morshedloo et al., 2017).

معادله (۹)

$$100 \times (\text{وزن خشک نمونه (گرم)} / \text{وزن اسانس}) = \text{درصد اسانس}$$

معادله (۱۰)
$$\text{درصد اسانس} \times \text{عملکرد ماده خشک} = \text{عملکرد اسانس}$$

شناسایی ترکیبات اسانس

برای شناسایی ترکیبات اسانس گیاه مریم‌گلی از دستگاه کروماتوگرافی گازی^۱ متصل‌شده به طیف‌سنجی جرمی^۲ مدل آجیلنت^۳ ساخت کشور آمریکا، با ستون HP-5 MS (پنج درصد فنیل

متیل پلی‌سیلوکسان، به‌طول 30 متر، قطر داخلی 0.25 میلی‌متر و ضخامت ماده جاذب 0.25 میکرومتر) استفاده گردید. در برنامه‌ریزی دمایی آن، ابتدا دما در عرض 5 دقیقه به 60 درجه سانتی‌گراد رسیده، سپس به‌تدریج دما با سرعت 3 درجه سانتی‌گراد بر دقیقه افزایش یافت تا به دمای 240 درجه سانتی‌گراد رسید. بعد از آن به‌مدت 20 دقیقه در این دما نگهداری شد. هلیوم به‌عنوان گاز حامل با سرعت جریان یک میلی‌لیتر بر دقیقه استفاده شد. ولتاژ یونیزاسیون 70 الکترون ولت، روش یونیزاسیون EI و دمای یونیزاسیون 220 درجه سانتی‌گراد بود. محفظه تزریق در حالت تقسیم (نسبت تقسیم $1:30$) تنظیم شده بود و محدوده جذب جرمی از 40 تا 400 m/z بود. به‌منظور محاسبه شاخص بازداري ترکیبات، مخلوطی از هیدروکربن-های آلیفاتیک^۴ تحت شرایط برنامه دمایی آنالیز نمونه اسانس به داخل سیستم جی‌سی تزریق شد. نرم‌افزار مورد استفاده Chemstation بود. محاسبه و شناسایی ترکیبات اسانس به کمک شاخص‌های بازداري خطی آن‌ها و مقایسه آن با شاخص‌های موجود در کتاب مرجع (Adams, 2007) و با استفاده از طیف‌های جرمی ترکیبات استاندارد و استفاده از اطلاعات موجود در کتابخانه کامپیوتری صورت گرفت. برای جداسازی ترکیبات از دستگاه کروماتوگرافی گازی مدل Agilent 7990B ساخت کشور آمریکا با آشکارساز یونیزاسیون شعله‌ای^۵ و ستون VF-5MS استفاده گردید. دمای تزریق و آشکارساز به‌ترتیب روی 230 و 240 سانتی‌گراد تنظیم شد. گاز هلیوم با سرعت جریان یک میلی‌لیتر بر دقیقه و نسبت تقسیم $1:24$ استفاده شد. نمونه‌های اسانس به نسبت $1:100$ در هگزان رقیق‌سازی و به‌میزان یک میکرولیتر تزریق شدند. کمی کردن ترکیبات اسانس با استفاده از نرمال‌سازی سطح قله و بدون استفاده از ضرایب اصلاح انجام پذیرفت (Morshedloo et al., 2018).

سنجش رنگیزه‌های فتوسنتزی

کلروفیل و کاروتنوئید موجود در برگ‌های مریم‌گلی به‌روش لیشنتالر (Lichtenthaler, 1987) مشخص گردید. بدین منظور، 100 میلی‌گرم وزن تر برگ در داخل هاون چینی با 10 میلی‌لیتر استون 80 درصد خوب ساییده گردید. سپس فالكون‌ها به‌مدت 10 دقیقه در دور 6000 در دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. حجم محلول

4- C8-C40

5- Flame ionization detector

1- Chromatograph gas

2- Spectrometer mass

3- Agilent Co. USA

برای افزایش سازگاری با این شرایط نامطلوب، ایجاد رابطه همزیستی با میکروارگانیسم‌ها می‌باشد. در پژوهش حاضر، درصد کلونیزاسیون ریشه گیاه مریم‌گلی با افزایش روند خشکی کاهش یافت که می‌تواند با تخریب فعالیت و جمعیت میکروبی خاک و همچنین با کاهش جوانه‌زنی اسپورها، تراکم اسپورها، ترشحات ریشه‌ای، تحرک و دسترسی به عناصر غذایی و تأمین کربوهیدرات توسط گیاه میزبان مرتبط باشد (Abdollahi Arpanahi et al., 2020). قنبرزاده و همکاران (Ghanbarzadeh et al., 2019) با بررسی سطوح مختلف تنش کم‌آبی و کاربرد قارچ مایکوریزا (*Claroideoglomus etunicatum*) روی بادربشی گزارش کردند که تنش خشکی باعث کاهش درصد کلونیزاسیون ریشه گیاه گردید، به‌طوری‌که بیشترین کمترین درصد کلونیزاسیون ریشه به‌ترتیب در ۱۰۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی به دست آمد. همچنین این پژوهشگران اظهار داشتند که میزان رطوبت خاک و در دسترس بودن کربن برای گیاه میزبان از عوامل تأثیرگذار بر کلونیزاسیون ریشه می‌باشد. در مطالعه‌ای دیگر با کاربرد قارچ مایکوریزا (*Glomus versiforme*) و اعمال تنش خشکی روی گیاه تنباکو (*Nicotiana tabacum* L. Variety Yunyan 87) مشاهده کردند که با افزایش تنش خشکی، درصد کلونیزاسیون ریشه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. به‌طوری‌که درصد کلونیزاسیون در تنش‌های ملایم و شدید به‌ترتیب ۲۴/۱ و ۳۸/۶ کاهش یافت (Shukla et al., 2021). شوکلا و همکاران (Begum et al., 2021) (2013) مشاهده کردند که میزان رطوبت خاک یکی از عوامل تأثیرگذار بر میزان کلونیزاسیون ریشه می‌باشد. همچنین این پژوهشگران بیان کردند که بیشترین و کمترین درصد کلونیزاسیون ریشه در دو گیاه ماش سیاه (*Vigna mungo* (L.) Hepper) و گندم به‌ترتیب در ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به دست آمد. همچنین در پژوهشی دیگر با ارزیابی کشت مخلوط سویا (*Glycine max* L. با گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) و کاربرد قارچ مایکوریزا گزارش کردند که در بین الگوهای مختلف کشت، تفاوت معنی‌داری از لحاظ درصد کلونیزاسیون وجود نداشت (Weisany et al., 2021).

فوقانی توسط استون ۸۰ درصد به ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد و مقدار کلروفیل و کاروتنوئید توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (UV-1800 Shimadzu, Japan) با میزان جذب در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۶۳/۲ و ۶۴۶/۸ تعیین و غلظت کلروفیل و کاروتنوئید با استفاده از معادله های ۱۱ تا ۱۴ محاسبه گردید.

$$\text{Chl a} = (12.25A_{663.2}) - (2.79A_{646.8}) \quad \text{معادله (۱۱)}$$

$$\text{Chl b} = (21.5A_{646.8}) - (5.1A_{663.2}) \quad \text{معادله (۱۲)}$$

$$\text{Chl a+b} = (7.15A_{663.2}) + (18.71A_{646.8}) \quad \text{معادله (۱۳)}$$

$$\text{Car} = [1000A_{470} - 1.82C_a - 85.02C_b] / 198 \quad \text{معادله (۱۴)}$$

آنالیز آماری

در نهایت، بعد از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها با آزمون Shapiro-Wilk، تجزیه واریانس مرکب داده‌ها به‌صورت کرت‌های دو بار خردشده با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS ورژن ۹/۴ و رسم نمودارها توسط نرم‌افزار Excel صورت پذیرفت. همچنین مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

کلونیزاسیون ریشه مریم‌گلی

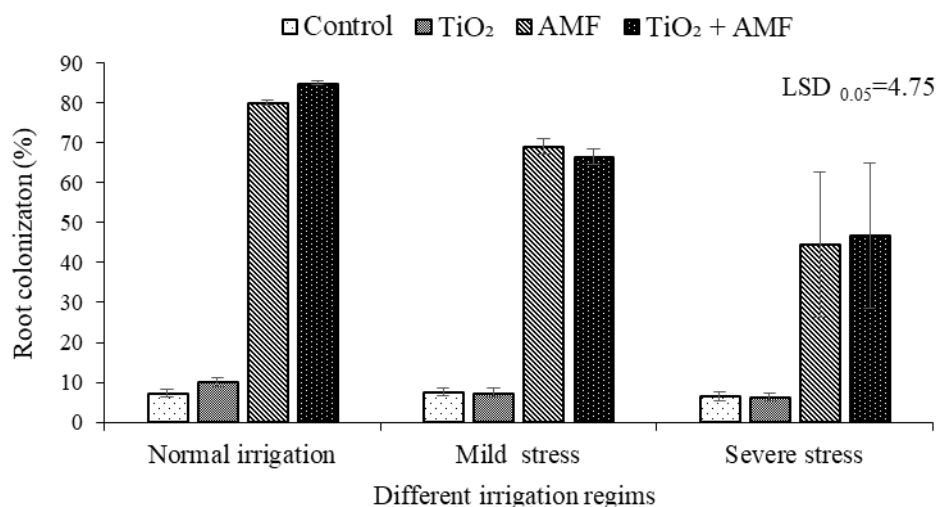
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که کلونیزاسیون ریشه مریم‌گلی تحت تأثیر معنی‌دار اثرات ساده سال، رژیم‌های مختلف آبیاری، منابع کودی و اثر متقابل رژیم‌های آبیاری × منابع کودی قرار گرفت (جدول ۳). بیشترین میزان کلونیزاسیون ریشه مریم‌گلی (۸۵ درصد) در شرایط آبیاری نرمال با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد. با افزایش شدت تنش خشکی از میزان کلونیزاسیون ریشه کاسته شد، به‌طوری‌که کلونیزاسیون ریشه در شرایط تنش ملایم و شدید به‌ترتیب ۱۷/۳ و ۴۲/۸ درصد کاهش یافت (شکل ۴). علاوه بر این، درصد کلونیزاسیون ریشه مریم‌گلی در سال اول ۴/۵ درصد نسبت به سال دوم بیشتر بود. (شکل ۵). تنش خشکی تأثیر منفی روی فیزیولوژی، رشد و بهره‌وری گیاهان دارد. یکی از راهکارها

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر تیمارها بر درصد کلونیزاسیون، عملکرد ماده خشک، درصد و عملکرد اسانس مریم گلی
Table 3- Results of variance analysis of the effect of different treatments on colonization percentage, dry matter yield, EO content and yield of sage

منابع تغییر S.O.V	میانگین مربعات Mean of squares				
	درجه آزادی df	درصد کلونیزاسیون Colonization percentage	عملکرد ماده خشک Dry matter yield	درصد اسانس Essential oil content	عملکرد اسانس Essential oil yield
سال Year	1	93.61*	27.031 ^{n.s}	0.0001 ^{n.s}	0.20 ^{n.s}
خطای a Error a	4	9.64	474.94	0.02	0.04
رژیم های آبیاری Irrigation regimes	2	4635.65**	170478.55*	4.10**	47.03
سال × رژیم آبیاری Year × Irrigation regimes	2	43.18 ^{n.s}	733.58 ^{n.s}	0.04 ^{n.s}	0.15 ^{n.s}
خطای b Error b	8	18.17	183.35	0.01	0.05
الگوی کشت Planting patterns	1	94.58	49276.79*	0.52*	2.40**
الگوی کشت × رژیم آبیاری Irrigation regimes × Planting patterns	2	1.69 ^{n.s}	4129.75 ^{n.s}	0.04*	0.33 ^{n.s}
سال الگوی کشت Year × Planting patterns	1	1.54 ^{n.s}	44.00 ^{n.s}	0.0004 ^{n.s}	0.00001 ^{n.s}
سال × رژیم آبیاری × الگوی کشت Year × Irrigation regimes × Planting patterns	2	2.92 ^{n.s}	340.76 ^{n.s}	0.0005 ^{n.s}	0.10 ^{n.s}
خطای c Error c	12	0.81	102.38	0.003	0.03
(دی اکسید تیتانیوم + قارچ مایکوریزا) (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi)	3	40140.69	24978.84**	0.56**	4.42*
رژیم آبیاری × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ مایکوریزا) (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi) × Irrigation regimes	6	1262.55**	7695.55*	0.12**	1.85**
الگوی کشت × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ مایکوریزا) Planting patterns × (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi)	3	10.86 ^{n.s}	1456.12*	0.007*	0.033 ^{n.s}
رژیم آبیاری × الگوی کشت × منابع کودی Irrigation × Planting patterns × Fertilizer sources	6	0.63 ^{n.s}	396.69 ^{n.s}	0.012 ^{n.s}	0.08 ^{n.s}
سال × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ مایکوریزا) Year × (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi)	3	17.11 ^{n.s}	586.20 ^{n.s}	0.010 ^{n.s}	0.09 ^{n.s}
سال × رژیم آبیاری × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ مایکوریزا) Year × Irrigation regimes × (nano titanium dioxide + arbuscular mycorrhizal fungi)	6	22.70 ^{n.s}	345.60 ^{n.s}	0.014 ^{n.s}	0.06 ^{n.s}
سال × الگوی کشت × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ مایکوریزا) Year × Planting patterns × (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi)	3	1.30 ^{n.s}	116.21 ^{n.s}	0.001 ^{n.s}	0.01 ^{n.s}
سال × رژیم آبیاری × الگوی کشت × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ مایکوریزا) Year × Irrigation regimes × Planting patterns × (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi)	6	0.85 ^{n.s}	109.64 ^{n.s}	0.003 ^{n.s}	0.02 ^{n.s}
خطای کل Total error	72	11.11	304.17	0.01	0.05
ضریب تغییرات CV (%)		9.16	13.53	8.48	15.19

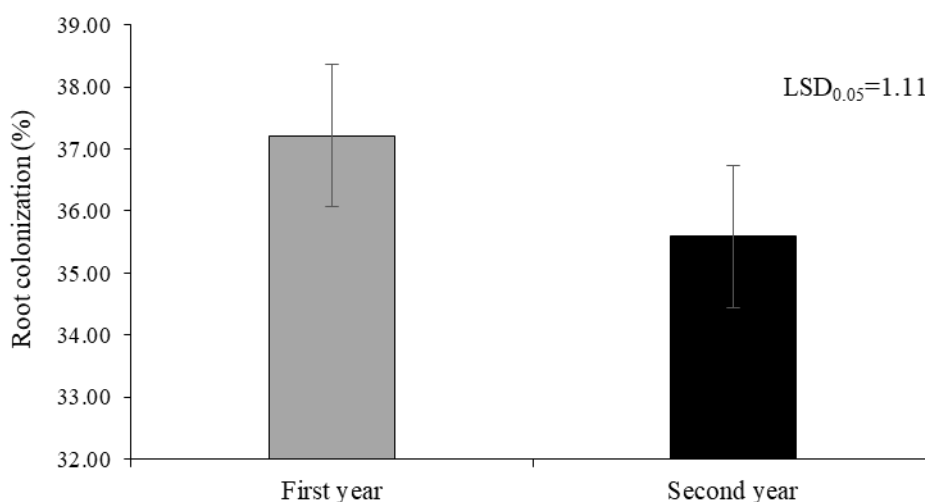
ns و *، **: به ترتیب معنی دار در سطح یک و پنج درصد و عدم تفاوت معنی دار.

ns, * and **: are significant at the 1 and 5 percent levels, respectively, and there is no significant difference.



شکل ۴- مقایسه میانگین کلونیزاسیون ریشه مریم‌گلی تحت تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ میکوریزا
Fig. 4- Mean comparison of sage roots colonization under the influence of different different irrigation regimes, nano titanium dioxide and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)

TiO₂: نانو دی‌اکسید تیتانیوم و AMF: قارچ آرباسکولار میکوریزا
TiO₂: Nano titanium dioxide and AMF: Arbuscular mycorrhizal fungi



شکل ۵- مقایسه میانگین درصد کلونیزاسیون ریشه مریم‌گلی در سال‌های اول و دوم آزمایش
Fig. 5- Mean comparison of the sage root colonization in the first and second years of the experiment

عملکرد ماده خشک مریم‌گلی

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که عملکرد ماده خشک مریم‌گلی تحت تأثیر معنی‌دار اثرات ساده رژیم‌های مختلف آبیاری، الگوی کشت، منابع کودی و اثرات متقابل رژیم‌های آبیاری × منابع کودی و الگوهای کشت × منابع کودی قرار گرفت. براساس ترکیب تیماری رژیم‌های آبیاری و منابع کودی، بیشترین (۲۳۳/۷ گرم در مترمربع) عملکرد ماده خشک مریم‌گلی در آبیاری نرمال با کاربرد

تلفیقی قارچ میکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد. در تنش‌های ملایم و شدید، عملکرد ماده خشک مریم‌گلی به ترتیب ۲۷ و ۶۴/۱ درصد کاهش یافت (شکل ۶). همچنین براساس اثر متقابل الگوی کشت × منابع کودی، بیشترین (۱۷۲/۷ گرم در مترمربع) عملکرد ماده خشک مریم‌گلی در کشت خالص با کاربرد تلفیقی قارچ میکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد. کاربرد تلفیقی قارچ میکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم منجر به افزایش ۳۶/۱ درصدی

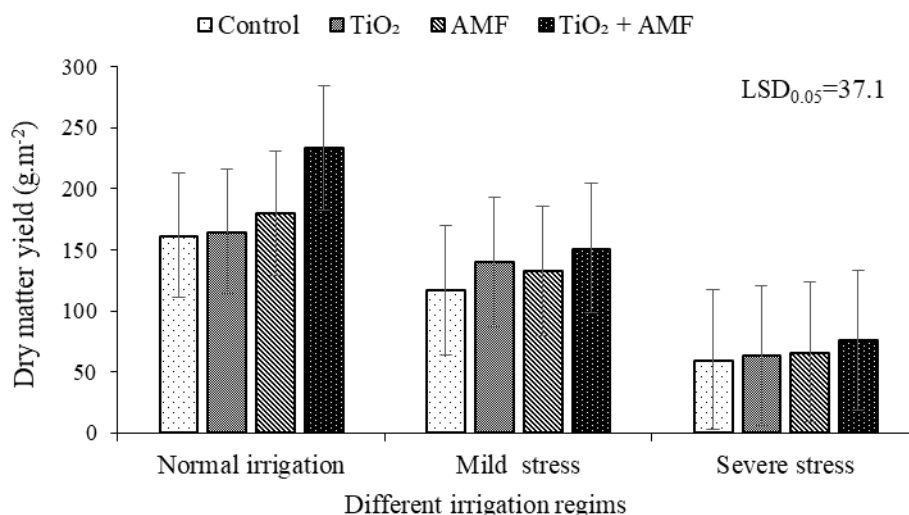
عملکرد ماده خشک نسبت به عدم مصرف کود گردید. علاوه بر این، کشت خالص منجر به افزایش ۳۳/۵۲ درصدی عملکرد ماده خشک نسبت به کشت مخلوط گردید (شکل ۷).

کاهش عملکرد ماده خشک با افزایش تنش خشکی را می‌توان به کاهش صفات رشدی از قبیل ارتفاع بوته نسبت داد. کاهش در عملکرد وزن تر و خشک با افزایش تنش خشکی ممکن است به دلیل تخصیص ترجیحی و بیشتر مواد به ریشه‌ها به دلیل محدود شدن رطوبت در خاک و یا کاهش محتوای کلروفیل و در نتیجه کاهش کارایی فتوسنتزی باشد (Govahi et al., 2015). بر اثر تنش خشکی، گیاه با بستن روزنه‌ها سعی در به حداقل رساندن تعرق داشته و همین امر باعث کاهش تبدلات گازی شده و دی‌اکسید کربن ورودی کاهش یافته، ولی اکسیژن افزایش می‌یابد که موجب کاهش فعالیت کربوکسیلاسیون آنزیم ریبولوز ۵-بی‌فسفات کربوکسیلاز/اکسیژناز (رابیسکو) می‌گردد و در نهایت باعث کاهش تولید ماده خشک خواهد شد (Madhava et al., 2006). همچنین افزایش ماده خشک تولیدی در شرایط آبیاری مطلوب می‌تواند به دلیل گسترش بیشتر سطح برگ و نیز دوام سطح برگ باشد که با ایجاد منبع بیولوژیکی کارآمد برای استفاده هرچه بیشتر از نور دریافتی باعث افزایش تولید ماده خشک خواهد شد (Gao et al., 2020). همچنین بیشترین عملکرد ماده خشک با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا و نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد که منجر به افزایش ۳۶/۱ درصدی عملکرد ماده خشک مریم‌گلی گردید. قارچ مایکوریزا با کاهش اسیدیت ریشه و ترشح آنزیم‌های حل‌کننده عناصر غذایی منجر به افزایش دسترسی ریشه گیاهان به عناصر غذایی می‌شود. همچنین قارچ مایکوریزا قادر به استفاده از نیتروژن معدنی مواد آلی و آمینو اسیدها نیز می‌باشد، ولی به یکسری عوامل از جمله گستردگی شبکه قارچی، آنزیم‌های تجزیه‌کننده مانند گزیلوگلوکاناز، پکتیناز و تعامل با سایر ریزجانداران خاک بستگی دارد که توانایی قارچ را در معدنی کردن مقادیر زیادی از نیتروژن آلی تحت تأثیر قرار می‌دهد (Varma et al., 2018). در مطالعه‌ای با بررسی اثرات قارچ مایکوریزا (*Glomus intradices* و *Glomus mosseae*) در شرایط تنش خشکی و نرمال روی پونه معطر (*Mentha pulegium* L.) گزارش شد که تنش خشکی سبب کاهش وزن خشک گیاه گردید. اما این کاهش با کاربرد قارچ مایکوریزا کمتر بود. همچنین همزیستی با قارچ‌های مایکوریزا سبب بهبود عملکرد ماده خشک نسبت به عدم

مصرف کود گردید (Zare Hassanabdi et al., 2020). از آنجایی که عملکرد ماده خشک در گیاهان برآیندی از صفات رشدی مختلف و اجزای عملکرد می‌باشد، بنابراین می‌توان بیان کرد که کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم منجر به بهبود صفات رشدی مریم‌گلی از طریق بهبود جذب عناصر غذایی، جذب رطوبت و افزایش تحمل گیاهان در برابر تنش خشکی شده است (Varma et al., 2018). یانگ و همکاران (Yang et al., 2006) گزارش کردند که نانو دی‌اکسید تیتانیوم با افزایش فعالیت آنزیم‌های دخیل در متابولیسم نیتروژن از جمله نیترات ردوکتاز باعث تسریع در تبدیل نیتروژن معدنی به فرم‌های آلی آن مثل کلروفیل و پروتئین شده و باعث بهبود صفات رشدی گیاه از جمله عملکرد ماده خشک گیاه می‌گردد. زیرا نیتروژن با افزایش تقسیم و تورژانس سلول‌های مرستمی باعث افزایش رشد رویشی و شاخه‌دهی در گیاهان می‌شود. علاوه بر این، زمانی که نیتروژن کافی در دسترس گیاه باشد، آسمیلایسون کربن فتوسنتزی از طریق افزایش فعالیت کربوکسیلاسیون آنزیم ریبولوز ۵-بی‌فسفات کربوکسیلاز/اکسیژناز (رابیسکو) افزایش یافته و فعالیت فتوسنتزی گیاه بیشتر شده که این امر منجر به افزایش رشد و زیست‌توده گیاه می‌گردد (Manzer et al., 2015). بنابراین افزایش عملکرد با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا و نانو دی‌اکسید تیتانیوم قابل توجه می‌باشد. در پژوهشی با بررسی سطوح مختلف تنش خشکی و کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم (صفر، ۵۰۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر) روی مریم‌گلی گزارش کردند که با افزایش تنش خشکی عملکرد ماده خشک کاهش یافت. کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم منجر به بهبود عملکرد ماده خشک گردید، به طوری که بیشترین میزان عملکرد ماده خشک در آبیاری نرمال با کاربرد ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد (Mazarie et al., 2019). علاوه بر این نتایج نشان داد که عملکرد ماده خشک مریم‌گلی در کشت مخلوط با نعنای فلفلی کمتر از کشت خالص آن بود. از آنجایی که میزان تراکم گیاهان برداشت‌شده در کشت مخلوط نسبت به کشت خالص کمتر می‌باشد، لذا کاهش میزان عملکرد تولیدشده در کشت مخلوط به کاهش میزان تراکم گیاهان در واحد سطح برداشت‌شده و افزایش رقابت برون گونه‌ای توسط اجزای کشت مخلوط نسبت داده می‌شود. به طور مشابه، امانی ماچیانی و همکاران (Amani Machiani et al., 2018) گزارش کردند که عملکرد دانه سویا و ماده خشک نعنای فلفلی در کلیه الگوهای کشت

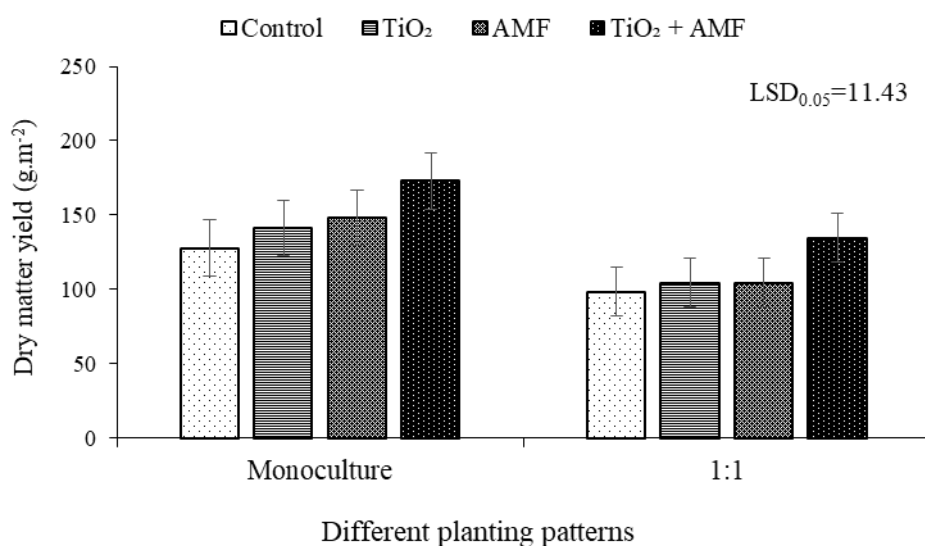
را افزایش رقابت برون گونه‌ای بین اجزای کشت مخلوط بیان نمودند. همچنین در پژوهشی دیگر، بیشترین عملکرد دانه در کشت مخلوط یولاف (*Avena sativa* L.) با نخود فرنگی (*Pisum sativum* L.) در کشت خالص دو گیاه به دست آمد (Jannoura et al., 2014).

مخلوط کمتر از کشت خالص دو گیاه بود. در تحقیقی دیگر، رضائی چپانه و همکاران (Rezaei-Chiyaneh et al., 2020) گزارش کردند که عملکرد ماده خشک رازیانه و عملکرد دانه لوبیا در الگوهای مختلف کشت مخلوط کمتر از کشت خالص دو گیاه بودند که دلیل آن



شکل ۶- مقایسه میانگین عملکرد ماده خشک مریم‌گلی تحت تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ میکوریزا
Fig. 6- Mean comparison of sage dry matter yield under the influence of different irrigation regimes, nano titanium dioxide and arbuscular mycorrhizal fungi

TiO₂: نانو دی‌اکسید تیتانیوم و AMF: قارچ آرباسکولار میکوریزا
TiO₂: Nano titanium dioxide and AMF: Arbuscular mycorrhizal fungus



شکل ۷- مقایسه میانگین عملکرد ماده خشک مریم‌گلی تحت تأثیر الگوهای مختلف کشت (کشت خالص و مخلوط با نعناع فلفلی)، نانوذرات دی اکسید تیتانیوم و قارچ میکوریزا

Fig. 7- Mean comparison of sage dry matter yield under the influence of different planting patterns (Monoculture and intercropping with peppermint), nano titanium dioxide (TiO₂), and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)

درصد اسانس مریم‌گلی

درصد اسانس مریم‌گلی تحت تأثیر معنی‌دار اثرات ساده رژیم‌های مختلف آبیاری، الگوی کشت، منابع کودی و اثرات متقابل رژیم‌های آبیاری $\times$ الگوی کشت، رژیم‌های آبیاری $\times$ منابع کودی و الگوی کشت $\times$ منابع کودی قرار گرفت (جدول ۳). بیشترین (۱/۶۰ درصد) و کمترین (۲۳/۷۳ درصد) درصد اسانس مریم‌گلی به ترتیب در تنش ملایم با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم و آبیاری نرمال بدون مصرف کود به دست آمد. درصد اسانس در آبیاری نرمال و تنش شدید به ترتیب ۲۹/۲ و ۲۱/۹ درصد کاهش یافت. همچنین درصد اسانس با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم ۳۰/۲۰ درصد نسبت به عدم مصرف کود افزایش یافت (شکل ۸). براساس اثر متقابل رژیم‌های آبیاری $\times$ الگوی کشت، بیشترین (۱/۴۴ گرم در مترمربع) درصد اسانس مریم‌گلی در تنش ملایم در کشت مخلوط به دست آمد. درصد اسانس در کشت مخلوط نسبت به کشت خالص ۱۱/۱ درصد افزایش یافت (شکل ۹). علاوه بر این براساس نتایج اثر متقابل الگوی کشت $\times$ منابع کودی، بیشترین (۱/۳۳ درصد) درصد اسانس مریم‌گلی در کشت مخلوط با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد. همچنین درصد اسانس با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم ۳۰/۲۰ درصد نسبت به عدم مصرف کود افزایش یافت (شکل ۱۰). نتایج نشان داد که با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم، درصد اسانس مریم‌گلی افزایش یافت.

افزایش اسانس مریم‌گلی با کاربرد قارچ مایکوریزا به بهبود فعالیت فتوسنتزی گیاه از طریق افزایش سطح جذب و فراهمی عناصر اصلی سازنده اسانس از جمله نیتروژن و فسفر (Sharifi-Rad et al., 2017) و تولید بیشتر غده‌های تشکیل‌دهنده اسانس مرتبط می‌باشد (Golubkina et al., 2020; Amani Machiani et al., 2021). رابطه مستقیمی بین قارچ مایکوریزا و عملکرد کمی و کیفی اسانس در بسیاری از گیاهان دارویی و معطر وجود دارد. به‌طوری‌که تغییرات کمی و کیفی اسانس در گشنیز و نعناع فلفلی با کاربرد قارچ مایکوریزا گزارش شده است (Mucciarelli et al., 2003). کاپور و همکاران (Kapoor et al., 2017) نتیجه گرفتند که قارچ‌های مایکوریزا باعث ایجاد تغییراتی در غلظت فیتوهورمون‌های گیاهی از جمله سیتوکینین، اسیدجیبرلیک و اسیدجاسمونیک می‌شوند که این فیتوهورمون‌ها،

تشکیل غده‌های ترشح‌کننده اسانس را بیشتر نموده و در نتیجه سبب تولید بیشتر متابولیت‌های ثانویه می‌شوند. همچنین کوپتا و همکاران (Copetta et al., 2006) نتیجه گرفتند که کاربرد قارچ مایکوریزا از طریق افزایش غده‌های ترشح‌کننده اسانس منجر به افزایش میزان اسانس تولیدشده در گیاه ریحان گردید. به نظر می‌رسد که نانو دی‌اکسید تیتانیوم از طریق افزایش فعالیت آنزیمی و دسترسی به عناصر غذایی (نیتروژن و فسفر)، ظرفیت فتوسنتزی برگ را بهبود بخشیده و از این طریق منجر به بیوستز بیشتر کربوهیدرات‌ها، توسعه غده‌های ترشح‌کننده اسانس، کانال‌ها و مجاری ترشحی اسانس می‌گردد (Šebesta et al., 2021; Shabbir et al., 2019). مقدم و همکاران (Moghadam et al., 2016) اظهار داشتند که رابطه مستقیمی بین فتوستت و فرآورده‌های فتوستتزی وجود دارد، به‌طوری‌که همبستگی بین فتوستت و تولید اسانس نشان می‌دهد که گلوکز به‌عنوان پیش‌ماده مناسب در سنتز اسانس به‌ویژه مونوترپن‌ها عمل می‌کند. از این‌رو به نظر می‌رسد که گلوکز حاصل از فتوستتزی پیش‌ماده لازم برای تأمین انرژی و سنتز ترکیب‌های مؤثر در اسانس را فراهم می‌کند. گیاهان دارویی در طول رویش برای تولید مناسب اسانس و مواد مؤثره به مقدار کافی عناصر غذایی نیاز دارند، به‌طوری‌که تأمین این عناصر غذایی، میزان و عملکرد اسانس را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. یکی از روش‌های افزایش غلظت عناصر غذایی در گیاهان، استفاده از نانو دی‌اکسید تیتانیوم می‌باشد (Šebesta et al., 2021). در تطابق با نتایج پژوهش حاضر، گوهری و همکاران (Gohari et al., 2020) با کاربرد غلظت‌های مختلف نانو دی‌اکسید تیتانیوم روی بادرشی گزارش کردند که بیشترین درصد اسانس با کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد. در پژوهشی دیگر با ارزیابی اثر سطوح مختلف نانو دی‌اکسید تیتانیوم و اسیدجاسمونیک روی مریم‌گلی گزارش کردند که درصد اسانس با کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو دی‌اکسید تیتانیوم افزایش یافت و دلیل آن این‌طور بیان کردند که نانو دی‌اکسید تیتانیوم می‌تواند ظرفیت فتوستتزی گیاه را افزایش داده که به‌تبع آن تولید پیش‌ماده سنتز اسانس به‌ویژه مونوترپن‌ها (گوکز) بیشتر شده و در نتیجه درصد اسانس افزایش پیدا خواهد کرد (Mazarie et al., 2019). علاوه بر این، میزان اسانس تولیدی مریم‌گلی در تنش ملایم نسبت به آبیاری نرمال و تنش شدید افزایش معنی‌داری پیدا کرد.

گیاهان دارویی برخلاف همه محصولات کشاورزی که در شرایط تنش خشکی از نظر تولید صدمه می‌بینند، ممکن است در این اوضاع تولید مواد شیمیایی بیشتر و در نتیجه بازدهی اقتصادی بالاتری پیدا کنند (Morshedloo et al., 2017). تولید متابولیت‌های ثانویه برای سازگاری گیاه نسبت به عوامل نامساعد و تنش‌های محیطی زندگی صورت گرفته و به‌منزله به کار افتادن یک نوع جریان دفاعی به‌منظور استمرار تعادل فعالیت‌های حیاتی به حساب می‌آید. معمولاً تشکیل و تجمع اسانس در گیاهان دارویی در شرایط نامساعد محیطی افزایش می‌یابد که این امر گیاه را در مقابل آسیب‌های نوری زیاد و کمبود احتمالی آب محافظت می‌کند. در شرایط تنش خشکی با کاهش پتانسیل آب برگ، روزنه‌ها بسته شده و به‌دنبال آن تعرق کاهش می‌یابد. در نتیجه این اتفاق با کم شدن غلظت کربن دی‌اکسید، فتوسنتز کاهش می‌یابد. پایین بودن غلظت کربن دی‌اکسید درون سلولی باعث کاهش واکنش‌های چرخه کالوین می‌شود. با ادامه این روند، فرآیند اکسایش و کاهش اکسی‌الانت $NADP^+$ به‌عنوان پذیرنده الکترون در زنجیره انتقال، کاهش می‌یابد، در نتیجه مقادیر زیادی H^+ و $NADPH$ در سلول تجمع پیدا کرده و نسبت H^+ و $NADPH$ به $NADP^+$ افزایش می‌یابد؛ در این حالت، بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه از قبیل ترکیب‌های اسانس، فنیلی، آلکالوئیدی و ... با مصرف $NADPH + H^+$ تجمع‌یافته منجر به متعادل شدن نسبت $NADPH^+ / NADP^+$ می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تولید متابولیت‌های ثانویه به‌عنوان یک روش دفاعی مؤثر در گیاهان دارویی و معطر به‌منظور کاهش اثرات منفی ناشی از تنش شناخته می‌شود (Kleinwächter & Selmar, 2015). علی‌رغم اینکه میزان اسانس مریم‌گلی در دو تنش ملایم و شدید نسبت به شاهد افزایش یافته است، ولی میزان اسانس تولیدشده در تنش شدید نسبت به ملایم کاهش پیدا کرده است. زیرا در تنش‌های شدیدتر، گیاه بیشتر مواد فتوسنتزی تولیدشده را به‌جای رشد به تولید ترکیب‌های تنظیم‌کننده اسمزی از جمله پرولین، گلیسین بتائین و ترکیب‌های قندی مانند ساکارز و فروکتور تخصیص می‌دهد تا از این طریق شرایط لازم برای بقای حیات گیاه در تنش‌های شدیدتر فراهم شود. افزایش درصد اسانس در تنش ملایم را می‌توان این‌گونه توضیح داد که با کاهش سطح برگ، تراکم‌های غده‌های ترشح‌کننده اسانس و تجمع اسانس در واحد بافت برگ افزایش می‌یابد (Amani Machiani et al., 2021). در تطابق با نتایج پژوهش حاضر، گواهی و همکاران

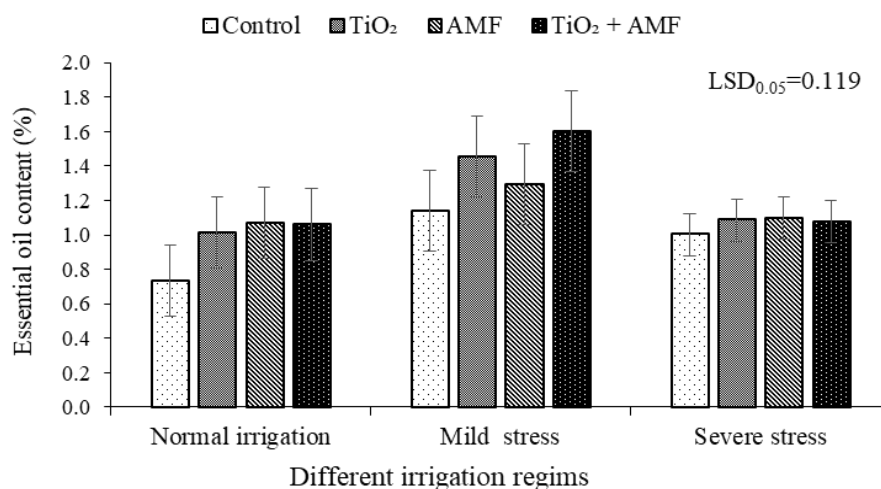
(Govahi et al., 2015) مشاهده کردند که میزان اسانس تولیدی مریم‌گلی در تنش ملایم و شدید به‌ترتیب ۱۰۸ و ۸۴ درصد نسبت به آبیاری نرمال افزایش پیدا کرد. در مطالعه‌ای دیگر روی مریم‌گلی تحت شرایط تنش خشکی مشخص گردید که بیشترین و کمترین میزان درصد اسانس به‌ترتیب در تنش متوسط و آبیاری نرمال به دست آمد (Bettaieb et al., 2009). در پژوهشی دیگر با ارزیابی الگوهای کشت مخلوط شنبلیله (*Trigonella foenum-graceum* L.) و نعناع‌فلفلی گزارش شد که بیشترین درصد اسانس دو گیاه در الگوی کشت ۱:۱ به دست آمد (Ebrahimghochi et al., 2018). امانی ماچیانی و همکاران (Amani Machiani et al., 2019) گزارش کردند که بیشترین درصد و عملکرد اسانس گیاه رازیانه در کشت مخلوط دو ردیف رازیانه + چهار ردیف لوبیا + دو ردیف بادرشو به دست آمد. همچنین درصد و عملکرد اسانس رازیانه در این الگوی کشت مخلوط به‌ترتیب ۳۷ و ۲۴ درصد بیشتر از کشت خالص رازیانه بود. علاوه بر این، میانگین ترکیب‌های تشکیل‌دهنده اسانس رازیانه از قیل *(E)-anethole*, *limonene* و *methyleugenol*، *fenchone* و *chavicol* در الگوهای مختلف کشت مخلوط به‌ترتیب ۴/۹، ۳/۴، ۲۱/۲ و ۲/۱ درصد نسبت به کشت خالص رازیانه بیشتر بود.

عملکرد اسانس مریم‌گلی

اثرات ساده رژیم‌های مختلف آبیاری، الگوی کشت، منابع کودی و اثر متقابل رژیم‌های آبیاری × منابع کودی بر عملکرد اسانس مریم‌گلی معنی‌دار گردید (جدول ۳). براساس اثر متقابل رژیم‌های آبیاری × منابع کودی، بیشترین (۲/۴۵ گرم در مترمربع) عملکرد اسانس در آبیاری نرمال با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد که تفاوت معنی‌داری با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم و کاربرد جداگانه نانو دی‌اکسید تیتانیوم در تنش ملایم نداشت. عملکرد اسانس در آبیاری نرمال و تنش شدید به‌ترتیب ۳/۷ و ۶۲/۸ درصد نسبت به تنش ملایم کاهش یافت. همچنین کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم و کاربرد جداگانه نانو دی‌اکسید تیتانیوم به‌ترتیب منجر به افزایش ۸۳/۵ و ۴۲/۷ درصدی عملکرد اسانس نسبت به عدم مصرف کود گردید (شکل ۱۱). علاوه بر این کشت خالص منجر به افزایش ۱۹/۵ درصدی عملکرد اسانس نسبت به کشت مخلوط گردید (شکل ۱۲). نتایج نشان داد که عملکرد اسانس با کاربرد تلفیقی قارچ

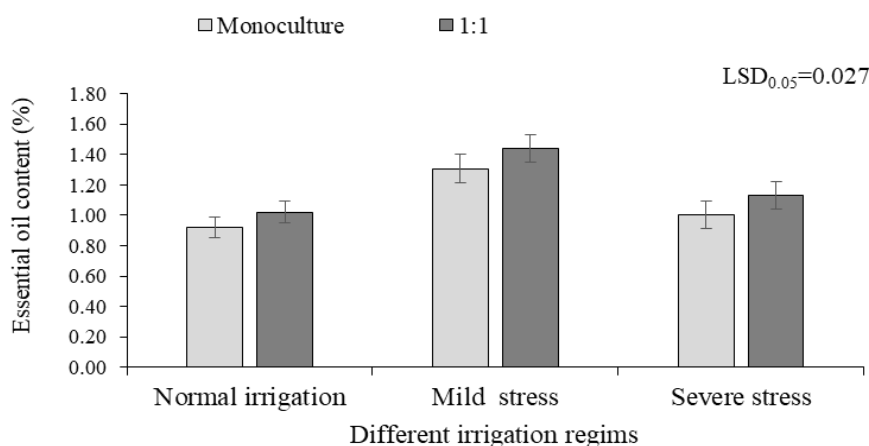
با کاربرد قارچ میکوریزا به دلیل افزایش عملکرد دانه و درصد اسانس افزایش یافت. در پژوهشی دیگر با بررسی سطوح مختلف تنش خشکی و نانو دی‌اکسید تیتانیوم روی گیاه *Vetiveria zizanioides* L. Nash گزارش شد که بیشترین عملکرد ماده خشک و اسانس با کاربرد ۹۰ میلی گرم در لیتر نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد (Shabbir et al., 2019).

میکوریزا و نانو دی‌اکسید تیتانیوم افزایش یافت. عملکرد اسانس از حاصل ضرب عملکرد ماده خشک در میزان اسانس تولیدشده توسط گیاه به دست می‌آید. لذا هر عاملی که منجر به افزایش دو شاخص ذکر شده گردد منجر به افزایش عملکرد اسانس نیز خواهد شد. رضائی چپانه و همکاران (Rezaei-Chiyaneh et al., 2021) با ارزیابی منابع مختلف کودی و کشت مخلوط شنبلیله با بالنگو (*Lallemantia iberica* L. گزارش شد که عملکرد اسانس بالنگو در کشت خالص

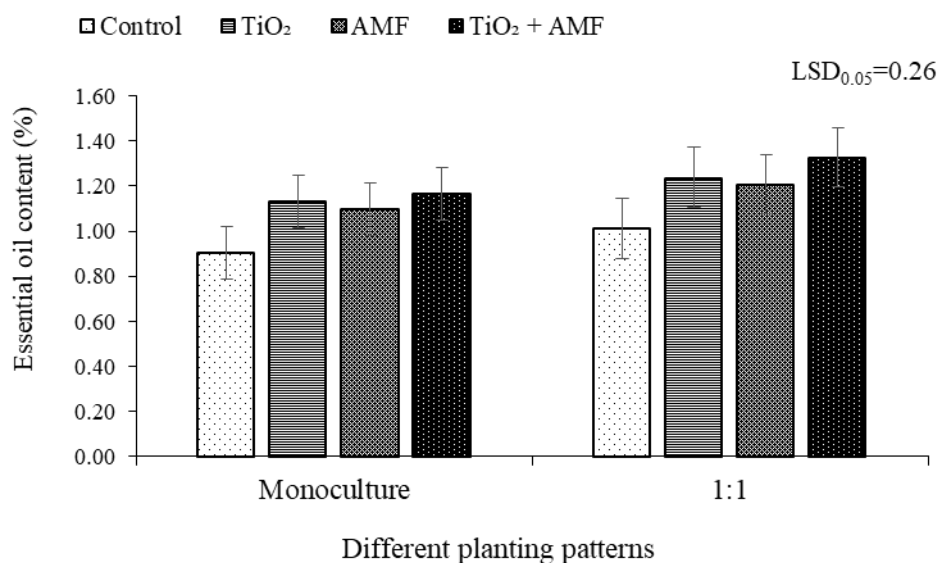


شکل ۸- مقایسه میانگین درصد اسانس مریم‌گلی تحت تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ میکوریزا
Fig. 8- Mean comparison of the essential oil content of sage under the influence of different irrigation regimes, nano titanium dioxide, and arbuscular mycorrhizal fungi

TiO₂: نانو دی‌اکسید تیتانیوم و AMF: قارچ آرباسکولار میکوریزا
TiO₂: Nano titanium dioxide and AMF: Arbuscular mycorrhizal fungus

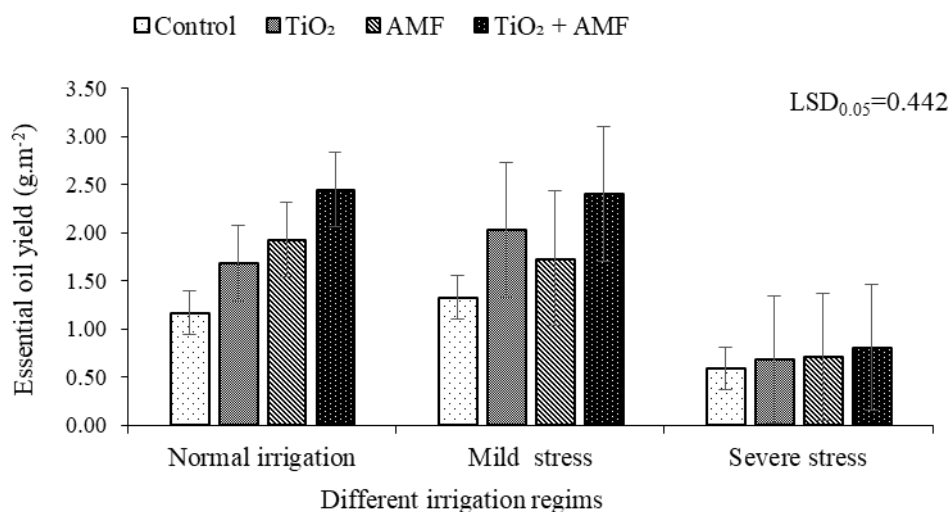


شکل ۹- مقایسه میانگین درصد اسانس مریم‌گلی تحت تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری و الگوهای کشت (کشت خالص و مخلوط با نعناع فلفلی)
Fig. 9- Mean comparison of the sage essential oil content under the influence of different irrigation regimes and planting patterns (Monoculture and intercropping with peppermint)



شکل ۱۰- مقایسه میانگین درصد اسانس مریم‌گلی تحت تأثیر الگوهای مختلف کشت (کشت خالص و مخلوط با نعناع فلفلی)، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ میکوریز

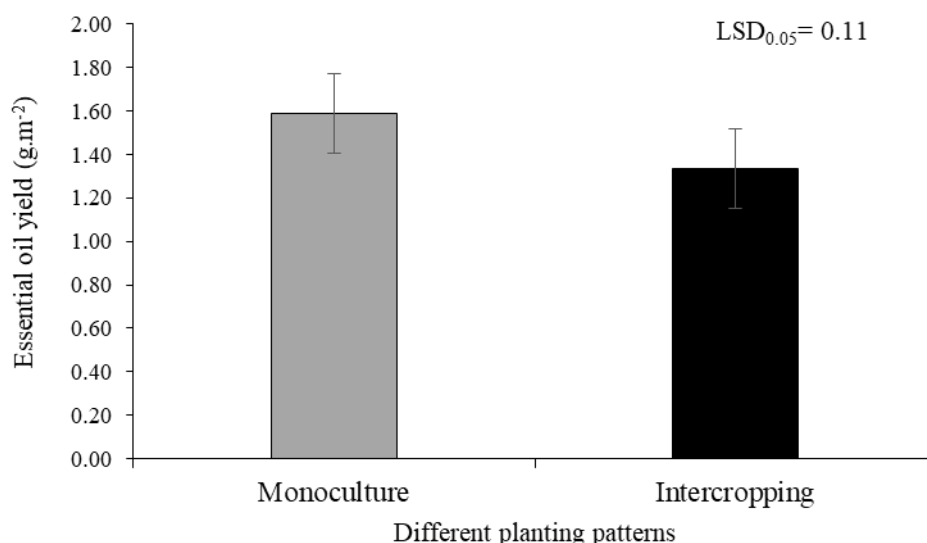
Fig. 10- Mean comparison of the sage essential oil content under the influence of different planting patterns (Monoculture and intercropping with peppermint), nano titanium dioxide (TiO₂) and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)



شکل ۱۱- مقایسه میانگین عملکرد اسانس مریم‌گلی تحت تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ میکوریزا

Fig. 11- Mean comparison of the sage essential oil yield under the effect of different irrigation regimes, nano titanium dioxide and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)

TiO₂: Nano titanium dioxide and AMF: Arbuscular mycorrhizal fungus
 قارچ آرباسکولار میکوریزا: AMF؛ نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ آرباسکولار میکوریزا: TiO₂



شکل ۱۲- مقایسه میانگین عملکرد اسانس مریم‌گلی در الگوهای کشت خالص و مخلوط با نعناع‌فللی

Fig. 12- Mean comparison of the sage essential oil yield in planting patterns of monoculture and intercropping with peppermint

اجزای اسانس مریم‌گلی

با تجزیه اسانس مریم‌گلی، ۳۳ ترکیب شناسایی شد. در بین ترکیب‌های اسانس سیس-توجن (۳۰/۷۳ تا ۳۸/۳۵ درصد)، کامفور (۱۲/۹۷ تا ۱۹/۳۴ درصد)، ۸ و ۱۰ سینئول (۹/۱۷ تا ۱۰/۷۱ درصد)، ترنس-توجن (۴/۳۶ تا ۵/۷۸ درصد)، کامفن (۲/۷۴ تا ۴/۳۵ درصد) و ویریدیفلورول (۳/۱۶ تا ۴/۳۷ درصد)، ترکیب‌های غالب اسانس بودند (جدول ۴، ۵ و ۶). بیشترین میزان سیس-توجن (۳۸/۳۵ درصد) در تنش ملایم در کشت مخلوط با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد. میزان سیس-توجن در کشت مخلوط ۶/۵۰ درصد بیشتر از کشت خالص مریم‌گلی بود. علاوه بر این، میزان سیس-توجن در تنش ملایم به ترتیب ۲/۲ و ۳ درصد بیشتر از تنش شدید و آبیاری نرمال بود. همچنین کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم، کاربرد جداگانه قارچ مایکوریزا و نانو دی‌اکسید تیتانیوم به ترتیب منجر به افزایش ۴/۸، ۳/۱ و ۳/۳ درصدی این ترکیب نسبت به عدم مصرف کود گردید. علاوه بر این، بیشترین میزان کامفور (۱۹/۳۴ درصد) در کشت مخلوط در آبیاری نرمال با کاربرد قارچ مایکوریزا به دست آمد. همچنین آبیاری نرمال به ترتیب منجر به افزایش ۳/۳ و ۴/۷ درصدی این ترکیب نسبت به تنش ملایم و تنش شدید گردید. کاربرد قارچ مایکوریزا منجر به افزایش ۳/۷ درصدی میزان کامفور نسبت به عدم مصرف کود شد. همچنین

بیشترین میزان ۸ و ۱۰ سینئول (۱۰/۷۱ درصد) در کشت خالص در تنش شدید و با کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد. علاوه بر این، میزان ۸ و ۱۰ سینئول در آبیاری نرمال ۲/۷ درصد کمتر از تنش شدید بود. همچنین کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم منجر به افزایش ۵/۴ درصدی این ترکیب نسبت به عدم مصرف کود گردید. علاوه بر این، بیشترین میزان ترنس-توجن در تنش شدید در کشت مخلوط با کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد. کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم منجر به افزایش ۳/۲ درصدی ترنس-توجن نسبت به عدم مصرف کود گردید. کشت مخلوط منجر به افزایش ۲/۱ درصدی این ترکیب نسبت به کشت خالص شد. همچنین تنش شدید منجر به افزایش ۶/۶ درصدی ترنس-توجن نسبت به آبیاری نرمال گردید. علاوه بر این، بیشترین میزان کامفن (۴/۳۵ درصد) در تنش ملایم در کشت خالص با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد. کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم منجر به افزایش ۶/۱ درصدی کامفن نسبت به عدم مصرف کود گردید. علاوه بر این، بیشترین میزان ویریدیفلورول در تنش ملایم در کشت خالص با کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد. کشت خالص منجر به افزایش ۲/۴ درصدی ویریدیفلورول نسبت به کشت مخلوط گردید.

کیفیت اسانس گیاهان دارویی به درصد ترکیب‌های غالب تولید

تیمول افزایش می‌یابد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت اسانس این گیاه در تنش‌های ملایم و شدید و با کاربرد قارچ مایکوریزا بهبود یافته است. مطالعه‌ای روی گشنیز نشان داد که کاربرد چهار گرم در لیتر نانو دی‌اکسید تیتانیوم منجر به افزایش درصد لینالول نسبت به عدم مصرف کود گردید (Khater et al., 2021).

کلروفیل a

اثرات ساده رژیم‌های مختلف آبیاری، الگوی کشت و منابع کودی و اثرات متقابل رژیم‌های آبیاری × منابع کودی، الگوی کشت × منابع کودی و رژیم‌های آبیاری × الگوی کشت × منابع کودی بر غلظت کلروفیل a معنی‌دار گردید (جدول ۷). بیشترین (۵/۵۶ میلی گرم در گرم وزن تر) غلظت کلروفیل a در آبیاری نرمال و در کشت مخلوط با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد که در همان سطح آبیاری تفاوت معنی‌داری با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم در کشت خالص نداشت. تنش‌های ملایم و شدید به ترتیب منجر به کاهش ۳۴/۵ و ۵۵/۶ درصدی کلروفیل a شدند (جدول ۸). علاوه بر این، غلظت کلروفیل a مریم‌گلی با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم، کاربرد جداگانه قارچ مایکوریزا و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم به ترتیب ۶۸/۴، ۱۸/۲ و ۳۷/۲ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. همچنین کلروفیل a در کشت مخلوط نسبت به کشت خالص ۳۱/۴ درصد افزایش یافت (جدول ۸).

کلروفیل b

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که غلظت کلروفیل b مریم‌گلی تحت تأثیر معنی‌دار اثرات ساده رژیم‌های مختلف آبیاری، الگوی کشت و منابع کودی و اثرات متقابل رژیم‌های آبیاری × منابع کودی، الگوی کشت × منابع کودی و رژیم‌های آبیاری × الگوی کشت × منابع کودی قرار گرفت (جدول ۷). بیشترین (۱/۳۳ میلی گرم در گرم وزن تر) غلظت کلروفیل b مریم‌گلی در آبیاری نرمال در الگوی کشت مخلوط با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد که در همان سطح آبیاری به ترتیب تفاوت معنی‌داری با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم در کشت خالص و کاربرد جداگانه نانو دی‌اکسید تیتانیوم در کشت مخلوط نداشت.

شده در اسانس این گیاهان وابسته است. افزایش درصد ترکیب‌های غالب در مریم‌گلی (سیس-توجن، کامفور و ۸۰ سینئول) منجر به افزایش کیفیت اسانس تولیدی خواهد شد. طبق نتایج این پژوهش مشاهده شد که اکثر ترکیب‌های غالب اسانس مریم‌گلی (سیس-توجن و ۸۰ سینئول) در تنش‌های ملایم و شدید افزایش پیدا کرد. دلیل افزایش ترکیب‌های اسانس مریم‌گلی در تنش‌های ملایم و شدید، تخصیص بیشتر کربن‌های تثبیت‌شده طی فرآیند فتوسنتز به تولید متابولیت‌های ثانویه می‌باشد که طی این فرآیند، میزان مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های محیطی از طریق کاهش خسارت‌های رادیکال‌های فعال اکسیژن افزایش می‌یابد (Farahani et al., 2009). بحرینی نژاد و همکاران (Bahreininejad et al., 2013) گزارش کردند که میزان تیمول در اسانس آویشن دناپی در تنش‌های ملایم و شدید نسبت به آبیاری نرمال افزایش پیدا کرد. در پژوهشی دیگر با بررسی سطوح مختلف تنش خشکی (۱۰۰، ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی) روی زوفا (*Hyssopus officinalis* L.) گزارش کردند که درصد اسانس در تنش ملایم به ترتیب ۳۶/۹ و ۱۵/۹ درصد بیشتر از آبیاری نرمال و تنش شدید بود. همچنین بیشترین میزان بتا-پینن، سیس-پینوکامفون و میرتینول در تنش ملایم به دست آمد (Khosheghbal Ghorabae et al., 2020). همچنین نتایج نشان داد که میزان ترکیب‌های غالب اسانس مریم‌گلی با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم و کاربرد جداگانه آن‌ها افزایش یافت. اسانس‌ها، ترکیب‌های ترپنوئیدی بوده و واحدهای سازنده آن‌ها (ایزوپرنوئیدها) مانند ایزوپنتیل پیروفسفات و دی متیل آلیل پیروفسفات نیاز به ترکیب‌هایی از قبیل استیل کوآنزیم A، ATP و NADPH دارند (Kapoor et al., 2017). با توجه به این موضوع که حضور عناصری نظیر نیتروژن و فسفر برای تشکیل ترکیب‌های نام برده ضروری می‌باشد، از این رو احتمالاً کاربرد قارچ مایکوریزا و نانو دی‌اکسید تیتانیوم با تأمین فسفر و نیتروژن مورد نیاز گیاه می‌تواند باعث افزایش کلروفیل، فعالیت آنزیم روبیسکو و به دنبال آن فعالیت‌های فتوسنتزی و میزان و ترکیب‌های اسانس گردد (Rafique Kapoor et al., 2017; Tarraf et al., 2017et al., 2018). در پژوهشی با کاربرد قارچ مایکوریزا روی نعنای گزارش شد که قارچ مایکوریزا منجر به افزایش درصد کاروون نسبت به عدم مصرف گردید (Urcoviche et al., 2015). توحیدی و همکاران (Tohidi et al., 2019) گزارش کردند که کیفیت اسانس آویشن با افزایش درصد

جدول ۴- ترکیب اسانس مریم گلی در الگوهای کشت خالص و مخلوط با نمناغ فلفلی، نانوذرات دی اکسید تیتانیوم و قارچ مایکور ریزا تحت آبیاری نرمال (میانگین دو سال)
Table 4- Identified compounds of sage essential oil in planting patterns of monoculture and intercropping with peppermint, nano titanium dioxide and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) under normal irrigation (average of two years)

ردیف Row	ترکیبها Ingredients	شماره RI	MAD ₂₅ control		MAD ₂₅ TiO ₂		MAD ₂₅ AMF		MAD ₂₅ AMF+TiO ₂	
			کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping	کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping	کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping	کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping
1	cis-Salvene سیس - سالون	847	0.36	0.479	0.47	0.244	0.39	0.27	0.46	0.31
2	trans-Salvene ترنس - سالون	858	0.1	0.095	0.09	0	0.11	0.08	0.09	0.07
3	Tricyclene تریسیکلن	921	0.15	0.14	0.14	0.10	0.14	0.11	0.12	0.12
4	α -Thujene آلفا-توجن	924	0.15	0.17	0.16	0.10	0.18	0.16	0.21	0.15
5	α -Pinene پا-پینن	932	2.51	3.13	3.34	2.50	3.33	2.41	3.13	3.7
6	Camphene کامفن	946	3.11	3.22	3.44	2.74	3.32	2.9	3.58	3.5
7	β -Pinene پتا-پینن	974	1.26	1.33	1.29	1.06	1.47	1.02	1.28	0.99
8	Myrcene میرسن	988	0.94	0.963	0.96	0.747	1.07	0.891	0.94	0.96
9	n-Decane n-دکان	1000	0.13	0.119	0.12	0.15	0.14	0.11	0.14	0.1
10	α -Terpinene آلفا-ترپینن	1014	0.31	0.372	0.39	0.266	0.4	0.313	0.36	0.37
11	p-Cymene p-سیرسن	1022	1.44	1.39	1.41	1.20	1.5	1.2	1.35	1.44
12	1,8-Cineole (δ -سینئول)	1026	9.17	9.53	10.49	10.23	10.37	9.23	9.89	10.02
13	γ -Terpinene گاما-ترپینن	1054	0.36	0.36	0.34	0.28	0.36	0.33	0.33	0.34
14	cis-Sabinene hydrate سیس-سابلینن هیدرات	1065	0.24	0.20	0.24	0.187	0.23	0.15	0.18	0.15
15	Terpinolene تریپنولن	1086	0.2	0.17	0.16	0.18	0.16	0.16	0.15	0.12
16	trans-Sabinene hydrate ترانس-سابلینن هیدرات	1098	0.66	0.42	0.44	0.3	0.41	0.34	0.45	0.23
17	cis-Thujone سیس-توجن	1101	30.73	34.29	33.63	33.79	34.7	34.61	33.89	35.29
18	trans-Thujone ترانس-توجن	1112	4.59	5.14	4.97	4.36	4.94	5.22	5.3	5.29

19	Camphor کامفور	1141	17.48	16.90	17.19	18.45	14.58	19.34	16.88	17.40
20	neo-iso-3- Thujanol تئو-ایزو-۳-توجانول	1147	0.84	0.53	0.51	0.58	0.46	0.52	0.57	0.4
21	trans- Pinocamphone ترانس-پینوکامفون	1158	0.12	0.14	0.12	0.07	0.05	0.08	0.11	0.05
22	Borneol بورنول	1165	3.64	2.34	2.16	3.54	2.06	2.72	3.23	2.61
23	cis- Pinocamphone سیس-پینوکامفون	1172	0.6	0.334	0.32	0.37	0.35	0.314	0.36	0.35
24	Terpinen-4-ol ترپین-۴-ال	1174	0.06	0.08	0.1	0.07	0.1	0.06	0.06	0.06
25	α -Terpineol آلفا-ترپینئول	1186	0.15	0.17	0.19	0.09	0.15	0.16	0.14	0.11
26	Bornyl acetate بورنیل استات	1284	2.27	1.51	1.57	1.4	1.84	1.42	1.8	1.38
27	trans-Sabinyl acetate ترانس-سابینیل استات	1289	0	0.079	0.12	0.081	0.08	0.062	0.13	0.06
28	Caryophyllene (E)- ای-کاروفیلین	1417	2.16	2.11	2.32	3.23	2.3	2.57	2.13	2.26
29	α -Humulene آلفا-هومولن	1452	2.64	2.79	2.84	3.85	2.81	3.68	2.63	3.38
30	Caryophyllene oxide کاروفیلین اکساید	1582	0.38	0.321	0.36	0.32	0.35	0.37	0.36	0.3
31	Viridiflorol ویریدی فورول	1592	4.19	4.05	4.1	3.39	4.2	4.28	3.37	3.94
32	Humulene epoxide II هومولن اکساید II	1608	0.61	0.57	0.64	0.90	0.75	0.79	0.75	0.5
33	Manool مانول	2056	2.82	2.71	2.18	3.71	2.86	2.67	2.65	2.56
مجموع ترکیبها Total combinations			94.37	96.15	96.8	98.48	96.16	98.55	97.02	98.52

MAD₂₅: Irrigation after 25% of maximum allowable moisture discharge, Control: Control, TiO₂: Nano titanium dioxide, AMF: Avascular mycorrhizal fungus. Linear inhibition index was calculated on HP-5 MS column using C8-C40 normal alkanes.

جدول ۵- ترکیب اسانس مریم گلی در الگوهای کشت خالص و مخلوط با نعناع فلفلی، نانوذرات دی اکسید تیتانیوم و قارچ مایکوریزا تحت تنش ملایم (میانگین دو سال)
Table 5- Identified compounds of sage essential oil in planting patterns of monoculture and intercropping with peppermint, nano titanium dioxide and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) under mild stress (average of two years)

ردیف Row	ترکیب ها Ingredients	شاخص بازداری RI	MAD ₅₀ control			MAD ₅₀ TiO ₂			MAD ₅₀ AMF			MAD ₅₀ AMF+TiO ₂		
			کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping	کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping	کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping	کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping	کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping	کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping
1	<i>cis</i> -Salvene سیس - سالون	847	0.48	0.3	0.44	0.47	0.56	0.33	0.52	0.44				
2	<i>trans</i> -Salvene ترنس - سالون	858	0.12	0.09	0.12	0.09	0.13	0.08	0.11	0.05				
3	Tricyclene تریسیکلن	921	0.13	0.13	0.12	0.13	0.15	0.14	0.13	0.12				
4	α -Thujene آلفا-توجن	924	0.2	0.18	0.2	0.18	0.19	0.18	0.21	0.20				
5	α -Pinene پینن	932	3.65	3.17	3.46	2.82	3.49	2.86	3.88	3.48				
6	Camphene کامفن	946	3.71	3.35	3.64	3.51	4	2.83	4.35	3.25				
7	β -Pinene پینن	974	1.39	1.05	1.44	1.40	1.49	1.09	1.35	1.56				
8	Myrcene میرسن	988	0.98	0.95	0.95	0.98	1.01	0.97	1.03	1.07				
9	<i>n</i> -Decane دکان	1000	0.12	0.12	0.12	0.14	0.12	0.11	0.12	0				
10	α -Terpinene آلفا-ترپینن	1014	0.38	0.38	0.38	0.36	0.4	0.31	0.42	0.52				
11	<i>p</i> -Cymene پ-سیرسن	1022	1.55	1.3	1.35	1.44	1.52	1.05	1.4	1.36				
12	1,8-Cineole آ۱۸ سینول	1026	9.25	9.66	9.87	10.05	10.57	10.11	9.56	10.64				
13	γ -Terpinene گاما-ترپینن	1054	0.34	0.35	0.31	0.36	0.34	0.34	0.37	0.37				
14	<i>cis</i> -Sabinene hydrate سیس-سابینن هیدرات	1065	0.19	0.2	0.21	0.19	0.21	0.21	0.24	0.20				
15	Terpinolene تریپنولن	1086	0.21	0.17	0.16	0.16	0.17	0.16	0.17	0.18				
16	<i>trans</i> -Sabinene hydrate ترانس-سابینن هیدرات	1098	0.45	0.35	0.41	0.40	0.38	0.29	0.23	0.32				

17	<i>cis</i> -Thujone سیس-توجون	1101	31.41	35.56	33.55	34.83	33.37	36.09	35.84	38.35
18	<i>trans</i> -Thujone ترانس-توجون	1112	5.04	5.12	5.53	5.04	4.91	4.87	5.68	5.69
19	Camphor کامفور	1141	17.02	18.18	16.02	17.49	17.95	18.60	15.54	12.97
20	<i>neo</i> - <i>iso</i> -3-Thujanol تئو-ایزو-۳-توجانول	1147	0.57	0.47	0.52	0.525	0.5	0.32	0.47	0.358
21	<i>trans</i> -Pinocamphone ترانس-پینوکامفون	1158	0.13	0.11	0.06	0.11	0.12	0.05	0.06	0.05
22	Borneol بورنول	1165	2.88	2.63	2.67	2.29	2.44	2.58	1.94	1.44
23	<i>cis</i> -Pinocamphone سیس-پینوکامفون	1172	0.34	0.34	0.37	0.33	0.36	0.30	0.34	0.36
24	Terpinen-4-ol ترپین-۴-ال	1172	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.07
25	α -Terpineol آلفا-ترپینول	1186	0.14	0.13	0.14	0.15	0.17	0.15	0.13	0.16
26	Bornyl acetate بورنیل استات	1284	1.94	1.49	1.69	1.54	1.37	1.42	1.41	1.54
27	<i>trans</i> -Sabinyl acetate ترانس-ساینیل استات	1289	0.08	0.15	0.06	0.07	0.04	0.11	0.05	0.12
28	(<i>E</i>)-Caryophyllene ای-کاریوفیلن	1417	2.41	2.32	2.05	1.94	2.40	2.42	3.55	2.12
29	α -Humulene آلفا-هومولن	1452	3.04	2.68	2.65	2.49	3.48	3.35	2.62	3.13
30	Caryophyllene oxide کاریوفیلن اکساید	1582	0.42	0.35	0.43	0.33	0.32	0.4	0.4	0.38
31	Viridiflorol ویریدی فورول	1592	4.11	3.85	4.37	3.16	3.35	3.76	3.88	3.83
32	Humulene epoxide II هومولن اکساید II	1608	0.79	0.65	0.77	0.6	0.52	0.68	0.76	0.71
33	Manool مانول	2056	3.04	2.62	3.01	2.16	3.12	3.42	2.95	3.28
مجموع ترکیب‌ها			96.57	98.46	97.13	98.63	96.91	98.69	98.71	98.80
Total combinations										

MAD₅₀: Irrigation after 50% of maximum allowable moisture discharge, Control: Control, TiO₂: Nano titanium dioxide, AMF: Abovascular mycorrhizal fungus. Linear inhibition index was calculated on HP-5 MS column using C8-C40 normal alkanes.

شده. AMF: قارچ آبوسکولار مایکوریزا، شاخص بازدارنده خطی در ستون HP-5 MS یا استفاده از نرمال آلکان‌های C₈-C₄₀ محاسبه شد.

جدول ۶- ترکیب اسانس مریم گلی در الگوهای کشت خالص و مخلوط با نعنای فلفلی، نانوذرات دی اکسید تیتانیوم و قارچ مایکوریزا تحت تنش شدید (میانگین دو سال)
Table 6- Identified compounds of sage essential oil in planting patterns of monoculture and intercropping with peppermint, nano titanium dioxide and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) under severe stress (average of two years)

ردیف	ترکیبها	شاخص بازداری	MAD ₇₅ control			MAD ₇₅ TiO ₂			MAD ₇₅ AMF			MAD ₇₅ AMF+TiO ₂		
			کشت خالص	کشت مخلوط	Intercropping	کشت خالص	کشت مخلوط	Intercropping	کشت خالص	کشت مخلوط	Intercropping	کشت خالص	کشت مخلوط	Intercropping
Row	Ingredients	Ri	Monoculture	Intercropping	Monoculture	Monoculture	Intercropping	Monoculture	Monoculture	Intercropping	Monoculture	Monoculture	Intercropping	Intercropping
1	<i>cis</i> -Salvene سیس - سالون	847	0.54	0.49	0.44	0.44	0.4	0.5	0.35	0.44	0.32	0.44	0.32	0.32
2	<i>trans</i> -Salvene ترنس - سالون	858	0.11	0.14	0.17	0.17	0.10	0	0.11	0.11	0.05	0.11	0.05	0.05
3	Tricyclene تریسیکلن	921	0.14	0.14	0.12	0.12	0.13	0.14	0.12	0.13	0.15	0.13	0.15	0.15
4	α -Thujene آلفا-توجن	924	0.18	0.16	0.17	0.17	0.20	0.2	0.28	0.14	0.18	0.14	0.18	0.18
5	α -Pinene پتا-پینن	932	3.56	3.24	2.69	2.69	4.40	3.67	4.26	3.34	4.23	3.34	4.23	4.23
6	Camphene کامفن	946	3.87	3.46	3.15	3.15	3.43	4.17	3.74	3.4	3.86	3.4	3.86	3.86
7	β -Pinene بتا-پینن	974	1.51	1.39	1.29	1.29	1.45	1.49	1.38	1.24	1.1	1.24	1.1	1.1
8	Myrcene میرسن	988	1.02	1.03	0.97	0.97	1.01	0.91	1.04	0.93	0.95	0.93	0.95	0.95
9	<i>n</i> -Decane دکان	1000	0.12	0.16	0.13	0.13	0.14	0.12	0.12	0.13	0.123	0.13	0.123	0.123
10	α -Terpinene آلفا-ترپینن	1014	0.37	0.46	0.4	0.4	0.44	0.38	0.45	0.4	0.34	0.4	0.34	0.34
11	<i>p</i> -Cymene پ-ایمرسن	1022	1.59	1.52	1.37	1.37	1.49	1.61	1.55	1.44	1.4	1.44	1.4	1.4
12	1,8-Cineole اواسیتول	1026	9.98	10.51	10.71	10.71	9.82	9.91	9.46	10.03	10.44	10.03	10.44	10.44
13	γ -Terpinene گاما-ترپینن	1054	0.4	0.59	0.38	0.38	0.37	0.39	0.3	0.33	0.31	0.33	0.31	0.31
14	<i>cis</i> -Sabinene hydrate سیس-سابینن هیدرات	1065	0.2	0.22	0.21	0.21	0.198	0.26	0.21	0.17	0.2	0.17	0.2	0.2
15	Terpinolene تریپنولن	1086	0.2	0.14	0.17	0.17	0.182	0.19	0.16	0.14	0.22	0.14	0.22	0.22
16	<i>trans</i> -Sabinene hydrate ترانس-سابینن هیدرات	1098	0.41	0.38	0.5	0.5	0.40	0.41	0.32	0.42	0.29	0.42	0.29	0.29
17	<i>cis</i> -Thujone سیس-توجن	1101	33.01	35.16	33.99	33.99	36.97	32.32	35.19	32.08	34.29	32.08	34.29	34.29

18	<i>trans</i> -Thujone ترانس-توجون	1112	4.97	5.36	5.52	5.78	4.87	5.44	5.07	5.50
19	Camphor کامفور	1141	15.77	16.16	15.07	14.96	18.36	16.43	18.61	16.62
20	<i>neo</i> -iso-3-Thujanol نیو-ایزو-۳-توجانول	1147	0.55	0.49	0.59	0.45	0.31	0.47	0.53	0.36
21	<i>trans</i> -Pinocampone ترانس-پینوکامفون	1158	0.1	0.104	0.15	0.11	0.05	0.10	0.12	0.06
22	Borneol بورنئول	1165	3.12	2.58	2.83	1.83	3.17	1.77	2.56	2.53
23	<i>cis</i> -Pinocamphone سیس-پینوکامفون	1172	0.35	0.35	0.36	0.34	0.38	0.34	0.34	0.30
24	Terpinen-4-ol ترپینن-۴-ال	1174	0.06	0.11	0.07	0.08	0.03	0.05	0.09	0.06
25	α -Terpineol آلفا-ترپینئول	1186	0.19	0.13	0.21	0.18	0.08	0.16	0.16	0.15
26	Bornyl acetate بورنیل استات	1284	2.21	1.44	2.25	1.68	2.5	1.35	1.41	1.40
27	<i>trans</i> -Sabinyl acetate ترانس-سابینیل استات	1289	0.08	0.06	0.09	0.06	0	0.05	0.1	0.04
28	(<i>E</i>)-Caryophyllene ای-کاریوفیلین	1417	1.92	2.05	2.07	2.32	1.95	2.32	2.32	2.92
29	α -Humulene آلفا-هومولن	1452	2.61	2.57	2.77	2.43	2.52	2.60	3.22	2.83
30	Caryophyllene oxide کاریوفیلین اکساید	1582	0.39	0.37	0.4	0.34	0.36	0.3	0.3	0.31
31	Viridiflorol ویریدی فورول	1592	3.69	3.21	3.87	3.57	3.73	3.92	4.02	4.23
32	Humulene epoxide II هومولن اکساید II	1608	0.75	0.63	0.74	0.47	0.64	0.65	0.68	0.41
33	Manool مانول	2056	2.78	2.92	2.53	2.68	2.68	2.72	2.34	2.15
مجموع ترکیبها Total combinations			96.75	97.72	96.38	98.43	98.3	97.71	97.01	98.32

MAD₇₅: Irrigation after 75% of maximum allowable moisture discharge, Control: Control, TiO₂: Nano titanium dioxide, AMF: Abovascular mycorrhizal fungus. Linear inhibition index was calculated on HP-5 MS column using C8-C40 normal alkanes.

جدول ۷- تجزیه واریانس اثر الگوهای کشت خالص و مخلوط با نعنای فلفلی، نانوذرات دی اکسید تیتانیوم و قارچ میکوریزا بر کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید تحت رژیم های مختلف آبیاری

Table 7- The analysis of variance the effect of planting patterns of monoculture and intercropping with peppermint, nano titanium dioxide and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on chl a, b, total and carotenoids under different irrigation regimes

منابع تغییرات S.O. V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares			
		کلروفیل a Chlorophyll a (mg. g ⁻¹ Fresh weight)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg. g ⁻¹ Fresh weight)	کلروفیل کل Total chlorophyll (mg. g ⁻¹ Fresh weight)	کاروتنوئید Carotenoid (mg. g ⁻¹ Fresh weight)
سال Year	1	0.03 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.005 ^{ns}
خطای a Error a	4	4.62	0.41	7.77	0.43
رژیم های آبیاری Irrigation regimes	2	66.30 ^{**}	3.84 ^{**}	99.31 ^{**}	9.84 ^{**}
سال × رژیم آبیاری Year × Irrigation regimes	2	0.07 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.01 ^{ns}
خطای b Error b	8	0.20	0.01	0.22	0.12
الگوی کشت Planting patterns	1	24.30 [*]	3.89 [*]	47.66 [*]	3.95 ^{ns}
الگوی کشت × رژیم آبیاری Irrigation regimes × Planting patterns	2	0.27 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.17 ^{ns}	0.05 ^{ns}
سال × الگوی کشت Year × Planting patterns	1	0.02 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.09 ^{ns}
سال × رژیم آبیاری × الگوی کشت Year × Irrigation regimes × Planting patterns	2	0.04 ^{ns}	0.008 ^{ns}	0.06 ^{ns}	0.003 ^{ns}
خطای c Error c	12	0.37	0.008	0.39	0.06
(دی اکسید تیتانیوم + قارچ میکوریزا) (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi)	3	16.55 ^{**}	1.08 ^{**}	25.59 ^{**}	1.19 ^{**}
رژیم آبیاری × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ میکوریزا) Irrigation regimes × (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi)	6	3.14 ^{**}	0.29 ^{**}	4.88 ^{**}	0.16 ^{**}
الگوی کشت × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ میکوریزا) Planting patterns × (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi)	3	1.76 [*]	0.26 ^{**}	3.31 [*]	0.05 ^{ns}
رژیم آبیاری × الگوی کشت × منابع کودی Irrigation × Planting patterns × Fertilizer sources	6	1.49 ^{**}	0.08 ^{**}	1.72 ^{**}	0.01 ^{ns}
سال × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ میکوریزا) Year × (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi)	3	0.02 ^{ns}	0.004 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.008 ^{ns}
سال × رژیم آبیاری × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ میکوریزا) Year × Irrigation regimes × (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi)	6	0.02 ^{ns}	0.015 ^{ns}	0.07 ^{ns}	0.007 ^{ns}
سال × الگوی کشت × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ میکوریزا) Year × Planting patterns × (Nano titanium dioxide +Mycorrhizal fungi)	3	0.15 ^{ns}	0.008 ^{ns}	0.21 ^{ns}	0.008 ^{ns}
سال × رژیم آبیاری × الگوی کشت × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ میکوریزا) Year × Irrigation regimes × Planting patterns × (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi)	6	0.12 ^{ns}	0.006 ^{ns}	0.17 ^{ns}	0.003 ^{ns}
خطای کل Total error	72	0.24	0.02	0.25	0.07
ضریب تغییرات CV (%)		16.22	19.79	13.25	22.02

^{**}، * و ^{ns}: به ترتیب معنی دار در سطح یک و پنج درصد و عدم تفاوت معنی دار.
**، * and ns: are significant at the 1 and 5 percent levels, respectively, and there is no significant difference.

جدول ۸- مقایسه میانگین‌های غلظت کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل مریم‌گلی در ترکیب تیماری رژیم‌های مختلف آبیاری، الگوهای کشت خالص و مخلوط با نعناع فلفلی، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ مایکوریزا

Table 8- Mean comparisons of the sage chl a, b, and total under treatment combination of irrigation regimes, planting patterns of monoculture and intercropping with peppermint, nano titanium dioxide and arbuscular mycorrhizal fungi

تیما رها Treatments		کلروفیل a Chlorophyll a (mg. g ⁻¹ Fresh weight)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg. g ⁻¹ Fresh weight)	کلروفیل کل Total chlorophyll (mg. g ⁻¹ Fresh weight)	
آبیاری نرمال Normal irrigation	شاهد Control	2.10	0.35	2.45	
	نانو دی اکسید تیتانیوم Nano titanium dioxide	4.51	0.79	5.30	
	کشت خالص Monoculture	قارچ مایکوریزا AMF	3.82	0.90	4.72
	قارچ مایکوریزا + نانو دی اکسید تیتانیوم Arbuscular mycorrhizal fungi + Nano titanium dioxide	5.21	1.30	6.51	
	شاهد Control	3.89	0.92	4.81	
	کشت مخلوط Intercropping	نانو دی اکسید تیتانیوم Nano titanium dioxide and	4.51	1.26	5.77
	قارچ مایکوریزا Arbuscular mycorrhizal fungi	5.00	0.99	5.99	
	قارچ مایکوریزا + نانو دی اکسید تیتانیوم Arbuscular mycorrhizal fungi + Nano titanium dioxide	5.56	1.33	6.89	
	تنش ملایم Mild stress	شاهد Control	1.56	0.22	1.77
نانو دی اکسید تیتانیوم Nano titanium dioxide		2.43	0.75	3.18	
کشت خالص Monoculture		قارچ مایکوریزا Arbuscular mycorrhizal fungi	2.49	0.72	3.21
قارچ مایکوریزا + نانو دی اکسید تیتانیوم Arbuscular mycorrhizal fungi + Nano titanium dioxide		3.24	0.76	4.00	
شاهد Control		2.95	0.95	3.90	
کشت مخلوط Intercropping		نانو دی اکسید تیتانیوم TiO ₂	3.35	1.08	4.43
قارچ مایکوریزا AMF		2.72	0.98	3.70	
قارچ مایکوریزا + نانو دی اکسید تیتانیوم Arbuscular mycorrhizal fungi + Nano titanium dioxide		3.90	1.22	5.12	
تنش شدید Severe stress		شاهد Control	1.09	0.22	1.31
	نانو دی اکسید تیتانیوم Nano titanium dioxide	1.36	0.47	1.83	
	کشت خالص Monoculture	قارچ مایکوریزا Arbuscular mycorrhizal fungi	1.15	0.22	1.37
	قارچ مایکوریزا + نانو دی اکسید تیتانیوم Arbuscular mycorrhizal fungi + Nano titanium dioxide	2.40	0.30	2.70	
	شاهد Control	2.26	0.53	2.79	
	کشت مخلوط Intercropping	نانو دی اکسید تیتانیوم Nano titanium dioxide	2.84	0.79	3.63
	قارچ مایکوریزا Arbuscular mycorrhizal fungi	1.18	0.30	1.48	
	قارچ مایکوریزا + نانو دی اکسید تیتانیوم Arbuscular mycorrhizal fungi + Nano titanium dioxide	3.05	0.58	3.63	
	LSD _{0.05}		0.4855	0.1085	0.5848

نانو دی‌اکسید تیتانیوم به‌ترتیب منجر به افزایش ۴۲/۶، ۱۸/۸ و ۱۰/۹ درصدی غلظت کاروتنوئید نسبت به عدم مصرف کود گردید (شکل ۳۱).

به‌طور کلی نتایج نشان داد که با افزایش تنش خشکی، میزان کلروفیل a، b و کل کاهش یافت. محتوای کلروفیل در گیاهان ارتباط نزدیکی با فتوسنتز، میزان عناصر غذایی و بهره‌وری محصول دارد (Varma et al., 2018). دلیل کاهش میزان کلروفیل با افزایش تنش خشکی را می‌توان به کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی، آسیب به ساختار کلروپلاست، تخریب پیش‌ساز کلروفیل و اکسیداسیون کلروفیل بر اثر افزایش میزان رادیکال‌های فعال اکسیژن نسبت داد که در نهایت منجر به مهار بیوسنتز کلروفیل خواهد شد (Mohammadi et al., 2019). شیواکریشنا و همکاران (Shivakrishna et al., 2018) گزارش کردند که قرار گرفتن گیاه در تنش خشکی منجر به افزایش میزان رادیکال‌های فعال اکسیژن شده که این امر به‌نوبه خود باعث پراکسیداسیون لیپیدها، آسیب به کلروپلاست و در نهایت تجزیه کلروفیل موجود در برگ گیاهان خواهد شد. همچنین یکی دیگر از دلایل کاهش میزان کلروفیل را می‌توان به کاهش جذب عناصر غذایی به‌منظور رشد و ساخت بیومولکول‌های حیاتی گیاه نسبت داد که این امر در نهایت منجر به کاهش تولید کلروفیل خواهد شد (Emami Bistgani et al., 2017). در تطابق با نتایج پژوهش حاضر، بحرینی‌نژاد و همکاران (Bahreininejad et al., 2013) گزارش کردند که میزان کلروفیل و کاروتنوئید آویشن دانی در شرایط خشکی نسبت به آبیاری نرمال کاهش معنی‌داری پیدا کرد. باین‌حال، نتایج نشان داد که میزان کاروتنوئید در تنش ملایم نسبت به شرایط آبیاری نرمال افزایش یافت. کاروتنوئیدها نوعی رنگدانه آنتی‌اکسیدانی می‌باشند که در افزایش مقاومت گیاهان در برابر تنش خشکی نقش مهمی را ایفا می‌کنند. کاروتنوئیدها متابولیت‌های ایزوپرنوئیدی می‌باشند که در اندامک‌های فتوسنتزکننده سنتز می‌شوند. در شرایط نامساعد محیطی، گیاهان با تنظیم ژن‌های مربوط به متابولیسم کاروتنوئیدها، تجمع و تخریب کاروتنوئیدها را تنظیم می‌کنند. علاوه‌بر این، کاروتنوئیدها به‌عنوان پیش‌ساز برای سنتز هورمون‌های گیاهی از جمله اسیدآبسیزیک می‌باشند (Sun et al., 2022). آسیب اکسیدی تنش خشکی در بافت‌های گیاهی معمولاً توسط سیستم‌های ضداکسیدکنندگی آنزیمی و غیرآنزیمی فرونشاندن می‌شود. این

با افزایش روند خشکی، غلظت کلروفیل b مریم‌گلی کاهش یافت، به‌طوری‌که میزان صفت ذکرشده در تنش‌های ملایم و شدید به‌ترتیب ۱۵/۳ و ۵۶/۱ درصد کاهش یافت. همچنین غلظت کلروفیل b مریم‌گلی با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم ۷۱/۷ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. علاوه‌بر این، کشت مخلوط منجر به افزایش ۵۶/۹ درصدی غلظت کلروفیل b نسبت به کشت خالص گردید (جدول ۸).

کلروفیل کل

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۷) نشان داد که غلظت کلروفیل کل مریم‌گلی تحت تأثیر معنی‌دار اثرات ساده رژیم‌های مختلف آبیاری، الگوی کشت و منابع کودی و اثرات متقابل رژیم‌های آبیاری × منابع کودی، الگوی کشت × منابع کودی و رژیم‌های آبیاری × الگوی کشت × منابع کودی قرار گرفت. بیشترین (۶/۸۸ میلی‌گرم در گرم وزن تر) غلظت کلروفیل کل در آبیاری نرمال در الگوی کشت مخلوط با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد که در همان سطح آبیاری تفاوت معنی‌داری با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم در کشت خالص نداشت. غلظت کلروفیل کل مریم‌گلی در تنش‌های ملایم و شدید به‌ترتیب ۳۰/۹ و ۵۵/۸ درصد کاهش یافت. همچنین غلظت کلروفیل کل مریم‌گلی با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم، کاربرد جداگانه قارچ مایکوریزا و نانو دی‌اکسید تیتانیوم به‌ترتیب ۶۹، ۲۰/۱ و ۴۱/۵ درصد نسبت به عدم مصرف کود افزایش یافت. علاوه‌بر این، کشت مخلوط منجر به افزایش ۳۶/۱ درصدی غلظت کلروفیل b نسبت به کشت خالص گردید (جدول ۸).

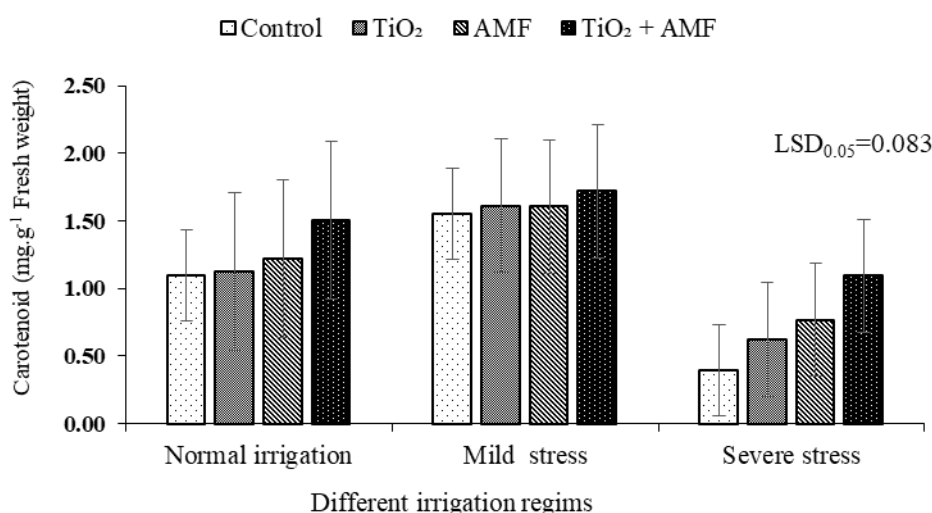
کاروتنوئید

اثرات ساده رژیم‌های مختلف آبیاری و منابع کودی و اثر متقابل رژیم‌های آبیاری × منابع کودی بر غلظت کاروتنوئید مریم‌گلی معنی‌دار گردید (جدول ۷). بیشترین (۱/۷۲ میلی‌گرم در گرم وزن تر) و کمترین (۰/۳۹ میلی‌گرم در گرم وزن تر) غلظت کاروتنوئید در تنش ملایم با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم و تنش شدید بدون مصرف کود به دست آمد. کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانودی‌اکسید تیتانیوم، کاربرد جداگانه قارچ مایکوریزا و

دی‌اکسید تیتانیوم افزایش یافت. مولکول کلروفیل از دو بخش (یک سر پورفیرین و یک هیدروکربن طولی با دنباله فیتول) تشکیل شده است. پورفیرین از چهار حلقه پیرول حاوی نیتروژن که به صورت حلقوی قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است. کامل‌کننده مولکول کلروفیل یک یون منیزیم است که با چهار اتم نیتروژن در مرکز حلقه تشکیل کلات می‌دهد. با توجه به اینکه هر مولکول کلروفیل دارای چهار اتم نیتروژن می‌باشد و با توجه به همبستگی مثبت محتوای کلروفیل با میزان نیتروژن در دسترس گیاه می‌توان بیان کرد که با افزایش جذب نیتروژن، میزان کلروفیل گیاه افزایش می‌یابد (Mao et al., 2020). بنابراین می‌توان بیان نمود که با افزایش غلظت عناصر از طریق کاربرد تلفیقی قارچ میکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم، میزان فتوسنتز و به تبع آن غلظت کلروفیل و کاروتنوئید افزایش پیدا خواهد کرد. همچنین بیشتر بودن غلظت کلروفیل و کاروتنوئید در کشت مخلوط نسبت به کشت خالص به استفاده بهینه از منابع در دسترس نسبت داده می‌شود (Amani Machiani et al., 2021). در تطابق با نتایج پژوهش حاضر، سیلوا و همکاران (Silva et al., 2018) با ارزیابی کشت مخلوط بادرنجبویه با بومادران گزارش کردند که در هر دو گیاه، بیشترین میزان کلروفیل آ، کلروفیل ب و کلروفیل کل در کشت مخلوط دو گیاه به دست آمد.

ضد اکسیدکننده‌ها شامل کاروتنوئیدها، فنولیک‌ها، فلاونوئیدها، آسکوربات‌ها، آلفا-توکوفرول و آنزیم‌های آنتی اکسیدانی می‌باشند. این ترکیب‌ها نه تنها از اجزای سلول محافظت می‌کنند، بلکه منجر به افزایش طول سلول شده و مرگ سلول و پیری را با تأخیر می‌اندازند. افزایش غلظت کاروتنوئید در شرایط تنش خشکی احتمالاً به نقش آنتی‌اکسیدانی آن مرتبط باشد. بنابراین، افزایش میزان کاروتنوئید در تنش ملایم به عنوان یک ترکیب غیرآنزیمی برای کاهش میزان رادیکال‌های فعال اکسیژن و افزایش مقاومت گیاهان در برابر تنش خشکی توجیه‌پذیر می‌باشد (Zhang et al., 2021). در پژوهشی با ارزیابی سطوح مختلف تنش خشکی (۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) روی درسد و عملکرد موسیلاژ قدومه (*Alyssum homolocarpum*) گزارش کردند که با افزایش تنش خشکی، کلروفیل کل کاهش یافت، به طوری که بیشترین و کمترین میزان کلروفیل کل به ترتیب در ۸۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی به دست آمد. همچنین بیشترین و کمترین میزان کاروتنوئید به ترتیب در ۴۰ و ۸۰ درصد ظرفیت زراعی حاصل شد (Zaferanieh & Mahdavi, 2021).

همچنین نتایج نشان داد که میزان کلروفیل و کاروتنوئید مریم‌گلی در کشت مخلوط با کاربرد تلفیقی قارچ میکوریزا + نانو



شکل ۱۳- مقایسه میانگین غلظت کاروتنوئید مریم‌گلی تحت تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ میکوریزا

Fig. 13- Mean comparison of sage carotenoid concentrations under the influence of different Irrigation regimes, nano titanium dioxide and arbuscular mycorrhizal fungi

در پژوهشی دیگر با بررسی سطوح مختلف تنش خشکی و کاربرد قارچ مایکوریزا روی ریحان گزارش کردند که بیشترین میزان کلروفیل کل در آبیاری نرمال با کاربرد قارچ میکوریزا به دست آمد (Hazzoumi et al., 2015). همچنین بیشترین میزان کلروفیل آ در آبیاری نرمال و با کاربرد دو میلی گرم در لیتر نانو دی اکسید تیتانیوم به دست آمد. کاربرد ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانو دی اکسید تیتانیوم روی بادرشبی منجر به افزایش غلظت کاروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید نسبت به عدم مصرف آن گردید (Gohari et al., 2020). همچنین، کاربرد ۹۰ میلی گرم در لیتر نانو دی اکسید تیتانیوم منجر به افزایش غلظت کلروفیل کل گیاه *Vetiveria zizanioides* L. Nash به شاهد گردید (Shabbir et al., 2019).

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش عملکرد ماده خشک و محتوای کلروفیل مریم‌گلی گردید. اما کاربرد تلفیقی قارچ

مایکوریزا + نانو دی اکسید تیتانیوم، بهره‌وری گیاه را در شرایط تنش خشکی بهبود بخشید. بیشترین عملکرد ماده خشک، کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی اکسید تیتانیوم در شرایط آبیاری نرمال به دست آمد. با افزایش روند تنش خشکی، درصد اسانس مریم‌گلی افزایش یافت، به طوری که بیشترین درصد اسانس در تنش ملایم به دست آمد که ۴۱/۲ درصد نسبت به آبیاری نرمال افزایش پیدا کرد. علاوه بر این، درصد اسانس مریم‌گلی در کشت مخلوط ۱۱/۱ درصد بیشتر از کشت خالص آن بود. همچنین در تنش ملایم، کشت مخلوط به همراه کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی اکسید تیتانیوم موجب افزایش ترکیب اصلی اسانس مریم‌گلی یعنی سیس-توجن گردید. به طور کلی، نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی اکسید تیتانیوم در کشت مخلوط می‌تواند به عنوان یک راهبرد پایدار برای بهبود کمیت و کیفیت اسانس مریم‌گلی در شرایط خشکی توصیه گردد.

References

1. Abdollahi Arpanahi, A., Feizian, M., Mehdipourian, G., & Khojasteh, D. N. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation improve essential oil and physiological parameters and nutritional values of *Thymus daenensis* Celak and *Thymus vulgaris* L. under normal and drought stress conditions. *European Journal of Soil Biology*, 100, 1-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2020.103217>.
2. Adams, R. P. (2007). Identification of Essential Oil Components by Gas Chromatography/Mass Spectrometry. Carol Stream: Allured Publishing Corporation.
3. Ahmad, B., Shabbir, A., Jaleel, H., Khan, M. M. A., & Sadiq, Y. (2018). Efficacy of titanium dioxide nanoparticles in modulating photosynthesis, peltate glandular trichomes and essential oil production and quality in *Mentha piperita* L. *Current Plant Biology*, 13, 6-15. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2018.04.002>.
4. Amani Machiani, M., Javanmard, A., Morshedloo, M. R., Aghaee, A., & Maggi, F. (2021). *Funneliformis mosseae* inoculation under water deficit stress improves the yield and phytochemical characteristics of thyme in intercropping with soybean. *Scientific Reports*, 11(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94681-9>.
5. Amani Machiani, M., Javanmard, A., Morshedloo, M. R., & Maggi, F. (2018). Evaluation of competition, essential oil quality, and quantity of peppermint intercropped with soybean. *Industrial Crops and Products*, 111, 743-754. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.052>.
6. Amani Machiani, M., Rezaei-Chiyaneh, E., Javanmard, A., Maggi, F., & Morshedloo, M. R. (2019). Evaluation of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seed yield and qualitative-quantitative production of the essential oils from fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) and dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.) in intercropping system under humic acid application. *Journal of Cleaner Production*, 235, 112-122. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.241>.
7. Anjum, S. A., Xie, X. Y., Wang, L. C., Saleem, M. F., Man, C., & Lei, W. (2011). Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*, 6(9), 2026-2032. <http://dx.doi.org/10.5897/AJAR10.027>.
8. Bahreininejad, B., Razmjou, J., & Mirza, M. (2013). Influence of water stress on morpho-physiological and phytochemical traits in *Thymus daenensis*. *International Journal of Plant Production*, 7(1), 151-166. <https://doi.org/10.22069/ijpp.2012.927>.

9. Begum, N., Akhtar, K., Ahanger, M. A., Iqbal, M., Wang, P., Mustafa, N. S., & Zhang, L. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi improve growth, essential oil, secondary metabolism, and yield of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) under drought stress conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(33), 45276-45295. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13755-3>.
10. Bettaieb, I., Zakhama, N., Wannes, W. A., Kchouk, M. E., & Marzouk, B. (2009). Water deficit effects on *Salvia officinalis* fatty acids and essential oils composition. *Scientia Horticulturae*, 120(2), 271-275. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.10.016>.
11. Biglari, T., Maleksaeidi, H., Eskandari, F., & Jalali, M. (2019). Livestock insurance as a mechanism for household resilience of livestock herders to climate change: Evidence from Iran. *Land Use Policy*, 87, 1-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104043>.
12. Chaudhary, I., & Singh, V. (2020). Titanium dioxide nanoparticles and its impact on growth, biomass and yield of agricultural crops under environmental stress: A Review. *Research Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 10, 1-8. <http://dx.doi.org/10.3923/rjnn.2020.1.8>.
13. Copetta, A., Lingua, G., & Berta, G. (2006). Effects of three AM fungi on growth, distribution of glandular hairs and essential oil production in *Ocimum basilicum* L. var. *Genovese*. *Mycorrhiza*, 16, 485-494. <https://doi.org/10.1007/s00572-006-0065-6>.
14. Ebrahimghochi, Z., Mohsenabadi, G., & Majidian, M. (2018). Effect of planting date and intercropping with fenugreek (*Trigonella foenum-graceum* L.) on yield and essential oil content of peppermint (*Mentha piperita* L.). *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 21(3), 759-768. <http://dx.doi.org/10.1080/0972060X.2018.1465857>.
15. El-Haddad, M. H., Zayed, M. S., El-Sayed, G. A. M., & Abd El-Satar, A. M. (2020). Efficiency of compost and vermicompost in supporting the growth and chemical constituents of *Salvia officinalis* L. cultivated in sand soil. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 9, 49-59. <https://doi.org/10.30486/ijrowa.2020.671209>.
16. Emami Bistgani, Z., Siadat, S. A., Bakhshandeh, A., Ghasemi Pirbalouti, A., & Hashemi, M. (2017). Interactive effects of drought stress and chitosan application on physiological characteristics and essential oil yield of *Thymus daenensis* Celak. *Crop Journal*, 5(5), 407-415. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cj.2017.04.003>.
17. Farahani, H. A., Valadabadi, S. A., Daneshian, J., & Khalvati, M. A. (2009). Evaluation changing of essential oil of balm (*Melissa officinalis* L.) under water deficit stress conditions. *Journal of Medicinal Plant Research*, 3, 329-333. <https://www.researchgate.net/publication/237559464>.
18. Farahpour, M. R., Pirkhezr, E., Ashrafian, A., & Sonboli, A. (2020). Accelerated healing by topical administration of *Salvia officinalis* essential oil on *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus* infected wound model. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 128, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2020.110120>.
19. Farruggia, D., Di-Miceli, G., Licata, M., Leto, C., Salamone, F., & Novak, J. (2024). Foliar application of various biostimulants produces contrasting response on yield, essential oil and chemical properties of organically grown sage (*Salvia officinalis* L.). *Frontiers in Plant Science*, 15, 1397489. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1397489>.
20. Gao, S., Wang, Y., Yu, S., Huang, Y., Liu, H., Chen, W., & He, X. (2020). Effects of drought stress on growth, physiology, and secondary metabolites of two *Adonis* species in Northeast China. *Scientia Horticulturae*, 259, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108795>.
21. Ghanbarzadeh, Z., Mohsenzadeh, S., Rowshan, V., & Moradshahi, A. (2019). Evaluation of the growth, essential oil composition and antioxidant activity of *Dracocephalum moldavica* under water deficit stress and symbiosis with *Claroideoglossum etunicatum* and *Micrococcus yunnanensis*. *Scientia Horticulturae*, 256, 1-8. <https://www.researchgate.net/publication/338633410>.
22. Gheysari, M., Loescher, H. W., Sadeghi, S. H., Mirlatifi, S. M., Zareian, M. J., & Hoogenboom, G. (2015). Water-yield relations and water use efficiency of maize under nitrogen fertigation for semiarid environments: Experiment and synthesis. *Advances in Agronomy*, 130, 175-229. <https://dx.doi.org/10.1016/bs.agron.2014.12.001>.
23. Giovannetti, M., & Mosse, B. (1980). An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytologist*, 84(3), 489-500. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1980.tb04556.x>.
24. Gohari, G., Mohammadi, A., Akbari, A., Panahirad, S., Dadpour, M. R., Fotopoulos, V., & Kimura, S. (2020). Titanium dioxide nanoparticles (TiO₂ NPs) promote growth and ameliorate salinity stress effects on essential oil

- profile and biochemical attributes of *Dracocephalum moldavica*. *Scientific Reports*, 10(1), 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57794-1>.
25. Golami, A., Abbaspour, H., Hashemi-Moghaddam, H., & Gerami, M. (2018). Photocatalytic effect of TiO₂ nanoparticles on essential oil of *Rosmarinus officinalis*. *Journal of Biochemical Technology*, 9(4), 50-56.
26. Golubkina, N., Logvinenko, L., Novitsky, M., Zamana, S., Sokolov, S., Molchanova, A., Shevchuk, O., Sekara, A., Tallarita, A., & Caruso, G. (2020). Yield, essential oil and quality performances of *Artemisia dracunculus*, *Hyssopus officinalis* and *Lavandula angustifolia* as affected by arbuscular mycorrhizal fungi under organic management. *Plants*, 9, 1-16. <https://doi.org/10.3390/plants9030375>.
27. Govahi, M., Ghalavand, A., Nadjafi, F., & Sorooshzadeh, A. (2015). Comparing different soil fertility systems in sage (*Salvia officinalis*) under water deficiency. *Industrial Crops and Products*, 74, 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.053>.
28. Hazzoumi, Z., Moustakime, Y., & Joutei, K. A. (2015). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and water stress on growth, phenolic compounds, glandular hairs, and yield of essential oil in basil (*Ocimum gratissimum* L.). *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2(1), 1-11. <https://doi.org/10.1186/s40538-015-0035-3>.
29. Ingle, A. P. (2021). Nanotechnology in Plant Growth Promotion and Protection. Maharashtra India: John Wiley & Sons, Incorporated. <https://doi.org/10.1002/9781119745884>.
30. Jannoura, R., Joergensen, R. G., & Bruns, C. (2014). Organic fertilizer effects on growth, crop yield, and soil microbial biomass indices in sole and intercropped peas and oats under organic farming conditions. *European Journal of Agronomy*, 52, 259-270. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.001>.
31. Kapoor, R., Anand, G., Gupta, P., & Mandal, S. (2017). Insight into the mechanisms of enhanced production of valuable terpenoids by arbuscular mycorrhiza. *Phytochemistry Reviews*, 16(4): 677-692. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11101-016-9486-9>.
32. Khater, R. M., Sabry, R. M., Pistelli, L., Abd-ElGawad, A. M., Soufan, W., & El-Gendy, A. N. G. (2021). Effect of compost and titanium dioxide application on the vegetative yield and essential oil composition of Coriander. *Sustainability*, 14(1), 322, 1-11. <https://doi.org/10.3390/su14010322>.
33. Khosheghbal Ghorabae, F., Ghasemi Pirbalouti, A., Enteshari, S., & Davarpanah, S. J. (2020). Qualitative and quantitative effects of drought stress on essential oil compositions of hyssop (*Hyssopus officinalis* L.). *Plant Research*, 33(2), 349-356. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0260-3>.
34. Kleinwächter, M., & Selmar, D. (2015). New insights explain that drought stress enhances the quality of spice and medicinal plants: Potential applications. *Agronomy Sustainable Developments*, 35, 121-131. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0260-3>.
35. Koske, R., & Gemma, J. (1989). A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhizas. *Mycological Research*, 92(4), 486-488. [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(89\)80195-9](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(89)80195-9).
36. Liu, R., & Lal, R. (2015). Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the Total Environment*, 514, 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.104>.
37. Li, H., Ma, Z., Zhang, G., Chen, J., Lu, Y., & Li, P. (2024). Performance of a drip irrigation system under the co-application of water, fertilizer, and air. *Horticulturae*, 10, 1-22. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10010006>.
38. Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1).
39. Llusia, J., Penuelas, J., Alessio, G. A., & Estiarte, M. (2006). Seasonal contrasting changes of foliar concentrations of terpenes and other volatile organic compound in four dominant species of a Mediterranean shrubland submitted to a field experimental drought and warming. *Physiologia Plantarum*, 127(4), 632-649. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00693.x>.
40. Madhava, K. V., Raghavendra, A. S., & Reddy, K. J. (2006). Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants. Springer Science & Business Media India. <https://doi.org/10.1007/1-4020-4225-6>.
41. Manzer, H., Siddiqui, M. H., & Al-Whaibi, F. M. (2015). Nanotechnology and Plant Sciences, Nanoparticles and Their Impact on Plants. Springer, Cham. <http://10.1007/978-3-319-14502-0>.
42. Mao, Z. H., Deng, L., Duan, F. Z., Li, X. J., & Qiao, D. Y. (2020). Angle effects of vegetation indices and the influence on prediction of SPAD values in soybean and maize. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 93, 1-14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2020.102198>.

43. Mazarie, A., Mousavi-Nik, S. M., Ghanbari, A., & Fahmideh, L. (2019). Effect of different spraying concentrations of jasmonic acid and titanium dioxide nanoparticles on some physiological traits and antioxidant system activity of sage (*Salvia officinalis* L.). *Iranian Journal of Plant Biology*, 11(1), 1-22. <https://doi.org/10.22108/ijpb.2018.110510.1092>.
44. McGonigle, T., Miller, M., Evans, D., Fairchild, G., & Swan, J. (1990). A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular—arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 115(3), 495-501. <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/authorised-by/EVANS/D.+G>.
45. Mohammadi, H., Amirikia, F., Ghorbanpour, M., Fatehi, F., & Hashempour, H. (2019). Salicylic acid induced changes in physiological traits and essential oil constituents in different ecotypes of *Thymus kotschyianus* and *Thymus vulgaris* under well-watered and water stress conditions. *Industrial Crops and Products*, 129, 561-574. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.046>.
46. Mohammadi, H., Esmailpour, M., & Gheranpaye, A. (2016). Effects of TiO₂ nanoparticles and water-deficit stress on morpho-physiological characteristics of dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.) plants. *Acta Agriculturae Slovenica*, 107(2), 385-396. <https://doi.org/10.14720/aas.2016.107.2.11>.
47. Moghadam, E., Mahmoodi Sourestani, M., Ramazani, Z., Farrokhian Firoozi, A., & Eskandari, F. (2016). Effects of iron foliar application on the number and size of glandular trichomes and essential oil content and composition of holy basil (*Ocimum sanctum* L.) at first and second harvests. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 32(1), 174-188. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2016.106146>.
48. Monti, M., Pellicanò, A., Santonoceto, C., Preiti, G., & Pristeri, A. (2016). Yield components and nitrogen use in cereal-pea intercrops in Mediterranean environment. *Field Crops Research*, 196, 379-388. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.017>.
49. Morshedloo, M. R., Craker, L. E., Salami, A., Nazeri, V., Sang, H., & Maggi, F. (2017). Effect of prolonged water stress on essential oil content, compositions and gene expression patterns of mono-and sesquiterpene synthesis in two oregano (*Origanum vulgare* L.) subspecies. *Plant Physiology and Biochemistry*, 111, 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.11.023>.
50. Morshedloo, M. R., Maggi, F., Neko, H. T., & Aghdam, M. S. (2018). Sumac (*Rhus coriaria* L.) fruit: Essential oil variability in iranian populations. *Industrial Crops and Products*, 111, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.002>.
51. Mucciarelli, M., Scannerini, S., Berteà, C., & Maffei, M. (2003). *In vitro* and *in vivo* peppermint (*Mentha piperita*) growth promotion by nonmycorrhizal fungal colonization. *New Phytologist*, 158, 591-597. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00762.x>.
52. Nasiri Mahallati, M. N., Koocheki, A., Mondani, F., Feizi, H., & Amirmoradi, S. (2015). Determination of optimal strip width in strip intercropping of maize (*Zea mays* L.) and bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Northeast Iran. *Journal of Cleaner Production*, 106, 343-350. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.099>.
53. Phillips, J. M., & Hayman, D. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55(1), 158-161. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3).
54. Rafique, R., Zahra, Z., Virk, N., Shahid, M., Pinelli, E., Park, T. J., Kallerhoff, J., & Arshad, M. (2018). Dose-dependent physiological responses of *Triticum aestivum* L. to soil applied TiO₂ nanoparticles: Alterations in chlorophyll content, H₂O₂ production, and genotoxicity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 255, 95-101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2017.12.010>.
55. Rezaei-Chiyaneh, E., Mahdaviakia, H., Battaglia, M. L., Thomason, W. E., & Caruso, G. (2021). Intercropping and fertilizer type impact seed productivity and secondary metabolites of dragon's head and fenugreek. *Scientia Horticulturae*, 287, 1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110277>.
56. Rezaei-Chiyaneh, E., Amirnia, R., Amani Machiani, M., Javanmard, A., Maggi, F., & Morshedloo, M. R. (2020). Intercropping fennel (*Foeniculum vulgare* L.) with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as affected by PGPR inoculation: A strategy for improving yield, essential oil and fatty acid composition. *Scientia Horticulturae*, 261, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108951>.
57. Said-Al Ahl, H. A. H., & Hussein, M. S. (2010). Effect of water stress and potassium humate on the productivity of oregano plant using saline and fresh water irrigation. *Ozean Journal of Applied Sciences*, 3(1), 125-141.

- <https://www.researchgate.net/publication/266967908>.
58. Salehi-Lisar, S. Y., & Bakhshayeshan-Agdam, H. (2020). Agronomic crop responses and tolerance to drought stress. *Agronomic Crops*, 3, 63-91. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-0025-1_5.
 59. Šebesta, M., Ramakanth, I., Zvěřina, O., Šeda, M., Diviš, P., & Kolenčík, M. (2021). Effects of titanium dioxide nanomaterials on plants growth. *Nanotechnology in Plant Growth Promotion and Protection: Recent Advances and Impacts*. pp. 17-44. New York, United States: John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.3390/plants11131659>.
 60. Shabbir, A., Khan, M. M. A., Ahmad, B., Sadiq, Y., Jaleel, H., & Uddin, M. (2019). Efficacy of TiO₂ nanoparticles in enhancing the photosynthesis, essential oil and khusimol biosynthesis in *Vetiveria zizanioides* L. *Nash. Photosynthetica*, 57(2), 599-606. <https://doi.org/10.32615/ps.2019.071>.
 61. Sharifi-Rad, J., Sureda, A., Tenore, G. C., Daglia, M., Sharifi-Rad, M., Valussi, M., Tundis, R., Sharifi-Rad, M., Loizzo, M. R., Ademiluyi, A. O., & Sharifi-Rad, R. (2017). Biological activities of essential oils: From plant chemoecology to traditional healing systems. *Molecules*, 22(1), 1-55. <https://doi.org/10.3390/molecules22010070>.
 62. Shivakrishna, P., Reddy, K. A., & Rao, D. M. (2018). Effect of PEG-6000 imposed drought stress on RNA content, relative water content (RWC), and chlorophyll content in peanut leaves and roots. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25(2), 285-289. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.04.008>.
 63. Shukla, A., Kumar, A., Jha, A., Salunkhe, O., & Vyas, D. (2013). Soil moisture levels affect mycorrhization during early stages of development of agroforestry plants. *Biology and Fertility of Soils*, 49(5), 545-554. <https://www.researchgate.net/journal/Biology-and-Fertility-of-Soils-1432-0789>.
 64. Silva, T. C., Pinto, J. E. B. P., Pacheco, F. V., Roza, H. L. H., Lordêllo, D. M. D. S., & Bertolucci, S. K. V. (2018). The growth, photosynthetic pigments and essential oil composition of monocropped and intercropped lemon balm with yarrow. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 40, 1-7. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v40i1.35506>.
 65. Sun, T., Rao, S., Zhou, X., & Li, L. (2022). Plant carotenoids: Recent advances and future perspectives. *Molecular Horticulture*, 2(1), 1-21. <https://doi.org/10.1186/s43897-022-00023-2>.
 66. Tarraf, W., Ruta, C., Tagarelli, A., De Cillis, F., & De Mastro, G. (2017). Influence of arbuscular mycorrhizae on plant growth, essential oil production and phosphorus uptake of *Salvia officinalis* L. *Industrial Crops and Products*, 102, 144-153. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.010>.
 67. Thokchom, S. D., Gupta, S., & Kapoor, R. (2020). Arbuscular mycorrhiza augments essential oil composition and antioxidant properties of *Ocimum tenuiflorum* L. A popular green tea additive. *Industrial Crops and Products*, 153, 1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112418>.
 68. Tohidi, B., Rahimmalek, M., & Trindade, H. (2019). Review on essential oil, extracts composition, molecular and phytochemical properties of *Thymus* species in Iran. *Industrial Crops and Products*, 134, 89-99. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.038>.
 69. Toksha, B., Sonawale, V. A. M., Vanarase, A., Bornare, D., Tonde, S., Hazra, C., Kundu, D., Satdive, A., Tayde, S., & Chatterjee, A. (2021). Nanofertilizers: A review on synthesis and impact of their use on crop yield and environment. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101986>.
 70. Urcoviche, R. C., Gazim, Z. C., Dragunski, D. C., Barcellos, F. G., & Alberton, O. (2015). Plant growth and essential oil content of *Mentha crispa* inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi under different levels of phosphorus. *Industrial Crops and Products*, 67, 103-107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.01.016>.
 71. Varma, A., Prasad, R., & Tuteja, N. (2018). Mycorrhiza-Nutrient Uptake, Biocontrol, Ecorestoration. Springer Nature, Cham. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-68867-1>.
 72. Weisany, W., Tahir, N. A. R., & Schenk, P. M. (2021). Coriander/soybean intercropping and mycorrhizae application lead to overyielding and changes in essential oil profiles. *European Journal of Agronomy*, 126, 1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2021.126283>.
 73. Willmann, M., Gerlach, N., Buer, B., Polatajko, A., Nagy, R., Koebeke, E., Jansa, J., Flisch, R., & Bucher, M. (2013). Mycorrhizal phosphate uptake pathway in maize: Vital for growth and cob development on nutrient poor agricultural and greenhouse soils. *Frontiers in Plant Science*, 4, 1-6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00533>.
 74. Wu, Y. H., Wang, H., Liu, M., Li, B., Chen, X., Ma, Y. T., & Yan, Z. Y. (2021). Effects of native arbuscular mycorrhizae isolated on root biomass and secondary metabolites of *Salvia miltiorrhiza* Bge. *Frontiers in Plant*

- Science*, 12, 1-13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.617892>.
75. Yang, F., Hong, F., You, W., Liu, C., Gao, F., Wu, C., & Yang, P. (2006). Influence of nano-anatase TiO₂ on the nitrogen metabolism of growing spinach. *Biological Trace Element Research*, 110(2), 179-190. <https://doi.org/10.1385/BTER:110:2:179>.
76. Yang, F., Huang, S., Gao, R., Liu, W., Yong, T., Wang, X., Wu, X., & Yang W. (2014). Growth of soybean seedling in relay strip intercropping systems in relation to light quantity and red: Far red ratio. *Field Crops Research*, 155, 245-253. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2013.08.011>.
77. Zare Hassanabdi, M., Dashti, M., & Akhondi, M. (2020). The effect of two species of arbuscular mycorrhiza fungi on the activity of antioxidant enzymes and morphophysiological characteristics of *Mentha pulegium* L. in drought stress. *Iranian Medicinal Plants Technology*, 2, 83-99. <https://doi.org/10.22092/mpt.2020.127803.1049>.
78. Zhang, R. R., Wang, Y. H., Li, T., Tan, G. F., Tao, J. P., Su, X. J., Xu, Z. S., Tian, Y. S., & Xiong, A. S. (2021). Effects of simulated drought stress on carotenoid contents and expression of related genes in carrot taproots. *Protoplasma*, 258(2), 379-390. <https://doi.org/10.1007/s00709-020-01570-5>.
79. Zaferanieh, M., & Mahdavi, B. (2021). Effect of water stress on morphological traits, mucilage percentage and yield of *Alyssum homolocarpum*. *Desert*, 26(1), 99-113. <https://doi.org/10.22059/jdesert.2020.305751.1006787>.



Analysis of Canola (*Brassica napus* L.) Yield Limiting Factors in Miankaleh, Behshahr County, Using Comparative Performance Analysis (CPA)

Atieh Jafari¹, Afshin Soltani^{1*}, Ebrahim Zeinali¹ and Safoora Jafar Nodeh¹

1- Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (GUASNR), Gorgan, Iran

(*- Corresponding author's Email: Afshin.Soltani@gau.ac.ir, Afshin.Soltani@gmail.com)

Received: 01-02-2026 Revised: 28-02-2026 Accepted: 10-03-2026 Available Online: 04-04-2026	How to cite this article: Jafari, A., Soltani, A., Zeinali, E., & Jafar Nodeh, S. (2026). Analysis of canola yield limiting factors in Miankaleh, Behshahr County, using Comparative Performance Analysis (CPA). <i>Journal of Agroecology</i> , 18(1), 39-62. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.96208.1257
---	--

Introduction

The pressing need for global food security, particularly concerning strategic oilseeds like canola (*Brassica napus* L.), underscores the importance of increasing agricultural productivity. Mazandaran province, though a major producer, exhibits an average yield (1715 kg.ha^{-1}) even below the national figure, with Behshahr County being a critical area within the province for production. Closing the gap between actual and potential yield remains the most effective pathway to enhanced national oilseed production. This study was specifically undertaken to quantify the yield gap and precisely identify the key managerial constraints responsible for this shortfall in irrigated canola farms within the Miankaleh district of Behshahr County, Mazandaran Province, Iran.

Materials and Methods

The research employed the Comparative Performance Analysis (CPA) methodology across two consecutive cropping seasons (2021-2022 and 2022-2023). The study involved a comprehensive field survey and detailed interviews conducted on 100 canola farms in the Miankaleh region, characterized by a moderate and humid climate. Data collection covered farmer demographics, field characteristics, and intricate details of all agronomic management practices, including land preparation, variety selection, sowing date, fertilization (base and top-dressing), pest and weed control, irrigation, and final yield. The collected data allowed for a thorough analysis, which began with the development of a yield function using stepwise multiple regression. This statistical model linked various management variables (both quantitative and qualitative) directly to grain yield, enabling the estimation of the average observed yield and the attainable potential yield by substituting average and optimal managerial values into the final, predictive model.

Results and Discussion

The average yield achieved by the surveyed farmers was calculated at 2247 kg.ha^{-1} , whereas the estimated potential yield for the region stood at 4798 kg.ha^{-1} . This disparity resulted in a considerable total yield gap of



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

 <https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.96208.1257>

2551 kg.ha⁻¹. Importantly, the stepwise regression analysis successfully isolated and quantified the influence of six distinct managerial factors that collectively accounted for a substantial 89% of this observed yield gap, thereby providing clear targets for intervention. The single largest contributor to the yield loss was identified as the suboptimal management of plant nutrition. A detailed breakdown showed that the most significant individual constraint was the inadequate application of phosphorus (P) fertilizer, contributing a major 43 percent to the total yield gap. Following this, the insufficient or complete lack of amino acid supplements accounted for a further 16 percent reduction in yield, indicating a gap in adopting advanced nutritional practices. Additionally, a deficiency in sulfur (S) fertilizer usage contributed another 6 percent to the gap. Collectively, these nutritional deficiencies highlight that nutrient management is the dominant factor limiting current production. Beyond nutritional issues, pest control emerged as the second principal area of concern. Specifically, inadequate and untimely control of snails during the crucial early stages of the growing season was quantified as contributing a significant 22 percent to the total yield gap. Finally, poor weed management practices also played a role. This was reflected by the high frequency of herbicide application (11 percent contribution) and the need for supplementary hand weeding (1 percent contribution), both of which signal sub-optimal control strategies and increased weed competition that negatively impact yield.

Conclusion

The results unequivocally demonstrate that the most efficient pathway to closing the existing 2551 kg.ha⁻¹ yield gap lies in the optimization of the nutritional management program. Priority must be given to ensuring adequate and timely application of key fertilizers, particularly phosphorus and sulfur, alongside the integration of beneficial supplements such as amino acids. Furthermore, the establishment of an immediate and highly effective strategy for controlling early-season pests, especially snails, is crucial. By focusing resources and efforts on these specifically quantified managerial factors, a significant portion of the current yield shortfall can be practically addressed, leading to enhanced farm profitability and a vital step towards achieving national self-sufficiency in oilseed production.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere gratitude to the respected farmers of the Miankaleh region for their valuable cooperation in data collection. We also acknowledge the support from the faculty and staff at Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources for their guidance and assistance during this research project.

Keywords: Agronomic management, Food security, Mazandaran, Oilseeds, Plant nutrition

مقاله پژوهشی

جلد ۱۸، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص ۶۲-۳۹

بررسی عوامل محدودکننده عملکرد کلزا (*Brassica napus* L.) در میانکاله شهرستان بهشهر به روش آنالیز مقایسه کارکرد (CPA)

آتیه جعفری^۱، افشین سلطانی^{۱*}، ابراهیم زینلی^۱ و صفورا جعفر نوده^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۱۹

چکیده

کاهش خلأ عملکرد کلزا (*Brassica napus* L.) به عنوان یکی از راهکارهای کلیدی ارتقای امنیت غذایی و بهره‌وری پایدار کشاورزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از این پژوهش، تعیین میزان خلأ عملکرد و شناسایی مهم‌ترین عوامل مدیریتی محدودکننده آن در مزارع کلزای آبی منطقه میانکاله شهرستان بهشهر با استفاده از روش تحلیل مقایسه کارکرد (CPA) بود. این مطالعه طی دو سال زراعی (۱۴۰۰-۱۴۰۱ و ۱۴۰۱-۱۴۰۲) در ۱۰۰ مزرعه کلزا انجام شد و داده‌های مدیریتی و عملکرد از طریق پیمایش میدانی و مصاحبه جمع‌آوری گردید. نتایج نشان داد که میانگین عملکرد کشاورزان ۲۲۴۷ کیلوگرم در هکتار، درحالی‌که عملکرد پتانسیل ۴۷۹۸ کیلوگرم در هکتار برآورد شد؛ این امر بیانگر وجود خلأ عملکرد قابل توجه ۲۵۵۱ کیلوگرم در هکتار است. تحلیل رگرسیون گام‌به‌گام مشخص کرد که شش عامل مدیریتی، ۸۹ درصد از این خلأ عملکرد را تبیین کردند. بیشترین سهم در کاهش عملکرد مربوط به مدیریت نامناسب تغذیه، به‌ویژه کمبود مصرف کود فسفر (۴۳ درصد)، عدم استفاده از اسید آمینه (۱۶ درصد) و کمبود کود گوگرد (شش درصد) بود. پس از آن، مهار ناکافی حلزون در ابتدای فصل رشد (۲۲ درصد) سهم عمده‌ای در این شکاف داشت. همچنین مدیریت ضعیف علف‌های هرز که منجر به افزایش دفعات استفاده از علف‌کش (۱۱ درصد) و وجین دستی (۱ درصد) شده بود، تأثیر منفی رقابت علف‌های هرز را نشان داد. این نتایج تأکید می‌کند که با تمرکز بر مدیریت بهینه تغذیه (فسفر، گوگرد و اسید آمینه) و مهار به‌موقع آفات مانند حلزون، می‌توان بخش قابل توجهی از خلأ عملکرد موجود را کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: امنیت غذایی، تغذیه گیاهی، دانه‌های روغنی، مازندران، مدیریت زراعی

مقدمه

امروزه با توجه به رشد روزافزون جمعیت و افزایش تقاضا برای مواد غذایی، تأمین امنیت غذایی به یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی تبدیل شده است (Godfray et al., 2010; Yu et al., 2016). این امر مستلزم افزایش پایدار تولیدات کشاورزی، به‌ویژه محصولات راهبردی مانند دانه‌های روغنی است. در ایران، به‌دلیل

وابستگی به واردات روغن نباتی و کنجاله، تولید داخلی دانه‌های روغنی از اولویت‌های اصلی وزارت جهاد کشاورزی محسوب می‌شود (Eyni-Nargeseh et al., 2020). به همین دلیل در سال‌های اخیر تولید دانه‌های روغنی به‌ویژه کلزا (*Brassica napus* L.) در اولویت برنامه‌های وزارت جهاد کشاورزی قرار گرفته است. سطح زیرکشت، عملکرد و تولید کلزا در ایران در سال ۱۴۰۰ به‌ترتیب ۱۵۴ هزار هکتار، ۱۸۹۰ کیلوگرم در هکتار و ۲۹۱ هزار تن بوده است (Ministry of Jihad Agriculture, 2022). استان مازندران با سطح زیرکشت حدود ۸ هزار هکتار و تولید حدود ۱۶ هزار تن، پس از استان‌های خوزستان (سطح زیرکشت و تولید به‌ترتیب ۵۶ هزار هکتار و ۱۰۸ هزار تن) و گلستان (سطح زیرکشت و تولید به‌ترتیب ۴۵ هزار

۱- گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
*- نویسنده مسئول:

(Email: Afshin.Soltani@gmail.com, Afshin.Soltani@gau.ac.ir
<https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.96208.1257>

عملکرد کلزا در این استان کمتر از متوسط کشوری و حدود ۱۷۱۵ کیلوگرم در هکتار می‌باشد. شایان ذکر است که حدود یک سوم از سطح زیرکشت و تولید کلزا در استان مازندران مربوط به شهرستان بهشهر است (Ministry of Jihad Agriculture, 2022). نقش کلیدی محصولات روغنی مانند کلزا در تأمین امنیت غذایی کشور، ضرورت توجه به افزایش تولید داخلی را بیش از پیش نمایان می‌سازد. امنیت غذایی به معنای دسترسی همه افراد به غذای کافی، سالم و مغذی در تمام اوقات است. این دسترسی باید به گونه‌ای باشد که نیازهای جسمی، اجتماعی و اقتصادی افراد را تأمین کند و به آن‌ها امکان داشتن یک زندگی فعال و سالم را بدهد (FAO, 2002). رشد جمعیت و توسعه اقتصادی هر دو بر تقاضای مواد غذایی در سراسر جهان مؤثر هستند (Halloran et al., 2014). برای تأمین نیاز غذایی نه میلیارد نفر جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰، تولید غذا باید ۶۰ درصد افزایش یابد (Yu et al., 2016). به نظر می‌رسد که ادامه روش‌های کشت و کار معمولی قادر به پاسخگویی به این نیازهای رشد جمعیت نخواهد بود (Godfray et al., 2010). برای پاسخگویی به فشار فزاینده تقاضای جهانی غذا، بهبود عملکرد محصول ضروری است. یکی از مؤثرترین راه‌های افزایش تولید، شناسایی و کاهش خلأ عملکرد است که می‌تواند به افزایش قابل توجه تولید محصولات کشاورزی کمک کند. خلأ عملکرد به تفاوت میان عملکرد واقعی مزارع و عملکرد پتانسیل (حداکثر محصول قابل دستیابی در شرایط مدیریتی و منابع بهینه) گفته می‌شود (Lobell et al., 2009). با این حال، دستیابی به ۱۰۰ درصد پتانسیل عملکرد اغلب به دلیل افزایش نامتناسب مصرف نهاده‌ها و فشار زیست‌محیطی، از نظر اقتصادی و محیط زیستی بهینه نیست. بنابراین، هدف‌گذاری واقع‌بینانه بر دستیابی به حدود ۸۰ درصد پتانسیل عملکرد است که به عنوان عملکرد قابل دستیابی شناخته می‌شود و تعادلی میان بهره‌وری بالا، سود اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی برقرار می‌کند؛ اختلاف میان عملکرد واقعی و این عملکرد قابل دستیابی نیز خلأ قابل مدیریت نامیده می‌شود (Nehbandani & Soltani, 2018). تحلیل مقایسه کارکرد (CPA^۱) یکی از روش‌هایی است که برای کمی کردن خلأ عملکرد استفاده می‌شود. با استفاده از این روش، محدودیت‌های اصلی عملکرد و توابع کمی شده برای خلأ عملکرد تعیین می‌شوند. در روش CPA، با استفاده از رگرسیون چندگانه و با روش گام‌به‌گام

(Rezaei & Soltani, 1998)، محدودیت‌های عملکرد و در نهایت مدل تولید تعیین می‌شوند. با استفاده از مدل تولید و مقادیر پارامترهای مدل، سهم هر یک از محدودیت‌ها در ایجاد خلأ عملکرد مشخص می‌شود (De Bie, 2000). از این رو برای اجرای موفق روش CPA، مطالعه باید روی یک طبقه خاصی از کاربری زمین متمرکز باشد و نیز سامانه‌های کاربری زمین جهت مطالعات پیمایشی باید شامل دامنه متنوعی از فناوری‌ها (مدیریت‌ها) باشند (De Bie, 2000). چندین مطالعه خلأ عملکرد با استفاده از روش CPA در شمال ایران صورت گرفته است که از جمله می‌توان به نهبندانی و همکاران (Nehbandani et al., 2017)، ترابی و همکاران (Torabi et al., 2011)، حاجی‌پور و همکاران (Hajjarpoor et al., 2018) و نکاحی و همکاران (Nekahi et al., 2014) اشاره نمود. براساس اطلس خلأ عملکرد (Soltani et al., 2018)، متوسط عملکرد کلزای آبی در ایران ۱۷۹۸ کیلوگرم در هکتار با پتانسیل عملکرد ۵۰۷۳ کیلوگرم در هکتار است که نشان‌دهنده وجود خلأ عملکرد قابل مدیریت به میزان ۲۲۶۱ کیلوگرم در هکتار می‌باشد. رهبان و همکاران (Rahban et al., 2022)، عملکرد واقعی و پتانسیل کلزای آبی در مناطق اصلی کشت آن در کشور را بررسی کردند. نتایج نشان داد که عملکرد واقعی کلزای آبی در این مناطق بین ۱۱۸۴ تا ۲۳۵۸ کیلوگرم در هکتار است. عملکرد پتانسیل کلزای آبی نیز بین ۳۸۲۳ تا ۶۵۲۰ کیلوگرم در هکتار برآورد شد. بالاترین عملکرد پتانسیل در استان‌های همدان و لرستان و کم‌ترین آن مربوط به جلگه خوزستان بود. در این مطالعه، خلأ عملکرد کلزای آبی در این مناطق بین ۲۴۸۰ تا ۴۳۶۵ کیلوگرم در هکتار بود که معادل ۵۳ تا ۷۷ درصد است. برای کلزای دیم نیز که عمدتاً در شرق دریا خزر کشت می‌شود، متوسط عملکرد ۱۳۴۹ کیلوگرم در هکتار در مقایسه با پتانسیل آب‌محدود ۳۴۹۴ کیلوگرم در هکتار، بیانگر خلأ عملکرد قابل توجهی است. در این مناطق، به‌ویژه غرب استان گلستان، خلأ عملکرد قابل مدیریت در سطح بالایی قرار دارد که نشان‌دهنده پتانسیل زیاد برای افزایش تولید از طریق بهبود مدیریت زراعی است. در راستای شناسایی دلایل این خلأ عملکرد، مطالعات منطقه‌ای نتایج مشابهی ارائه داده‌اند. برای مثال، نجفی‌راد (Najafi Rad, 2014) در شهرستان علی‌آباد کتول (استان گلستان) با استفاده از روش CPA نشان داد که عدم آبیاری تکمیلی، مشکل علف‌های هرز و مدیریت نیتروژن به ترتیب ۶۱، ۲۱ و ۱۸ درصد از خلأ عملکرد کلزای آبی را تشکیل می‌دهند. همچنین

آبروان (Abravan, 2016) در شرق استان گلستان، مهم‌ترین دلایل خلأ عملکرد کلزای آبی را مدیریت نامناسب کود نیتروژن (۲۵ درصد) و گوگرد (۱۶ درصد) و پس از آن، مهار ضعیف علف‌های هرز و بیماری‌ها و مدیریت نامناسب بذر و تاریخ کاشت معرفی کرد. این یافته‌ها بر اهمیت مدیریت تغذیه، آب و آفات و علف‌های هرز در کاهش خلأ عملکرد کلزا در شمال کشور تأکید دارند. یحیی‌پور و همکاران (Yahyapoor et al., 2021) با استفاده از روش CPA به بررسی خلأ عملکرد کلزای آبی در شهرستان نکا پرداختند. نتایج نشان داد که میانگین و حداکثر عملکرد کلزا به ترتیب ۲۵۳۶ و ۴۲۶۵ کیلوگرم در هکتار با خلأ عملکرد ۱۷۲۹ کیلوگرم در هکتار بود. این خلأ عملکرد مربوط به مصرف بذر، تاریخ کاشت، آیش و کشت پوششی برنج برابر با ۱۲۴، ۱۰۱، ۲۴۲ و ۲۴۵ کیلوگرم در هکتار بود. متوریان و همکاران (Matourian et al., 2022) به بررسی خلأ عملکرد کلزای آبی با استفاده از روش CPA در منطقه خرمشهر پرداختند. در این مطالعه، میانگین عملکرد واقعی در سطح مزارع، عملکرد قابل حصول و خلأ عملکرد کلزا به ترتیب ۱۶۶۳، ۳۱۹۷ و ۱۵۳۳ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. خلأ عملکرد کلزا در این پژوهش ۴۸ درصد بود که نشان‌دهنده تأثیرپذیری بالا نسبت به استفاده از روش‌های مدیریتی مطلوب بود. متغیرهای مؤثر در خلأ عملکرد کلزا، استفاده از دستگاه لولر جهت تسطیح اراضی، میزان تحسیلات کشاورزان، کاربرد کود فسفر، تاریخ مصرف کود پتاسیم، میزان مصرف کود پتاسیم و روش حذف بقایای کشت سال قبل بود که در مجموع ۸۹/۲۷ درصد از کل خلأ عملکرد کلزا در سطح مزارع شهرستان خرمشهر را ایجاد کردند. دستان و همکاران (Dastan et al., 2019)، خلأ عملکرد مرتبط با مدیریت زراعی در تولید کلزا را به روش تحلیل مقایسه کارکرد در منطقه نکا ارزیابی کردند. در این مطالعه عملکرد واقعی و پتانسیل عملکرد به ترتیب ۲۳۹۴ و ۴۱۱۹ کیلوگرم در هکتار برآورد شد. متغیرهای مصرف کود سرک و پتاسیم خالص به ترتیب با ۲۷ و ۱۷ درصد، مهم‌ترین عوامل ایجادکننده خلأ عملکرد بودند.

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که مطالعات خلأ عملکرد کلزا در استان مازندران عمدتاً در شهرستان‌های نکا و مناطق دیگر صورت گرفته است. با توجه به اینکه شهرستان بهشهر به عنوان یکی از مهم‌ترین مناطق کشت کلزا در استان مازندران شناخته می‌شود، اما تاکنون مطالعه جامعی با استفاده از روش تحلیل مقایسه کارکرد (CPA) برای شناسایی عوامل محدودکننده عملکرد در این منطقه انجام نشده است. این پژوهش با هدف شناسایی و کمی کردن عوامل مؤثر بر شکاف عملکرد کلزا در اراضی آبی شهرستان بهشهر، تخمین سهم هر یک از عوامل مدیریتی و زراعی در ایجاد این خلأ عملکرد و در نهایت ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب برای افزایش بهره‌وری تولید کلزا در سال‌های زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ و ۱۴۰۲-۱۴۰۱ در این منطقه در صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

شهرستان بهشهر یکی از شهرهای استان مازندران است. این شهرستان از سمت شمال به خلیج میانکاله، از سمت شرق به شهرستان گلوگاه، از سمت غرب به شهرستان نکا و در نهایت از سمت جنوب به دامنه‌های البرز منتهی می‌شود. دهستان میانکاله در شمال استان مازندران و در ۱۲ کیلومتری شمال شهر بهشهر واقع

مرور مطالعات داخلی و بین‌المللی نشان می‌دهد که هرچند مدیریت نامناسب تغذیه، به‌ویژه کمبود فسفر، در بسیاری از مناطق به عنوان یکی از عوامل اصلی خلأ عملکرد کلزا شناخته می‌شود، اما شدت و ترکیب این محدودیت‌ها وابسته به شرایط منطقه‌ای است. در ایران، مطالعه CPA در خرمشهر نشان داد که بیش از ۵۰ درصد خلأ عملکرد ناشی از مصرف ناکافی فسفر بوده است (Matourian et al., 2022).

در حالی که در استان گلستان و دهلران علاوه بر فسفر، مدیریت گوگرد، پتاسیم و نیتروژن نیز نقش تعیین‌کننده‌ای داشته‌اند (Dastan et al., 2019; Abravan, 2016; et al., 2019). در چین نیز سهم فسفر در پاسخ عملکرد ۲۳/۱ درصد و نیتروژن ۴۰/۴ درصد گزارش شده است (Zhang et al., 2017). در مقابل، برخی مطالعات شمال ایران بیانگر آن است که عواملی نظیر تاریخ کاشت، میزان بذر، تناوب و زمان‌بندی مصرف نیتروژن نیز سهم بالایی در ایجاد شکاف عملکرد دارند و فسفر همواره عامل غالب نیست (Torabi et al., 2011; Nehbandani et al., 2017). همچنین در سطح جهانی، کمبود گوگرد در خاک‌های پارکلند کانادا (Malhi & Leach, 2000) و برهم‌کنش آب و نیتروژن در اروپا و استرالیا (Hoffmann et al., 2015) به عنوان قیود اصلی تولید معرفی شده‌اند. در مجموع، اگرچه محدودیت‌های تغذیه‌ای وجه مشترک بسیاری از مطالعات هستند، اما تنوع عوامل محدودکننده در مناطق مختلف، ضرورت بررسی منطقه‌ای و تحلیل اختصاصی خلأ عملکرد، از جمله در بهشهر را برجسته می‌سازد.

شده است و اقلیمی معتدل و مرطوب دارد و به‌دلیل مجاورت با دریای خزر و قرارگیری در منطقه‌ای جلگه‌ای، آب‌وهوای ملایم و رطوبت نسبتاً بالایی دارد. میانگین ارتفاع آن حدود ۳۰ متر پایین‌تر از سطح دریاهای آزاد است. مهم‌ترین مؤلفه‌های آب‌وهوایی در طی دوره نمو و رشد گیاه کلزا در منطقه نیز در **جدول ۱** ارائه شده است. آمار هواشناسی فصل رشد کلزا در سال‌های زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ و ۱۴۰۲-۱۴۰۱ در **جدول ۱** ارائه شده است.

طبق داده‌های هواشناسی، میانگین بارندگی در این دو سال کمتر از میانگین بلندمدت ۱۵ ساله منطقه بوده است. علاوه‌بر توصیف کلی

اقلیم، شرایط محیطی به‌عنوان عوامل پس‌زمینه‌ای بر عملکرد بالقوه و خالص عملکرد تأثیر می‌گذارند و می‌توانند بخشی از تغییرات سالانه عملکرد کشاورزان را توضیح دهند. مطالعات مدل‌سازی خالص عملکرد در ایران نیز نشان داده‌اند که انحراف از میانگین بلندمدت بارش و دما باید در تفسیر تفاوت‌های عملکرد ناشی از مدیریت در نظر گرفته شود، زیرا فشارهای اقلیمی می‌توانند تحقق عملکرد بالقوه را حتی تحت مدیریت بهینه محدود کنند (Soltani et al., 2010). مقایسه بارش فصلی با میانگین ۱۵ ساله، زمینه لازم برای تفسیر بزرگی خالص عملکرد را فراهم می‌کند.

جدول ۱- میانگین مؤلفه‌های آب‌وهوایی در فصل رشد کلزا (مهر تا خرداد) در مقایسه با میانگین آمار بلندمدت ۱۵ ساله (۱۴۰۲-۱۳۸۸)

Table 1- Average weather components in the rapeseed growing season (October to June) compared to the 15-year long-term average (2009-2023)

ماه Month	سال Year	دمای کمینه Min. temp. (°C)	دمای بیشینه Max. temp. (°C)	تبخیر و تعرق Evapotranspiration (mm)	بارندگی Precipitation (mm)	رطوبت نسبی Mean humidity (%)	ساعات آفتابی (ساعت در فصل) Sunshines (hours per season)
آبان October	۱۳۹۹-۱۴۰۰ 2020-2021	16.4	24.6	67.7	99.2	78	146.4
	۱۴۰۰-۱۴۰۱ 2021-2022	19.8	28.4	98.9	29.1	78	183.5
آذر November	۱۳۹۹-۱۴۰۰ 2020-2021	9	18.2	30.3	121.4	81	161.6
	۱۴۰۰-۱۴۰۱ 2021-2022	11.8	20.8	33	78.8	81	176.1
دی December	۱۳۹۹-۱۴۰۰ 2020-2021	7.8	17.7	24.4	34.9	82	155.4
	۱۴۰۰-۱۴۰۱ 2021-2022	7.7	15.9	19	37.7	82	109.7
بهمن January	۱۳۹۹-۱۴۰۰ 2020-2021	4.8	14.2	15.3	103.8	83	153.7
	۱۴۰۰-۱۴۰۱ 2021-2022	2.2	12.6	13.7	16	77	167.9
اسفند February	۱۳۹۹-۱۴۰۰ 2020-2021	4.2	13.9	20.5	67.8	81	159.9
	۱۴۰۰-۱۴۰۱ 2021-2022	2.5	12.6	15.7	62.6	79	166.7
فروردین March	۱۳۹۹-۱۴۰۰ 2020-2021	8.2	15.1	45.8	49	79	118.7
	۱۴۰۰-۱۴۰۱ 2021-2022	7.6	17.1	41.9	106	81	128.3
اردیبهشت April	۱۳۹۹-۱۴۰۰ 2020-2021	10.5	18.6	98.5	18	78	176.7
	۱۴۰۰-۱۴۰۱ 2021-2022	23.2	31.4	226.5	1.2	73	316.3
خرداد May	۱۳۹۹-۱۴۰۰ 2020-2021	15.4	22.4	125	27.2	80	172.2

	۱۴۰۰-۱۴۰۱	15.2	23.5	127.8	41.4	78	246.7
	2021-2022						
تبر	۱۳۹۹-۱۴۰۰	19.5	27.6	175.7	1.4	74	332.7
June	2020-2021						
	۱۴۰۰-۱۴۰۱	20.6	25.6	240	6.33	75	262.3
	2021-2022						
میانگین ۱۵ ساله	۱۳۸۸-۱۴۰۲	14.1	21.83	85.11	52.63	79.2	197.29
15-year Average	2009-2023						

تحلیل داده‌ها

به‌منظور مستندسازی شیوه‌های مدیریتی کشاورزان، از آمار توصیفی و توزیع فراوانی برای هر یک از عملیات زراعی استفاده شد تا دامنه تغییرات و نسبت کشاورزانی که از هر شیوه استفاده کرده‌اند، مشخص شود. برای ارزیابی دلایل خلأ عملکرد از روش تحلیل مقایسه کارکرد (Comparative Performance Analysis - CPA) استفاده شد (De Bie, 2000). این روش یک ابزار کمی برای مقایسه عملکرد کشاورزان مختلف و استخراج عوامل محدودکننده عملکرد است (Soltani, 2007). اساس این روش بر این فرض استوار است که با مقایسه کارکرد مزارع تحت مدیریت‌های متنوع، می‌توان عوامل کلیدی مؤثر بر عملکرد را شناسایی کرد. این رویکرد پیش از این برای تحلیل عملکرد محصولاتی چون گندم در ایران با موفقیت به کار رفته است (Hajjarpoor et al., 2018). فرآیند تحلیل شامل ایجاد یک تابع عملکرد با استفاده از رگرسیون گام‌به‌گام (Stepwise regression) برای تعیین رابطه بین متغیرهای مدیریتی (کمی و کیفی) و عملکرد دانه بود. متغیرهای کیفی به‌صورت صفر و یک کدگذاری شدند. برای افزایش پایداری مدل و قابلیت تکرار، روش رگرسیون گام‌به‌گام با استفاده از انتخاب روبه‌جلو به‌طور دقیق تعریف شد، به‌طوری‌که هر متغیر زمانی وارد مدل شد که سطح معناداری آن کمتر از ۰/۰۵ بود و در صورت افزایش آن به بالای ۰/۱۰، از مدل حذف گردید. این روش نیمه‌خودکار هم‌زمان چندهم‌خطی و بیش‌برازش را کاهش می‌دهد و امکان شناسایی مؤثرترین عوامل مدیریتی را فراهم می‌کند. ابتدا عملکرد واقعی هر متغیر براساس داده‌های مشاهده‌شده و عملکرد پتانسیل آن براساس مدل رگرسیون تخمین زده شد تا نشان دهد که هر متغیر در شرایط بهینه مدیریتی چه مقدار می‌توانست داشته باشد. تفاوت بین عملکرد پتانسیل و واقعی برای هر متغیر به‌عنوان خلأ عملکرد محاسبه شد و سهم درصدی هر عامل در کل خلأ عملکرد مشخص گردید، به‌طوری‌که سهم هر متغیر نشان‌دهنده نقش آن در محدود کردن عملکرد کل بود. به‌عنوان مثال،

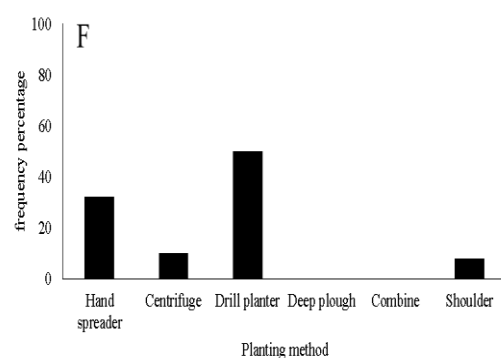
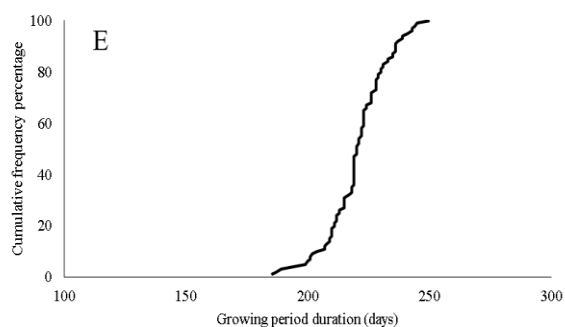
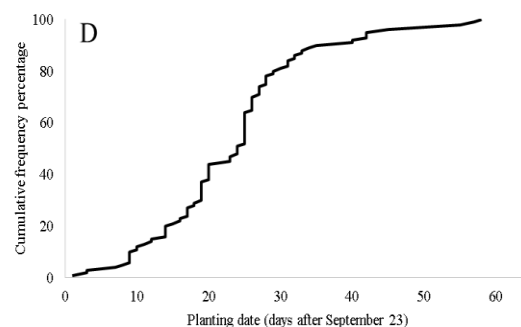
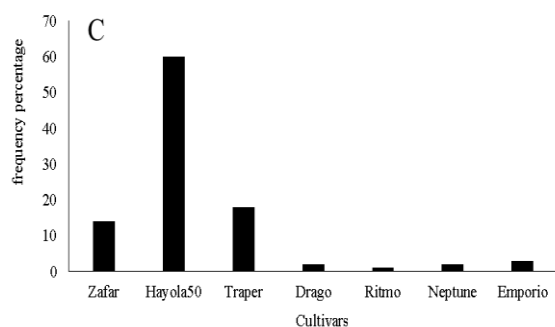
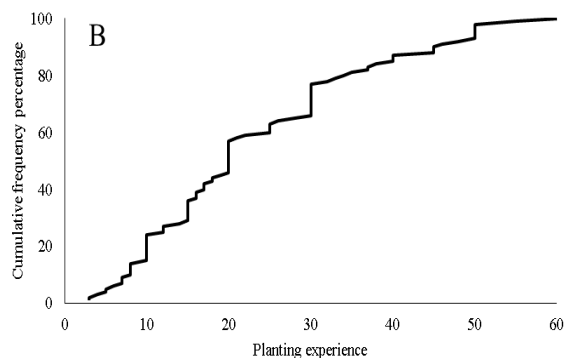
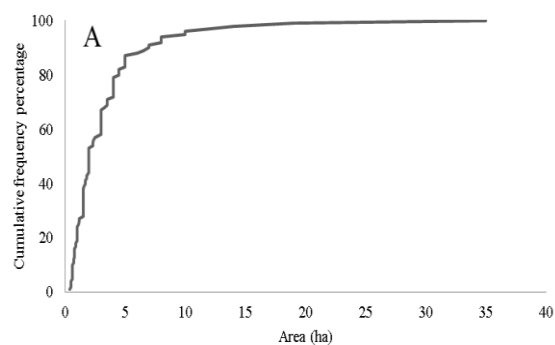
اگر عملکرد واقعی یک مزرعه کمتر از عملکرد پتانسیل باشد، اختلاف آن نشان‌دهنده بخشی از خلأ عملکرد است و سهم درصدی آن نسبت به مجموع خلأهای تمام عوامل بیانگر اهمیت نسبی آن در محدود کردن عملکرد است. براساس نتایج CPA، عوامل محدودکننده عملکرد رتبه‌بندی شدند و سهم درصدی آن‌ها در کل خلأ عملکرد ارائه شد، که امکان اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی برای کاهش خلأ عملکرد را تسهیل می‌کند. این رتبه‌بندی کمی با مطالعات پیشین مدل‌سازی خلأ عملکرد که بر تسلط مدیریت ورودی‌ها در توضیح تغییرات بین مزارع تأکید کرده‌اند، همسو است (Soltani et al., 2010; Hajjarpoor et al., 2018). پس از انتخاب متغیرهای نهایی و تشکیل مدل، با قرار دادن مقادیر میانگین مشاهده‌شده از هر متغیر در مزارع، عملکرد متوسط (عملکرد واقعی) محاسبه شد. سپس، با جای‌گذاری مقادیر بهینه (بهترین سطح مشاهده‌شده برای هر متغیر در بین مزارع)، عملکرد پتانسیل برآورد گردید. تفاوت بین این دو سطح عملکرد به‌عنوان خلأ عملکرد کل در نظر گرفته شد. سهم هر عامل مدیریتی در ایجاد این خلأ، از طریق محاسبه تفاوت بین تأثیر مقدار میانگین و مقدار بهینه آن متغیر در مدل مشخص شد (Torabi et al., 2011). کلیه تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۲) و رویه‌های توصیه‌شده (Soltani, 2007) و ترسیم نمودارها با نرم‌افزار Excel انجام شد.

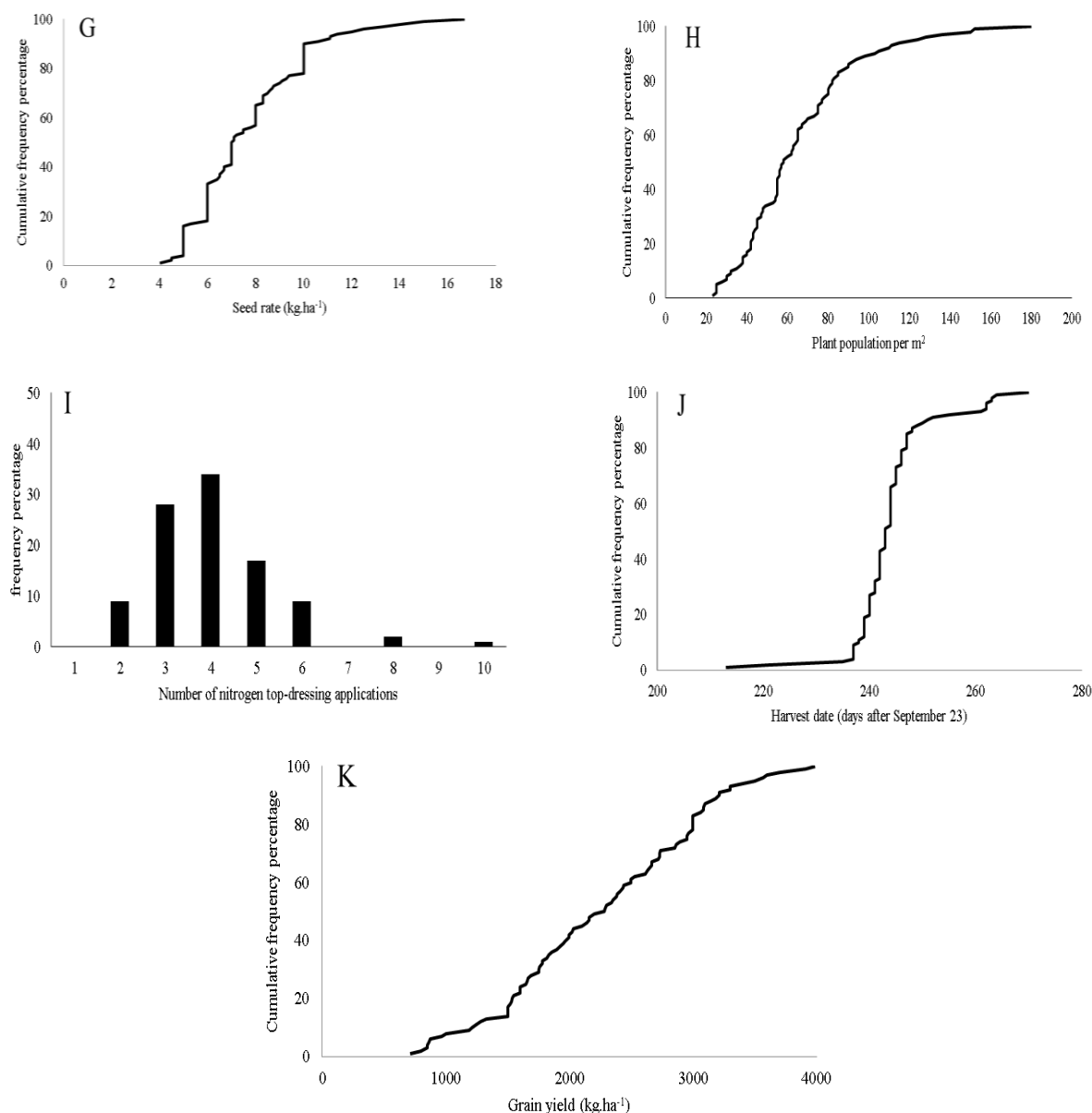
نتایج و بحث

در بررسی مزارع کلزا دهستان میانکاله دامنه، مساحت مزارع بین ۳۰۰۰ مترمربع تا ۱۴۰۰۰۰ مترمربع در نوسان بود و ۸۲ درصد از مزارع مساحت دو هکتار یا کمتر داشتند (شکل ۱). سابقه کشاورزان در تولید کلزا بین ۳ تا ۶۰ سال متغیر بود و ۴۲ درصد از کشاورزان سابقه تولید ۲۰ سال به بالا داشتند (شکل ۱). نود و سه درصد از مزارع مورد بررسی از بذر گواهی‌شده و ۷ درصد از بذر خودمصرفی استفاده کرده

ریتمو، نپتون و امپریو مورد کشت قرار گرفتند. رقم ظفر با ۶۰ درصد بیشترین سطح زیرکشت و رقم ریتمو با یک درصد کمترین سطح زیرکشت را داشتند (شکل ۱).

بودند. در ۹۳ درصد مزارع، از سه قارچ‌کش کربوکسین تیرام داخلی، کربوکسین تیرام خارجی و توبوکونازول جهت ضدعفونی بذور استفاده شد. در این مزارع، هفت نوع رقم شامل ظفر، هایولا ۵۰، تراپر، دراگو،





شکل ۱- توزیع‌های فراوانی (تجمعی و عادی) شاخص‌های زراعی کلزا در دهستان میانکاله، شهرستان بهشهر (شامل A: مساحت زمین، B: سابقه کاشت، C: ارقام، D: تاریخ کاشت، E: طول دوره رشد، F: روش کاشت، G: مقدار بذر، H: تراکم بوته، I: میزان مصرف کود سرک نیتروژن، J: تاریخ برداشت و K: عملکرد دانه)

Fig. 1- Frequency distributions (cumulative and normal) for canola agronomic indicators in Miankaleh Dehestan, Behshahr county (including A: field size, B: farmer's experience, C: cultivars, D: sowing date, E: growth period duration, F: sowing methods, G: seed rate, H: plant population, I: nitrogen top-dressing, J: harvest date and K: yield)

(ترویج)، کشت در زمان مناسبی انجام شد. شرایط آب‌وهوایی سال انجام پژوهش، نوع محصول قبلی کشت‌شده و زمان برداشت آن، نحوه آماده‌سازی زمین و رطوبت مزرعه از دلایل تفاوت در تاریخ کاشت بودند (شکل ۱). طول دوره رشد از ۱۸۵ روز تا ۲۵۰ روز متغیر بود و ۵۳ درصد از مزارع، طول دوره رشدشان در محدوده ۲۲۰ تا ۲۵۰

کشاورزان دهستان میانکاله در فاصله زمانی بین ۱ مهر تا ۲۸ آبان (۱ تا ۵۸ روز پس از مهرماه) اقدام به کشت کلزا نمودند. با اینکه تاریخ کاشت زود هنگام و دیر هنگام در مزارع وجود داشت، اما ۷۶ درصد از مزارع در محدوده ۱۵ تا ۴۵ روز پس از اول مهر (۱۵ مهر تا ۱۵ آبان) کشت شدند و با توجه به تاریخ کاشت توصیه‌شده در منطقه

روز بود (شکل ۱). ۳۲ درصد از مزارع به‌روش دست‌پاش، ۵۰ درصد با استفاده از خطی‌کار، ۱۰ درصد با استفاده از دستگاه ساترینفوژ و هشت درصد با استفاده از کودپاش دوشی کشت شدند (شکل ۱). میزان بذر مصرفی از ۴ تا ۱۶/۷ کیلوگرم در هکتار متغیر بود. میزان بذر توصیه‌شده چهار تا پنج کیلوگرم در هکتار است که تنها در ۱۷ درصد از مزارع، کشاورزان از میزان توصیه‌شده استفاده کردند و سایر مزارع، میزان بالاتری از میزان توصیه‌شده استفاده کردند. دلایل استفاده از میزان بیشتر بذر در یک مزرعه می‌تواند به‌دلیل تنظیم نبودن ادوات کاشت و یا تمایل کشاورزان به داشتن مزارع پرتراکم‌تر باشد، به عبارتی، کشاورزان جهت اطمینان خاطر از سبز شدن یکنواخت مزارع خود ترجیح می‌دهند که از بذر بیشتری در هکتار استفاده کنند (شکل ۱). میزان تراکم بوته در مزارع کلزا از ۲۳ تا ۱۸۰ بوته در مترمربع متغیر بوده و ۱۰ درصد از مزارع تراکم بوته بین ۱۰۳ تا ۱۸۰ بوته در مترمربع داشتند (شکل ۱). در ۸۴ درصد از مزارع کود پایه استفاده شد و در ۱۰۰ درصد از مزارع کود سرک (اوره) مصرف گردید. تعداد دفعات کود سرک مصرفی از ۲ بار تا ۱۰ بار متغیر بوده و در ۳۴ درصد

از مزارع حداقل چهار بار کودپاشی سرک انجام شد (شکل ۱). برداشت مزارع از ۳ اردیبهشت ماه شروع و تا ۲۹ خرداد ماه به‌طول انجامید (۲۱۳ تا ۲۷۰ روز پس از اول مهر ماه). ۸۵ درصد مزارع در محدوده زمانی ۲۷ اردیبهشت تا ۹ خرداد ماه (۲۳۷ تا ۲۵۰ روز پس از اول مهر ماه) برداشت شدند (شکل ۱). درصد فراوانی تجمعی عملکردها در شکل ۱ نشان داده شده است. بر این اساس، کمترین عملکرد ۷۱۳ کیلوگرم در هکتار و بیشترین عملکرد ۳۹۸۵ کیلوگرم در هکتار بود. پس از بررسی توصیفی مزارع، به‌منظور شناسایی عوامل مدیریتی تأثیرگذار بر عملکرد دانه کلزا، تأثیر متغیرهای مختلف ارزیابی شد. در این راستا، ابتدا میزان معنی‌داری و تأثیرگذاری فاکتورهای مختلف مدیریتی بر عملکرد کلزا با استفاده از آنالیز واریانس بررسی شد که نتایج آن در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است. از میان پارامترهای مختلف کمی مورد بررسی؛ سن کشاورز، مقدار فسفر سرک، دفعات دفع حلزون، تعداد دفعات علف‌کش، تعداد وجین و نمره مشکل علف‌هرز براساس تجزیه رگرسیون ساده خطی، تأثیر معنی‌داری بر عملکرد کلزا داشتند (جدول ۲).

جدول ۲- بررسی معنی‌داری متغیرهای کمی مورد مطالعه بر عملکرد کلزا

Table 2- Study of the significance of the studied (quantitative) variables on canola yield

متغیر Variable	a±se	b±se	R ²	معنی‌داری Pr>F
سن (سال) Age (year)	2860.01±297.63	-13.28±6.3	0.0428	0.0389 *
سابقه تولید (سال) Production experience (year)	2450.87±152.17	-8.32±5.64	0.0217	0.1433 Ns
سابقه تولید کلزا (سال) Canola production experience (year)	2323.1±115.34	-8.62±11.19	0.006	0.4427 Ns
مساحت کل (هکتار) Total canola area (ha)	2366.62±98.18	-31.9±17.73	0.032	0.0751 Ns
آخرین سال از کشت بقولات (سال) Last year of legume cultivation (year)	2288.64±88.53	-24.79±33.13	0.0057	0.4562 Ns
بقایای محصول قبلی (درصد) Previous crop residue (%)	2550.5±316.21	-161.66±169.26	0.0092	0.3419 Ns
مشکل زهکش (نمره) Drainage problem (score)	2282.19±82.68	-202.4±220.97	0.0085	0.3619 Ns
مشکل آب‌گرفتگی (نمره) Waterlogging problem (score)	2274.48±83.34	-127.5±215.19	0.0036	0.5549 Ns
تعداد شخم (تعداد) Plowing count (count)	2158.83±163.49	79.26±114.75	0.0048	0.4914 Ns
تعداد دیسک (تعداد) Disk count (count)	2192.13±217.09	25.3±77.83	0.0011	0.7458 Ns

مقدار بذر (کیلوگرم در هکتار) Seed rate(kg.ha ⁻¹)	1938.12±263.9	41.35±32.6	0.0162	0.2076	Ns
عمق کاشت (سانتی متر) Sowing depth (cm)	2160.58±195.75	43.45±80.05	0.003	0.5885	Ns
تاریخ کاشت به روز (روز از اول مهر) Sowing date (days after September 23)	2068.01±185.8	8.07±7.17	0.0128	0.2627	Ns
مقدار نیتروژن خالص پایه (کیلوگرم در هکتار) Base N (kg.ha ⁻¹)	2277.41±98.2	-1.58±4.75	0.0011	0.7411	Ns
مقدار کود پتاس خالص پایه (کیلوگرم در هکتار) Base K (kg.ha ⁻¹)	2195.92±95.96	4.49±4.03	0.0125	0.2683	Ns
مقدار فسفر پایه (کیلوگرم در هکتار) Base P (kg.ha ⁻¹)	2298.24±121.35	-1.58±3.63	0.0019	0.6637	Ns
مقدار کود خالص گوگرد پایه (کیلوگرم در هکتار) Base S (kg.ha ⁻¹)	2238.72±91.44	0.78±1.91	0.0017	0.6826	Ns
مقدار منیزیم پایه (کیلوگرم در هکتار) Base Mg (kg.ha ⁻¹)	2263.66±80.84	-10.61±34.73	0.001	0.7607	Ns
مقدار آهن پایه (کیلوگرم در هکتار) Base Fe (kg.ha ⁻¹)	2250.41±78.68	1070.84±1123.99	0.0092	0.3431	Ns
مقدار منگنز پایه (کیلوگرم در هکتار) Base Mn (kg.ha ⁻¹)	2250.41±78.68	1873.98±1966.98	0.0092	0.3431	Ns
مقدار روی پایه (کیلوگرم در هکتار) Base Zn (kg.ha ⁻¹)	2248.79±78.59	79.23±71.37	0.0124	0.2696	Ns
مقدار اسیدهیومیک (کیلوگرم در هکتار) Humic acid amount (kg.ha ⁻¹)	2266.08±79.23	-8.03±10.99	0.0054	0.4667	Ns
تعداد کود سرک (تعداد) Top-dress count (count)	2385.95±249.46	-32.01±59.19	0.003	0.5899	Ns
مقدار نیتروژن خالص سرک (کیلوگرم در هکتار) Top-dress N(kg.ha ⁻¹)	2018.48±211.5	1.2±0.99	0.0149	0.2261	Ns
مقدار فسفر سرک (کیلوگرم در هکتار) Top-dress P(kg.ha ⁻¹)	2234.21±77.59	408.61±188.19	0.0459	0.0323	*
مقدار پتاس خالص سرک (کیلوگرم در هکتار) Top-dress K (kg.ha ⁻¹)	2247.8±81.52	3.47±7.49	0.0022	0.6439	Ns
مقدار گوگرد سرک (کیلوگرم در هکتار) Top-dress S (kg.ha ⁻¹)	2217.04±82.5	20.4±13.74	0.022	0.1408	Ns
تعداد اسیدهیومیک (تعداد) Humic acid count (count)	2191.94±90.48	115.72±80.93	0.0204	0.1559	Ns
مقدار اسیدهیومیک (کیلوگرم در هکتار) Humic acid amount (kg.ha ⁻¹)	2238.75±81.69	5.97±7.19	0.007	0.4079	Ns
تعداد اسیدفولویک (تعداد) Fulvic acid count (count)	2260.16±79.01	-225.16±790.1	0.0008	0.7763	Ns
مقدار اسیدفولویک (کیلوگرم در هکتار) Fulvic acid amount (kg.ha ⁻¹)	2260.16±79.01	-450.31±1580.2	0.0008	0.7763	Ns
تعداد تقویتی (تعداد) Booster count (count)	2288.39±89.48	-56.45±79.72	0.0051	0.4805	Ns
مقدار کود تقویتی (کیلوگرم در هکتار) Booster amount (kg.ha ⁻¹)	2265.37±85.35	-7.73±34.37	0.0005	0.8225	Ns

تعداد اسید آمینه (تعداد)	2227.83±82.85	180.08±164.43	0.0121	0.2761	Ns
Amino acid count (count)					
مقدار کود مرغی (تن در هکتار)	2229.3±81.77	0.14±0.12	0.014	0.2411	Ns
Poultry manure amount (t.ha ⁻¹)					
مقدار کود دامی (تن در هکتار)	2243.64±81.15	0±0.01	0.0048	0.4931	Ns
Animal manure amount (t.ha ⁻¹)					
تعداد دفعات آفت کش (تعداد)	2209.62±89.67	112.29±102.19	0.0122	0.2745	Ns
Pesticide count (count)					
دفعات دفع حلزون (تعداد)	2180.04±80.08	278.08±95.72	0.0793	0.0045	**
Snail control count (count)					
تعداد دفعات علف کش (تعداد)	2568.71±135.7	-248.64±90.06	0.0722	0.0069	**
Herbicide count (count)					
تعداد دفعات قارچ کش (تعداد)	2300.67±99.42	-99.45±142.03	0.005	0.4855	Ns
Fungicide count (count)					
تعداد وجین (تعداد)	2438.01±86.62	-353.14±90.8	0.1337	0.0002	**
Hand weeding count (count)					
تراکم بوته کلزا در مترمربع (بوته در مترمربع)	2167.96±191.44	1.38±2.68	0.0027	0.6076	Ns
Plant density (plants m ⁻²)					
تراکم علف هرز در مترمربع (بوته در مترمربع)	2315.49±85.17	-3.11±1.89	0.0267	0.1044	Ns
Weed density (plants m ⁻²)					
تاریخ برداشت (روز از اول مهر)	3756.22±2509.6	-6.14±10.28	0.0036	0.5517	Ns
Harvest date (days after September 23)					
مشکل ورس (نمره)	1675.28±321.77	554.89±297.48	0.0343	0.0651	Ns
Lodging problem (score)					
مشکل آفات (نمره)	1857.89±801.17	396.06±789.42	0.0026	0.617	Ns
Pest problem (score)					
نمره مشکل بیماری (نمره)	2439.9±205.4	-166.97±174.22	0.0093	0.3402	Ns
Disease problem score (score)					
نمره مشکل علف هرز (نمره)	2913.35±127.23	-334.41±55.16	0.2728	0	**
Weed problem score (score)					

ns و *، ** به ترتیب نشان دهنده معنی داری در سطوح ۱ درصد، ۵ درصد و عدم معنی داری هستند.

ns, *, ** and ns are significant at 1%, 5%, and non-significant, respectively.

جدول ۳- بررسی معنی داری متغیرهای کیفی مورد مطالعه بر عملکرد کلزا

Table 3- Significant study of the studied (qualitative) variables on rapeseed yield

متغیر	درجه آزادی	میانگین مربعات	معنی داری
Variable	df	Mean of squares	Pr>F
کشت تابستانه قبلی: آیش	1	7221915	0.0004 **
Previous summer: Fallow			
کشت تابستانه قبلی: کنجد	1	575154	0.335 Ns
Previous summer: Sesame			
کشت تابستانه قبلی: پنبه	1	1434083	0.1265 Ns
Previous summer: Cotton			
کشت تابستانه قبلی: برنج	1	5659569	0.002 **
Previous summer: Rice			
کشت تابستانه قبلی: آفتابگردان	1	1096931	0.1821 Ns
Previous summer: Sunflower			

کشت تابستانه قبلی: گوجه‌فرنگی Previous summer: Tomato	1	231851	0.541 Ns
کشت تابستانه قبلی: سویا Previous summer: Soybean	1	178951	0.5913 Ns
کشت تابستانه قبلی: هندوانه Previous summer: Watermelon	1	168224	0.6027 Ns
کشت پاییزه قبلی: گندم Previous fall: Wheat	1	6538425	0.0008 **
کشت پاییزه قبلی: کلزا Previous fall: Canola	1	1011332	0.2003 Ns
کشت پاییزه قبلی: آیش Previous fall: Fallow	1	1974547	0.0723 Ns
کشت پاییزه قبلی: آفتابگردان Previous fall: Sunflower	1	2037124	0.0679 Ns
کشت پاییزه قبلی: شبدر Previous fall: Clover	1	18433	0.8633 Ns
کشت پاییزه قبلی: جو Previous fall: Barley	1	437211	0.4008 Ns
کشت پاییزه قبلی: باقلا Previous fall: Faba bean	1	205203	0.5653 Ns
شخم: انجام شده/نشده Plowing: Yes/No	1	20294	0.8566 Ns
دیسک: انجام شده/نشده Disk: Yes/No	1	74916	0.7284 Ns
تسطیح: انجام شده/نشده Leveling: Yes/No	1	1754636	0.0906 Ns
ماله‌کشی: انجام شده/نشده Harrowing: Yes/No	1	5393636	0.0026 **
ضدعفونی: انجام شده/نشده Seed treatment: Yes/No	1	326688	0.4679 Ns
استفاده از کربوکسین تیرام داخلی Use of Carboxin Thiram - Domestic	1	584482	0.3311 Ns
استفاده از کربوکسین تیرام خارجی Use of Carboxin Thiram - Foreign	1	3953019	0.0103 *
استفاده از تبوکونازول Use of Tebuconazole	1	612653	0.3196 Ns
رقم کشت‌شده: ظفر Cultivar: Zafar	1	1480625	0.1205 Ns
رقم کشت‌شده: هایولا ۵۰ Cultivar: Hayola 50	1	9520	0.9015 Ns
رقم کشت‌شده: تراپر Cultivar: Trapper	1	1998880	0.0706 Ns
رقم کشت‌شده: دراگو Cultivar: Drago	1	50886	0.7748 Ns
رقم کشت‌شده: ریتمو Cultivar: Ritmo	1	198146	0.5721 Ns

رقم کشت شده: نپتون Cultivar: Neptune	1	1169658	0.1681 Ns
رقم کشت شده: امپریو Cultivar: Imperio	1	816343	0.2502 Ns
بذر مال: انجام شده/نشده Seed coating: Yes/No	1	411446	0.4151 Ns
نوع بذر: گواهی شده/خودمصرفی Seed type: Certified/Self-consumed	1	1325336	0.1421 Ns
استفاده از: بذر گواهی شده سوناسی Use of: Sonasi certified seed	1	533267	0.3533 Ns
استفاده از خطی کار Use of row planter	1	4310233	0.0073 **
استفاده از سانتریفوژ Use of centrifuge	1	383471	0.4315 Ns
روش کشت: دست پاش Sowing method: Hand broadcasting	1	2171211	0.0593 Ns
استفاده از کود پایه Use of base fertilizer	1	3175621	0.022 *
استفاده از کود نیتروژن پایه Use of base N	1	1450	0.9615 Ns
استفاده از کود پتاس پایه Use of base K	1	112309	0.6707 Ns
استفاده از کود فسفر پایه Use of base P	1	1492415	0.119 Ns
استفاده از کود گوگرد پایه Use of base S	1	600045	0.3247 Ns
استفاده از منیزیم Use of magnesium	1	23824	0.8448 Ns
استفاده از آهن Use of iron	1	556268	0.3431 Ns
استفاده از منگنز Use of manganese	1	556268	0.3431 Ns
استفاده از روی Use of zinc	1	1261113	0.1522 Ns
استفاده از هیومیک اسید Use of humic acid	1	177409	0.5929 Ns
استفاده از گوگرد سرک Use of top-dress S	1	1459739	0.1232 Ns
استفاده از اسید هیومیک Use of humic acid	1	1137112	0.1742 Ns
استفاده از فولویک اسید Use of fulvic acid	1	50189	0.7763 Ns
استفاده از کود تقویتی Use of booster fertilizer	1	931338	0.2192 Ns
استفاده از اسید آمینه Use of amino acid	1	1708407	0.095 Ns

استفاده از کود مرغی Use of poultry manure	1	3314037	0.0192 *
استفاده از کود دامی Use of animal manure	1	27915	0.8322 Ns
استفاده از آفت کش Use of pesticide	1	456690	0.3905 Ns
استفاده از سایپرمتترین Use of Cypermethrin	1	70040	0.7371 Ns
استفاده از مالاتیون Use of Malathion	1	198146	0.5721 Ns
استفاده از دورسبان Use of Dursban	1	7	0.9972 Ns
استفاده از استامی پراید Use of Acetamiprid	1	352138	0.451 Ns
استفاده از دیازینون Use of Diazinon	1	348425	0.4534 Ns
استفاده از سومیتون Use of Sumithion	1	483834	0.3767 Ns
استفاده از روی آگرو Use of Zinc Agro	1	1965414	0.073 Ns
استفاده از دلتامترین Use of Deltamethrin	1	227036	0.5453 Ns
استفاده از پرمترین Use of Permethrin	1	580222	0.3328 Ns
استفاده از تری کلروفن (دیتراکس) (Use of Trichlorfon)	1	41096	0.7971 Ns
استفاده از کنفیدور Use of Confidor	1	556268	0.3431 Ns
استفاده از متالدهاید Use of Metaldehyde	1	522430	0.3583 Ns
استفاده از سوین Use of Sevin	1	358918	0.4467 Ns
استفاده از استامی پراید و سایپرمتترین Use of Acetamiprid + Cypermethrin	1	23985	0.8443 Ns
استفاده از استامی پراید و پروفنفس Use of Acetamiprid + Profenofos	1	1928951	0.0758 Ns
استفاده از استامی پراید و دیازینون Use of Acetamiprid + Diazinon	1	636	0.9745 Ns
استفاده از روی آگرو و کنفیدور Use of Zinc Agro + Confidor	1	584340	0.3311 Ns
استفاده از سایپرمتترین و متالدهاید Use of Cypermethrin + Metaldehyde	1	2162025	0.0599 Ns
دفع حلزون Snail control	1	6289913	0.0011 **
استفاده از علف کش Use of herbicide	1	1329127	0.1415 Ns

استفاده از ترفلان Use of Trifluralin	1	2632898	0.0374 *
استفاده از بوتیزان استار Use of Butisan Star	1	32192	0.82 Ns
استفاده از سلکت سوپر Use of Select Super	1	604574	0.3229 Ns
استفاده از سوپر گالانت Use of Super Gallant	1	1073756	0.1827 Ns
استفاده از لونتر Use of Lontrel	1	1077468	0.186 Ns
استفاده از اختلاط سلکت سوپر و لونتر Mix of Select Super + Lontrel	1	1573850	0.1093 Ns
استفاده از اختلاط سلکت سوپر و کلین وید Mix of Select Super + Clean Weed	1	1965414	0.073 Ns
استفاده از گراماکسون Use of Gramoxone	1	23985	0.8443 Ns
استفاده از رانداپ قبل از کاشت Use of Roundup pre-sowing	1	923351	0.2212 Ns
استفاده از رانداپ حاشیه مزرعه Use of Roundup field margin	1	547053	0.347 Ns
لکه گیری علف هرز با توفوردی Spot treatment with 2,4-D	1	32192	0.82 Ns
استفاده از قارچ کش Use of fungicide	1	2575	0.949 Ns
تعداد دفعات قارچ کش Fungicide count	1	301732	0.485 Ns
استفاده از تیلت Use of Tilt	1	2243032	0.0552 Ns
استفاده از فولیکور Use of Folicur	1	1533982	0.114 Ns
استفاده از تیوفانات متیل Use of Thiophanate-methyl	1	50189	0.776 Ns
استفاده از مانکوزب Use of Mancozeb	1	178951	0.591 Ns
استفاده از اختلاط تریکومیکس و نوتریکا Mix of Tricomix + Nutrica	1	483834	0.377 Ns
وجین: انجام شده/نشده Hand weeding: Yes/No	1	7505541	0.00033 **
روش وجین: دستی Weeding method: Hand	1	3012987	0.0258 *

***، * و ns به ترتیب نشان دهنده معنی داری در سطوح ۱ درصد، ۵ درصد و عدم معنی داری هستند.
***، * and ns are significant at 1%, 5%, and non-significant, respectively.

مزارع، خلأ عملکرد و سهم هر یک از متغیرهای مدیریتی وارد شده در مدل در ایجاد این خلأ تعیین شد.

معادله (۱)

$$Y \text{ (kg.ha}^{-1}\text{)} = -2246.53 + 308.343X_1 + 347.366X_2 + 465.235X_3 + 666.055X_4 - 233.732X_5 - 72.294X_6$$

که در آن، Y: عملکرد، X_1 : استفاده از کود گوگرد پایه، X_2 : مقدار فسفر سرک، X_3 : استفاده از اسید آمینه، X_4 : دفع حلزون، X_5 : تعداد دفعات استفاده از آفت کش و X_6 : تعداد وجین می‌باشد. در جدول ۴، خلأ عملکرد کلزا و سهم هر یک از عوامل محدودکننده نشان داده شده است. طبق مدل، عملکرد متوسط و حداکثر به ترتیب ۲۲۴۷ و ۴۷۹۸ کیلوگرم در هکتار تخمین زده شد. کل خلأ عملکرد تخمین زده شده ۲۵۵۱ کیلوگرم در هکتار بود که با توجه به جدول ۴ به بررسی سهم هر کدام از عوامل مدیریتی پرداخته می‌شود.

از بین متغیرهای مختلف کیفی مورد بررسی، کشت تابستانه قبلی: آیش، کشت تابستانه قبلی: برنج، کشت پاییزه قبلی: گندم، ماله کشی، استفاده از کاربوکسین تیرام خارجی، استفاده از خطی کار، استفاده از کود پایه، استفاده از کود مرغی، دفع حلزون، استفاده از ترفلان، وجین و روش وجین براساس آنالیز واریانس ساده (مدل طرح کاملاً تصادفی)، اثر معنی‌داری بر عملکرد داشتند (جدول ۳). نتایج مربوط به رگرسیون گام‌به‌گام جهت تعیین مهم‌ترین متغیرهای مدیریتی مؤثر بر عملکرد و مدل عملکرد در جدول ۴ ارائه شده است.

در این رگرسیون، عملکرد در واحد سطح، متغیر وابسته در نظر گرفته شد و از بین ۳۶ متغیر مدیریتی، متغیرهای استفاده از کود گوگرد پایه، مقدار کود فسفر سرک، استفاده از اسید آمینه، دفع حلزون، تعداد دفعات استفاده از علف کش و تعداد وجین وارد مدل شدند که نتیجه آن در معادله ۱ مشاهده می‌گردد. با استفاده از این معادله، عملکرد پتانسیل برآورد شده و سپس با مقایسه آن با عملکرد واقعی

جدول ۴- نتایج رگرسیون تأثیر متغیرهای مختلف بر خلأ عملکرد محصول کلزا
Table 4- Regression results of the effect of different variables on the yield gap of canola

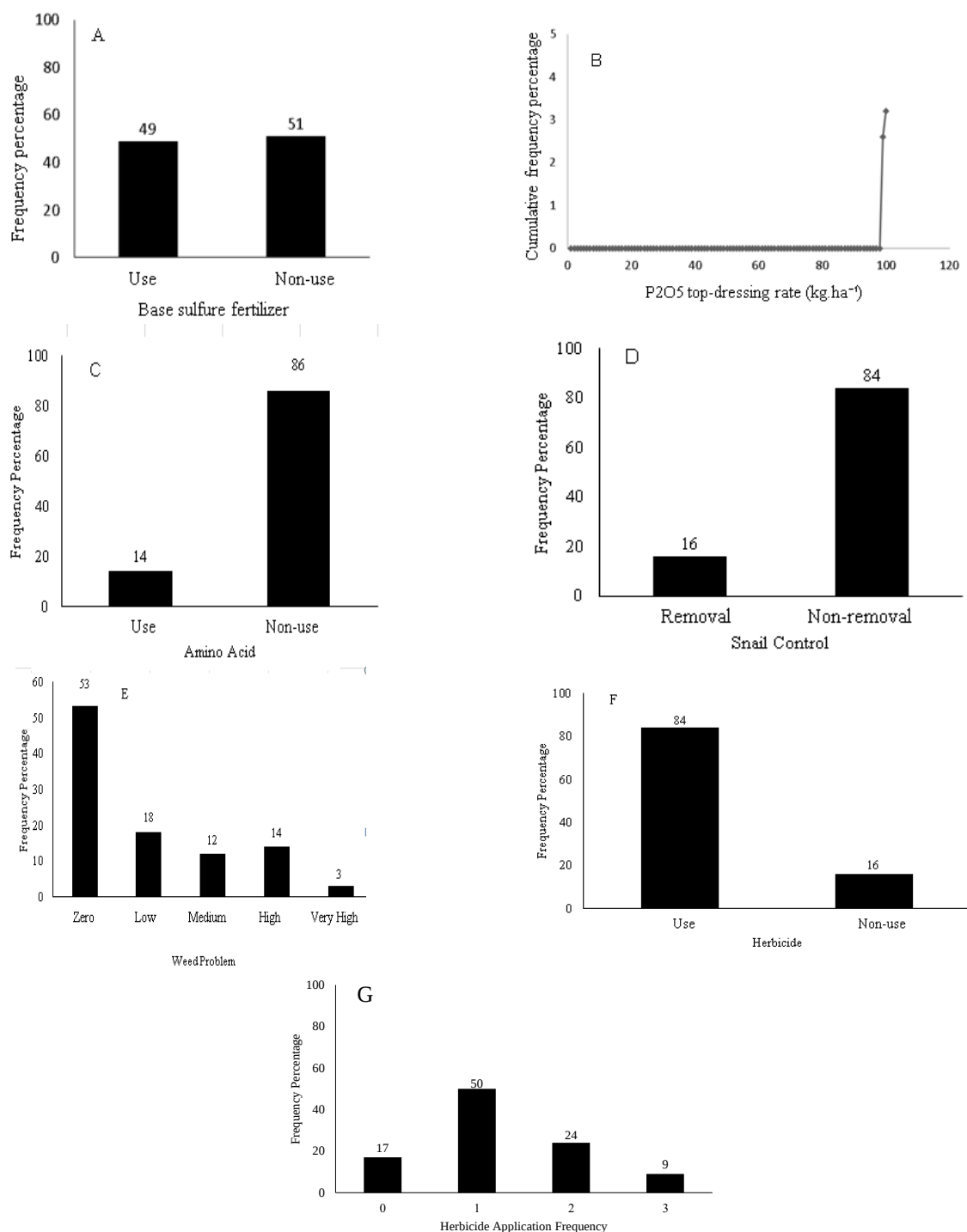
متغیرها Variables	ضریب متغیر در مدل Coefficient	مقدار میانگین Mean value	مقدار انتخاب شده Optimal value	عملکرد حاصله با مدل Model-estimated yield (Mean)	عملکرد حاصله با مدل Model-estimated yield (Optimal)	خلأ عملکرد Yield gap (kg.ha ⁻¹)	درصد Percent
عرض از مبدأ Intercept	2246.527	1	1	2247	2247	-	-
استفاده از کود گوگرد پایه (X1) Use of base S	308.3425	0.49	1	151	308	157	6
مقدار فسفر سرک (X2) Top-dress P amount	347.3658	0.058	3.2	20	1112	1091	43
استفاده از اسید آمینه (X3) Use of amino acid	465.2349	0.14	1	65	465	400	16
دفع حلزون (X4) Snail control	666.0554	0.14	1	93	666	573	22
تعداد دفعات استفاده از علف کش (X5) Herbicide count	-233.732	1.25	0	-292	0	292	11
تعداد وجین (X6) Hand weeding count	-72.2694	0.51	0	-37	0	37	1
میانگین عملکرد Average yield	-	-	-	2247	4798	2551	100

نتایج نشان داد که عدم استفاده از کود گوگرد پایه، باعث کاهش شش درصدی عملکرد کلزا شد؛ به عبارت دیگر، مزارعی که از این کود استفاده کرده بودند، عملکرد بالاتری داشتند. بررسی‌ها نشان داد که توزیع استفاده از این کود تقریباً برابر بوده، به طوری که ۵۱ درصد از مزارع از کود گوگرد پایه استفاده نکرده بودند (شکل ۲) و همین امر بخشی از خلأ عملکرد مشاهده شده را توجیه می‌کند. یکی از مهم‌ترین عناصر حیاتی برای تغذیه گیاهان، گوگرد است که نقش آن در گیاهان، ساخت پروتئین، روغن و بهبود کیفیت محصولات کشاورزی است. همچنین در پایین آوردن pH موضعی خاک و افزایش قابلیت دسترسی عناصر کم‌مصرف برای گیاه مهم می‌باشد (Marschner, 1995). نیاز بالای کلزا به گوگرد به دلیل وجود ترکیبات گوگردی متعدد (مانند گلوکوزینولات‌ها) در اندام‌های رویشی و دانه آن است که این امر گوگرد را به عنصری کلیدی با تأثیر مستقیم بر رشد، کیفیت و عملکرد دانه این گیاه تبدیل می‌کند (Azizi et al., 2011). اهمیت گوگرد به عنوان یک عامل محدودکننده عملکرد کلزا در بسیاری از پژوهش‌های دیگر نیز گزارش شده است. مطالعات انجام شده در مناطق مختلف نشان داده‌اند که کمبود گوگرد می‌تواند عملکرد دانه کلزا را به طور قابل توجهی کاهش دهد و کاربرد آن منجر به بهبود شاخص‌های رشد و عملکرد می‌شود (Maurya et al., 2023; Blake-Kalff et al., 1998). این نتایج با یافته پژوهش حاضر مبنی بر ورود این متغیر به مدل رگرسیون، هم‌خوانی دارد. وارد شدن متغیر کود گوگرد به مدل می‌تواند با ویژگی‌های خاک منطقه میانکاله نیز مرتبط باشد. خاک‌های مناطق ساحلی و جلگه‌ای شمال کشور، به ویژه در اراضی شالیزاری، ممکن است به دلیل pH پایین و یا آبشویی مواد غذایی، با کمبود گوگرد قابل دسترسی برای گیاه مواجه باشند. کاربرد گوگرد علاوه بر تأمین نیاز غذایی گیاه، می‌تواند با کاهش موضعی pH خاک، فراهمی سایر عناصر غذایی کم‌مصرف را نیز افزایش داده و از این طریق به صورت غیرمستقیم بر بهبود عملکرد کلزا تأثیر بگذارد. با توجه به اینکه در مدل عملکرد، تأثیر مقدار کود فسفر سرک مثبت بود که به معنی افزایش عملکرد با افزایش میزان استفاده از فسفر است؛ بنابراین استفاده بهینه از کود فسفر به صورت محلول پاشی می‌تواند در دستور کار کشاورزان قرار گیرد (شکل ۲). با توجه به ارائه فرمولاسیون‌های جدید کود فسفر مایع، استفاده از این نوع کود در مراحل ابتدایی رشد به صورت سرک، جهت رشد بهتر گیاه در میان کشاورزان رواج پیدا کرده است. فسفر از مهم‌ترین عناصر در تولید

محصول می‌باشد که از نظر تغذیه گیاهی، دومین عنصر کلیدی است. در مراحل شروع ساقه‌دهی تا قبل از گل‌دهی، غلظت فسفر در گیاه کلزا بین ۰/۳۵ تا ۰/۷ درصد متغیر است (Orlovius., 2003). فسفر به طور گسترده به عنوان یکی از عوامل اصلی محدودکننده عملکرد در مطالعات خلأ عملکرد برای محصولات مختلف از جمله کلزا شناخته شده است. پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که مدیریت نامناسب فسفر و عدم تأمین مقدار کافی آن برای گیاه، به ویژه در مراحل اولیه رشد می‌تواند منجر به ایجاد خلأ عملکرد قابل توجهی شود (Dastan et al., 2019)؛ بنابراین، یافته‌های به دست آمده از این تحقیق در راستای نتایج مطالعات پیشین قرار دارد و بر لزوم توجه ویژه به مدیریت بهینه فسفر در منطقه تأکید می‌کند.

عدم کاربرد اسیدهای آمینه به عنوان یک عامل محدودکننده شناسایی شد که مسئول ۱۶ درصد از خلأ عملکرد (معادل حدود ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار) در مزارع مورد بررسی بود (شکل ۲). اگرچه اسیدهای آمینه حاوی نیتروژن هستند، اما تأثیر اصلی آن‌ها بر افزایش عملکرد، نه از طریق تأمین نیتروژن (که مقدار آن ناچیز است)، بلکه به دلیل نقش‌های بیواستیمولاتی آن‌ها است. اسیدهای آمینه به عنوان پیش‌ساز هورمون‌های گیاهی و مولکول‌های سیگنالینگ عمل کرده و مقاومت گیاه را در برابر تنش‌های محیطی (مانند سرما یا خشکی) افزایش می‌دهند. علاوه بر این، با بهبود فرآیندهای فیزیولوژیک کلیدی مانند فتوسنتز، انتقال و تخصیص مواد پرورده و افزایش جذب سایر عناصر غذایی، به طور غیرمستقیم به بهبود اجزای عملکرد و پر شدن بهتر دانه‌ها کمک می‌کنند (Taiz & Zeiger, 2006)؛ بنابراین، کاربرد آن‌ها می‌تواند به گیاه در عبور از شرایط نامساعد و تحقق پتانسیل عملکرد کمک نماید.

مدیریت و مهار حلقه‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل مدیریتی شناسایی شد و نتایج نشان داد که عدم مهار این آفت، مسئول ۲۲ درصد از خلأ عملکرد است (شکل ۲). در منطقه میانکاله، حلقه‌ها به ویژه در مراحل اولیه رشد کلزا (مرحله گیاهچه‌ای) با تغذیه از برگ‌های جوان و ساقه‌ها باعث کاهش شدید تراکم بوته و ایجاد لکه‌های خالی در مزرعه می‌شوند. این خسارت اولیه، استقرار نامناسب و غیریکنواخت گیاه را در پی دارد که در نهایت منجر به کاهش عملکرد دانه می‌گردد؛ بنابراین، مهار به موقع حلقه‌ها برای دستیابی به یک سطح سبز یکنواخت و عملکرد مطلوب ضروری است.



شکل ۲- توزیع‌های فراوانی (تجمعی و عادی) مدیریت عناصر غذایی و مهار عوامل خسارت‌زا در مزارع کلزا، دهستان میانکاله، شهرستان بهشهر (شامل A: کود گوگرد پایه، B: کود فسفات سرک، C: اسید آمینه، D: مهار حلزون، E: مشکل علف هرز، F: استفاده و عدم استفاده از علف کش و G: دفعات کاربرد علف کش)

Fig. 2- Frequency distributions (cumulative and normal) for nutrient management and pest/weed control in canola farms, Miankaleh Dehestan, Behshahr County (including: A. base sulfur Fertilizer, B. top-dress phosphate fertilizer, C. amino acid application, D. snail control, E. weed problems, F. herbicide use or non-use, and G. number of herbicide applications)

(Asadi Rahmani et al., 2018; Salimpour et al., 2012; Karimi et al., 2012). به‌طور مشابه، دسترسی به گوگرد به‌دلیل کمبود مواد آلی، محدود بودن ورودی‌های گوگرد و عدم استفاده از اصلاح‌کننده‌های میکروبی اکسیدکننده گوگرد محدود می‌شود، که هم عرضه مستقیم سولفات را کاهش می‌دهد و هم به‌طور غیرمستقیم کمبود فسفر را با محدود کردن اسیدی شدن خاک و متحرک‌سازی مواد مغذی تشدید می‌کند (Asadi Rahmani et al., 2018; Salimpour et al., 2012; Karimi et al., 2012). نیاز ذاتی بالای کلزا به گوگرد برای سنتز پروتئین و روغن، حساسیت این گیاه را افزایش می‌دهد و آزمایش‌های میدانی و گلدانی در خاک‌های آهکی ایران نشان داده‌اند که کاربرد ترکیبی گوگرد عنصری، باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد و کودهای آلی موجب افزایش چشمگیر عملکرد و جذب عناصر مغذی می‌شود (Asadi Rahmani et al., 2018; Salimpour et al., 2012; Karimi et al., 2012). این یافته‌ها نشان می‌دهند که مدیریت هدفمند تغذیه‌ای شامل راهبردهای زیستی و شیمیایی، برای غلبه بر محدودیت‌های اولیه گوگرد و محدودیت‌های ثانویه فسفر در خاک‌های آهکی منطقه ضروری است.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف شناسایی عوامل محدودکننده عملکرد کلزا در منطقه میانکاله به‌شهر با استفاده از روش آنالیز مقایسه کارکرد (CPA) انجام شد. نتایج نشان داد که بین عملکرد واقعی مزارع (میانگین ۲۲۵۸ کیلوگرم در هکتار) و عملکرد پتانسیل (۴۷۹۸ کیلوگرم در هکتار)، یک خلأ عملکرد قابل توجه ۲۵۵۱ کیلوگرم در هکتاری وجود دارد. تحلیل رگرسیون گام‌به‌گام، مهم‌ترین عوامل مدیریتی مؤثر در ایجاد این خلأ را شناسایی کرد. براساس نتایج، مدیریت نامناسب تغذیه گیاه به‌ویژه کمبود فسفر و گوگرد، به‌عنوان مهم‌ترین عامل محدودکننده شناخته شد. پس از آن، خسارت ناشی از آفت حلزون در مراحل اولیه رشد و رقابت شدید با علف‌های هرز به‌عنوان موانع اصلی بعدی برای دستیابی به عملکرد بالا شناسایی شدند. همچنین کاربرد اسیدهای آمینه به‌عنوان یک عامل بهبوددهنده عملکرد مشخص گردید. این یافته‌ها نشان می‌دهد که برای کاهش خلأ عملکرد در منطقه، تمرکز بر راهکارهای مدیریتی باید در اولویت قرار گیرد. اصلاح مدیریت تغذیه براساس آزمون خاک و گیاه، مهار به‌موقع و مؤثر آفات کلیدی مانند حلزون و اجرای یک برنامه مدیریت

متغیرهای تعداد دفعات کاربرد علف‌کش و تعداد وجین، در مجموع مسئول ۱۲ درصد از خلأ عملکرد بودند (شکل ۲). ضریب منفی این متغیرها در مدل رگرسیون به این معنا نیست که مهار علف‌های هرز مضر است، بلکه نشان می‌دهد که این اقدامات در مزارعی انجام شده که از ابتدا با تراکم بالای علف‌های هرز مواجه بوده‌اند. در واقع، این متغیرها به‌عنوان شاخصی برای شدت آلودگی به علف‌های هرز عمل می‌کنند. نتایج حاکی از آن است که علی‌رغم تلاش کشاورزان برای کنترل، رقابت علف‌های هرز برای منابع (آب، نور و مواد غذایی) به‌قدری شدید بوده که توانسته است، عملکرد کلزا را به‌طور معنی‌داری کاهش دهد. این یافته نشان می‌دهد که مدیریت علف‌های هرز یک جزء حیاتی برای کاهش خلأ عملکرد در منطقه است و باید به راهبردهای مدیریتی یکپارچه و مؤثرتر، از جمله انتخاب زمان و نوع علف‌کش مناسب و رعایت تناوب زراعی، توجه ویژه‌ای شود. داده‌های توصیفی نیز شدت این مشکل را تأیید می‌کنند؛ حدود نیمی از مزارع مورد بررسی با مشکل علف‌های هرز در سطوح مختلف درگیر بودند (شکل ۲). در واکنش به این مشکل، ۸۴ درصد از کشاورزان به استفاده از علف‌کش روی آورده بودند (شکل ۲) و در نیمی از مزارع، حداقل یک نوبت سم‌پاشی انجام شده بود (شکل ۲). تنوع علف‌کش‌های مورد استفاده (شامل ترفلان، بوتیزان‌استار، سلکت‌سوپر و ...) و حتی اختلاط آن‌ها در برخی مزارع، نشان‌دهنده تلاش کشاورزان برای مهار طیف وسیعی از علف‌های هرز پهن‌برگ و باریک‌برگ است. با این حال، ورود متغیرهای مهار علف‌هرز به مدل عملکرد با ضریب منفی، بیانگر این است که این اقدامات کنترلی، کافی نبوده و یا در زمان مناسب انجام نشده‌اند و نتوانسته‌اند به‌طور کامل اثرات مخرب رقابت علف‌هرز را جبران کنند. علاوه‌بر مهار شیمیایی، در ۳۵ درصد از مزارع نیز وجین دستی به‌کار گرفته شد که این خود تأییدی بر فشار بالای علف‌های هرز و عدم کفایت مهار شیمیایی به‌تنهایی در برخی کشتزارها است.

در منطقه میانکاله استان مازندران، کمبود فسفر و گوگرد از محدودیت‌های حیاتی تولید کلزا به‌شمار می‌آیند که ناشی از تعامل ویژگی‌های خاک، کمبود ورودی‌های آلی و روش‌های مدیریتی سنتی است. خاک‌های آهکی منطقه دارای pH بالایی هستند که فسفات را غیرقابل دسترس می‌کند و میزان فسفر قابل استفاده گیاه را کاهش می‌دهد، درحالی‌که استفاده کم از کودهای آلی و نبود باکتری‌های محلول‌کننده فسفات، چرخه و جذب فسفر را بیش‌تر محدود می‌کند

سیاسگزاری

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از کلیه کشاورزان محترم منطقه میانکاله که با صبر و حوصله در جمع‌آوری داده‌های میدانی همکاری نمودند، صمیمانه قدردانی نمایند. همچنین از راهنمایی‌های ارزشمند اساتید گرانقدر و حمایت‌های بی‌دریغ کارشناسان و همکاران محترم دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان که در اجرای این پروژه یاری‌رسان بودند، کمال تشکر را داریم.

یکپارچه علف‌های هرز، پتانسیل بالایی برای افزایش سودآوری و پایداری تولید کلزا در این منطقه دارد. اهمیت این یافته‌ها در آن است که برای اولین بار با استفاده از داده‌های واقعی مزارع، عوامل محدودکننده عملکرد کلزا در منطقه میانکاله را به‌صورت کمی اولویت‌بندی می‌کند. این اطلاعات می‌تواند به‌عنوان یک راهنمای عملی برای کارشناسان ترویج و کشاورزان منطقه مورد استفاده قرار گیرد تا با تمرکز بر رفع محدودیت‌های کلیدی شناسایی‌شده، گام‌های مؤثری در جهت افزایش بهره‌وری و کاهش فاصله بین عملکرد واقعی و پتانسیل بردارند. همچنین این نتایج می‌تواند مبنایی برای تحقیقات آتی در زمینه بهینه‌سازی بسته‌های زراعی متناسب با شرایط منطقه باشد.

References

1. Abravan, H. (2016). Investigating the yield gap of spring canola in the east of Golestan province and evaluating its reasons, Ph.D Dissertation, University of Guilan, Rasht, Iran. (In Persian with English Abstract)
2. Asadi Rahmani, H., Khavazi, K., Jahandideh Mahjen Abadi, V. A., Ramezanpour, M. R., Mirzapour, M. H., & Mirzashahi, K. (2018). Effect of *Thiobacillus*, sulfur, and phosphorus on the yield and nutrient uptake of canola and the chemical properties of calcareous soils in Iran. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(14), 1671-1683. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1474905>
3. Azizi, J., Nowroozian, A., Heydari, S., & Yaghoubi, M. (2011). The study of effect of zinc and boron foliar application on yield, yield components, seed oil and protein content and growth indices of rapeseed (*Brassica napus* L.) in Khorramabad climatic conditions. *Journal of Agricultural Science*, 3(5), 1-4. (In Persian with English Abstract)
4. Blake-Kalff, M. M., Harrison, K. R., Hawkesford, M. J., Zhao, F. J., & McGrath, S. P. (1998). Distribution of sulfur within oilseed rape leaves in response to sulfur deficiency during vegetative growth. *Plant Physiology*, 118(4), 1337-1344. <https://doi.org/10.1104/pp.118.4.1337>
5. Dastan, S., Nezamzadeh, S. A., Soltani, A., & Azim Nowroozi, H. (2019). Evaluation of yield gap associated with crop management in canola production by CPA method in Neka region. *Journal of Applied Agricultural Research*, 32(02), 76-107. (In Persian with English Abstract) <https://doi.org/10.22092/aj.2019.120656.1251>
6. De Bie, C. A. J. M. (2002). Yield gap studies through comparative performance evaluation. In ISPRS 2002: Proceedings of ISPRS commission VII international symposium: Resource and environmental monitoring (p. 11).
7. Eyni-Nargeseh, H., AghaAlikhani, M., Shirani Rad, A. H., Mokhtassi-Bidgoli, A., & Modarres Sanavy, S. A. M. (2020). Late season deficit irrigation for water-saving: selection of rapeseed (*Brassica napus*) genotypes based on quantitative and qualitative features. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(1), 126-137. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1602866>
8. FAO. (2002). Report of the World Food Summit: Five Years Later. FAO.
9. Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S. M., Toulmin, C., & White, R. (2010). Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327(5967), 812-818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>
10. Hajjarpoor, A., Soltani, A., Zeinali, E., Kashiri, H., Ayneband, A., & Vadez, V. (2018). Using boundary line analysis to assess the on-farm crop yield gap of wheat. *Field Crops Research*, 225, 64-73. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.06.003>
11. Halloran, A., Clement, J., Kornum, N., Bucatariu, C., & Magid, J. (2014). Addressing food waste reduction in Denmark. *Food Policy*, 49, 294-301. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2014.09.005>
12. Hoffmann, M. P., Jacobs, A., & Whitbread, A. M. (2015). Crop modelling based analysis of site-specific

- production limitations of winter oilseed rape in northern Germany. *Field Crops Research*, 178, 49-62. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2015.03.018>
13. Karimi, F., Bahmanyar, M. A., & Shahabi, M. I. N. A. (2012). Investigation the effects of sulfur and cattle manure application on macronutrient availability in calcareous soil and accumulation in leaf and seed of canola. *European Journal of Experimental Biology*, 22(3), 836-842.
 14. Lobell, D. B., Cassman, K. G., & Field, C. B. (2009). Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. *Annual Review of Environment and Resources*, 34, 179-204. <https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.041008.093740>
 15. Malhi, S. S., & Leach, D. (2000). Restore canola yields by correcting sulphur deficiency in the growing season. In *Soils and Crops Workshop*.
 16. Marschner, H. (1995). *Mineral Nutrition of Higher Plants* (2nd Ed.). Academic Press. 180 p.
 17. Matourian, H., Khodaei Joghian, A., Moradi Telavat, M. R., Siadat, S. A., & Torabi, B. (2022). Analyzing rapeseed (*Brassica napus* L.) yield gap using comparative performance analysis (CPA) in Khorramshahr. *Journal of Agroecology*, 14(2), 275-289. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22067/agry.2021.67226.0>
 18. Maurya, M. K., Sarma, A., Behera, P., Karan, N., Shukla, V. K., Kumar, A., Kumar, G. & Kumar, A. (2023). A critical review on sulphur application in rapeseed-mustard to enhancing productivity and oil quality. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(21), 661-671.
 19. Ministry of Jihad Agriculture. (2022). *Agricultural statistics (Crop products)*. Retrieved from (in Persian). <https://www.maj.ir>.
 20. Mohammadi, K., Eskandari, M., Rokhzadi, A., & Heidari, G. (2012). Canola traits and some soil biological indices in response to fertilizer and tillage management. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 12(3), 377-383.
 21. Nehbandani, A. (2017). *Evaluation of soybean yield gap in Iran*. Ph.D Dissertation, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. (In Persian with English Abstract)
 22. Nehbandani, A., & Soltani, A. (2018). *Guidelines for yield gap analysis of crops in production zones*. University Project Report, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. (In Persian with English Abstract)
 23. Najafi Rad, V. (2014). *Investigating the yield gap of canola in Aliabad-e Katul region* MSc. Thesis, Islamic Azad University, Gorgan Branch, Gorgan, Iran. (In Persian with English Abstract)
 24. Nekahi, M. Z., Soltani, A., Siahmarghooyi, A., & Bagherani, N. (2014). Yield gap of crop and weed management in wheat: Case study, Golestan province-Bandar Gaz. *Journal of Crop Production*, 7(2), 135-156. (In Persian with English Abstract) <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2008739.1393.7.2.8.3>
 25. Orlovius, K. (2003). *Oilseed rape: Fertilizing for high yield and quality* (No. 16). International Potash Institute.
 26. Rahban, S., Torabi, B., Soltani, A., & Zeinali, E. (2022). Determining yield gap and potential for improved production of irrigated canola in Iran. *Journal of Agricultural Improvement*, 24(2), 393-406. (In Persian with English Abstract) <https://doi.org/10.22059/jci.2021.319201.2520>
 27. Rezaei, A., & Soltani, A. (1998). *An Introduction to Applied Regression Analysis*. Isfahan University of Technology Press, Isfahan, Iran. 310 p. (in Persian)
 28. Salimpour, S., Khavazi, K., Nadian, H., Besharati, H., & Miransari, M. (2012). Canola oil production and nutrient uptake as affected by phosphate solubilizing and sulfur oxidizing bacteria. *Journal of Plant Nutrition*, 35(13), 1997-2008. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.716892>
 29. Soltani, A. (2007). *Application of SAS Software in Statistical Analysis* (2nd Ed.). Mashhad University Jihad Publications, Mashhad, Iran. 281 p. (in Persian)
 30. Soltani, A., Nabbandani, A., Zeinali, A., Torabi, B., Zand, A., Qasemi, S., Alasti, A., Dadresi, A., Hosseini, R., Alimagham, M., Zahed, M., Fayyazi, H., Kamari, H., Arab-Ameri, R., Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Poorshirazi, Sh., Mohammadi, S., & Keramat, S. (2018). *Atlas of yield gap and production potential of important crops in the country under current and future climatic conditions*. Vajegan Sirang Publications, Golestan, Iran. 241 pages. (in Persian)
 31. Soltani, A., Torabi, B., Galeshi, S., & Zeinali, E. (2010). *Analysis of yield-limiting factors of wheat in Gorgan conditions using the CPA method*. Research Project Report, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian with English Abstract)

32. Taiz, L., & Zeiger, E. (2006). *Plant Physiology* (4th Ed.). Sinauer Associates, Inc.
33. Torabi, B., Soltani, A., Galeshi, S., & Zeinali, E. (2011). Analyzing wheat yield constraints in Gorgan. *Crop Production*, 4(4), 1-17. (In Persian with English Abstract). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2008739.1390.4.4.1.9>
34. Yahyapoor, H., Niknejad, Y., Fallah, H., Dastan, S., & Barari Tari, D. (2021). Yield gap estimation of rapeseed (*Brassica napus* L.) in Northern Iran. *Romanian Agricultural Research*, 38, 1-9.
35. Yu, Y., Feng, K., Hubacek, K., & Sun, L. (2016). Global implications of China's future food consumption. *Journal of Industrial Ecology*, 20(3), 593-602. <https://doi.org/10.1111/jiec.12392>
36. Zhang, Z., Lu, J., Cong, R., Ren, T., & Li, X. (2017). Evaluating agroclimatic constraints and yield gaps for winter oilseed rape (*Brassica napus* L.)—A case study. *Scientific Reports*, 7852. <https://doi.org/10.1038/S41598-017-08164-X>



Land Suitability Assessment and Estimation of Rice (*Oryza sativa* L.) Production Potential in the Yaneh-Sar District of Behshahr County

Karim Riahi¹, Hossein Kazemi^{ID 2*}, Afshin Soltani^{ID 1} and Fardin Sadeghzadeh^{ID 3}

1- Agronomy Department, Plant Production Faculty, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

2- Horticulture Department, Plant Production Faculty, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

3- Soil Sciences Department, Crop Sciences faculty, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran

(*- Corresponding author's Email: hkazemi@gau.ac.ir)

Received: 12-12-2025

Revised: 11-04-2026

Accepted: 22-04-2026

Available Online: 04-04-2026

How to cite this article:

Riahi, K., Kazemi, H., Soltani, A., & Sadeghzadeh, F. (2026). Land suitability assessment and estimation of rice (*Oryza sativa* L.) production potential in the Yaneh-Sar District of Behshahr County. *Journal of Agroecology*, 18(1), 63-80. (In Persian with English abstract)

<https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.96890.1262>

Introduction

Identifying land suitability and potential for various uses is crucial for conserving environmental resources and achieving sustainable agricultural production. The absence of systematic land-use planning can lead to significant socio-economic and environmental damage. Agro-ecological zoning, which integrates environmental data layers such as climate, water, topography, and soil, serves as a vital tool for agricultural planning. It allows for a comprehensive analysis of production possibilities by assessing environmental potentials and constraints, thereby enabling informed decision-making. In Iran, despite the agricultural significance of many regions, the environmental potential of most areas has not been scientifically delineated. This study was conducted to perform detailed agro-ecological zoning and estimate the production potential for rice (*Oryza sativa* L.) in the Yaneh-Sar District of Behshahr County, Mazandaran Province – a region with a distinct, cooler climate compared to other parts of the province, which has faced developmental challenges and agricultural issues such as declining yield per unit area.

Materials and Methods

The agroecological requirements for rice cultivation were first identified through scientific sources and documents. Thematic maps were then prepared for a comprehensive set of variables, including annual precipitation, average/maximum/minimum annual temperatures, total sunshine hours, relative humidity, water resources, topographic features (elevation, slope percentage, and aspect), and soil properties (texture, potassium, phosphorus, nitrogen, copper, manganese, iron, organic matter, electrical conductivity, and pH). Soil sampling was conducted at 128 points across the farmlands of 49 villages in the region, and the samples were analyzed at the central laboratory of Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Geostatistical and classical interpolation methods, including Ordinary Kriging, Radial Basis Functions, and Inverse Distance Weighting (IDW), were employed to extrapolate these variables across the study area, with the final method



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

<https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.96890.1262>

selected based on the lowest Root Mean Square Error (RMSE). The Analytic Hierarchy Process (AHP) was utilized to determine the weight of each environmental criterion, incorporating expert opinions. The weighted digital layers were then integrated within a Geographic Information System (GIS) environment. Land suitability was classified into four categories: highly suitable, suitable, moderately suitable, and unsuitable. Furthermore, the SSM-iCrop2 model, a native crop simulation model for Iran, was used to estimate the potential yield of paddy rice based on meteorological data, soil conditions, crop management practices, and plant parameters.

Results and Discussion

The results of the land suitability assessment revealed that only a small fraction of the agricultural land in the Hezar Jerib District is highly suitable for rice cultivation. Specifically, approximately 2.2% (637 ha) was classified as highly suitable, 16.7% (4,690 ha) as suitable, 40.5% (11,370 ha) as moderately suitable, and 40.4% (11,355 ha) as unsuitable. The highly suitable areas are primarily confined to a narrow strip along the Nekarood River in the northern part of the region, characterized by flat terrain and proximity to water sources. The main factors limiting suitability were identified as steep slopes and inadequate water resources, with about 81% of the land deemed unsuitable or only marginally suitable due to these constraints. The SSM-iCrop2 model output indicated a potential paddy rice yield of about 3.92 tons per hectare for the region's agricultural land units. The current average yield achieved by local farmers was estimated at 3.2 tons per hectare, resulting in a relatively small yield gap of 0.72 tons per hectare. This minor gap is likely attributable to the recent adoption of modern mechanized equipment and could potentially be addressed by optimizing crop management practices, such as adjusting planting dates.

Conclusion

This study demonstrates that only a limited portion of the Hezar Jerib District possesses high suitability for rice cultivation, primarily due to topographic (slope) and water resource limitations. The findings underscore the necessity of aligning agricultural activities with the land's ecological capacity to ensure sustainability. Expanding rice cultivation into non-suitable areas would require intensive inputs and management, potentially leading to environmental degradation and long-term loss of productive resources. Therefore, rice cultivation is recommended only in limited areas that have access to sufficient water and are properly leveled. The small yield gap suggests that significant yield increases through improved management might be challenging under the current cultivation system. Future efforts could explore alternative cultivation methods, such as aerobic rice systems, to enhance water-use efficiency, provided that challenges like weed control and the identification of suitable varieties are addressed.

Keywords: Agro-ecological zoning, AHP, Geographic Information System, SSM-iCrop2

مقاله پژوهشی

جلد ۱۸، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص ۸-۶۳

استعدادسنجی اراضی و برآورد پتانسیل تولید برنج (*Oryza sativa* L.) در بخش یانه‌سر شهرستان بهشهر

کریم ریاحی^۱، حسین کاظمی^{۲*}، افشین سلطانی^۱ و فردین صادق زاده^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۲

چکیده

شناسایی استعداد و توان سرزمین برای کاربری‌های مختلف به منظور حفظ منابع محیطی و تولید پایدار محصولات کشاورزی در راستای توسعه پایدار ضروری به نظر می‌رسد، به‌طوری‌که عدم توجه به پهنه‌بندی اصولی سرزمین می‌تواند زیان‌های اقتصادی-اجتماعی و محیط زیستی فراوانی را به بار آورد. پژوهش حاضر به منظور پهنه‌بندی زراعی-بوم‌شناختی و برآورد پتانسیل تولید برنج (*Oryza sativa* L.) در بخش یانه‌سر شهرستان بهشهر (استان مازندران) انجام شد. در گام اول، نیازهای زراعی-بوم‌شناختی گیاه برنج با استفاده از منابع و اسناد علمی تعیین و شناسایی شده و سپس نقشه‌های موضوعی انواع متغیرهای شامل بارش سالانه، دماهای متوسط، بیشینه و کمینه سالانه، مجموع ساعات آفتابی، رطوبت نسبی، منابع آبی، متغیرهای توپوگرافی شامل ارتفاع از سطح دریا، درصد شیب، جهت شیب و ویژگی‌های خاک مانند بافت، پتاسیم، فسفر، نیتروژن، مس، منگنز، آهن، ماده آلی، هدایت الکتریکی و اسیدیته خاک تهیه گردید. نمونه‌های خاک از طریق نمونه‌گیری مستقیم از ۱۲۸ نقطه از مزارع روستاهای منطقه تهیه و در آزمایشگاه خاکشناسی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری تجزیه شد. جهت تخمین و تعمیم این متغیرها به سطح منطقه مورد مطالعه از روش‌های درون‌یابی زمین‌آمار و کلاسیک مانند کریجینگ معمولی، توابع پایه شعاعی و وزن‌دهی معکوس فاصله و براساس کمترین برآورد آماره‌های خطای برآورد (RMSE) استفاده گردید. در ادامه، جهت تعیین وزن معیارها از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده شد. لایه‌های رقومی عوامل محیطی در محیط GIS پس از اختصاص وزن AHP مختص به هر لایه، روی هم‌گذاری و تلفیق شده‌اند. پهنه‌بندی اراضی در چهار طبقه بسیار مستعد، مستعد، نیمه‌مستعد و غیرمستعد انجام شد. همچنین در این مطالعه، مدل SSM-iCrop2 برای برآورد پتانسیل تولید مورد استفاده قرار گرفت. این شبیه‌ساز، مقدار عملکرد پتانسیل را بر مبنای داده‌های هواشناسی، شرایط خاک، نحوه مدیریت زراعی و پارامترهای گیاهی محاسبه می‌نماید. نتایج حاصل از تطابق اراضی کشاورزی با نیازهای زراعی و محیطی برنج نشان داد که تنها حدود ۲/۲ درصد از زمین‌های زراعی منطقه دارای پتانسیل بسیار مستعد جهت کشت برنج بوده که این مناطق شامل بخش کوچکی از زمین‌های حاشیه رودخانه نکارود می‌باشد. همچنین سهم پهنه مستعد ۱۶/۷ درصد، نیمه‌مستعد ۴۰/۵ درصد و پهنه غیرمستعد ۴۰/۴ درصد برآورد شد. به‌طور کلی، در بخش‌هایی که به منابع آبی دسترسی دارند و تسطیح شده‌اند، کشت برنج به‌صورت محدود امکان‌پذیر است. همچنین با تغییر در الگوی کاشت کارایی مصرف آب افزایش می‌یابد. روش تولید برنج به‌صورت هوازی می‌تواند باعث کاهش مصرف آب شود. براساس نتایج حاصل از خروجی مدل SSM-iCrop2، واحدهای اراضی کشاورزی منطقه در تولید شلتوک برنج دارای پتانسیل تولید حدود ۳/۹۲ تن در هکتار شلتوک می‌باشد و میزان تولید فعلی کشاورزان حدود ۳/۲ تن در هکتار می‌باشد که حدود ۰/۷۲ تن در هکتار خلأ عملکرد تولید شلتوک برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی زراعی-بوم‌شناختی، سامانه اطلاعات جغرافیایی، مدل SSM-iCrop2، AHP

۱- گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۲- گروه باغبانی، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

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

(Email: hkazemi@gau.ac.ir)

(*)- نویسنده مسئول:

<https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.96890.1262>

مقدمه

استعدادسنجی یک منطقه عبارت است از شناسایی و توانمندی‌ها، امکانات و محدودیت‌های منطقه از نظر منابع محیطی پایدار، شامل توپوگرافی، خاک، زمین، پوشش گیاهی و سایر موارد. منابع بوم‌شناختی ناپایدار شامل منابع آب، اقلیم و حیات وحش، برای انواع کاربری‌ها مانند کشاورزی (Makhdoom, 2011) است. از آنجایی که مناطق کشت در اکثر مناطق کشور برپایه مطالعات کارشناسی و علمی نیست، پتانسیل محیطی اکثر مناطق کشور در حال حاضر به روش‌های علمی و کارشناسی چندان مشخص نیست (Kamali et al., 2008). در همین راستا، تعیین کاربری مناسب اراضی به‌منظور استفاده بهینه از منابع آب و خاک و جلوگیری از تخریب منابع می‌تواند گامی مؤثر در راستای توسعه پایدار باشد (Peato, 2007).

پهنه‌بندی زراعی-بوم‌شناختی، تلفیقی از لایه‌های اطلاعاتی محیطی است که در آن منابع اقلیم، آب، توپوگرافی و شرایط خاک به‌صورت یک مجموعه همگن زیست‌محیطی در ارتباط با سامانه‌های زراعی، کاربری اراضی و تنوع زیستی بررسی می‌شود. همچنین یک ابزار مهم در برنامه‌ریزی کشاورزی محسوب می‌شود و با تلفیق اجزای اصلی و تأثیرگذار کشاورزی، امکان بررسی همه‌جانبه تولید را فراهم و پتانسیل‌ها و محدودیت‌های محیطی بررسی و تصمیم‌گیرندگان عرصه کشاورزی با داشتن یک نقشه کامل و جامع به‌جای نقشه‌های واحد و پراکنده، تصمیمات درستی خواهند گرفت (Ghaffari et al., 2002). سازمان خواروبار ملل متحد در سال ۱۹۷۸ به‌منظور بهینه‌سازی استفاده از زمین، آب و سایر منابع طبیعی، مدلی را تحت عنوان A.E.Z (پهنه‌بندی زراعی-بوم‌شناختی)^۱ ارائه و پس از تحقیقات و آزمایش‌های مختلف در سال ۱۹۸۳ آن را برای کلیه کشورها توصیه کرد. روش به‌کاررفته در این مدل در کمی نمودن متغیرهای اقلیمی، خاک و سایر متغیرهای فیزیکی در تعیین مناطق مستعد جهت کشت محصولات مختلف با توجه به نیازمندی‌های محیطی و مدیریتی روشی مناسب است (Ahmadizadeh, 2003). در این مدل، جهت ترکیب لایه‌های اطلاعاتی و تحلیل‌های فضایی از روش لایه‌های اطلاعاتی جغرافیایی استفاده و پایگاه اطلاعاتی مورد نیاز در آن تشکیل می‌شود و مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرد. نتیجه تمام

تحقیقاتی که براساس این مدل صورت گرفته، شکل‌گیری واحدهای همگنی است که به‌عنوان واحدهای بوم‌شناختی-کشاورزی محسوب می‌شوند. این واحدها از نظر خصیصه‌های اقلیمی و محیطی ویژگی‌های واحدی را ارائه می‌دهند و به یک برنامه‌ریزی یکسانی نیاز دارند. این روش ابزار قدرتمندی را در اختیار کاربران قرار می‌دهد تا توانایی تحلیل‌های مختلف فضایی و مدل‌سازی را از طریق آن انجام دهند (Mohammadi et al., 2007; Tajvidi, 2002).

در ایران پژوهش‌های متعددی با موضوع تناسب اراضی به‌صورت منطقه‌ای انجام شده است و پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که این مطالعات روند تکاملی داشته و محققان، ابزارهای و مدل‌های متعددی را برپایه سامانه اطلاعات جغرافیایی و ارزیابی‌های چندمعیاره استفاده نموده‌اند. در مطالعه‌ای، مساواتی و سید جلالی (Mosavati, & Seiedjalali, 2002) تناسب اراضی و برآورد پتانسیل تولید گندم (*Triticum aestivum* L.) را در مناطق شور استان گلستان انجام دادند که در آن تناسب اراضی برای گندم آبی در حالت‌های مختلف شوری از تناسب خوب تا نامناسب تعیین گردید. همچنین پتانسیل تولید اراضی در مناطق شور استان گلستان در شرایط آبی به‌روش فائو از ۱۲۰۳ کیلوگرم تا ۷۴۸۲ کیلوگرم در هکتار برآورد گردید. فرج‌زاده و همکاران (Farajzadeh et al., 2007) با ارزیابی منابع اقلیمی و محیطی شهرستان سبزوار با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و روش‌های آماری، تناسب اراضی این منطقه را برای کشت کلزا (*Brassica napus* L.) مشخص کردند. در این پهنه‌بندی، درجه-روز رشد، دمای متوسط، شیب و قابلیت هدایت الکتریکی (EC)^۲ بیشترین تأثیر را در تعیین مناطق مستعد داشتند. اشرف (Ashraf, 2011)، پتانسیل تولید منطقه‌ای واقع در شمال دامغان در استان سمنان را با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی بر مبنای روش فائو برای کاشت گندم تعیین کرد. پتانسیل تولید زمین در این منطقه بین ۳۸۰ و ۴۰۰۰ کیلوگرم در هکتار متغیر بود. پایین بودن پتانسیل تولید زمین در برخی واحدهای نقشه به‌علت محدودیت شوری و قلیائیت تشخیص داده شد. کاظمی و همکاران (Kazemi et al., 2016) نشان دادند که ۲۳/۴۸ درصد از منطقه گند کاووس برای کشت باقلا (*Vicia faba* L.) بسیار مستعد، در حالی که ۲۵/۰۳ درصد مستعد، ۲۵/۳۸ درصد نیمه‌مستعد و ۲۶/۱۱ درصد از کل اراضی

خاک (بافت، pH، هدایت الکتریکی، آهک، ماده آلی و عمق خاک) به عنوان معیار در تعیین طبقات مناسب جهت تحلیل تناسب زمین برای کشت گندم و تهیه نقشه تناسب زمین با ادغام الگوریتم تحلیل سلسله مراتبی (AHP) ^۱ فازی با سامانه اطلاعات جغرافیایی استفاده کردند. نتایج نشان داد که اراضی بسیار مستعد، متوسط و ضعیف برای کشت گندم به ترتیب ۲/۶۳، ۹/۸۵ و ۳۲/۵۹ درصد از مساحت منطقه را شامل می شود. مطالعه ای با هدف بررسی تناسب زمین برای کاشت محصولات کشاورزی و گیاهان بومی در منطقه شمال غربی اردن و شناسایی اراضی زراعی جدید با تکیه بر مجموعه ای از متغیرهای محیطی شامل خصوصیات فیزیکی-شیمیایی خاک با تهیه ۵۳ نمونه خاک انجام شد. نتایج نشان داد که منطقه برای کشت گیاهان زراعی مانند گندم دارای توان ۳۵/۶ درصد، برای جنگل ۳۳/۱ درصد، برای چمنزارها ۱۹/۴ درصد و برای کشت سبزیجات ۳۲/۲ درصد توان دارد (Al-Sababhhah, 2024). یوسف (Yousif, 2024)، مطالعه ای با هدف برآورد تناسب محصول و قابلیت زمین برخی از مناطق احیای جدید در امتداد محور الدبعه در صحرای شمال غربی مصر را با تهیه ۱۱۵ نمونه از خاک و تجزیه و تحلیل های آزمایشگاهی برای تعیین شاخص های فیزیکی و شیمیایی خاک با استفاده از نرم افزار ALEsArid-GIS انجام داد. نتایج تجزیه و تحلیل تناسب اراضی نشان داد که ۱۶/۷ درصد و ۸/۹۸ درصد از مساحت مورد مطالعه به ترتیب در طبقه بندی S₁ (بسیار مناسب) برای گندم و زیتون (Olea europaea L.) قرار گرفتند.

استان مازندران با داشتن آبوهوای معتدل و بارش مطلوب، یکی از مناطق مستعد در زمینه تولید انواع محصولات کشاورزی است. میزان تولید محصولات کشاورزی در این استان، سالیانه شش میلیون تن برآورد می شود. این استان در ۱۴ محصول حائز رتبه های اول و دوم کشور است و رتبه نخست را در تولید برنج و مقام دوم در تولید کلزا دارد. براساس گزارش سازمان جهاد کشاورزی استان مازندران، سطح زیرکشت برنج در این استان در سال زراعی ۱۴۰۳ حدود ۲۲۸ هزار هکتار ثبت شده است. منطقه هزارجریب شهرستان بهشهر جزء مناطق کوهستانی و کوهپایه ای استان مازندران و دارای اقلیم سرد و در کل محیطی متفاوت نسبت به سایر مناطق مازندران می باشد. این منطقه به دلیل فاصله زیاد از مرکز استان و صعب العبور بودن مسیر دسترسی، از نظر شاخص های توسعه ای رشد مناسبی نداشته است. در

کشاورزی برای تولید محصول غیرمستعد می باشد. از جمله عوامل محدودکننده رشد گیاه باقلا، شوری خاک، مواد آلی کم، بارندگی کم، محتوای کلسیم بالا و کمبود مقادیر فسفر و آهن در منطقه اعلام شد. کاظمی و آکینچی (Kazemi & Akinci, 2018)، مطالعه ای به منظور تعیین تناسب کاربری اراضی استان گلستان برای زراعت دیم با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و تصمیم گیری چندمعیاره انجام دادند. نتایج نشان دادند که برخی از متغیرهای اقلیمی مانند دما، بارندگی سالانه و ساعات آفتابی از عوامل محدودکننده برای کشت دیم در این منطقه نیستند. پناه‌نژاد و همکاران (Panah Nezhad et al., 2022) با بررسی تناسب بوم‌شناختی برای کاربری زراعت آبی در بخشی از اراضی حوضه نازلوچای نشان دادند که ۴۲ درصد از منطقه فاقد توان، ۲۸/۵ درصد منطقه دارای بالاترین توان، ۱۷/۵ درصد سطح دارای توان متوسط و ۱۲ درصد از منطقه دارای توان کم برای کشت های زراعی آبی هستند. دادرسی و همکاران (Dadrasi et al., 2025)، تناسب اراضی برنج و راهبردهای سازگاری تحت تغییرات اقلیم را در ۱۹ منطقه در سطح جهانی انجام دادند. نتایج نشان داد که تغییرات اقلیمی به طور قابل توجهی تناسب اراضی برای کشت برنج را در همه مناطق تغییر می دهد، به طوری که مناطق گرمسیری مانند جنوب شرقی آسیا، جنوب آسیا و شرق آفریقا به دلیل تنش گرما و بارندگی نامنظم، کاهش سطح اراضی مناسب برای نظام های آبیاری و دیم را تجربه می کنند. در مقابل، مناطق معتدل مانند آسیای شرقی، آمریکای جنوبی و اروپای شرقی شاهد افزایش سطح طبقه مناسب هستند که ناشی از فصل های رشد طولانی است. آیمن و همکاران (Ayman et al., 2021)، تناسب سرزمین را برای کاربری کشاورزی براساس پنج معیار بارندگی، دما، درصد شیب، انواع خاک و توزیع آب چاه ها ارزیابی کردند. سپس لایه های مختلف زمین با استفاده از روش کدگذاری تناسب اراضی برای تهیه نقشه های تناسب مناطق دیم و آبی با استفاده از روش هم پوشانی وزنی تهیه شد. نتایج نشان داد که تنها حدود (دو درصد) از کل مساحت برای کشاورزی وابسته به بارندگی، بسیار مناسب است. در حالی که حدود ۱/۴ درصد برای محصولات آبی مناسب می باشد. دلیل اصلی پایین بودن سطح مناسب زمین برای کشاورزی، حاصلخیزی بسیار پایین خاک و کمبود آب بود. کلیک و همکاران (Kilic et al., 2022) در حوضه واقع در منطقه پشیلو مارک ترکیه، از مشخصات توپوگرافی (ارتفاع، شیب و جهت) و برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی

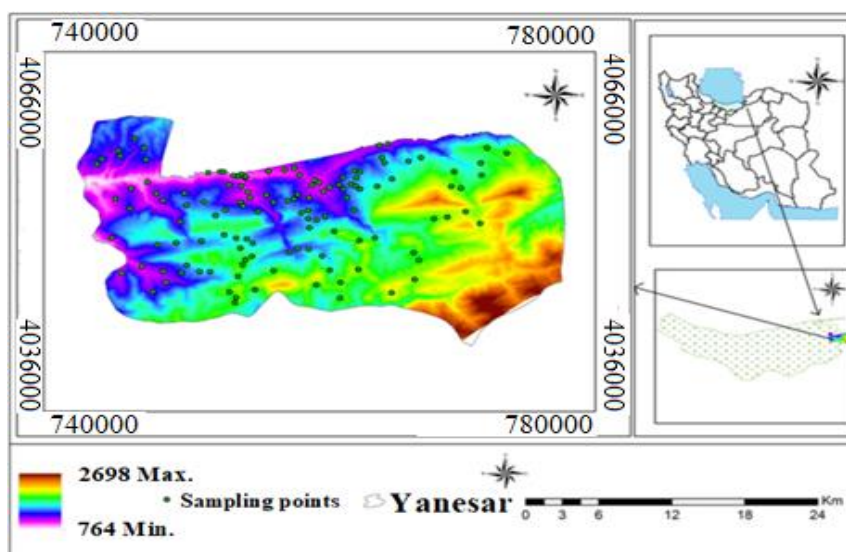
مازندران، گلستان و سمنان است. این بخش از نظر هندسی تقریباً به شکل مستطیل است. از شمال به شهرستان گلوگاه و شهرستان بندرگز، از مغرب به شهرستان کردکوی، از جنوب شرقی و شرق به شهرستان دامغان و از جنوب به شهرستان نکا محدود است (شکل ۱). بخش یانه‌سر دارای دو دهستان به نام‌های شهدا با وسعت ۵۱۹ کیلومتر مربع و عشرستاق با وسعت ۲۴۳ کیلومتر مربع و با مرکزیت روستای بیشه‌بنه و دارای ۵۱ روستا و آبادی بوده که از نظر اداری تابع شهرستان بهشهر می‌باشد (Riahi, 2000). براساس آخرین اطلاعات دریافتی از مراکز خدمات کشاورزی منطقه، سطح زیرکشت محصولات زراعی مورد مطالعه در منطقه شامل گندم ۱۰۵۰۰ هکتار، جو ۲۸۰۰ هکتار، عدس ۵۰۰ هکتار و برنج ۲۷۰ هکتار می‌باشد. همچنین منطقه دارای کاربری‌های باغی، اراضی زراعی آبی، مرتع، جنگل و اراضی زراعی دیم می‌باشد. سطح اراضی جنگلی ۶۷/۲ درصد، اراضی کشاورزی ۲۵/۱ درصد و اراضی مرتعی با ۴/۳ درصد وسعت منطقه را در بر می‌گیرد.

بخش کشاورزی با توجه به عدم توجه کافی، این منطقه دارای مشکلات و مسائلی مانند کاهش تولید در واحد سطح، استفاده نادرست از سرزمین و منابع محیطی و ورود بدون مطالعه برخی از محصولات به الگوی کشت منطقه در سال‌های اخیر می‌باشد (Riahi, 2000). با توجه به افزایش تمایل کشاورزان به کشت برنج در سال‌های اخیر، این مطالعه به منظور استعداده‌سنجی اراضی و نیز برآورد پتانسیل تولید برنج در بخش یانه‌سر شهرستان بهشهر انجام شد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

بخش یانه‌سر یکی از بخش‌های سه‌گانه شهرستان بهشهر (مازندران) است که در ناحیه کوهستانی البرز واقع شده است. این بخش که از دیرباز منطقه هزار جریب نامیده می‌شود، بین ۳۶ درجه ۲۸ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۰ دقیقه عرض شمالی و ۵۳ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۹ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. یانه‌سر در انتهای جنوب شرقی استان مازندران و محل اتصال سه استان



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه و موقعیت نقاط نمونه‌گیری در بخش یانه‌سر شهرستان بهشهر، استان مازندران
Fig. 1- Study area and location of sampling points in Yanesar district of Behshahr county, Mazandaran province

لایه‌های محیطی

برای تهیه نقشه‌های رقومی، ویژگی‌های خاک اراضی کشاورزی در تابستان سال ۱۳۹۹، نمونه‌برداری از مزارع انجام شد. با توجه به موقعیت روستاهای منطقه، به‌طور تصادفی وارد مزارع شده و نمونه‌های خاک از عمق ۳۰-۰ سانتی به‌روش W از هر مزرعه تهیه شد.

موقعیت هر نقطه را با دستگاه مکان‌یاب جغرافیایی جهانی (GPS)^۱ مدل گارمین لمسی ثبت و در مجموع تعداد ۱۲۸ نمونه خاک از ۴۹ روستای منطقه تهیه شد. با توجه به کوهستانی بودن منطقه و وجود

1- Global Positioning System

بارش) از روش‌های زمین‌آمار مانند IDW، Kriging و توابع شعاعی استفاده گردید. در نهایت، براساس مقدار کمترین مقدار خطا، روش IDW برای تولید نقشه‌ها انتخاب شد. همچنین لایه پتانسیل آب زیرزمینی از اطلاعات مربوط به چشمه‌های موجود در منطقه تهیه شد. اطلاعات آن از مدیریت آب منطقه‌ای استان مازندران تهیه و پس از تهیه لایه رستری، پتانسیل آب زیرزمینی اراضی کشاورزی در چهار سطح شامل پربازده، خوب، متوسط و ضعیف طبقه‌بندی شد.

مدل استعدادسنجی اراضی

برای مکان‌یابی مناطق مستعد کشت گیاه زراعی نیاز به تطبیق خصوصیات و نیازهای بوم‌شناختی گیاه برنج با شرایط محیطی منطقه می‌باشد. در این تحقیق به منظور تطبیق نیازمندی‌های محیطی گیاه زراعی برنج در نظام کشت نشایی با خصوصیات اراضی، براساس روش محدودیت ساده انجام شد. در ابتدا نیازهای زراعی و بوم‌شناختی گیاه زراعی برنج از منابع و اسناد کتابخانه‌ای، مقالات، پایان‌نامه‌ها و مشاوری با کارشناسان مراکز دانشگاهی و تحقیقات کشاورزی استان مازندران تهیه گردید. پس از تهیه جدول نیازهای بوم‌شناختی گیاه (جدول ۱) درجه‌بندی آن‌ها براساس روش پیشنهادی سایز و همکاران (Sys et al., 1991) و غفاری و همکاران (Ghaffari et al., 2000) انجام و براساس متغیرهای موجود در جدول اطلاعات مورد نیاز در محیط ArcMap تهیه شد (شکل ۲). طبقه‌بندی و رتبه‌بندی هر لایه پس از تهیه لایه‌ها براساس روش محدودیت ساده و جدول نیازهای محیطی برنج در چهار طبقه بسیار مستعد، مستعد، متوسط و غیرمستعد صورت گرفت (جدول ۲) و لایه رستری آن‌ها تهیه شد. از آنجایی که عوامل محیطی جهت تعیین تناسب اراضی و کشت محصول فراوان بوده و دارای اهمیت یکسانی نمی‌باشند، برای ارزیابی دقیق‌تر لازم است که اهمیت نسبی هر معیار مشخص گردد. جهت تعیین اهمیت و ارزش متغیرها از وزن‌ها و ضرایب به‌دست‌آمده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده شد (شکل ۳). در انتها، استعدادسنجی و پهنه‌بندی مناطق برای تولید گیاه برنج براساس (جدول ۲) به‌روش هم‌پوشانی وزنی انجام گرفت. نقشه‌ها در چهار پهنه، چگونگی انطباق نیازهای گیاه زراعی مدنظر با شرایط محیطی منطقه را نشان داد.

مناطق صعب‌العبور، بهترین روش برای نمونه‌برداری، روش تصادفی تشخیص داده شد. وضعیت پراکنش نقاط نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه مرکزی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری هوا خشک گردید و سپس از الک دو میلی‌متری عبور داده و در ادامه اقدام به تجزیه آزمایشگاهی نموده و عناصر و ویژگی‌های خاکی مانند شوری به‌روش عصاره‌گیری از گل اشباع و دستگاه شوری‌سنج، اسیدیته به‌روش تهیه گل اشباع و دستگاه pH متر، بافت خاک به‌روش هیدرومتری، آهن و مس به‌روش DTPA لیندسی و نیتروژن، پتاسیم به‌وسیله دستگاه فلیم فوتومتر، فسفر به‌روش اولسن توسط دستگاه اسپکتروفتومتر، نیتروژن به‌روش کجلدال، ^۱ TNV به‌روش تیتراسیون، ماده آلی به‌روش والکلی بلاک و وزن مخصوص ظاهری خاک به‌روش سیلندر اندازه‌گیری شد. پس از آماده‌سازی، داده‌ها به نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۶ وارد شد و در ادامه برای فراخوانی در محیط ArcGIS 10.8 مورد استفاده قرار گرفت. برای تهیه نقشه از انواع روش‌های زمین‌آمار مانند IDW^۲، Kriging و توابع پایه شعاعی استفاده گردید، در نهایت براساس مقدار کمترین مقدار خطا، بهترین روش برای تهیه نقشه انتخاب شد. در ادامه لایه تیپ و واحد اراضی، از معاونت برنامه‌ریزی استانداری مازندران تهیه شد. سپس محدوده مورد مطالعه از آن جدا و سپس برحسب نوع تیپ واحد اراضی طبقه‌بندی شد. لایه‌های شیب، جهات شیب و ارتفاع از سطح دریا در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ از مدل رقومی ارتفاع (DEM^۳) با اندازه سلول ۳۰ متری تهیه گردید.

برای تهیه نقشه رقومی عوامل اقلیمی با توجه به عدم وجود ایستگاه هواشناسی در منطقه یانه‌سر شهرستان بهشهر، از آمار و اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی موجود در اطراف منطقه که در سه استان مازندران، گلستان و سمنان قرار داشتند، شامل هم‌دید، باران‌سنجی و اقلیم‌شناسی استفاده گردید. لایه‌های اقلیمی منطقه از ۱۳ ایستگاه هم‌دید و باران‌سنجی واقع در حاشیه محدوده تحقیق که شامل دمای کمینه، بیشینه و متوسط از سال‌های ۱۳۸۳-۱۴۰۱ بود، از اداره آب منطقه‌ای و هواشناسی سه استان مازندران، گلستان و سمنان تهیه شد. سپس برای تهیه نقشه وضعیت اقلیمی منطقه (دما و

- 1- Total Neutralizing Value
- 2- Inverse distance weighting
- 3- Digital Elevation Model

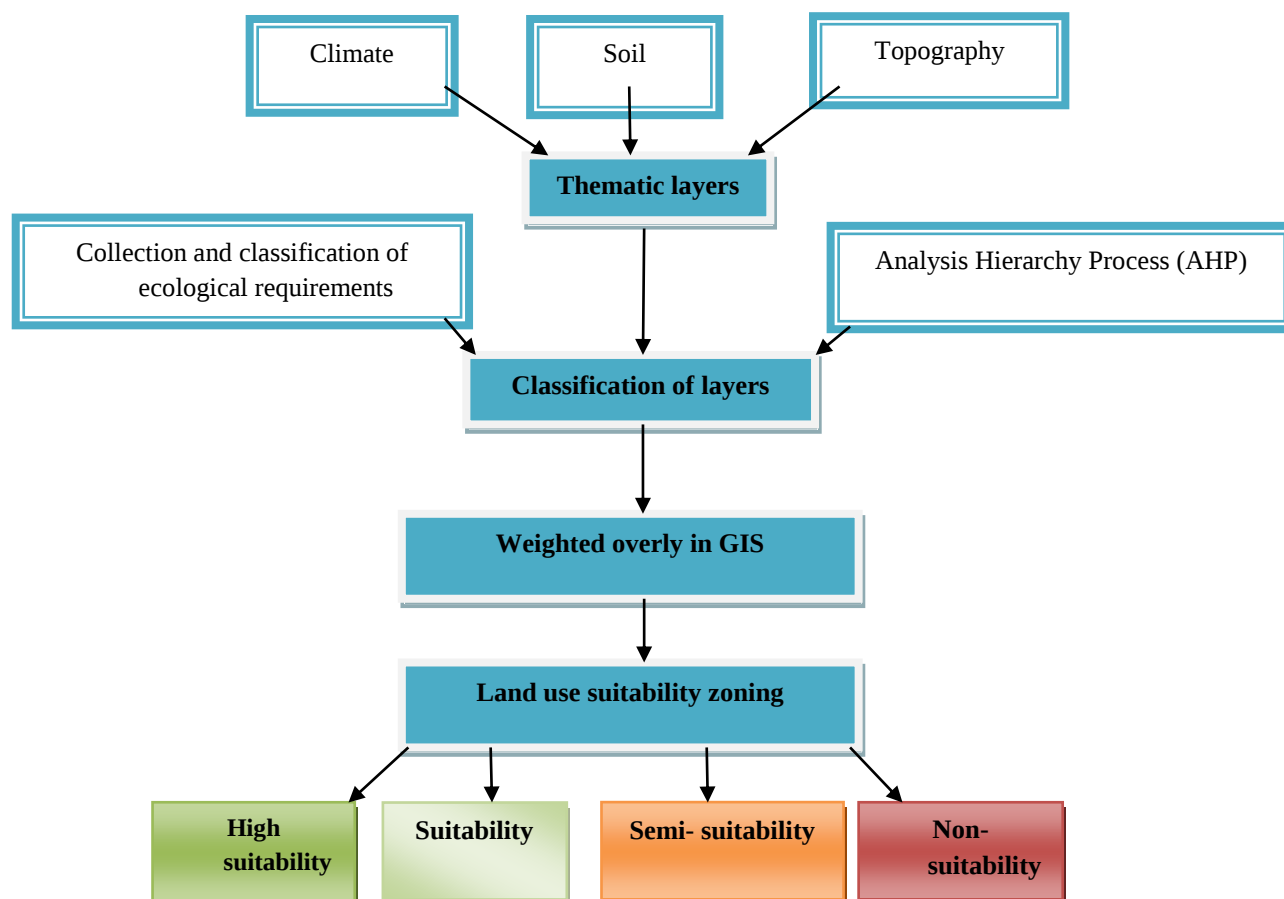
جدول ۱- نیازهای بوم‌شناختی گیاه برنج (Kazemi, 2013)
Table 1- Ecological requirements of rice (Kazemi, 2013)

متغیر Variable	بسیار مستعد (خیلی مناسب) Highly suitable (S ₁)	مستعد (نسبتاً مناسب) Moderately suitable (S ₂)	نیمه‌مستعد (ضعیف) Marginally suitable (S ₃)	غیرمستعد (نامناسب) Not suitable (N)
میزان بارش سالانه Annual precipitation (mm)	1000<	700-1000	500-700	<500
دمای متوسط سالانه Average annual temperature (°C)	22-27	18-22 27-32	12-18 32-37	<12 37<
دمای کمینه سالانه Average minimum temperature (°C)	12-17	10-12	<10	<10
دمای بیشینه سالانه Average maximum temperature (°C)	25-30	20-25 30-35	35-40	40<
شوری خاک EC (dS.m ⁻¹)	0-3	3-5	5-8	7<
شاخص واکنش خاک pH	5.5-6.5	6.5-7.5	4.5-5.5	<4.5 7.5<
بافت خاک Texture	رسی سیلتی، لومی رسی، رسی و لومی رسی سیلتی Silty clay, clay loam, clay, silty clay loam	لومی‌شنی، رسی لومی و رسی‌شنی Loam, sandy, loam clay, sandy clay	لومی، لومی رسی و لومی سیلتی Loam, clay loam, silty loam	شنی لومی و شنی Loam sandy, sandy
شیب Slope (%)	0-3	3-6	6-8	8<
جهت شیب Slope aspect	بدون جهت، جنوبی و جنوب شرقی Falat, south, eastsout	شرقی و شمال شرقی Eastern, eastnorth	جنوب غربی و شمال غربی West south. West north	غربی و شمالی West, north
ارتفاع از سطح دریا Elevation (m)	0-400	400-800	800-1400	1400<
آهن خاک Fe (mg.kg ⁻¹)	10-15	15-18 8-10	18-20 5-8	20< <5
مس خاک Cu (mg.kg ⁻¹)	0/1-1/9	1-1/2	2-6	6< <0/9
فسفر خاک Phosphorous (mg.kg ⁻¹)	10-12	12-15 7-10	15-18 5-7	18< <5
پتاسیم خاک Potassium (mg.kg ⁻¹)	200-250	150-200 250-300	100-150	300< <100
نیتروژن خاک (%) Nitrogen	1<	1-0/7	0/5-0/7	<0/5
ماده آلی خاک Orgince matter (%)	3<	2-3	1-2	<1
آهک خاک Total neutralizing value (TNV)	20-40	20-25	25-50	50< <20

جدول ۲- شاخص‌های مورد نیاز جهت پهنه‌بندی اراضی (Ghaffari et al., 2000)

Table 2- Indices for land suitability zoning (Ghaffari et al., 2000)

وضعیت تولید محصول Crop production status	پهنه Zone
۸۰-۱۰۰ درصد پتانسیل تولید آن محصول در این پهنه وجود دارد. This zone possesses 80-100% of the potential yield for that crop.	بسیار مستعد (خیلی مناسب) Highly suitable (S ₁)
۶۰-۸۰ درصد پتانسیل تولید آن محصول در این پهنه وجود دارد. This zone possesses 60-80% of the potential yield for that crop.	مستعد (نسبتاً مناسب) Moderately suitable (S ₂)
۴۰-۶۰ درصد پتانسیل تولید آن محصول در این پهنه وجود دارد. This zone possesses 40-60% of the potential yield for that crop.	نیمه‌مستعد (ضعیف) Marginally suitable (S ₃)
< ۴۰ درصد پتانسیل تولید آن محصول در این پهنه وجود دارد. This zone possesses less than 40% of the potential yield for that crop.	غیرمستعد (نامناسب) Not suitable (N)



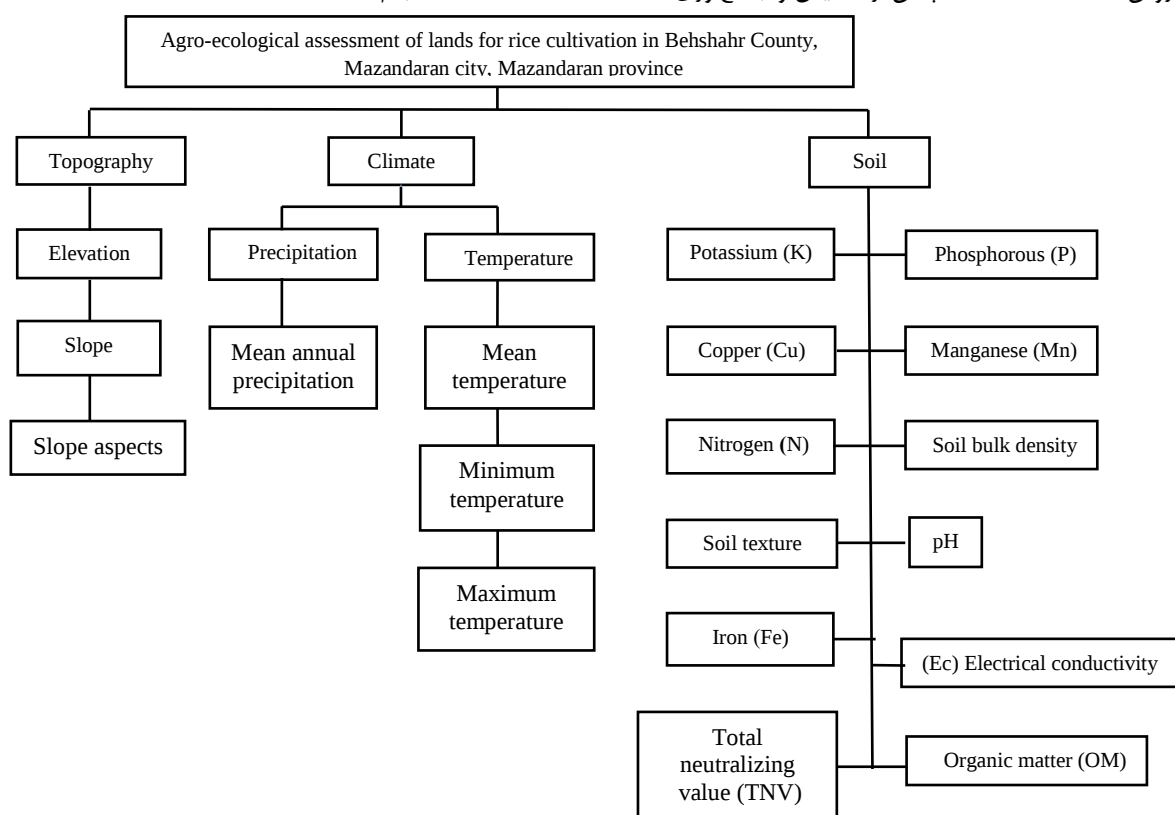
شکل ۲- نمودار جریان‌ی ارزیابی تناسب اراضی زراعی جهت کشت برنج در بخش یانه‌سر شهرستان بهشهر، استان مازندران

Fig. 2- Flowchart of the land suitability assessment process for rice cultivation in the Yaneh-sar District of Behshahr County, Mazandaran province

سطح سوم قرار گرفتند (شکل ۳). برای جمع‌آوری داده‌ها و وزن معیارها و زیرمعیارها از پرسش‌نامه AHP استفاده شد. پرسش‌نامه‌ها شامل مقایسه‌های مشترک برای کلیه عوامل تأثیرگذار در مکان‌یابی گیاه زراعی برنج بوده که توسط ۲۵ کارشناس خبره برای هر گیاه

برای ایجاد درخت سلسله‌مراتبی AHP در سطح اول هدف تحقیق، یعنی استعدادسنجی کشت برنج در اراضی کشاورزی یانه‌سر قرار گرفت. معیارها شامل اقلیم، توپوگرافی و خاک در سطح دوم قرار گرفتند. هرکدام از معیارها به زیرمعیارهایی تقسیم شدند. زیرمعیارها در

تکمیل گردید. برای سنجش پایایی پرسش‌نامه به همان ضریب ناسازگاری روش AHP اکتفا شد. پس از تکمیل و جمع‌آوری پرسش‌نامه‌ها، تجزیه و تحلیل آن‌ها به‌وسیله نرم‌افزار Expert Choice نسخه ۱۱ انجام شد.



شکل ۳- درخت فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) عوامل تأثیرگذار بر استعدادسنجی کشت برنج
Fig. 3- Analytic Hierarchy Process (AHP) model tree of factors influencing rice cultivation potential

جدول ۳- مقادیر ترجیحات برای مقایسه‌های زوجی (Ghodsipour, 2012)

Table 3- Preference values for pairwise comparisons (Ghodsipour, 2012)

مقدار عددی	ترجیحات
Numerical value	Preference
9	کاملاً مرجح یا کاملاً مهم‌تر و یا کاملاً مطلوب‌تر Extremely preferred / important (absolute dominance)
7	ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت خیلی قوی Very strongly preferred / important
5	ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت قوی Strongly preferred / important
3	کمی مرجح یا کمی مهم‌تر یا کمی مطلوب‌تر Moderately preferred / important (slight dominance)
1	ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت یکسان Equally preferred / important (equal importance)
2,4,6,8	ترجیحات بین فواصل Intermediate values (used for compromise between the above judgments)

در روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، پس از تشکیل درخت سلسله مراتبی و تهیه پرسش‌نامه، معیارها و زیرمعیارها

شده از مراکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استانهای کشور مقایسه گردید تا مشخص شود که پیش‌بینی‌های مدل تا چه اندازه با اندازه‌گیری‌های واقعی انطباق دارد. آماره‌های مورد استفاده برای بررسی دقت مدل، ضریب تغییرات (CV^2)، جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE^2$) و ضریب همبستگی (r) بودند. وجه تمایز این مدل نسبت به سایر مدل‌های موجود، بومی بودن آن می‌باشد. تعیین اقلیم این منطقه با استفاده از وبگاه گیگا (Gyga) محاسبه شده است.

نتایج و بحث

برای تهیه نقشه متغیرهای محیطی، روش‌های مدل‌های مختلف درون‌یابی اجرا، سپس مناسب‌ترین مدل براساس مقادیر برآورد خطا ($RMSE$) تعیین گردید. با توجه به جدول ۴، مناسب‌ترین مدل برای اکثر پارامترها روش کریجینگ بود. در مطالعه‌ای مشخص شد که روش‌های کریجینگ و کو-کریجینگ بهترین روش برای تخمین برآورد شوری در منطقه لنجان استان اصفهان است (Mashayekhi, et al., 2007). نقشه پراکنش برخی از متغیرهای محیطی در شکل ۴ نشان داده شده است.

خروجی نقشه‌های اقلیمی نشان می‌دهد که میزان بارش، رطوبت نسبی، میانگین دمای حداقل، متوسط و حداکثر، از غرب منطقه به شرق روند کاهشی دارد. منطقه از نظر بافت خاک دارای بافت‌های مختلفی شامل رسی، لومی-رسی، لومی، رسی سیلتی، لومی رسی سیلتی و لومی سیلتی می‌باشد.

نتایج حاصل از تطابق اراضی کشاورزی با نیازهای زراعی و محیطی برنج در نظام کشت نشایی نشان داد که تنها حدود ۲/۲ درصد از زمین‌های زراعی منطقه دارای پتانسیل بسیار مستعد جهت کشت برنج، حدود ۱۶/۷ درصد از زمین‌های زراعی دارای پتانسیل مستعد، حدود ۴۰/۵ درصد دارای پتانسیل نیمه‌مستعد و حدود ۴۰/۴ درصد نیز دارای پتانسیل غیرمستعد جهت کشت برنج می‌باشند (جدول ۵). با توجه به نتایج ذکرشده، مهم‌ترین دلایل استعداد پایین و عدم استعداد زمین‌های منطقه برای کشت برنج، وجود شیب در زمین‌های منطقه و همچنین نیاز آبی برنج در نظام کشت نشایی می‌باشد که براین اساس، حدود ۸۱ درصد از زمین‌های منطقه غیرقابل کشت برای برنج تشخیص داده شد و تنها حدود ۱۹ درصد از زمین‌های

به‌صورت زوجی با هم به‌صورت دوبه‌دو مقایسه گردید. در این روش ۲۵ کارشناس زراعت، قضاوت‌های ساده‌ای را از طریق سلسله مراتبی ایجاد شده تا رسیدن به اولویت برای تمامی گزینه‌ها انجام دادند. مقایسات زوجی این تحقیق در قالب ماتریس‌های مقایسه‌های زوجی و براساس طیف نه قسمتی قدسی‌پور (Ghodsipour, 2012) صورت گرفت (جدول ۳). برای بررسی ناسازگاری در قضاوت‌ها ضریبی به‌نام ضریب ناسازگاری (I.R.) محاسبه شد.

برآورد پتانسیل تولید

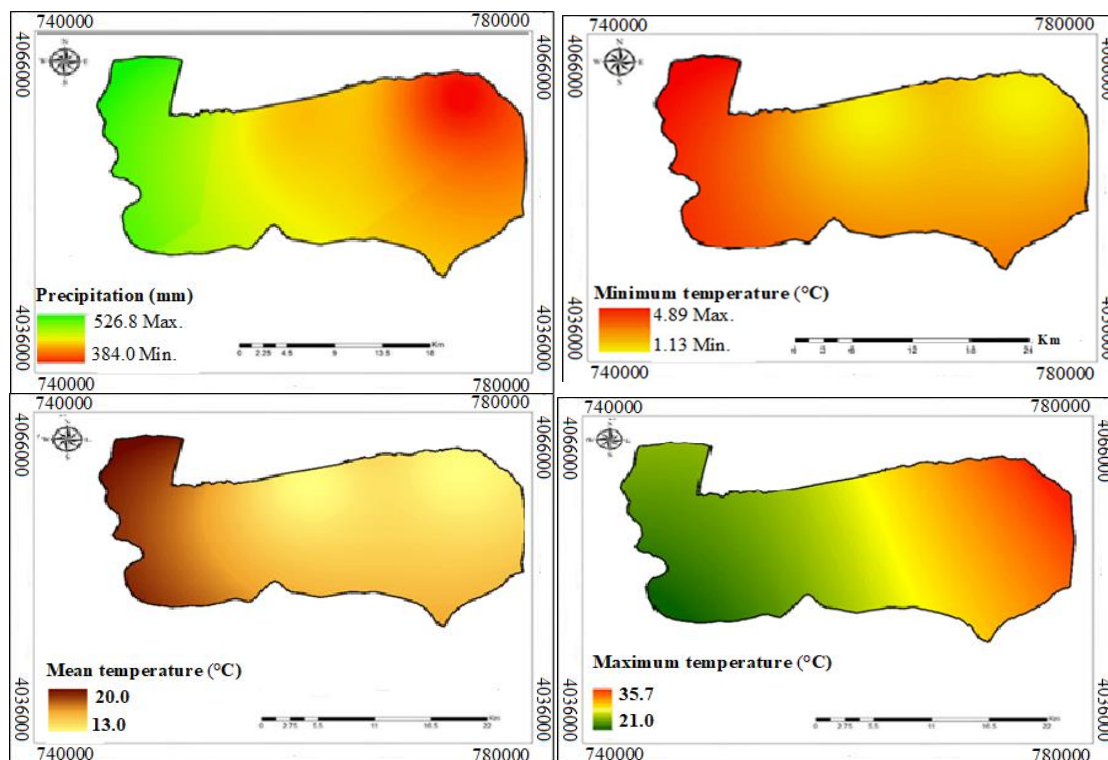
در این مطالعه، مدل SSM-iCrop2 برای برآورد پتانسیل تولید استفاده شد. این شبیه‌ساز، مقدار عملکرد پتانسیل را بر مبنای داده‌های هواشناسی، شرایط خاک، نحوه مدیریت زراعی و پارامترهای گیاهی محاسبه می‌نماید. این مدل، توانایی شبیه‌سازی مراحل فنولوژی، گسترش و پیری برگ، توزیع ماده خشک، تشکیل عملکرد و موازنه آب و خاک را دارد. مدل، شبیه‌سازی را به‌صورت روزانه انجام می‌دهد. مدل، مراحل سبز شدن، شروع مؤثر پُر شدن دانه‌ها، پایان مؤثر پُر شدن دانه‌ها، شروع پیر شدن برگ‌ها و رسیدگی را پیش‌بینی می‌کند. جهت استفاده از مدل شبیه‌سازی گیاهی SSM-iCrop2، اطلاعاتی شامل آمار هواشناسی که به‌صورت روزانه و شامل کمینه و بیشینه دمای روزانه، بارندگی روزانه و تشعشع خورشیدی روزانه، اطلاعات محلی یا محیطی شامل عرض جغرافیایی محل، غلظت گاز دی‌اکسید کربن، اطلاعات خاک شامل عمق خاک زراعی و بافت خاک و اطلاعات مدیریت تولید شامل تاریخ کاشت، تعیین نوع کشت آبی یا دیم تهیه و در مدل استفاده شده است. تولید ماده خشک به‌عنوان تابعی از تشعشع دریافت‌شده و دما تخمین زده می‌شود و موازنه آب خاک شامل رواناب، رشد ریشه و افزایش عمق مؤثر استخراج آب، تبخیر از سطح خاک، تعرق و زهکشی شبیه‌سازی می‌شوند (Soltani, 2019). مدل SSM-iCrop2 دارای چندین پارامتر می‌باشد که قبل از اجرای آن برای هر گیاه زراعی نیاز است که مقادیر آن پارامترها برآورد شوند. مقادیر پارامترهای مدل با استفاده از تحقیقات انجام‌شده در گذشته (Keramat et al., 2023) و همچنین با استفاده از واسنجی محاسبه گردید. پس از برآورد پارامترهای مدل، ارزیابی مدل انجام شد. بدین منظور، مدل اجراشده و خروجی آن با اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در تحقیقات گذشته و داده‌های جمع‌آوری

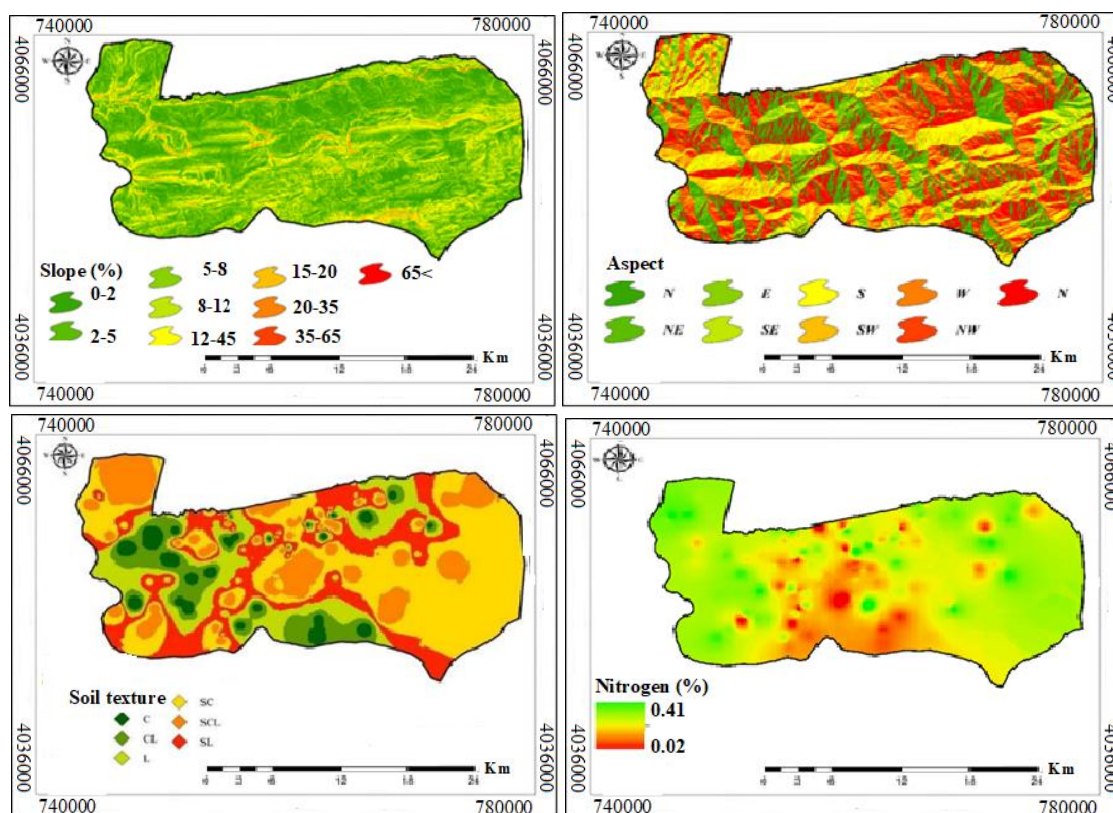
منطقه از نظر شیب، منابع آبی و دیگر عوامل محیطی مورد نیاز، استعدادسنجی اراضی نشان داده شده است. مناسب جهت کشت برنج برآورد گردید. در شکل ۵، نقشه نهایی

جدول ۴- روش برتر برای هم‌پوشانی متغیرهای خاکی در منطقه یانسر شهرستان بهشهر، استان مازندران

Table 4- Best method for interpolation of soil variables in the Yaneh-sar District of Behshahr County, Mazandaran province

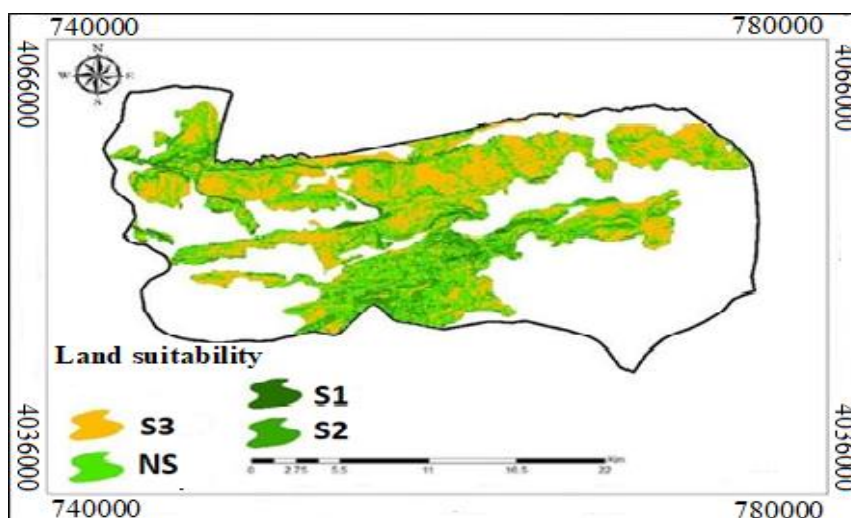
متغیر Variables	روش-مدل Method/modell	RMSE
EC	IDW-توان یک	0.327
pH	IDW-power 1	
	کریجنک-مدل کروی	0.289
	Kriging-spherical	
TNV	کریجنک-مدل نمایی	0.753
	Kriging-exponential	
N	IDW-توان یک	0.083
	IDW-power 1	
OM	کریجنک با مدل گوسی	0.985
	Kriging-Gaussian	
K	کریجنک با مدل گوسی	6.149
	Kriging-Gaussian	
Fe	کریجنک-مدل نمایی	0.934
	Kriging-exponential	
Mn	کریجنک-مدل کروی	0.964
	Kriging-spherical	
Cu	تابع شعاعی - چندربعی معکوس	0.805
	Radial Basis Function-Multiquartic	





شکل ۴- نقشه برخی از عوامل محیطی در منطقه یانسر شهرستان بهشهر، استان مازندران

Fig. 4- Maps of some environmental variables in the yaneh-sar District of Behshahr County, Mazandaran province



شکل ۵- نقشه نهایی استعدادسنجی اراضی جهت کشت برنج در بخش یانه‌سر شهرستان بهشهر، استان مازندران

Fig. 5- Final land suitability map for rice cultivation in Yaneh-sar District, Behshahr County, Mazandaran province

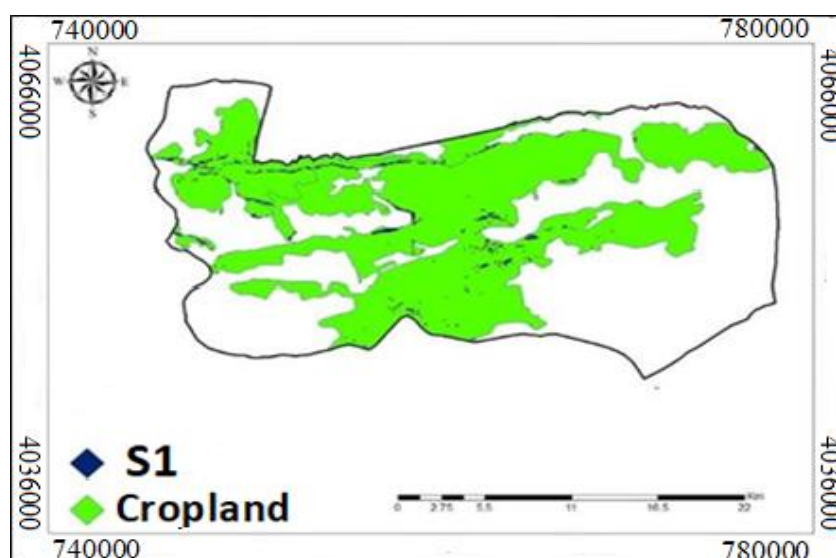
جدول ۵- مساحت پهنه‌های طبقه‌بندی شده جهت کشت برنج در بخش یانه‌سر شهرستان بهشهر، استان مازندران

Table 5- Area and proportion of zoned land classes for rice cultivation in Yaneh-sar District, Behshahr County, Mazandaran province

رتبه‌بندی پهنه‌ها Zone ranking	مساحت Area (ha)	نسبت مساحت پهنه به کل اراضی کشاورزی Proportion of total agricultural land (%)
مناطق بسیار مستعد High suitable areas	637	2.2
مناطق مستعد Moderately suitable areas	4690	16.7
مناطق نیمه‌مستعد Marginally suitable areas	11370	40.5
مناطق غیرمستعد Non- suitable areas	11355	40.4

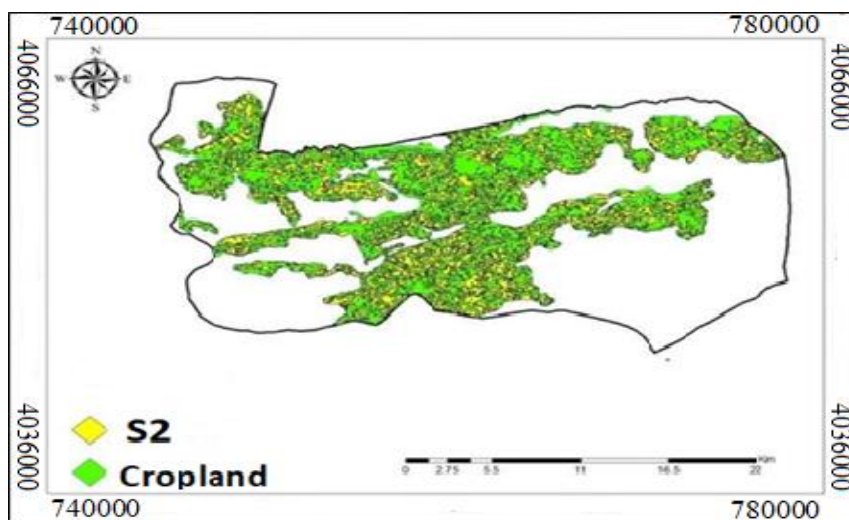
هکتار (۱۶/۷ درصد) را در بر می‌گیرد (شکل ۷). یکی از دلایل پراکندگی نقاط مستعد و حتی بسیار مستعد کشت برنج، نیاز آبی و شرایط شیب زمین بوده که با توجه به کوهپایه بودن منطقه، اکثر مناطق از همواری مناسب جهت کشت برنج برخوردار نبوده و بنابراین مناطق مستعد به صورت نقاط پراکنده و پهنه‌های کوچک در منطقه مشاهده شد.

مناطق بسیار مستعد کشت برنج، سطحی حدود ۶۳۷ هکتار (۲/۲ درصد) را در بر می‌گیرد که تنها به صورت نوار باریکی در طول امتداد شمال منطقه که دارای زمین‌های مسطح و نزدیک به رودخانه نکارود بودند و همچنین به صورت پهنه‌های کوچک در قسمت‌های از مرکز قابل مشاهده می‌باشد (شکل ۶). مناطق مستعد کشت برنج بیشتر در بخش‌هایی از شمال و جنوب منطقه واقع شده و سطحی حدود ۴۶۹۰



شکل ۶- پهنه بسیار مستعد جهت کشت برنج در بخش یانه‌سر شهرستان بهشهر، استان مازندران

Fig. 6- High Suitable (S1) zone for rice cultivation in Yaneh-sar District, Behshahr County, Mazandaran province

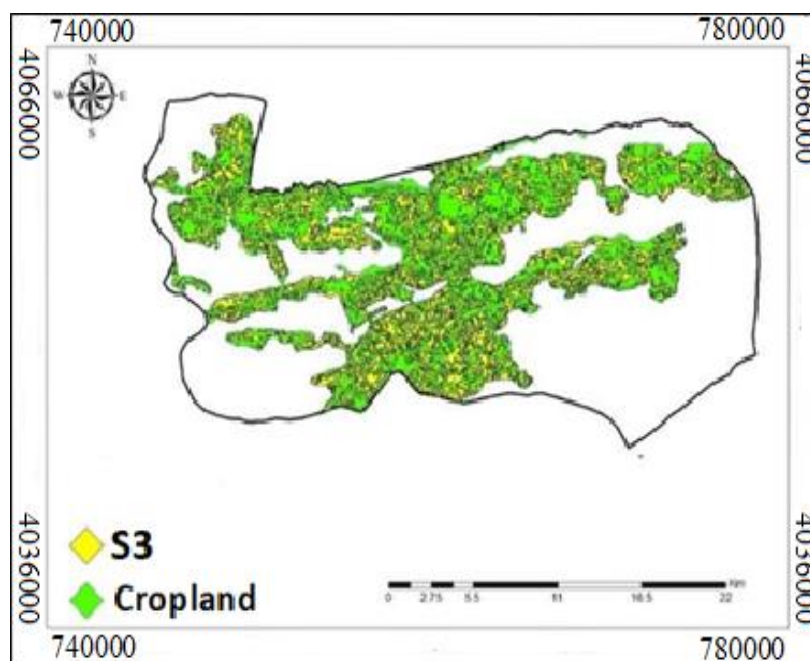


شکل ۷- پهنه مستعد جهت کشت برنج در بخش یانه‌سر شهرستان بهشهر، استان مازندران

Fig. 7- Moderately Suitable (S2) zone for rice cultivation in Yaneh-sar District, Behshahr County, Mazandaran province

(Asadi, 2019) اعلام کردند که تغییرات اقلیمی، منابع آب و توپوگرافی نقش مؤثری در تولید محصولات کشاورزی دارند و اشاره کردند که شیب به دلیل عدم نگهداشت مناسب آب، تأثیر منفی در تولید محصولات دارد.

در این مطالعه، مناطق نیمه‌مستعد کشت برنج در تمام سطح منطقه به صورت نقاط مختلف و لکه‌هایی پراکنده مشاهده شد (شکل ۸). با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، تغییرات نسبتاً بالای شیب زمین و کمبود منابع آبی از عوامل تأثیر در این پهنه بودند. رضوان و همکاران (Rezvan et al., 2018) و باقری و اسدی (Baqeri & Asadi, 2019)

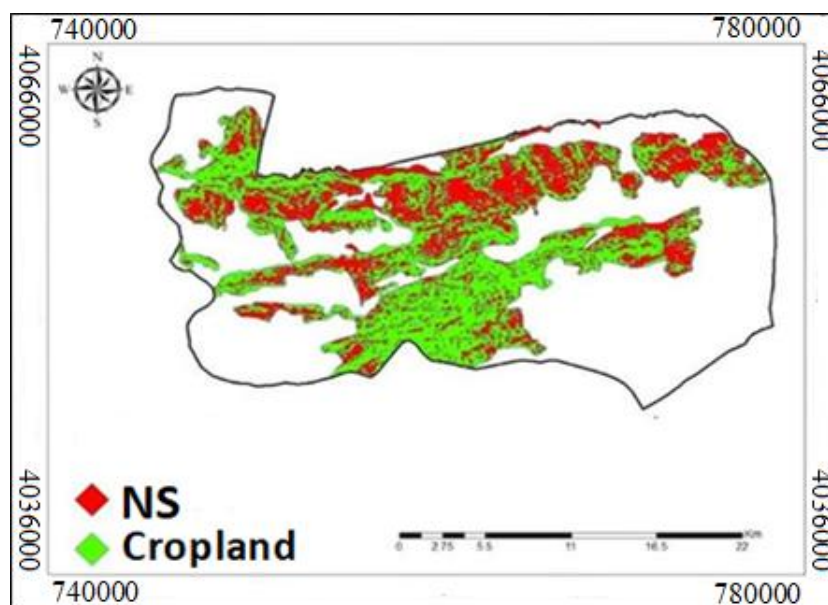


شکل ۸- پهنه نیمه‌مستعد جهت کشت برنج در بخش یانه‌سر شهرستان بهشهر، استان مازندران

Fig. 8- Marginally Suitable (S3) zone for rice cultivation in Yaneh-sar District, Behshahr County, Mazandaran province

ناکافی بودن میزان آب در دسترس، مساحت پهنه غیرمستعد بیشتر از سایر پهنه‌هاست. از اصول مهم و اولیه کشاورزی پایدار، متکی بودن کشت گیاهان به توانایی منطقه در جهت تأمین نیازهای بوم‌شناختی آن‌هاست و در گام‌های بعدی است که می‌توان با مدیریت صحیح، استفاده از نهاده‌ها پایداری کشاورزی را حفظ و تداوم بخشید. بنابراین در مناطقی که استعداد تولید یک گیاه وجود ندارد، کشت آن با مصرف حجم زیادی از منابع و نهاده‌های خارج از مزرعه و مدیریت فشرده، باعث آسیب به محیط و از بین رفتن منابع تولید در بلندمدت می‌گردد و سامانه زراعی را ناپایدار می‌سازد.

مناطق غیرمستعد کشت برنج در تمام بخش‌های منطقه از شمال غربی تا شمال شرقی و بخش‌های زیادی از غرب و شرق منطقه گستردگی داشته و سطحی حدود ۱۱۳۵۵ هکتار (۴۰/۴ درصد) را شامل می‌شود (شکل ۹). با توجه به خروجی نقشه‌های اقلیمی و عناصر خاک، مشخص گردید که یکی از علت‌های اصلی وجود بخش غیرمستعد قابلیت کشت برنج، شرایط توپوگرافی از جمله شیب‌های تند در زمین‌های زراعی کنونی منطقه است که باعث می‌شود این مناطق در پهنه غیرمستعد جهت کشت برنج قرار گیرد. با توجه به نوع تهیه زمین و نیاز ضروری به زمین‌های مسطح و آب فراوان جهت آماده‌سازی زمین در زراعت برنج، وجود زمین‌های غیر مسطح و



شکل ۹- پهنه غیرمستعد جهت کشت برنج در بخش یانه‌سر شهرستان بهشهر، استان مازندران

Fig. 9- Non-Suitable (NS) zone for rice cultivation in Yaneh-sar District, Behshahr County, Mazandaran province

سال اخیر در منطقه می‌باشد. از طرفی، به نظر می‌رسد که دلیل پایین بودن خلأ عملکرد در برنج، کشت آبی و تأمین آب و رطوبت مورد نیاز در فصل رشد می‌باشد. کشت برنج در این منطقه به‌صورت غرقاب می‌باشد. در نظام کشت غرقابی برنج، حدود ۶۰ درصد از آب آبیاری جهت کشت اغلب به‌صورت نفوذ عمقی و یا هرز آب از دسترس گیاه خارج می‌شود که با تغییر در الگوی کاشت، کارایی مصرف آب افزایش می‌یابد. روش تولید برنج به‌صورت هوزاری می‌تواند باعث کاهش مصرف آب شود. با توجه به کوهپایه‌ای بودن منطقه، اکثر نزولات

براساس نتایج حاصل از خروجی مدل SSM-iCrop2، واحدهای اراضی کشاورزی منطقه در تولید شلتوک برنج دارای پتانسیل تولید حدود ۳/۹۲ تن شلتوک در هکتار می‌باشد و میزان تولید فعلی کشاورزان حدود ۳/۲ تن در هکتار می‌باشد و حدود ۰/۷۲ تن در هکتار خلأ عملکرد تولید شلتوک برآورد شد. در این پژوهی مشاهده شد که میزان پتانسیل تولید شلتوک در منطقه و تولید فعلی کشاورزان دارای اختلاف ناچیزی بوده و خلأ عملکرد کم می‌باشد، این مسئله به‌دلیل ورود تجهیزات مکانیزه جدید مثل نشاکار و کمباین برداشت در چند

بودن جهات شیب مختلف، در بیشتر نقاط منطقه مشاهده شده، به طوری که به طور نسبی برای دو گیاه گندم و جو شامل مناطق شمالی و غربی، برای گیاه عدس در مناطق مرکزی و برای گیاه برنج بیشتر به صورت مناطق پراکنده در شمال و جنوب می باشد. نتایج حاصل از خروجی مدل SSM-iCrop2 جهت تعیین پتانسیل تولید گیاه برنج، پتانسیل تولید ۳/۹۲ تن در هکتار شلتوک برآورد شده و میزان تولید فعلی کشاورزان حدود ۳/۲ تن در هکتار بوده که حدود ۰/۷۲ تن در هکتار خلأ عملکرد در تولید شلتوک برنج به دست آمد. به نظر می رسد که دلیل پایین بودن خلأ عملکرد را می توان به نظام کشت آبی و تامین آب و رطوبت مورد نیاز در فصل رشد ارتباط دانست. به طور کلی، در منطقه مورد مطالعه، بخش های که به منابع آبی کافی دسترسی دارند و تسطیح شده اند، کشت برنج به صورت محدود توصیه می گردد.

جوی به علت شیب منطقه از دسترس خارج می شود. پیشنهاد می گردد که با ایجاد سازه های مختلف نسبت به ذخیره سازی و استفاده بهینه آب در زمان نیاز گیاه زراعی اقدام گردد.

نتیجه گیری

خروجی نقشه های اقلیمی نشان می دهد که میزان بارش، رطوبت نسبی، میانگین دمای حداقل، متوسط و حداکثر، از غرب منطقه به شرق روند کاهشی دارد. از نظر بافت خاک، منطقه دارای بافت های مختلفی شامل رسی، لومی-رسی، لومی، رسی سیلتی، لومی رسی سیلتی و لومی سیلتی می باشد. نتایج استعدادسنجی اراضی جهت کشت گیاه زراعی برنج نشان داد که پهنه های بسیار مستعد و مستعد، با توجه به کوهپایه ای بودن منطقه، تنوع بافت خاک، ارتفاع مختلف از ۷۶۴ در قسمت های شمال غربی تا ۲۶۹۸ متر در جنوب شرقی و دارا

References

- Ahmadizadeh, S. S. R. (2003). Determination and application of quantitative ecological models in GIS environment - Case study (Qara Tikan-Zavin region). Ph.D. Dissertation, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Persian)
- Al-Sababha, N. (2024). The impact of climate change on the aridity index in Jordan: Integrating Statistical Models and geographic information systems. *Journal of the Faculty of Arts (JFA)*, 84(1), 1-47. <https://doi.org/10.21608/jarts.2023.209757.1358>
- Ashraf, S. (2011). Estimating the land production potential for wheat using the GIS method. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(8), 118-122.
- Aymen, A. T., Al-Husban, Y., & Farhan, I. (2021). Land suitability evaluation for agricultural use using GIS and remote sensing techniques: The case study of Ma'an Governorate, Jordan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(1), 109-117. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2020.01.001>
- Baqeri, A., & Asadi, S. (2019). Determination of suitable areas for the cultivation of annual snail medic (*Medicago scutellata* L.) using Analytic Hierarchy Process (AHP) and Geographic Information System (GIS) in Kermanshah Province. *Agroecology Journal*, 11(2), 467-482. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jag.v11i2.67180>
- Dadrasi, A., Vačkářová, D., Salmani, F., Nguyen, C. T., & Weinzettel, J. (2025). Global rice land suitability and adaptation strategies under climate change. *Journal of Environmental Management*, 394, 127630. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127630>
- Farajzadeh, M., Adab, H., & Amiri, R. (2007). The preparation of a suitability map for colza (*Brassica napus* L.) using statistical analysis and GIS; Case study: Sabzevar Township, Iran. *International Journal of Botany*, 3, 359-365. <https://doi.org/10.3923/ijb.2007.359.365>
- Ghaffari, A., Kook, H., & Valli, H. S. (2002). Determination of suitable areas for wheat cultivation towards sustainable agriculture using GIS (Abstract). Proceedings of the 7th Iranian Congress of Crop Production and Plant Breeding. Seed and Plant Improvement Institute, Karaj, Iran. p. 527. (In Persian)
- Ghodsipour, S. H. (2012). Analytic Hierarchy Process (AHP). Amirkabir University of Technology Press. Tehran, Iran. 219 p. (In Persian)
- Kamali, G., Sedghianpour, A., Sedaghat Kerdar, A., & Asgari, V. (2008). Investigation of climatic potential for rain-fed wheat cultivation in East Azerbaijan province. *Journal of Water and Soil Science (Science and*

- Technology of Agriculture and Natural Resources*, 22(2), 476-483. (In Persian with English abstract)
11. Kazemi, H. (2013). Agroecological zoning of Golestan province for determination of cropping pattern. PhD. Dissertation, Tarbiat Modars University, Tehran, Iran. (In Persian)
12. Kazemi, H., & Akinci, H. (2018). A land use suitability model for rainfed farming by Multi-criteria Decision-making Analysis (MCDA) and Geographic Information System (GIS). *Ecological Engineering*, 116, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.02.021>
13. Kazemi, H., Sadeghi, S., & Akinci, H. (2016). Developing a land evaluation model for faba bean cultivation using geographic information system and multi-criteria analysis (A case study: Gonbad-Kavous region, Iran). *Ecological Indicators*, 63, 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.021>
14. Keramat, S., Torabi, B., Soltani, A., & Zeinali, E. (2023). Parameterization and evaluation of SSM iCrop2 model to simulate the growth and yield of rice in Iran. *Plant Production Research*, 30(1), 21-47. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22069/jopp.2021.19090.2822>
15. Kılıc, O. M., Ersayın, K., Gunal, H., Khalofah, A., & Alsubeic, M. S. (2022). Combination of fuzzy-AHP and GIS techniques in land suitability assessment for wheat (*Triticum aestivum*) cultivation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(4), 2634-2644. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.12.050>
16. Makhdoom, M. (1992). Environmental assessment and planning with geographic information systems. Tehran University Press, Tehran, Iran. 309 pages. (In Persian)
17. Mashayekhi, K., Asadi, Z., Movahedi Naeini, S.A.R., & Hajrasuliha, S. (2007). Salinity regionalization with geostatistic method in a wet soil in southern Lenjan, Isfahan (Iran). *Indian Journal of Agricultural Research*, 41, 1-9.
18. Mohammadi, H., Kazemi, M., & Goodarzi, N. (2007). Application of GIS in the feasibility study of olive cultivation in Isfahan province. *Pajouhesh & Sazandegi*, 74, 123-133. (In Persian with English abstract)
19. Mosavati, S. A., & Seiedjalali, S. A. (2002). Determination of land suitability and wheat production potential in saline lands of Golestan province (Technical Publication No. 1136). *Soil and Water Research Institute*. (In Persian).
20. Panah Nezhad, V., Ahmadi Sani, N., & Javanmard, A. (2022). Spatial multi-criteria analysis of ecological land suitability for irrigated farming. *Journal of Agroecology*, 14(2), 219-233. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/agry.2021.20290.0>
21. Peato, G. (2007). Evaluating land use plans under uncertainty. *Land Use Policy*, 24(1), 165-174. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2006.02.003>
22. Rezvan, S., Kazemi, H., & Ghadirifar, F. (2018). Temporal and spatial feasibility of hull-less barley cropping in agricultural lands of Gorgan Township. *Cereal Research Journal*, 8(1), 127-138. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22124/C.2018.3133>
23. Riahi, A. A. (2000). Geographical Landscape of Hezarjrib-e Behshahr. Ayandegan Publications. Tehran, Iran. 300 p. (In Persian)
24. Soltani, A. (2019). Modeling the growth and production of large-scale vegetation with SSM-icrop2: crops, vegetables, orchards, and pastures. Research project report, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian)
25. Sys, I., Van-Ranst, E., & Debyeve, J. (1991). Land evaluation, Part 1: Principles in Land Evaluation and Crop Production Calculation. General Administration for Development Cooperation. Agricultural Publications, 7, Brussels, Belgium.
26. Tajvidi, G. (2002). An Introduction to Geographic Information Systems (Adapted from Ian Heywood). National Cartographic Center Publications. (In Persian)
27. Yousif, I. (2024). Optimizing agricultural land evaluation of some areas in the New Delta region, Al-Dabaa Corridor, Egypt. *Egyptian Journal of Soil Science*, 64(1), 193-206. <https://doi.org/10.21608/ejss.2023.239906.1669> .



The Evaluation of the Effect of Solid Vermicompost, Vermicompost Extract, and Seaweed on some Physio-Morphological Characteristics of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.)

F. Rigi¹, M. Dahmardeh^{1*}, M. R. Asgharipour¹, M. Heidari Majd² and A. R. Sirosmehr¹

1- Department of Agriculture, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran

2- Department of Medicinal Chemistry, Faculty of Pharmacy, Zabol University of Medical Sciences, Zabol, Iran

(*- Corresponding author's Email: dr.dahmardeh@uoz.ac.ir)

Received: 15-12-2025
Revised: 11-03-2026
Accepted: 14-03-2026
Available Online: 04-04-2026

How to cite this article:

Rigi, F., Dahmardeh, M., Asgharipour, M. R., Heidari Majd, M., & Sirosmehr, A. R. (2026). The evaluation of the effect of solid vermicompost, vermicompost extract, and seaweed on some physio-morphological characteristics of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Journal of Agroecology*, 18(1), 81-100. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.96982.1263>

Introduction

Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.), a medicinal plant belonging to the Malvaceae family, is highly valued for its food and medicinal products and ornamental uses (Richardson & Arlotta, 2021). The sustainability of medicinal plants largely depends on the efficient utilization of energy through environmentally friendly inputs (Bakhshi et al., 2025). In agricultural systems, soil and water are the two primary factors influencing crop growth and yield (Abebe et al., 2022). The application of eco-friendly inputs derived from natural and organic sources can enhance plant growth and promote environmental sustainability more effectively than synthetic chemical fertilizers (Przemieniecki et al., 2021). Vermicompost and seaweed extracts improve soil physicochemical properties, increase nutrient uptake, and enhance yield and growth characteristics (Narimani et al., 2018). Therefore, the present study was conducted for the first time under the climatic conditions of Taftan County, Sistan and Baluchestan Province, Iran, with the aim of achieving maximum yield in organic roselle production.

Materials and Methods

A Split -plot-factorial experiment based on a randomized complete block design with three replications was carried out in Taftan city, Sistan and Baluchestan Province, during the 2022 growing season. The main plot factor consisted of solid vermicompost at two levels (0 and 10 t.ha⁻¹). Sub-plot treatments included factorial combinations of vermicompost extract foliar application at three levels (0.5, 1, and 1.5 ml.L⁻¹) and seaweed extract foliar application at three levels (1.5, 3, and 4.5 ml.L⁻¹). Foliar sprays of both vermicompost and seaweed extracts were applied at three growth stages: four leaves, stem elongation, and flowering

Results and Discussion

Analysis of variance revealed that the application of solid vermicompost, vermicompost extract and seaweed extract significantly affected all measured morphophysiological traits. Moreover, the three-way interaction among



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

 <https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.96982.1263>

solid vermicompost, vermicompost extract, and seaweed extract was significant for all traits. Mean comparisons indicated that the highest plant height values for stem diameter, number of lateral branches, number of fruits per plant, carbohydrate content, anthocyanin content, economic yield, and biomass yield were obtained with the application of solid vermicompost at 10 t ha^{-1} . The maximum biomass yield ($27604.2 \text{ kg.ha}^{-1}$) was obtained, which was 47.45% higher than the control. The maximum sepal yield ($2629.1 \text{ kg.ha}^{-1}$) was obtained, which was 33.12% higher than the control. The maximum anthocyanin content (3.79 mg.g^{-1}) obtained, which was 35.8% higher than the control. All mentioned criteria were recorded when vermicompost extract 1.5 ml L^{-1} was combined with seaweed extract 4.5 ml L^{-1} . These findings suggest that organic fertilizers not only increase crop yield but also enhance the accumulation of secondary metabolites in roselle, thereby improving its medicinal value. The adoption of organic fertilizers plays a crucial role in reducing environmental pollution and supporting the goals of sustainable agriculture.

Conclusion

The growing medium is one of the most important factors influencing plant growth and quality of biological inputs through their ecological functions (Light, temperature, and nutrient availability), reducing the long-term vulnerability of agricultural ecosystems. Organic farming has therefore always attracted the attention of farmers. Overall, the results of this study demonstrate that organic fertilizers reduce production costs, improve both the quantity and quality of plant products, and contribute to long-term soil health, biodiversity conservation, and the establishment of sustainable agricultural systems. The greatest quantitative yield and secondary metabolite content were achieved with the application of 10 t ha^{-1} of solid vermicomposting, combined with foliar sprays of vermicompost extract 1.5 mL.L^{-1} and seaweed extract 4.5 mL.L^{-1} . These results confirm that the combined use of solid vermicompost and foliar application of vermicompost and seaweed extracts has a positive effect on growth and morphophysiological traits of roselle.

Keywords: Anthocyanin, Carbohydrate, Ecological agriculture, Harvest index

مقاله پژوهشی

جلد ۱۸، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص ۸۱-۱۰۰

ارزیابی تأثیر ورمی کمپوست جامد، عصاره ورمی کمپوست و جلبک دریایی بر برخی صفات فیزیولوژیکی و شیمیایی گیاه ترش (*Hibiscus sabdariffa* L.)

فرزانه ریگی^۱، مهدی دهمرده^{۱*}، محمد رضا اصغری پور^۱، مصطفی حیدری مجد^۲ و علیرضا سیروس مهر^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۳

چکیده:

به منظور ارزیابی تأثیر ورمی کمپوست جامد، عصاره ورمی کمپوست و عصاره جلبک دریایی بر برخی صفات کمی و کیفی گیاه چای ترش، آزمایشی به صورت اسپلیت پلات-فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در شهرستان تفتان، استان سیستان و بلوچستان در سال زراعی ۱۴۰۱ اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل ورمی کمپوست جامد در دو سطح صفر و ۱۰ تن در هکتار به عنوان عامل اصلی و محلول پاشی عصاره ورمی کمپوست در سه سطح ۱/۵، ۱ و ۴/۵ میلی لیتر بر لیتر و محلول پاشی عصاره جلبک دریایی در سه سطح ۱/۵، ۳ و ۴/۵ میلی لیتر بر لیتر به صورت فاکتوریل به عنوان عامل فرعی بودند. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که کاربرد ورمی کمپوست جامد، محلول پاشی سطوح عصاره ورمی کمپوست و عصاره جلبک دریایی برای تمام صفات فیزیولوژیکی و شیمیایی مورد اندازه‌گیری معنی‌دار بود. اثر متقابل کاربرد ورمی کمپوست جامد، محلول پاشی سطوح عصاره ورمی کمپوست و جلبک دریایی بر تمام صفات معنی‌دار شد. بیشترین ارتفاع بوته، قطر ساقه، تعداد شاخه جانبی، تعداد غوزه در بوته، کربوهیدرات، آنتوسیانین، عملکرد اقتصادی و عملکرد زیست‌توده در کاربرد کود ورمی کمپوست جامد در سطح ۱۰ تن در هکتار به دست آمد. بیشترین عملکرد زیست‌توده، ۲۷۶۰۴/۲ کیلوگرم در هکتار به دست آمد که نشان‌دهنده افزایش ۴۷/۴۵ درصدی نسبت به شاهد بود و علاوه بر این بیشترین میزان آنتوسیانین ۳/۷۹ میلی گرم به دست آمد که نشان‌دهنده افزایش ۳۵/۸ درصدی نسبت به شاهد بود و از کاربرد عصاره ورمی کمپوست در سطح ۱/۵ میلی لیتر و عصاره جلبک دریایی در سطح ۴/۵ میلی لیتر حاصل شد، کاربرد کودهای اکولوژیک، ضمن افزایش عملکرد محصول، متابولیت‌های ثانویه چای ترش را نیز در راستای افزایش خاصیت دارویی آن بالا می‌برند؛ از این رو در جهت کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و نیل به اهداف کشاورزی پایدار، کاربرد کودهای ارگانیک حائز اهمیت است.

واژه‌های کلیدی: آنتوسیانین، شاخص برداشت، کربوهیدرات، کشاورزی اکولوژیک

مقدمه

تولید ارگانیک جهت پایداری نظام‌های کشاورزی هستند که جهت نیل به این هدف، اصلاح روش‌های سنتی و توسعه تولیدات ارگانیک که منجر به استفاده بهینه از منابع زیست‌محیطی و افزایش بهره‌وری می‌شود، امری مهم به نظر می‌رسد (Delangizan et al., 2022). گیاه چای ترش متعلق به خانواده ختمی است که از ارزش اقتصادی

تولید پایدار گیاهان دارویی به مقدار زیادی به مصرف کارآمدتر انرژی در قالب نهاده‌ها وابسته است (Bakhshi et al., 2025). با گسترش روش‌های متعارف تولید محصولات کشاورزی، محققان برای مقابله با چالش‌های زیست‌محیطی در صدد ارزیابی روش‌های

۱- گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۲- گروه شیمی دارویی، دانشکده داروسازی، دانشگاه علوم پزشکی زابل، زابل، ایران

(* - نویسنده مسئول: Email: dr.dahmardeh@uoz.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.96982.1263>

مختلفی برای تولید عصاره ورمی‌کمپوست وجود دارد، در همه روش‌ها در طول عصاره‌گیری، مواد مغذی معدنی محلول، ریزجاندانان مفید، هیومیک اسیدها و فولویک اسیدها، هورمون‌ها و تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی از ورمی‌کمپوست وارد عصاره می‌شود، احتمالاً این مواد عامل مهمی برای رشد و جوانه‌زنی بهتر گیاهان هستند (Alizadeh et al., 2018). در پژوهشی که روی گیاه دارویی استویا (*Stevia rebaudiana* L.) انجام شد، نتایج نشان داد که کاربرد ورمی‌کمپوست بر ارتفاع بوته، طول ریشه، وزن خشک گل، سطح برگ، و رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاه اثر مثبت دارد (Valinejad et al., 2019). نامتعادل بودن نسبت عناصر غذایی مورد نیاز گیاه در خاک موجب غیرقابل استفاده شدن اکثر عناصر توسط گیاه می‌شود؛ چرا که همواره برخی عناصر غذایی، خاصیت رقابتی در جذب دارند (Xiong et al., 2018). از سوی دیگر، براساس قانون حداقل لیبیگ، باردهی گیاه توسط کمبود حتی یک عنصر غذایی محدود می‌شود، بدین معنی که اگر تمام عناصر غذایی مورد نیاز گیاه در دسترس باشد و تنها یکی از عناصر قابلیت جذب نداشته باشد، رشد گیاه محدود خواهد شد، در دوره‌های بحرانی رشد گیاه همچون گل‌دهی و رشد میوه، در اثر رقابت در جذب کربوهیدرات‌ها بین اندام‌های زایشی و ریشه، از فعالیت ریشه کاسته می‌شود و در نهایت جذب عناصر غذایی کاهش می‌یابد. در چنین شرایطی، تنها راه حل برای تأمین نیاز غذایی گیاه محلول‌پاشی است (Rezaei et al., 2024). عصاره جلبک دریایی از جمله محصولات ارگانیک است که به‌علت محرک رشد و سایر اثرات مفید بر گیاهان به طور گسترده‌ای به‌عنوان یک محرک زیستی در محصولات کشاورزی استفاده می‌شود (Ali et al., 2021). به‌دلیل وجود هورمون‌های رشد سیتوکینین، اکسین و ایندول بوتیریک اسید، عناصر غذایی مانند آهن، مس، روی، کبالت، مولیبدن، منگنز، نیکل، ویتامین‌ها و اسیدهای آمینه، اثرات مفیدی روی گیاهان دارد (Tursun, 2022). استفاده از عصاره جلبک دریایی باعث تحریک رشد ریشه، تأخیر در پیری و بهبود مقاومت در برابر تنش‌های محیطی می‌شود؛ ازاین‌رو عصاره جلبک باعث افزایش رشد و بهره‌وری گیاهان می‌شود (Vojodi Mehrabani et al., 2024). عصاره جلبک دریایی را می‌توان روی خاک و یا روی گیاهان به‌عنوان محلول‌پاشی استفاده کرد. آن‌ها روی حفظ و اصلاح خاک تأثیر مثبتی دارند، می‌توانند منبع مواد مغذی باشند و اثرات هورمونی از خود نشان دهند و کاربرد آن سبب افزایش رشد گیاه، تعداد برگ، تحریک رشد ریشه، تسریع زمان گل‌دهی،

بالایی به‌عنوان نوعی محصول غذایی و دارویی برخوردار بوده و به‌عنوان یک گیاه زینتی و مصرفی کاربردهای متنوعی دارد (Richardson & Arlotta, 2021). بخش اقتصادی گیاه، کاسبرگ گوشتی است که میوه (کپسول) را احاطه کرده است (Hasani Nasab et al., 2025). در نظام‌های کشاورزی، آب و کود دو عامل اساسی و تعیین‌کننده هستند که رشد و عملکرد محصولات زراعی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. استفاده از کودهای شیمیایی به‌عنوان راهی سریع برای تأمین عناصر غذایی و بهبود خاک به نظر می‌رسد؛ بااین‌حال، هزینه‌های بالای کودهای شیمیایی در مقدارهای پیشنهادی و آلودگی خاک و آب ناشی از مواد شیمیایی، تقاضای بیشتری برای استفاده از کودهای آلی ایجاد کرده است (Abebe et al., 2022). استفاده از کودهای آلی برای تولید محصولات کشاورزی علاوه بر کاهش آلودگی و بهبود کیفیت محیط زیست می‌تواند در ارتقای حاصلخیزی خاک مؤثر باشد (Vojodi Mehrabani, 2020). ازاین‌رو استفاده از نهاده‌های سازگار با محیط زیست از منابع طبیعی و ارگانیک می‌تواند موجب تحریک رشد گیاه و در ادامه باعث پایداری زیست‌محیطی شود که بسیار کارآمدتر از کودهای شیمیایی است (Przemieniecki et al., 2021). ورمی‌کمپوست نوعی کمپوست است که کرم طی یک فرآیند غیرحرارتی تولید می‌شود (Rusanescu et al., 2022). این کود به‌دلیل نوع زیستی وسیع میکروبی و فعال نسبت به سایر کمپوست‌های تولیدشده در فرآیند حرارتی، به‌عنوان پالاینده و اصلاح‌کننده مهم خاک استفاده می‌شود (Rajaei et al., 2022). ورمی‌کمپوست دارای ریزجاندانان هوازی مفید مانند ازتوباکترها بوده و عاری از انواع قارچ‌ها، باکتری‌های غیرهوازی و ریزجاندانان بیماری‌زا می‌باشد (Kováčik et al., 2022). همچنین ورمی‌کمپوست حاوی هومات می‌باشد که از مدفوع کرم خاکی در حال تجزیه شدن ایجاد می‌شود، این مواد دارای اثراتی مشابه هورمون‌ها و تنظیم‌کننده‌های رشد هستند، مواد هومیکی و مواد آلی موجود در ورمی‌کمپوست رشد گیاه را بسیار بهتر از تغذیه گیاه با کودهای معدنی تحریک می‌کنند (Mohkami et al., 2023). بالا بودن میزان عناصر غذایی نظیر پتاسیم، فسفر، ازت، منیزیم و کلسیم در مقایسه با سایر کودهای ارگانیک و همچنین وجود عناصر میکرو مانند مس، منگنز، آهن و روی از دیگر مزیت‌های ورمی‌واش است (Blouin et al., 2019). عصاره ورمی‌کمپوست دارای ویژگی‌های میکروبی و شیمیایی سودمند، ورمی‌کمپوست جامد است، روش‌های

افزایش تشکیل میوه، تأخیر پیری برگ و افزایش عملکرد کمی و کیفی میوه گیاه می‌شود (Mukherjee & Patel, 2020). با شروع تغییرات آب‌وهوایی، مقاومت در برابر آفت‌کش‌ها و رشد بیش از حد جمعیت، نیاز به شیوه‌های نوآورانه کشاورزی زیستی بیش از هر زمان دیگری ضروری است. (Masri et al., 2023) اصطلاح محرک‌های زیستی به موادی با منشأ بیولوژیکی یا ریزجاندارانی اطلاق می‌شود که وقتی از طریق کاربرد خاکی، محلول‌پاشی یا ترکیبی از هر دو روی گیاهان اعمال می‌شوند، فرآیندهای طبیعی در گیاه را تحریک کرده و کارایی گیاه در استفاده از مواد مغذی را افزایش می‌دهند (Askari Dehno et al., 2025). استفاده از جلبک دریایی و ورمی کمپوست (به صورت کود یا محلول‌پاشی) علاوه بر تأمین عناصر غذایی گیاهان و افزایش کیفیت محصولات، هیچ‌گونه خطری برای مصرف‌کنندگان ندارند، درحالی‌که استفاده از نهاده‌های شیمیایی به‌مرور سبب آلودگی محیط زیست شده و اثرات سوئی بر مصرف‌کنندگان محصولات تولید شده به دنبال دارند. ورمی کمپوست و عصاره جلبک به‌عنوان کود زیستی از طریق بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و افزایش جذب عناصر غذایی توسط گیاه سبب افزایش عملکرد و بهبود صفات رشدی گیاهان می‌شوند (Narimani et al., 2018). از این‌رو این پژوهش برای اولین بار در شرایط اقلیمی شهرستان تفتان به‌منظور دستیابی به تولید محصول ارگانیک چای ترش با بیشترین عملکرد کمی و کیفی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در شهرستان تفتان (بخش مرکزی، دهستان اسکل‌آباد، روستای گروک پایین) اجرا شد. موقعیت جغرافیایی محل اجرای آزمایش ۶۰ درجه و ۴۵ دقیقه طول شرقی جغرافیایی و ۲۸ درجه و ۲۲ دقیقه عرض شمالی با ارتفاع ۱۴۰۰ متر از سطح دریا است، متوسط دمای شهرستان تفتان ۱۸ درجه سانتی‌گراد، میانگین حداکثر دما ۳۶ درجه سانتی‌گراد، بارندگی سالانه ۱۵۰ میلی‌متر است. این شهرستان با توجه به ساختار طبیعی و اقلیمی متنوع، دارای دو پهنه اقلیمی کوهستانی-سرد و معتدل شمالی و پهنه اقلیمی گرم و خشک جنوبی می‌باشد، که محل اجرای آزمایش در پهنه اقلیمی معتدل شمالی قرار دارد (Alidoost Dehri et al., 2023) قبل از کاشت از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری مزرعه نمونه خاک تهیه و به آزمایشگاه ارسال شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آنالیز خاک در جدول ۱،

آنالیز ورمی کمپوست (تهیه شده از پژوهشگاه زابل) در جدول ۲ و آنالیز عصاره جلبک دریایی با نام تجاری اگری پلکس AGRIPLEX (از شرکت توسعه و بهبود نهاده‌های کشاورزی پارس یزد تهیه شده است) در جدول ۳ ارائه شده است. آزمایش به‌صورت اسپلیت پلات - فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۱۸ تیمار در سه تکرار طی سال زراعی ۱۴۰۱ انجام شد. تیمار ورمی کمپوست جامد در دو سطح ۰ و ۱۰ تن در هکتار در کرت‌های اصلی، تیمار عصاره ورمی کمپوست در سه سطح ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلی‌لیتر بر لیتر و تیمار عصاره جلبک دریایی در سه سطح ۱/۵، ۳ و ۴/۵ میلی‌لیتر بر لیتر در کرت‌های فرعی اعمال شد. تیمار ورمی کمپوست جامد در زمان قبل از کاشت به‌صورت خاکی مورد استفاده قرار گرفت. عصاره ورمی کمپوست و جلبک دریایی در سه مرحله (شامل چهار برگ، ساقه‌رفتن و شروع گل‌دهی) به‌صورت محلول‌پاشی اعمال شد. آماده‌سازی زمین در اواخر بهمن ماه شامل عملیاتی از قبیل شخم و دیسک و در اسفندماه کرت‌بندی و پیاده‌سازی نقشه کاشت انجام گردید. ابعاد هر کرت ۳×۴ متر، کشت به‌صورت جوی و پشته با چهار خط کاشت چهار متری در هر کرت با فاصله بین ردیف ۸۰ و فاصله روی ردیف بوته‌ها ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. تاریخ کاشت در ۱۰ فروردین به‌صورت دستی انجام گردید (بذرهای برای جوانه‌زنی سریع‌تر به‌مدت ۲۴ ساعت با آب خیسانده شدند)، عمق کاشت یک سانتی‌متر بود، پس از سبز شدن بذور عملیات واکاری انجام شد، در مرحله ۴-۶ برگ گیاه برای رسیدن به تراکم مناسب (سه بوته در مترمربع) عملیات تنک انجام شد، آبیاری براساس نیاز گیاه و رطوبت موجود در خاک مزرعه به صورت جوی و پشته در ابتدای مراحل جوانه‌زنی و سبز شدن هر پنج روز و بعد از شروع شاخه‌دهی جانبی هر ۱۵ روز یک بار انجام شد. در طول فصل رشد مزرعه با دقت رصد و وجین و مبارزه با آفات احتمالی انجام گرفت. به‌منظور تعیین عملکرد کاسبرگ، گیاهان با حذف اثر حاشیه برداشت و اندازه‌گیری صفات مورد نظر انجام گردید.

اندازه‌گیری صفات کمی

برخی صفات ریخت‌شناسی گیاه از قبیل ارتفاع بوته (از ناحیه طوقه تا انتهای ساقه اصلی توسط متر برحسب سانتی‌متر) تعداد شاخه جانبی، قطر ساقه (با کولیس برحسب میلی‌متر)، تعداد غوزه در بوته، عملکرد کاسبرگ (خشک شدن کاسبرگ‌ها در سایه (به‌مدت میانگین ۱۴ روز) و عملکرد زیست‌توده؛ با قرار دادن نمونه‌ها در آفتاب (میانگین

$$HI = EY/BY \times 100$$

(معادله ۱)

۴۰ روز) اندازه‌گیری شد و شاخص برداشت نیز براساس معادله ۱

محاسبه شد. که در آن، EY: عملکرد اقتصادی و BY: عملکرد زیست‌توده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک (عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری خاک)

Table 1- Physical and chemical properties of soil (depth of 0-30 cm)

بافت Texture	کربن C (%)	آهن Fe (mg.kg ⁻¹)	سدیم Na (mg.kg ⁻¹)	پتاسیم K (mg.kg ⁻¹)	فسفر P (mg.kg ⁻¹)	نیتروژن N (%)	هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	شاخص واکنش pH	ماده آلی Organic matter (%)
لوم - شنی Sandy loam	1.20	0.50	95.5	393	18.76	0.12	9.78	7.91	2.0688

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی ورمی کمپوست

Table 2- Chemical properties of vermicompost

تیماژ Treatment	منیزیم Mg (%)	کلسیم Ca (%)	سدیم Na (%)	پتاسیم K (%)	کربن C (%)	نیتروژن N (%)	فسفر P (%)	منگنز Mn (mg.kg ⁻¹)	آهن Fe (mg.kg ⁻¹)	رطوبت Moisture (%)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)
ورمی کمپوست Vermicompost	2.5	3.9	35.1	1.83	21.2	2.1	1.5	274.22	4153	21.43	7.3	8.2

جدول ۳- خصوصیات شیمیایی عصاره جلبک دریایی

Table 3- Chemical properties of Seaweed extract

تیماژ Treatment	ماده آلی Organic matter (%)	اسید آمینه آزاد Free amino acid (mg.kg ⁻¹)	سیتوکینین Cytokinin (mg.kg ⁻¹)	جبرلین Gibbereliin (mg.kg ⁻¹)	نیتروژن N (%)	فسفر P (%)	پتاسیم K (%)	گوگرد S (%)	روی Zn (mg.kg ⁻¹)	منگنز Mn (mg.kg ⁻¹)	آهن Fe (mg.kg ⁻¹)
عصاره جلبک دریایی Seaweed extract	45	2	15	10	1.5	3.5	18.5	1.5	12	2	226

اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیکی

غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a و b)

نمونه‌برداری از جوان‌ترین برگ بالغ توسعه‌یافته در اوایل شروع گل‌دهی انجام شد و غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی با استفاده از روش آرنون (Arnon, 1967) تعیین شد.

$$\text{Chlorophyll a} = (19.3 \times A_{663} - 0.86 \times A_{645}) \times V / 100W \quad (۲)$$

$$\text{Chlorophyll b} = (19.3 \times A_{645} - 3.6 \times A_{663}) \times V / 100W \quad (۳)$$

که در آن، V: حجم محلول سانتریفیوژ شده، A: جذب نور در طول موج‌های ۶۶۳ و ۶۴۵ نانومتر W: وزن نمونه برحسب گرم است.

آنتوسیانین

برای اندازه‌گیری میزان آنتوسیانین، ابتدا مقدار ۰/۱ گرم بافت تازه کاسبرگ در هاون چینی با ۱۰ میلی‌لیتر متانول اسیدی (متانول خالص و کلریدریک اسید خالص به نسبت حجمی ۹۹ به ۱) به‌طور کامل ساییده شد و سپس در لوله‌های آزمایش که توسط فویل پوشیده شده

بودند به مدت ۲۴ ساعت در تاریکی و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند، سپس به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ و جذب محلول بالایی در طول موج ۵۵۰ نانومتر به‌وسیله اسپکتروفتومتر مدل Unico UV- 2100 قرائت گردید. غلظت با استفاده از ضریب خاموشی ۳۳۰۰۰ سانتی‌متر بر مول و معادله ۴ محاسبه شد (Wagner, 1979)

$$A = \epsilon bC$$

(معادله ۴)

که در آن، A: جذب، b: عرض کووت و C: غلظت محلول مورد نظر است.

کربوهیدرات

برای اندازه‌گیری میزان کربوهیدرات، ابتدا مقدار ۰/۲ گرم بافت تازه کاسبرگ (برداشت در اواخر مهرماه، پایان رسیدگی فیزیولوژیک) وزن شد و به همراه ۱۰ میلی‌لیتر اتانول ۹۵ درصد (یا پنج میلی‌لیتر اتانول ۹۶ درصد) در لوله‌های آزمایش درب بسته به مدت یک

کاربرد کودهای آلی و زیستی بر صفات ریخت شناسی و خصوصیات بیوشیمیایی گیاه دارویی همیشه بهار (*Calendula officinalis* L.) در شرایط تنش خشکی نتایج نشان داد که غلظت ۱۰ در صد حجمی عصاره ورمی کمپوست در صد جوانه زنی، طول ساقه چه و ریشه چه، کاروتنوئید، فعالیت آنزیم کاتالاز و فنل کل را افزایش داد (Rasouli & Norouzi Sharaf, 2019).

تعداد شاخه جانبی در بوته

نتایج تجزیه واریانس بیانگر آن است که اثر سه گانه کاربرد ورمی کمپوست جامد، عصاره ورمی کمپوست و جلبک دریایی برای صفت تعداد شاخه جانبی معنی دار شد (جدول ۴). مقایسه میانگین تیمارها نشان داد که بیشترین تعداد شاخه جانبی گیاه ۸/۴ در بوته به دست آمد که نشان دهنده افزایش ۹/۱ درصدی نسبت به شاهد بود و با کاربرد ورمی کمپوست جامد و از تیمار عصاره ورمی کمپوست در سطح ۱/۵ میلی لیتر بر لیتر و عصاره جلبک دریایی در سطح ۴/۵ میلی لیتر بر لیتر به دست آمد (جدول ۷). یکی از اهداف اصلی مدیریت زراعی، به حداکثر رساندن دریافت نور توسط سایه انداز گیاه، از طریق افزایش سطح برگ و جذب نور است، نور نه تنها منبع اصلی انرژی برای فتوسنتز، بلکه راهنمای کلیدی تنظیم کننده رشد نیز به شمار می رود (Zhang et al., 2020). کودهای زیستی می توانند بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه از طریق افزایش سطح فعال برگ و جذب نور تأثیر داشته باشند (Mohsenzadeh et al., 2020). ورمی کمپوست با تأثیر قابل ملاحظه در تأمین و حفاظت از مواد غذایی خاک، می توانند در اثر فعالیت میکروبی ریز جانداران خاک، تغییر شکل یافته و باعث ارتقای کیفیت خاک شده و تولید محصول را از طریق بهبود جذب عناصر ماکرو و میکرو توسط ریشه گیاه افزایش دهد (Masri et al., 2023) از جمله مزایای کاربرد کودهای آلی در بستر کشت گیاه، افزایش ماده آلی خاک، افزایش ظرفیت نگهداشت آب خاک و افزایش انحلال و حفظ عناصر غذایی در برابر هدررفت می باشد (Pączka et al., 2021). با اعمال محلول پاشی عصاره جلبک دریایی در بخش هوایی اندام گیاه، هورمون جبرلین موجود در کود جلبک دریایی، تقسیم سلولی در جوانه های جانبی را تحریک کرده و منجر به افزایش شاخه زایی و گل دهی می شود. هم زمان، اسیدهای آمینه آزاد شده از کود، به عنوان پیش ساز سنتز پروتئین ها عمل کرده و فرآیندهای متابولیکی گیاه را تسریع می بخشد (Cotas et al., 2020).

ساعت در حمام بن ماری در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد حرارت داده شد. پس از سرد شدن، یک میلی لیتر از نمونه ها برداشته شد و به آن یک میلی لیتر فنل ۰/۵ در صد و پنج سی سی اسید سولفوریک ۹۸ درصد اضافه گردید. میزان نور جذبی در طول موج ۴۸۳ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتر مدل Unico UV-2100 قرائت و میزان کربوهیدرات براساس میلی گرم گلوکز در گرم وزن تر نمونه از روی منحنی استاندارد محاسبه شد (Clairmont et al., 1986). تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم افزار SAS نسخه ۹/۱ صورت گرفت. مقایسه میانگین ها در سطح احتمال پنج درصد به وسیله آزمون چنددامنه ای دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

ارتفاع ساقه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل سه گانه کاربرد ورمی کمپوست جامد، عصاره ورمی کمپوست و جلبک دریایی برای صفت ارتفاع بوته معنی دار شد (جدول ۴). مقایسه میانگین تیمارها نشان داد که بیشترین مقدار برای ارتفاع بوته ۲۳۰/۶ سانتی متر به دست آمد که نشان دهنده افزایش ۲۴/۵ درصدی نسبت به شاهد بود و با کاربرد ورمی کمپوست جامد و از تیمار عصاره ورمی کمپوست در سطح ۱/۵ میلی لیتر بر لیتر و عصاره جلبک دریایی در سطح ۴/۵ میلی لیتر بر لیتر به دست آمد. (جدول ۷). مدیریت های به زراعی از جمله فراهمی عناصر غذایی در خاک از عوامل مهم تأثیر گذار بر رشد اندام های هوایی گیاه می باشند، کاربرد کودهای ارگانیک از جمله ورمی کمپوست و جلبک دریایی که حاوی عناصر ریز مغذی هستند، با بهبود دسترسی گیاه به مواد غذایی، می توانند فتوسنتز گیاهان را از طریق افزایش فعالیت آنزیم روبیسکو افزایش دهند که علت آن می تواند در ارتباط با افزایش ترکیبات هیومیکی در خاک و تحریک رشد گیاه باشد (Salehi et al., 2022). وجود محرک های رشد در عصاره جلبک دریایی مانند سایتوکینین ها و مواد اکسینی سبب افزایش تقسیم و طول شدن سلولی و نمو برگ و رشد رویشی گیاه می شوند، از طرفی اعمال محلول پاشی عصاره جلبک و ورمی کمپوست در زمان های نیاز گیاه منجر به افزایش شاخص سطح برگ، طول میان گره، رشد رویشی و افزایش در تولید ماده خشک می شود و در نهایت پتانسیل گیاه برای تولید بوته های بزرگ تر با ارتفاع بیشتر افزایش می یابد (Ghasemi Maham et al., 2018). نتایج مطالعه ای بر روی اثر

جذب آب، نور و عناصر غذایی می‌توانند در افزایش شاخص‌های رشدی از قبیل قطر ساقه بسیار مؤثر باشند.

تعداد غوزه در بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل سه‌گانه کاربرد ورمی کمپوست جامد، عصاره ورمی کمپوست و جلبک دریایی بر صفت تعداد غوزه در بوته معنی‌دار (یک درصد) شد (جدول ۴). مقایسه میانگین تیمارها نشان داد که بیشترین تعداد غوزه، ۲۶۲/۸ در بوته به دست آمد که نشان‌دهنده افزایش ۳۵ درصدی نسبت به شاهد بود و با کاربرد ورمی کمپوست جامد (۱۰ تن در هکتار) همراه با محلول‌پاشی عصاره ورمی کمپوست در سطح (۱/۵ میلی‌لیتر بر لیتر) و عصاره جلبک دریایی در سطح (۴/۵ میلی‌لیتر بر لیتر) (جدول ۷). ورمی کمپوست به دلیل دارا بودن اسیدهای هیومیک در آن برای بسیاری از گیاهان مفید است، از جمله سودمندی آن می‌توان به افزایش جذب عناصر غذایی به وسیله گیاه، توسعه رشد ریشه، بهبود جوانه‌زنی و افزایش رشد گیاه اشاره کرد (Rajaei et al., 2022). برای تولید در مرحله زایشی، گیاه نیاز به رشد رویشی مناسب و زمینه‌سازی تولید اندام‌های مختلف زایشی از جمله گل، دانه و میوه دارد، وجود عناصر غذایی کافی باعث افزایش جذب قدرت مخزن در جذب مواد فتوسنتزی شده و همین عامل باعث افزایش تعداد گلچه‌های بارور و عملکرد مؤثر می‌شود (Bourebaba et al., 2020). ورمی کمپوست به‌خاطر داشتن محتوای غذایی مفید، فعالیت میکروبی را تحریک می‌کند که این امر می‌تواند به جوانه‌زنی، ظهور گل‌ها و افزایش محصول بیشتر کمک کند (Salehi et al., 2022). عصاره جلبک دریایی به‌عنوان یک محرک زیستی به دلیل وجود هورمون‌های رشد سیتوکینین، اکسین و ایندول بوتیریک اسید، عناصر غذایی مانند آهن، مس، روی، مولیبدن، منگنز، ویتامین‌ها و اسیدهای آمینه (Tursun, 2022) باعث تحریک رشد ریشه، تسریع زمان گل‌دهی، افزایش تشکیل میوه می‌شود (Mukherjee & Patel, 2020). از طرفی، گیاهانی که از قطر ساقه بیشتری برخوردار هستند، قادر به تأمین تعداد واحد زایشی (غوزه) بیشتری بوده و ماده خشک بیشتری نیز به این واحدها تخصیص می‌دهند. مصرف هم‌زمان ورمی کمپوست جامد در خاک به همراه اعمال محلول‌پاشی عصاره ورمی کمپوست و عصاره جلبک دریایی بر اندام‌های هوایی گیاه، با هم‌افزایی برای دسترسی قرار دادن عناصر غذایی، علاوه بر نمو رشد ریشه و اندام‌های هوایی گیاه منجر به

به نظر می‌رسد که کاربرد کودهای بیولوژیک از جمله ورمی کمپوست جامد در بستر کشت گیاه هم‌زمان با اعمال محلول‌پاشی عصاره ورمی کمپوست و جلبک دریایی در زمان‌های نیاز گیاه (چهار برگی، ساقه رفتن و ابتدای گل‌دهی) توانسته است با افزودن عناصر ریزمغذی به بستر کشت گیاه و افزایش حلالیت آن‌ها سبب افزایش جذب عناصر غذایی توسط ریشه شده که منجر به تحریک گیاه در جهت افزایش تولید شاخه‌های فرعی و افزایش عملکرد در گیاه شود (Moradi et al., 2018). بنابراین کودهای زیستی با بهبود شرایط فیزیکی سبب توسعه ریشه و افزایش فعالیت باکتری‌های محرک رشد می‌شوند و با بهبود دسترسی گیاه به عناصر غذایی، فتوسنتز افزایش می‌یابد که در نتیجه سبب افزایش عملکرد و اجزای عملکرد گیاه خواهد شد.

قطر ساقه

نتایج تجزیه واریانس بیانگر آن است که اثر متقابل سه‌گانه کاربرد ورمی کمپوست جامد، عصاره ورمی کمپوست و جلبک دریایی بر صفت قطر ساقه معنی‌دار شد (جدول ۴). مقایسه میانگین تیمارها نشان داد که بیشترین مقدار برای قطر ساقه بوته ۳۳/۷ میلی‌متر به دست آمد که نشان‌دهنده افزایش ۱۳/۰۵ درصدی نسبت به شاهد بود و با کاربرد ورمی کمپوست جامد و از تیمار عصاره ورمی کمپوست در سطح ۱/۵ میلی‌لیتر بر لیتر و عصاره جلبک دریایی در سطح ۴/۵ میلی‌لیتر بر لیتر حاصل شد (جدول ۷). ورمی کمپوست حاوی بیشتر عناصر غذایی فراهم مانند نیتрат‌ها، فسفات‌ها، کلسیم قابل تبادل و پتاسیم محلول است (Rusanescu et al., 2022). به‌علاوه به دلیل محتوای نسبتاً بالای مواد معدنی در ورمی کمپوست، بخشی از فعالیت تقویت‌کننده رشد گیاهان به واسطه ورمی کمپوست و عصاره ورمی کمپوست، می‌تواند ناشی از اثر مثبت مواد مغذی فراوان آن بر رشد گیاه باشد (Karlsons et al., 2016). در آزمایشی بر روی گیاه آویشن باغی (*Thymus vulgaris* L.) انجام شد. نتایج نشان داد که کاربرد ۱۰ میلی‌لیتر در لیتر کیتوزان و ۱۰ میلی‌لیتر در لیتر جلبک دریایی سبب تولید بیشترین قطر ساقه اصلی (۱/۶۷ برابر با شاهد)، وزن تر و خشک اندام هوایی (افزایش ۹۸ درصدی نسبت به شاهد) و عملکرد زیست‌توده (۷۵ درصد افزایش نسبت به شاهد) گردید (Rezaei et al., 2024). با کاربرد کود ورمی کمپوست جامد در بستر کشت گیاه، بوته‌ها از عوامل محیطی مثل آب، نور و عناصر غذایی به‌صورت کامل و مناسب‌تری بهره‌مند می‌شوند و بهبود شرایط تغذیه‌ای و افزایش

افزایش شاخص سطح برگ شده، از این رو نور بیشتری توسط برگ‌های گیاه دریافت می‌شود که با افزایش کربن‌گیری سبب افزایش فتوسنتز گردیده است و در نهایت منجر به افزایش عملکرد و اجزای عملکرد می‌شود (Rafiei Demne et al., 2023).

عملکرد زیست‌توده

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل سه‌گانه کاربرد ورمی کمپوست جامد، عصاره ورمی کمپوست و جلبک دریایی بر عملکرد زیست‌توده معنی‌دار شد (جدول ۴). مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین عملکرد بیولوژیک $276.04/2$ کیلوگرم در هکتار به دست آمد که نشان‌دهنده افزایش $47/45$ درصدی نسبت به شاهد بود و با کاربرد ورمی کمپوست جامد و از تیمار عصاره ورمی کمپوست در سطح $(1/5)$ میلی‌لیتر بر لیتر و عصاره جلبک دریایی در سطح $(4/5)$ میلی‌لیتر بر لیتر (به دست آمد). (جدول ۷). بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک یکی از روش‌های افزایش تولید در واحد سطح است که امروزه بدین منظور از بقایای گیاهی، مواد پلیمری، کودهای آلی و سوپرجاذب‌ها اغلب استفاده می‌شود، کودهای آلی با بهبود ساختمان و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، تأمین مواد غذایی و حفظ رطوبت مورد نیاز گیاه در خاک به رشد بهتر گیاه کمک می‌کنند (Askari Dehno et al., 2025). گیاه برای رسیدن به حداکثر رشد رویشی، جهت تولید مواد پرورده بیشتر، باید عناصر غذایی که در خاک وجود دارد را مصرف نماید، فرآیندهای مرتبط با آسمیلاسیون و تولید فرآورده‌های مرتبط با آن در گیاه به شدت تحت تأثیر مقدار آب و عناصر در دسترس سلول قرار دارد و در شرایط فراهمی رطوبت و عناصر غذایی، افزایش نرخ آسمیلاسیون سلولی به‌طور مستقیم بر میزان تولید ماده خشک در سلول‌ها و وزن نهایی تولید شده تأثیرگذار است (Khazaei et al., 2020). کودهای آلی مانند ورمی کمپوست، بهبود قابل توجهی در شرایط رشد گیاهان ایجاد می‌کنند. این کودها با افزایش دسترسی رطوبت و عناصر غذایی قابل جذب و همچنین افزایش محتوای ماده آلی خاک، به ارتقای عملکرد گیاهان کمک می‌کنند، بهبود ساختار خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب و مواد مغذی نتیجه این فرآیندها است، که در نهایت منجر به افزایش تولید محصولات زراعی می‌شوند (Abebe et al., 2022). بسیاری از پژوهشگران به نقش مثبت ریزوباکترهای محرک رشد موجود در ورمی کمپوست، بر افزایش عملکرد محصولات زراعی مختلف اشاره

کرده‌اند و آن را به ترشح هورمون‌های گیاهی، تولید و آزادسازی انواع اسیدهای آلی در خاک، تثبیت نیتروژن و در نهایت، برهم‌کنش مثبت بین آن‌ها و سایر ریزموجودات خاک نسبت داده‌اند (Rajaei et al., 2022). فراهمی عناصر غذایی نظیر فسفر، آهن، مس، روی و منگنز سبب افزایش فتوسنتز، تحریک رشد زیاد و بهبود ماده خشک گیاهی می‌گردد، در آزمایشی که روی گیاه مرزه خوزستانی (Satureja khuzistanica Jamzad) انجام شد، نتایج نشان داد که بیشترین مقدار وزن خشک اندام‌های هوایی (460 گرم در مترمربع) و وزن خشک برگ ($195/33$ گرم در مترمربع) از تیمار $3/5$ لیتر در هکتار اسید هیومیک و غلظت 20 درصد عصاره ورمی کمپوست به دست آمد که نسبت به شاهد اختلاف معنی‌داری را نشان داد (Alizadeh et al., 2018). عصاره جلبک دریایی سبب تسریع گل‌دهی، افزایش تشکیل میوه و تولید میوه زودرس در برخی گیاهان می‌شود. افزایش عملکرد در اثر استفاده از عصاره جلبک دریایی به دلیل حضور هورمون سیتوکینین است؛ سیتوکینین در مرحله رشد رویشی سبب توزیع بهتر عناصر غذایی و در مرحله رشد زایشی سبب تحرک عناصر غذایی می‌شود (Ali et al., 2021).

عملکرد کاسبرگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل سه‌گانه کاربرد ورمی کمپوست، عصاره ورمی کمپوست و جلبک دریایی بر عملکرد کاسبرگ معنی‌دار شد (جدول ۴). مقایسه میانگین تیمارها نشان داد که بیشترین عملکرد کاسبرگ، $2629/17$ کیلوگرم در هکتار به دست آمد که نشان‌دهنده افزایش $33/12$ درصدی نسبت به شاهد بود و با کاربرد ورمی کمپوست جامد و از تیمار عصاره ورمی کمپوست در سطح $1/5$ میلی‌لیتر بر لیتر و عصاره جلبک دریایی در سطح $4/5$ میلی‌لیتر بر لیتر حاصل شد (جدول ۷). جذب و دریافت نور تا حد زیادی به سرعت گسترش برگ‌ها بستگی دارد. سطح برگ یکی از شاخص‌های مهم تأثیرگذار در رشد و فتوسنتز گیاه می‌باشد که نقش مهمی در عملکرد اقتصادی و بیولوژیک گیاه دارد (Rafiei Demne et al., 2023). فراهمی برخی عناصر غذایی برای گیاه منجر به افزایش سطح فعال برگ، افزایش استفاده از تابش خورشیدی و در نتیجه افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی و بهبود فتوسنتز می‌شود که به موجب آن افزایش عملکرد گیاه اتفاق می‌افتد. کودهای آلی با اصلاح شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک موجب توسعه ریشه و افزایش فعالیت

باکتری‌های محرک رشد می‌شوند. در نتیجه، دسترسی گیاه به جذب و انتقال عناصر غذایی افزایش می‌یابد. عرضه مداوم عناصر معدنی نیز باعث افزایش رشد، میوه‌دهی و افزایش کیفیت محصول می‌گردد (Hasani Nasab et al., 2025). یکی از دلایل افزایش عملکرد گیاه در اثر کاربرد کود آلی مانند ورمی‌کمپوست مربوط به افزایش شاخص سطح برگ و تأخیر در پیری برگ می‌باشد، زیرا که با تداوم فتوسنتز به بقای گیاه کمک می‌کند. در تحقیق انجام‌شده در گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa* L.) ورمی‌کمپوست به همراه بیوجار موجب افزایش ارتفاع، عملکرد و وزن هزار دانه گیاه شد (Mohkami et al., 2023). از آنجایی که در گیاهان رشد نامحدود، ریشه توانایی بیشتری برای جذب مواد غذایی در زمان گل‌دهی دارد، کاربرد هم‌زمان ورمی‌کمپوست جامد، عصاره ورمی‌کمپوست و جلبک دریایی در مراحل حساس رشد گیاه از جمله گل‌دهی، اثر محرک قابل توجهی بر افزایش عملکرد اقتصادی کاسبرگ نشان داد. در پژوهشی که روی گیاه شاهسپر (*Tanacetum balsamit* L.) انجام شد، نتایج نشان داد که کاربرد کود بیوجار در بستر کشت گیاه به همراه محلول‌پاشی عصاره جلبک، وزن خشک گیاه، سطح برگ، محتوای فنل، فلاونوئید و محتوای آسانس گیاه را تحت تأثیر قرار داد. بیشترین وزن خشک گیاه، سطح برگ، محتوای فنل، فلاونوئید در تیمار کاربرد ۲۰ تن در هکتار بیوجار همراه با محلول‌پاشی دو و چهار میلی‌لیتر بر لیتر عصاره جلبک به دست آمد (Vojodi Mehrabani et al., 2024). به عبارت دیگر، دلیل تأثیر مصرف کود زیستی بر افزایش عملکرد به‌واسطه فراهم نمودن عناصر غذایی برای تک بوته‌ها و کاهش رقابت بین بوته‌ها است که در ادامه افزایش عملکرد در واحد سطح حاصل می‌شود.

شاخص برداشت

اثر متقابل کاربرد ورمی‌کمپوست جامد، عصاره ورمی‌کمپوست و جلبک دریایی برای شاخص برداشت معنی‌دار شد (جدول ۴). مقایسه میانگین تیمارها نشان داد که بیشترین شاخص برداشت (۱۸/۳۳ درصد در بوته) از تیمار عصاره ورمی‌کمپوست در سطح ۱/۵ میلی‌لیتر بر لیتر و عصاره جلبک دریایی در سطح ۴/۵ میلی‌لیتر بر لیتر در زمین کشت گیاه چای ترش که ورمی‌کمپوست جامد دریافت نکرده بود، به دست آمد (جدول ۷). از آنجایی که کودهای شیمیایی با به هم زدن ساختمان خاک و افزودن آلاینده‌ها به خاک همراه هستند؛ از این‌رو استفاده از

کودهای زیستی به صورت خاکی (سرک) و یا محلول‌پاشی ضروری است. کودهای زیستی با تأمین مواد مغذی قابل جذب برای گیاهان، زیست‌توده‌گیاه را بهبود می‌بخشند (Liu et al., 2021). افزایش عملکرد گیاه، در اثر استفاده از عصاره جلبک دریایی احتمالاً به دلیل حضور هورمون‌های رشد مانند سایتوکینین در آن‌ها است. سایتوکینین در مرحله رشد رویشی سبب توزیع بهتر عناصر غذایی و در مرحله زایشی سبب تحرک عناصر غذایی می‌شود، پژوهش‌ها نشان داده است که جلبک‌های دریایی حاوی ۱۸ تا ۱۹ اسیدآمین هستند که اثرات ترکیبی آن‌ها سبب بهبود عملکرد و جذب عناصر غذایی می‌شود، این اثرات در کارلا سبب افزایش تعداد میوه، وزن تر و خشک گیاه شد (Amini Fard & Khandan, 2019). اعمال محلول‌پاشی جلبک دریایی باعث بهبود رشد اندام‌های هوایی و افزایش تولید ماده خشک در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) شد، که این امر را می‌توان به افزایش توان تولید گیاه از طریق توسعه رشد ریشه، افزایش میزان فتوسنتز، افزایش شاخص سطح برگ، جذب و انتقال عناصر غذایی مانند پتاسیم و فسفر و همچنین افزایش فراهمی عناصر کم مصرف و هورمون‌های گیاهی مانند اکسین، سایتوکینین و اسید آسبازیک نسبت داد (Esmailpour et al., 2020). بنابراین در سال‌های اخیر، کودهای آلی همانند عصاره ورمی‌کمپوست و جلبک دریایی با توجه به تأمین کامل عناصر غذایی برای رشد گیاه، فتوسنتز و متابولیسم گیاه را تقویت کرده و تولید شیره پرورده را افزایش می‌دهند. این امر در نهایت به رشد بیشتر، بهره‌وری بالاتر و زیست‌توده گیاه منجر می‌شود و در نهایت به افزایش شاخص برداشت منجر می‌شوند.

غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی کلروفیل (a و b)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل سه‌گانه کاربرد ورمی‌کمپوست، عصاره ورمی‌کمپوست و جلبک دریایی بر محتوای کلروفیل a و کلروفیل b برگ معنی‌دار شد (جدول ۵). مقایسه میانگین تیمارها نشان داد که بیشترین غلظت کلروفیل a (۲۰/۱۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) به دست آمد که نشان‌دهنده افزایش ۵۳/۶۷ درصدی نسبت به شاهد بود و بیشترین غلظت کلروفیل b (۳/۹۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در برگ به دست آمد که نشان‌دهنده افزایش ۲۹/۸۴ درصدی نسبت به شاهد بود و با کاربرد ورمی‌کمپوست جامد (۱۰ تن در هکتار) همراه با محلول‌پاشی عصاره ورمی‌کمپوست در سطح ۱/۵ میلی‌لیتر بر لیتر و عصاره جلبک دریایی در سطح ۴/۵ میلی‌لیتر بر لیتر

محلول پاشی) افزایش نشان دادند (Saedi et al., 2022).

محتوای آنتوسیانین

اثر متقابل سه گانه کاربرد ورمی کمپوست، عصاره ورمی کمپوست و جلبک دریایی بر محتوای آنتوسیانین کاسبرگ معنی دار شد (جدول ۵). مقایسه میانگین تیمارها نشان داد که بیشترین میزان آنتوسیانین کاسبرگ گیاه (۳/۷۹ میلی گرم در گرم) با کاربرد ورمی کمپوست جامد و از تیمار عصاره ورمی کمپوست در سطح ۱/۵ میلی لیتر بر لیتر و عصاره جلبک دریایی در سطح ۴/۵ میلی لیتر بر لیتر به دست آمد که نشان دهنده افزایش ۳۵/۸ درصدی نسبت به شاهد بود (جدول ۷). ظهور بسیاری از متابولیت‌های ثانویه گیاه به آسانی به وسیله عوامل خارجی از قبیل سطوح مواد غذایی، نور، تنش‌ها و تنظیم کننده‌های رشد تغییر می‌کند (Bakhshi et al., 2025). شدت نور و دما دو عامل محیطی مهم برای توسعه رنگدانه‌های قرمز مانند آنتوسیانین هستند (Norhayati, et al., 2019). ورمی کمپوست سرشار از عناصر بوده و دسترسی به مواد مغذی برای گیاهان را افزایش می‌دهد که به نوبه خود فعالیت فتوسنتزی بالاتری را به همراه دارد و این امر به افزایش مقادیر آنتوسیانین و فلاونول‌های کل در گیاه منجر می‌شود (Kalhor Monfared et al., 2022). عصاره جلبک‌ها محرک زیستی هستند، زیرا وقتی روی گیاه محلول پاشی می‌شوند، واکنش‌های دفاعی و رشد را تحریک می‌کنند، و علاوه بر افزایش تحمل به تنش منجر به جذب مواد مغذی، بهبود رشد و عملکرد می‌گردد (Kapur et al., 2018). نتایج آزمایش روی گیاه مریم گلی (*Salvia officinalis* L.) نشان داد که کاربرد جلبک دریایی با فراهمی عناصر غذایی برای گیاه باعث افزایش سنتز متابولیت ثانویه فنول شد (Mansori et al., 2022). کاربرد ورمی کمپوست در محیط ریشه موجب افزایش دما و فعالیت ریزجانداران مفید خاک شده و از طرفی، محلول پاشی عصاره ورمی کمپوست و عصاره جلبک دریایی بر اندام هوایی گیاه موجب افزایش شاخص سطح برگ، دریافت نور بیشتر، تولید کربن بیشتر و افزایش سنتز متابولیت‌های ثانویه از جمله آنتوسیانین کاسبرگ چای ترش گردید. استفاده از کودهای آلی باعث بهبود محتوای آنتوسیانین در چای ترش شد، این امر نشان دهنده این است که کودهای آلی از طریق فراهمی عناصر غذایی به خصوص ریزمغذی‌ها باعث بهبود خصوصیات ریخت‌شناسی گیاه می‌شوند و از سوی دیگر، سنتز متابولیت‌های ثانویه گیاه را افزایش می‌دهند.

به دست آمد (جدول). تغذیه گیاهی نقش مهمی در رشد، نمو و مسیرهای بیوشیمیایی گیاه دارد، بهبود وضعیت تغذیه گیاه و حفظ رطوبت کافی در خاک با افزایش محتوای کلروفیل و بهبود فتوسنتز گیاه منجر به افزایش سطح برگ و مانع پیری زودرس برگ می‌شود (Mumivand et al., 2023). هرچه شرایط تغذیه‌ای و محیطی از جمله فراهمی عناصر غذایی، دریافت نور و حفظ رطوبت برای رشد گیاه مهیا باشد، توان گیاه جهت تولید کلروفیل و تثبیت CO₂ بیشتر می‌شود (Fletcher et al., 2017). سطح برگ یکی از شاخص‌های مهم رشد است که از آن به عنوان معیار اندازه‌گیری سیستم فتوسنتزی استفاده می‌کنند، فتوسنتز و تعادل بیوشیمیایی گیاه و دریافت تحرکات محیطی و تا حدی ذخیره مواد غذایی در حیطه وظایف رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه است (Gharne, 2019). از آنجایی که ورمی کمپوست حاوی هورمون‌ها می‌باشد، این مواد دارای اثراتی مشابه هورمون‌ها و تنظیم کننده‌ها هستند، مواد هومیکی و مواد آلی موجود در ورمی کمپوست، رشد گیاه را به دلیل عرضه مداوم و پایدار عناصر معدنی به گیاه بسیار بهتر از تغذیه گیاه با کودهای معدنی تحریک می‌کنند (Blouin et al., 2019). کاربرد ورمی کمپوست جامد در خاک باعث افزایش فعالیت ریزجانداران که در اطراف ریشه مستقر شده‌اند، می‌شود و گیاه را در جذب عناصر یاری می‌کند و بر میزان جذب عناصر میکرو (از جمله منگنز، منیزیم و آهن) که در ساخت کلروفیل نقش مهمی ایفا می‌کنند، می‌افزاید. از طرفی، جذب نیتروژن توسط ریشه‌ها گیاه باعث افزایش رشد رویشی و تولید بیشتر برگ و در ادامه منجر به افزایش سطح جذب نوری، سطح فتوسنتز، تولید مواد هیدروکربنی در برگ و افزایش محتوای کلروفیل a و b برگ می‌شود (Moradi et al., 2018). جلبک‌های دریایی حاوی سیتوکینین هستند، که در معرض نور منجر به تحریک کلروپلاست و افزایش تولید کلروفیل می‌شود و همچنین دارای عنصر منیزیم هستند، منیزیم به دلیل شرکت در ساختار کلروفیل نقش مهمی در افزایش تولید آن دارد. در آزمایشی که روی دو ژنوتیپ گیاه خیار آب پران (*Ecballium elaterium* L.) انجام شد، نتایج نشان داد که اعمال محلول پاشی عصاره جلبک دریایی قرمز منجر به افزایش کلروفیل کل برگ به ترتیب روی ژنوتیپ اسپانیایی (۲۶/۱۵ میلی گرم بر گرم وزن تر) و ژنوتیپ ایرانی (۲۵ میلی گرم بر گرم وزن تر) به دست آمد که هر کدام ۱۹۸/۷ و ۱۷۴/۴ درصد نسبت به شاهد (بدون

جدول ۴- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) بر برخی صفات ریخت‌شناسی گیاه چای ترش تأثیر ورمی کمپوست جامد، عصاره ورمی کمپوست و عصاره جلبک
Table 4- Analysis of variance (mean of squares) for some morphological characteristic of roselle affected solid vermicompost, ermtcompost extract and seaweed extract

منبع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع ساقه Stem height	شاخه جانبی Lateral branch	قطر ساقه Stem diameter	تعداد غوزه Number of bolls	عملکرد بیولوژیک Biological yield	عملکرد اقتصادی Economic yield	شاخص برداشت Harvest index
تکرار Replication	۲	۱.۵۲ ^{ns}	0.77 ^{ns}	0.37 ^{ns}	36244.24 ^{ns}	6.00 ^{ns}	2.59 ^{ns}	49.31 ^{ns}
ورمی کمپوست جامد Solid vermicompost	۱	10894.24**	16.11**	198.68**	7145323.13**	2178.68**	88.55*	25754.60**
خطای اصلی Main error (a)	۲	5.40	0.10	0.78	24306.46	1.14	1.38	26.54
عصاره ورمی کمپوست Vermicompost extract	۲	4592.72**	25.88**	44.28**	127695.63**	1984.22**	61.50**	21903.50**
عصاره جلبک Seaweed extract	۲	1646.05**	10.74**	102.92**	3106668.96**	2402.91**	7.06*	22368.80**
عصاره ورمی کمپوست × ورمی کمپوست جامد Solid vermicompost × vermicompost extract	۲	428.57**	3.30**	3.50**	6298.96 ^{ns}	380.89**	16.42**	8171.30**
عصاره جلبک × ورمی کمپوست جامد Solid vermicompost × seaweed extract	۲	184.12**	0.74**	14.02**	861646.74 **	12.76 ^{ns}	47.17**	1913.72 **
عصاره ورمی کمپوست × عصاره جلبک Seaweed extract × vermicompost extract	۲	202.94**	0.32*	1.12*	142190.76 **	155.23**	10.23**	1070.15*
عصاره ورمی کمپوست × جلبک × ورمی کمپوست جامد Solid vermicompost × seaweed extract × vermicompost extract	۴	174.46**	0.53*	3.02**	195366.324**	65.62**	20.90**	896.36 *
خطا فرعی Sub error (b)	۳۲	17.39	0.13	0.29	6005.56	5.91	1.57	305.23
ضریب تغییرات C.V (%)	-	2.44	6.02	2.0	6.13	5.76	11.71	13.14

ns و **، * به ترتیب معنی دار در سطوح احتمال پنج درصد، یک درصد و بدون اختلاف معنی دار می باشد.

*, ** and ns: significant at probability levels 1%, 5% and non significant, respectively.

جدول ۵- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برخی صفات فیزیولوژیکی گیاه چای ترش تحت تأثیر ورمی کمپوست جامد، عصاره ورمی کمپوست و عصاره جلبک

Table 5- Analysis of variance (mean of squares) for some physiological characteristic of roselle affected Solid vermicompost, ermicompost extract and seaweed extract

منبع تغییرات	df	Chlorophyll a	کلروفیل	Chlorophyll b	کلروفیل	Anthocyanin	آنتوسیانین	Carbohydrate	کربوهیدرات
S.O.V									
تکرار	۲	0.45*	0.0079 ^{ns}			0.00037 ^{ns}		0.014 ^{ns}	
ورمی کمپوست جامد									
Solid vermicompost	۱	254.05**	3.39*			0.5*		2530.61**	
خطای اصلی									
Main error (a)	۲	0.014	0.069			0.010		0.0051	
عصاره ورمی کمپوست									
Vermicompost extract	۲	164.054**	3.68**			0.28**		811.83**	
عصاره جلبک									
Seaweed extract	۲	90.37**	3.011**			0.63**		253.034**	
عصاره ورمی کمپوست × ورمی کمپوست جامد									
Solid vermicompost × vermicompost extract	۲	18.22**	0.65**			0.0078 ^{ns}		210.18**	
عصاره جلبک × ورمی کمپوست جامد									
Solid vermicompost × seaweed extract	۲	10.88**	0.53*			0.018 ^{ns}		51.42**	
عصاره ورمی کمپوست × عصاره جلبک									
Seaweed extract × vermicompost extract	۲	4.95**	0.24**			0.058**		2.81**	
عصاره ورمی کمپوست × جلبک × ورمی کمپوست جامد									
Solid vermicompost × seaweed extract × vermicompost extract	۴	10.14**	0.17**			0.038*		9.74**	
خطای فرعی									
Sub error (b)	۳۲	0.91	1.28			0.011		0.036	
ضریب تغییرات (درصد)									
C.V(%)	-	11.28	7.94			18.65		0.847	

***، ** و * به ترتیب معنی دار در سطوح احتمال پنج درصد، یک درصد و بدون اختلاف معنی دار می باشند.
 **، * and ns: significant at probability levels 1%, 5% and non significant, respectively.

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر سطوح عصاره ورمی کمپوست × سطوح جلبک × ورمی کمپوست جامد بر برخی صفات مورفوفیزیولوژیکی گیاه چای ترش

Table 6- Mean comparisons mutual effect vermicompost extract levels × seaweed levels × solid vermicompost for some morphophysiological characteristic of roselle

تیمار Treatment	ارتفاع ساقه Stem height (cm)	شاخه جانبی Lateral branch	قطر ساقه Stem diameter (mm)	تعداد غوزه Number of boll	عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg.ha ⁻¹)	عملکرد اقتصادی Economic yield (kg.ha ⁻¹)	شاخص برداشت Harvest index (%)	کلروفیل Chlorophyll a (mg.g ⁻¹)	کلروفیل Chlorophyll b (mg.g ⁻¹)	آنتوسیانین Anthocyanin (mg.g ⁻¹)	کربوهیدرات Carbohydrate (mg.g ⁻¹)
ورمی کمپوست جامد Solid vermicompost											
A	156.07b*	5.57b	25.21b	111.06b	9371.9b	1120.25b	11.99b	6.29b	2.26b	1.51b	15.58b
B	184.48a	6.67a	29.05a	154.74a	16950.2a	1517.24a	9.43a	10.62a	2.77a	2.11a	29.27a
LSD 5%	2.72	0.38	1.04	6.033	1902	39.12	1.380	0.1400	0.3088	0.381	0.8432
سطوح عصاره ورمی کمپوست Vermicompost extract levels											
O ₁	154.88 c	4.82 c	25.59 c	103.71c	12583.9 b	983.68 c	8.60b	5.25c	2.01c	1.40c	15.49c
O ₂	169.16 b	6.36 b	27.06 b	123.46 b	12728.6 b	1333.16 b	11.47a	8.88b	2.67b	1.83b	22.89b
O ₃	186.77 a	7.18 a	28.73 a	171.53 a	14170.7 a	1639.41a	12.06a	11.24a	2.87a	2.20a	28.89a
LSD 5%	2.83	0.25	0.36	11.86	548.1	51.61	0.85	0.64	0.13	0.22	0.12
سطوح جلبک Seaweed levels											
S ₁	160.278 c	5.33c	24.65c	100.38c	9736.7c	974.13c	10.15b	6.46c	2.19c	1.21c	19.01c
S ₂	171.222 b	6.15b	27.32b	127.96b	11721.6b	1287.85b	10.59ab	8.02b	2.39b	1.80b	21.82b
S ₃	179.33a	6.88a	29.42a	170.36a	18024.9a	1694.27a	11.39a	10.88a	2.97a	2.43a	26.44a
LSD 5%	2.83	0.25	0.36	11.86	548.1	51.61	0.85	0.64	0.13	0.22	0.12

* تفاوت حروف در هر ستون نشان دهنده اختلاف معنی دار بر اساس آزمون دانکن در سطح پنج درصد می باشد.

O: سطوح عصاره جلبک ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ میلی لیتر بر لیتر؛ S: سطوح عصاره ورمی کمپوست ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ میلی لیتر بر لیتر.

* The difference in the letters in column shows a significant difference based on the duncan test at 5%.

O: vermicompost extract levels 0.5, 1 and 1.5 ml.l⁻¹; S: seaweed levels 1.5, 3 and 4.5 ml.l⁻¹

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر متقابل ورمی کمپوست جامد × عصاره ورمی کمپوست × جلبک دریایی بر برخی صفات مورفوفیزیولوژیکی گیاه چای ترش
Table 7- Mean comparisons for interactive effects of solid vermicompost extract × seaweed extract on morphophysiological traits of roselle

ورمی کمپوست جامد Solid vermicompost	سطوح کود Fertilizer levels	ارتفاع ساقه Stem height (cm)	شاخه جانبی Lateral branch	قطر ساقه Stem diameter (mm)	تعداد غوزه Number of boll	بیولوژیک yield (kg.ha ⁻¹)	عمرکرد Economic yield (kg.ha ⁻¹)	شاخص برداشت Harvest index (%)	کلروفیل Chlorophyll a (mg.g ⁻¹)	کلروفیل Chlorophyll b (mg.g ⁻¹)	آنتوسیانین Anthocyanin (mg.g ⁻¹)	کربوهیدرات Carbohydrate (mg.g ⁻¹)
A	1	134m	3.53i	19.35i	60.57i	6354.2k	673.96j	10.60def	2.80l	1.62g	0.71j	9.42q
	2	143.3l	4.06i	24.80h	99.67gh	7916.7j	881.25ih	11.13def	3.87kl	1.72g	0.83ij	11.83p
	3	149.3kl	3.83i	25.50h	129.30ef	11944.4gf	1259.38f	10.63def	6.02lhj	2.44edc	1.84df	15.07n
	1	153.3kj	5.63hg	22.0i	67.43i	8941.0ij	771.88ij	8.63ghf	4.72kj	8.63ghf	1.05hig	14.20
	2	162.0 hi	5.93fg	26.53g	86.53gh	8854.2ij	1022.92g	11.57dec	5.94ihj	2.16edf	1.73feg	15.81m
	3	161.3 hi	7.03dce	27.03feg	180.33cb	8541.7ij	1546.88d	12.12bcd	8.12feg	2.86bc	1.93dfec	17.77j
	1	158.6ij	5.90fg	24.60h	83.00ih	7847.2j	884.38ih	11.29dec	6.95ihg	2.48cd	1.31hfigj	16.54k
	2	168.6hfg	6.60e	27.80ed	122.10ef	9444.4ih	1283.33ef	13.61cd	8.84fed	2.72bc	1.73def	19.35i
	3	174.0ef	7.66bc	29.30c	170.67cd	14503.5e	1758.33bc	18.33a	9.32ed	2.75bc	2.43dbc	20.16h
B	1	164.3hig	5.06h	27.40feg	103.10gh	12291.7ef	900.00igh	7.37ghi	5.20ikj	1.89gf	1.43hfig	16.21l
	2	167.3hfg	5.56hg	26.96feg	111.67gh	16718.7d	1016.67gh	6.11i	6.21ihj	1.72g	1.74feg	17.93j
	3	171.0fg	6.86de	29.56c	118.00gfe	20277.8c	1170.83f	5.77i	7.38fhg	2.28de	1.85def	22.46g
	1	170.0fg	5.43hg	26.78fg	99.87gh	10694.4gh	1217.71f	11.39dec	8.75fed	2.68bc	1.84higj	24.28f
	2	178.66de	6.70e	29.60cd	145.53cd	14062.5e	1638.54cd	11.771dec	11.40c	2.78bc	2.53bc	28.19e
	3	189.66c	7.46bcd	31.43b	161.07cd	25277.8b	1801.04b	7.12 hi	10.37cd	3.59ba	2.56b	37.03c
	1	181.33d	6.46fe	27.76fed	188.33cb	12291.7f	1396.88e	11.64dec	14.34b	2.81bc	1.60hfg	33.38d
	2	207.33b	8.03ab	29.23c	202.30b	13333.3ef	1884.38b	9.55ghf	11.85c	2.87b	2.36bcd	37.80b
	3	230.66a	8.43a	33.7a	262.83a	27604.2a	2629.17a	14.13b	20.12a	3.92a	3.79a	46.15a
LSD5%		6.93	0.6142	0.903	29.06	1343	126.4	2.08	1.58	0.3331	0.56	0.3161

* تفاوت حروف در هر ستون نشان دهنده اختلاف معنی دار بر اساس آزمون دانکن در سطح پنج درصد می باشد.

O: سطوح عصاره جلبک ۰.۵/۳ و ۰.۵/۴ میلی لیتر بر لیتر؛ S: سطوح عصاره ورمی کمپوست ۰.۵/۱ و ۰.۵/۱ میلی لیتر بر لیتر.
* The difference in the letters in column shows a significant difference based on the duncan test at 5%.

O: vermicompost extract levels 0.5, 1 and 1.5 ml.l⁻¹; S: seaweed levels 1.5, 3 and 4.5 ml.l⁻¹

محتوای کربوهیدرات

اثر متقابل سه گانه کاربرد ورمی کمپوست جامد، عصاره ورمی کمپوست و جلبک دریایی بر محتوای کربوهیدرات کاسبرگ معنی‌دار شد (جدول ۵). مقایسه میانگین تیمارها نشان داد که بیشترین میزان کربوهیدرات کاسبرگ (۴۶/۱۵ میلی گرم در گرم) با کاربرد ورمی کمپوست جامد و از تیمار عصاره ورمی کمپوست در سطح ۱/۵ میلی لیتر بر لیتر و عصاره جلبک دریایی در سطح ۴/۵ میلی لیتر بر لیتر به دست آمد که نشان‌دهنده افزایش ۵۶/۳ درصدی نسبت به شاهد بود. (جدول ۷). در گیاهان، انواع متفاوتی از متابولیت‌های آلی (اولیه و ثانویه) در نتیجه فرآیندهای متابولیکی تولید می‌شوند، از جمله متابولیت‌های اولیه گیاه مانند آمینواسیدها، نوکلئوتیدها، کربوهیدرات‌ها یا لیپیدهای غشایی ساده، که نقش‌های مشخصی در فتوسنتز، انتقال مواد محلول، جابه‌جایی مواد و آسمیلایسیون عناصر غذایی ایفا می‌کنند (Musavi & Razavizadeh, 2021). ترکیبات هیومیکی موجود در ورمی کمپوست، هم به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر گیاهان تأثیر می‌گذارند که اثرات غیرمستقیم روی حاصلخیزی خاک و افزایش جمعیت ریزجانداران مفید، بهبود ساختار خاک، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و نیز افزایش ظرفیت بافری خاک می‌باشد (Masri et al., 2023). اما اثرات مستقیم آن‌ها مربوط به افزایش متابولیت‌های اولیه گیاه از جمله کربوهیدرات است که به‌عنوان منبع کربن منجر به افزایش فتوسنتز، افزایش تنفس، افزایش سنتز پروتئین‌ها و غیره می‌شود (Chen et al., 2018). این محرک‌های زیستی به دلیل داشتن عناصر غذایی مفید، فعال‌سازی هورمون‌های مؤثر در رشد، افزایش فتوسنتز، افزایش متابولیسم و بهبود جذب و انتقال مواد غذایی سبب افزایش رشد و تولید ترکیبات آلی گیاه خواهند شد (Rezaei et al., 2024). با بهبود شرایط تغذیه‌ای و افزایش جذب آب و عناصر غذایی فعالیت آنزیم رایبیسکو افزایش می‌یابد که منجر به افزایش سرعت فتوسنتز و افزایش سنتز کربوهیدرات‌ها در گیاه می‌شود. در آزمایشی که روی گیاه بنفشه آفریقایی (*Streptocarpus ionanthus*) انجام شد، نتایج نشان داد که در تیمار حاوی ۱۰ درصد ورمی کمپوست، قند

محلول به‌میزان ۱/۱۲ میلی گرم بر گرم از بافت برگ گیاه به دست آمد (Javanbakht et al 2022).

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که کاربرد ورمی کمپوست جامد همراه با محلول‌پاشی عصاره ورمی کمپوست و عصاره جلبک دریایی تأثیر مثبت بر رشد و صفات مورفوفیزیولوژیک گیاه چای ترش داشته است. افزایش در عملکرد کمی و محتوای متابولیت‌های ثانویه گیاه در اثر کاربرد ۱۰ تن در هکتار ورمی کمپوست جامد، همراه با محلول‌پاشی عصاره ورمی کمپوست به‌میزان ۱/۵ میلی لیتر بر لیتر و عصاره جلبک دریایی به‌میزان ۴/۵ میلی لیتر بر لیتر به دست آمد. در مجموع، نتایج پژوهش حاضر بیانگر آن است که مصرف کودهای آلی، ضمن کاهش هزینه‌هایی تولید و بهبود کمیت و کیفیت محصولات گیاهی موجب حفظ سلامت خاک، تنوع زیستی و ایجاد سیستم کشاورزی پایدار در طولانی‌مدت می‌شود. از آنجایی که بستر کشت گیاه از عوامل مؤثر بر رشد و کیفیت محصول است، تولید ارگانیک گیاهان دارویی از طریق مدیریت تغذیه گیاه، نقش مهمی در کاهش آلودگی محیط زیست و حفظ حاصلخیزی خاک و تأمین سلامت انسان ایفا می‌کند. از این‌رو استفاده از نهاده‌های بیولوژیک از راهکارهای کاربردی است که می‌تواند تأثیر طولانی‌مدت بر حفظ و افزایش شاخص‌های کیفی خاک و در ادامه افزایش عملکرد و تولید محصول سالم در شرایط بهینه داشته باشد.

سپاسگزاری

از همکاری جهاد کشاورزی شهرستان تفتان و کشاورزان منطقه برای اجرای این پروژه پژوهشی، تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

References

1. Abebe, T. G., Tamtam, M. R., Abebe, A. A., Abtemariam, K. A., Shigut, T. G., Dejen, Y. A., & Haile, E. G. (2022). Growing use and impacts of chemical fertilizers and assessing alternative organic fertilizer sources in Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science*, 2022(1), 4738416. <https://doi.org/10.1155/2022/4738416>

2. Ali, O., Ramsubhag, A., & Jayaraman, J. (2021). Biostimulant properties of seaweed extracts in plants: Implications towards sustainable crop production. *Plants*, 10(3), 531. <https://doi.org/10.3390/plants10030531>
3. Alidoost Dehri, P., Norouzi Ziveh, A. H., Fedayee Watan Sufiani, A., & Farhadi Bansuleh, M. (2023). Investigating the characteristics of Taftan volcano and its eruption stages. *International Conference on Management Research and Humanities*, 13(1), 12-18. (In Persian). <https://civilica.com/doc/1773557>
4. Alizadeh, A., Najafi, F., Hadian, J., & Salehi, P. (2018). Effect of different levels of humic-acid and vermicompost extract on growth, yield, morphological and phytochemical properties of *Satureja khuzistanica* Jamzad. *Journal of Agroecology*, 10(1), 69-80. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jagv10i1.47161>
5. Amini Fard, M. H., & Khandan, S. (2019). The effect of different levels of seaweed extract (*Ascophyllum nodosum*) on the growth, yield, and biochemical characteristics of bitter squash (*Momordica charantia* L.). *Iranian Journal of Plant Environmental Physiology*, 13, 56-66. (In Persian). <https://doi.org/10.22048/jsat.2019.133954.1303>
6. Arnon, A. N. (1967). Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*, 23(1), 112-121.
7. Askari Dehno, S., Hassanpour, F., Piri, H., & Khammari, E. (2025). The effect of brown seaweed extract on reducing the effects of water stress in sweet pepper. *Water and Irrigation Management*, 15(1), 147-164. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.384872.1188>
8. Bakhshi, D., Ostad Malekroody, R., & Majidian, M. (2025). Effects of vermicompost and cow manure on physiological characteristics of marigold (*Calendula officinalis* L.) in Rasht region. *Journal of Advanced Researches in Medicinal Plants*, 2(1), 37-48. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.30479/armp.2024.18777.1014>
9. Blouin, M., Barrere, J., Meyer, N., Lartigue, S., Barot, S., & Mathieu, J. (2019). Vermicompost significantly affects plant growth. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(4), 34. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0579-x>
10. Bourebaba, L., Gilbert-López, B., Oukil, N., & Bedjou, F. (2020). Phytochemical composition of *Ecballium elaterium* extracts with antioxidant and anti-inflammatory activities: Comparison among leaves, flowers, and fruits extracts. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1), 3286-3300. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.11.004>
11. Chen, Q., Lu, X., Guo, X., Pan, Y., Yu, B., Tang, Z., & Guo, Q. (2018). Differential responses to Cd stress induced by exogenous application of Cu, Zn or Ca in the medicinal plant *Catharanthus roseus*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 157, 266-275. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.055>
12. Clairmont, K. B., Hagar, W. G., & Davis, E. A. (1986). Manganese toxicity to chlorophyll synthesis in tobacco callus. *Plant Physiology*, 80, 291-293.
13. Cotas, J., Leandro, A., Monteiro, P., Pacheco, D., Figueirinha, A., Gonçalves, A. M., & Pereira, L. (2020). Seaweed phenolics: From extraction to applications. *Marine Drugs*, 18(8), 384. <https://doi.org/10.3390/md18080384>
14. Delangizan, S., Papzan, A., & Armand, S. (2022). Design and development of a model for commercialization of organic products based on fundamental theory (Case study: Kermanshah province). *Karafan Journal*, 18(4), 33-48. (In Persian). <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.271211.1375>
15. Esmaelpour, B., & Fatemi, H. (2020). Effects of seaweed extract on physiological and biochemical characteristics of basil (*Ocimum basilicum* L.) under water-deficit stress conditions. *Journal of Soil and Plant Interactions*, 11(1), 59-69. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jspi.11.1.10288>
16. Fletcher, H. R., Biller, P., Ross, A. B., & Adams, J. M. M. (2017). The seasonal variation of fucoidan within three species of brown macroalgae. *Algal Research*, 22, 79-86. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.10.015>
17. Ghasemi Maham, S., Rahimi, A., & Smith, D. L. (2018). Environmental assessment of the essential oils produced from dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.) in conventional and organic farms with different irrigation rates. *Journal of Cleaner Production*, 202, 1070-1086. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.348>
18. Ghayoumi-Mohammadi, N., & Asadi-Gharneh, H. A. (2019). Effects of foliar application and use of vermicompost on quantitative and qualitative characteristics of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 34(6), 871-887. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2019.115698.215>
19. Hasani Nasab, M., Fateh, E., Aynehband, A., Monsefi, A., & Behnam Far, K. (2025). Effects of organic and chemical fertilizer management on yield and qualitative traits of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) in Ahvaz climate. *Journal of Crops Improvement*, 27(2), 315-336. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/>

- jci.2025.378013 .2889.
20. Javanbakht, M., Ghsaemi Ghehsareh, M., & Motaghian, H. (2022). Growth and yield characteristics of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) affected by different rates of nitrogen, phosphorus and potassium in Saravan, Iran. *Agro Ecology Journal*, 13(1), 29-37. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.61186/flowerjournal.7.1.77>
21. Kapur, B., Sarıdaş, M. A., Çeliktöpez, E., Kafkas, E., & PaydaşKargı, S. (2018). Health and taste related compounds in strawberries under various irrigation regimes and bio-stimulant application. *Food Chemistry*, 263, 67-73. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.04.108>
22. Kalhor Monfared, R., Ardakani, M. R., & Paknejad, F. (2022). Evaluation of organic fertilizersihp and soil amendments on yield and yield components of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Journal of Organic Farming of Medicinal Plants*, 1(2), 71-78. (In Persian with English abstract).
23. Karlsons, A., Osvalde, A., Andersone-Ozola, U., & Ievinsh, G. (2016). Vermicompost from municipal sewage sludge affects growth and mineral nutrition of winter rye (*Secale cereale*) plants. *Journal of Plant Nutrition*. 39(6), 765_780. <https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1087566>
24. Khazaei, Z., Esmailpour, B., & Estaji, A. (2020). Ameliorative effects of ascorbic acid on tolerance to drought stress on pepper (*Capsicum annuum* L.) plants. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 26(8), 1649-1662. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.041>
25. Kováčik, P., Šimanský, V., Smoleň, S., Neupauer, J., & Olšovská, K. (2022). The effect of vermicompost and earthworms (*Eisenia fetida*) application on phytomass and macroelement concentration and tetanic ratio in carrot. *Agronomy*, 12(11), 2770. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112770>
26. Liu, D., Ding, Z., Ali, E. F., Kheir, A. M., Eissa, M. A., & Ibrahim, O. H. (2021). Biochar and compost enhance soil quality and growth of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) under saline conditions. *Scientific Reports*, 11(1), 8739. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88293-6>
27. Mansori, M., Chernane, H., Hsissou, D., & El Kaoua, M. (2022). Seaweed extract enhances the biochemical and essential oil compounds in sage (*Salvia officinalis* L.). *Journal of Materials and Environmental Science*, 13(1), 82-94. (In Persian). <https://doi.org/ISSN : 2028-2508>
28. Masri, S., Kiani, F., Ebrahimi, S., Arzaneshand, M. H., & Mohammad Alipour., A. A. (2023). Effect of compost and vermicompost on some soil characteristics and runoff and sediment changes. *Journal of Watershed Management Research*, 14(27), 103-114. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.61186/jwmr.14.27.103>
29. Mohkami, A., Yazdanpanah, N., & Saeidnejad, A. H. (2023). The effect of vermicompost and biochar application on morphophysiological characteristics of quinoa under drought stress conditions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(1), 129-140. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.329540.669058>.
30. Mohsenzadeh, S., Hoseinkhani Hezaveh, M., & Zamanpour Shahmansouri, H. (2020). Some physiological characteristics of the medicinal plant *Lavandula angustifolia* in response to drought stress, compost and vermicompost. *Journal of Plant Production Research*, 27(3), 149-162. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/jopp.2020.16619.2520>
31. Moradi, F., Najafi, S., & Esmaeilzadeh Bahabadi, S. (2018). The effect of green algae (*Ulva fasciata* L.) extract on growth and physiological parameters of sesamum indicum. *Journal of Plant Process and Function*, 8(33), 1-14. (In Persian with English abstract). <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-1014-fa.html>
32. Mukherjee, A., & Patel, J. S. (2020). Seaweed extract: Biostimulator of plant defense and plant productivity. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17, 553-558. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02442-z>
33. Mumivand, H., Izadi, Z., Amirizadeh, F., Maggi, F., & Morshedloo, M. R. (2023). Biochar amendment improves growth and the essential oil quality and quantity of peppermint (*Mentha× piperita* L.) grown under waste water and reduces environmental contamination from waste water disposal. *Journal of Hazardous Materials*, 446, 130674. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1016/j.hazmat.2022.130674.epub.2022dec24>.
34. Musavi, M., & Razavizadeh, R. (2021). Evaluation of changes in phenolic compounds and secondary metabolites of calluses and seedlings of (*Melissa officinalis* L.) under cadmium heavy metal stress. *Journal of Plant Process and Function*, 10(41), 17-33. (In Persian with English abstract). <http://jispp.iut.ac.ir/article-1450-1-fa.html>
35. Narimani, R., Moghodom, M., Ebranpanimi, H. E., & Veshkoveyi, D. (2018). The effect of different levels of

- vermicompost and azomite organic fertilizer on growth, biochemical factors, and nutrient absorption of summer savory (*Satureja hortensis* L.). *Iranian Journal of Plant Environmental Physiology*, 14(56), 57-73. (In Persian with English abstract).
36. Norhayati, Y., N. G. W., & Dzulkefly, M. (2019). Effects of organic fertilizers on growth and yield of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) on bris soil. *Malaysian Applied Biology*, 48(1), 177-184.
37. Pączka, G., Mazur-Pączka, A., Garczyńska, M., Hajduk, E., Kostecka, J., Bartkowska, I., & Butt, K. R. (2021). Use of vermicompost from sugar beet pulp in cultivation of peas (*Pisum sativum* L.). *Agriculture*, 11(10), 919. <https://doi.org/10.3390/agriculture11100919>
38. Przemieniecki, S. W., Zapałowska, A., Skwiercz, A., Damszel, M., Telesiński, A., Sierota, Z., & Gorczyca, A. (2021). An evaluation of selected chemical, biochemical, and biological parameters of soil enriched with vermicompost. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(7), 8117-8127. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10981-z>
39. Rafiei Demne, M., & Shabani, L., Sabzalian, M. R. (2023). Effect of LED priming on growth indices, antioxidant enzymes and total phenolic compounds in basil (*Ocimum basilicum*) under salinity stress. *Journal Of Plant Process and Function*, 12(54), 259-274. (In Persian with English abstract). <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-1669->
40. Rajaei, N., & Hassanpour Asil, M. J. (2022). Effect of different nutrient solutions and percentage of vermicomposte on the absorption of nutrient elements and growth characteristics of potted calla lily (*Zantedeschia pentlandii* cv. Allure). *Iranian Journal of Horticultural Science and Technology*, 23(4), 613-624. (In Persian with English abstract). <http://journal-irshs.ir/article-1-615-en.html>
41. Rasouli, M., & Norouzi Sharaf, A. (2019). The effect of vermicompost extract on the germination of marigold (*Calendula officinalis* L.) under drought stress. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 35(2), 335-350. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2019.121728.2310>
42. Rezaei, A., Akbarpour, V., Bahmanyar, M. A., & Ashnavar, M. (2024). Improving the morphophysiological and phytochemical traits of garden thyme sprayed by chitosan and *Ascophyllum nodosum*. *Iranian Journal of Horticultural Science and Technology*, 25(2), 179-196. (In Persian with English abstract). <http://journal-irshs.ir/article-1-671-en.html>
43. Richardson, M. L., & Arlotta, C. G. (2021). Differential yield and nutrients of (*Hibiscus sabdariffa* L.). Genotypes when grown in urban production systems. *Scientia Horticulturae*, 288, 110349. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110349>
44. Rusanescu, M., Voicu, G., Paraschiv, G., Biris, S. S., & Popescu, I. N. (2022). The recovery of vermicompost sewage sludge in agriculture. *Agronomy*, 12(2653), 1-12. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112653>.
45. Saedi, F., Barzegar, T., Ghahremani, Z., & Nikbakht, J. (2022). Evaluation the effect of the red seaweed extract on growth and physiological indices of three genotypes of squirting cucumber (*Ecballium elaterium* L.). *Journal and Plant Function*, 11(48), 149-164. (In Persian with English abstract). <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-1619-en.html>
46. Salehi, M., Maleki Nia, A., & Shahbazi, M. (2022). The effect of vermicompost and humic acid application on some quantitative and qualitative characteristics of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Iranian Journal of Plant Process and Function*, 11(51), 295-305. (In Persian with English abstract)
47. Tursun, A. O. (2022). Effect of foliar application of seaweed (organic fertilizer) on yield, essential oil and chemical composition of coriander. *Plos One*, 17(6), 1-24. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0269067>
48. Valinejad, Z., Gholizad, A., Naeimi, M., Gholamipour Alamdari, A., & Zarei, M. (2019). The effect of vermicompost and mycorrhizal fungi on the quantitative and qualitative characteristics of the medicinal plant Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 35(3), 484-500. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2019.123788.2417>
49. Vojodi Mehrabani, L. (2020). The effect of plastic soil cover, dekap and estimplex foliar application on growth and some physio-chemical characteristics of *Ocimum basilicum* L. *Journal of Horticultural Science*, 34(1), 15-32 (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v34i1.73694>
50. Vojodi Mehrabani, L., Hassanpouraghdam, M. B., Rasouli, F., & Aazami, M. A. (2024). Soil-based application of biochar and foliar use of seaweed algae extract (*Ascophyllum nodosum*) and growth and some physiological traits of *Tanacetum balsamita* L. *Journal of Agricultural Sciences and Industries*, 34(2), 157-167. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/SAPS.2023.55439.3000>
51. Wagner, G. J. (1979). Content and vacuole/extravacuole distribution of neutralsugars, free amino acids and

- anthocyanin in protoplasts. *Plant Physiology*, 64, 88-93.
52. Xiong, W., Jousset, A., Guo, S., Karlsson, I., Zhao, Q., Wu, H., & Geisen, S. (2018). Soil protist communities form a dynamic hub in the soil microbiome. *The Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions*, 12(2), 634-638. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1038/ismej.2017.171>
53. Zhang, S., Ma, J., Zou, H., Zhang, L., Li, S., & Wang, Y. (2020). The combination of blue and red LED light improves growth and phenolic acid contents in *Salvia miltiorrhiza* Bunge. *Industrial Crops and Products*, 158, 112959. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112959>



Evaluation of Dry Matter Remobilization and Contribution of Current Photosynthesis of Wheat Grain (*Triticum aestivum* L.) affected by Three Cultivation Methods and Plant Residues

Masoumeh Shabibi¹, Esfandiar Fateh^{1*} and Amir Aynehband¹

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

(*- Corresponding author's Email: e.fateh@scu.ac.ir)

How to cite this article:

Received: 31-12-2025
Revised: 07-04-2026
Accepted: 11-04-2026
Available Online: 04-04-2026

Shabibi, M., Fateh, E., & Aynehband, A. (2026). Evaluation of dry matter remobilization and contribution of current photosynthesis of wheat grain (*Triticum aestivum* L.) affected by three cultivation methods and plant residues. *Journal of Agroecology*, 18(1), 101-117. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.97002.1264>

Introduction

In recent decades, agricultural production has been largely dependent on chemical fertilizers, which have led to some environmental problems. Plant residues, by providing nutrients to the soil, can maintain soil fertility, increase soil organic matter content, retain soil moisture, reduce evaporation, and stimulate microbial activity. Limited information is available on the effect of residue rates and cultivation methods on the amount of dry matter remobilization and contribution of current photosynthesis of wheat (*Triticum aestivum* L.) under the climatic conditions of Dasht-e-Azadegan.

Materials and Methods

In order to evaluate the amount of dry matter remobilization and the contribution of current photosynthesis of seed wheat. Under the influence of three cultivation methods and different amounts of plant residues, a split-plot layout based on a randomized complete block design (RCBD) with three replications was established in the Research Center for Agriculture Jihad of Dasht-e Azadegan County, Khuzestan Province, Iran in the crop year 2023-2024. The main factor was the three mechanized cultivation methods including (1- surface drilling, 2- ridge planting, 3- floor method) and the subfactor was the application of different amounts of wheat residues at four levels including (1- no plant residues (control), 2- one-third of residues (equivalent to 2500 kg.ha⁻¹), 3- two-thirds of residues (equivalent to 5000 kg.ha⁻¹), and 4- one hundred percent of residues (equivalent to 7500 kg.ha⁻¹). Leaf area, amount of remobilization, efficiency of dry matter remobilization, contribution of dry matter remobilization, amount of current photosynthesis, efficiency of current photosynthesis, contribution of current photosynthesis, rate of accumulation of seed yield, rate of accumulation of biological yield, percentage of seed nitrogen, and percentage of seed protein were measured.

Results and Discussion

Results of analysis of variance showed that the effect of cultivation method on traits of leaf area, amount of remobilization, efficiency dry matter remobilization, at the 1% probability level and on traits of contribution of



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

 <https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.97002.1264>

dry matter remobilization, contribution of current photosynthesis, rate of accumulation seed yield at the 5% probability level was significant but on traits of amount of current photosynthesis, efficiency current photosynthesis, rate of accumulation biological yield, percentage of seed nitrogen and percentage of seed protein was not-significant. Also, results showed that the effect of plant residues on traits of leaf area, amount of dry matter remobilization, efficiency dry matter remobilization, percentage of seed nitrogen and percentage of seed protein at the 1% probability level and on traits of contribution of dry matter remobilization and contribution of current photosynthesis at the 5% probability level was significant but on traits of amount of current photosynthesis, efficiency current photosynthesis, rate of accumulation seed yield, rate of accumulation biological yield, was not-significant. Also, results of analysis of variance showed the effect of the interaction of cultivation method and plant residues on traits of amount of remobilization and efficiency dry matter remobilization, at the 1% probability level was significant but on traits of leaf area, contribution of dry matter remobilization, amount of current photosynthesis, efficiency current photosynthesis, contribution of current photosynthesis, rate of accumulation seed yield and rate of accumulation biological yield was not-significant. The results of comparison showed that the highest efficiency of dry matter remobilization was related to the treatment of one hundred percent of residues in row and ridge cultivation conditions (23.3%), and the lowest efficiency of dry matter remobilization was related to the treatment of no plant residues in surface drilling (9.42%). Also, surface drilling had the highest remobilization (22.4%), and the treatment with no plant residues had the lowest (15.27%). The highest contribution of current photosynthesis was observed in the floor method (83.2%) and in one hundred percent of residues treatment (84.7%). The highest rate of accumulation seed yield was obtained in the treatment in ridge planting (0.042) and floor method (0.045 g.day⁻¹), and the lowest rate of accumulation seed yield was obtained in the surface drilling (0.036 g.day⁻¹). The highest percentage of seed protein was related to the treatments of two-thirds of residues (16.63%) and one hundred percent of residues (16.86%), but the lowest percentage of seed protein was obtained in treatments of no plant residues and one-third of residues. The findings demonstrate that integrating crop residue management with appropriate cultivation methods enhances nitrogen availability and soil health, leading to more efficient dry matter remobilization and improved grain protein content. This reflects a regenerative agricultural approach, where resource recycling and soil stewardship directly contribute to crop resilience and nutritional quality. Such practices not only optimize wheat productivity but also promote long-term sustainability by reducing dependence on chemical inputs. Ultimately, this study underscores that environmentally conscious farming is foundational to food security and sustainable livelihoods, aligning agricultural success with ecological and human well-being.

Conclusion

The results showed that applying plant residues and appropriate nutritional management increase nitrogen storage and improve seed protein quality. Generally, plant residues management and selection of appropriate cultivation methods can play a significant role in the growth and quality of wheat grain by improving photosynthetic conditions and dry matter remobilization.

Keywords: Percentage of seed nitrogen, Percentage of seed protein, Rate of accumulation of seed yield, Ridge planting.

مقاله پژوهشی

جلد ۱۸، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص ۱۱۷-۱۰۱

بررسی انتقال مجدد ماده خشک و سهم فتوسنتز جاری در دانه گندم (*Triticum aestivum* L.) در سه روش کشت و مقادیر مختلف بقایای گیاهی

معصومه شبیبی^۱، اسفندیار فاتح^{۱*} و امیر آینه بند^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۲

چکیده

به منظور مقایسه سه روش کشت مکانیزه گندم در شرایط کاربرد مقادیر مختلف بقایای گیاهی گندم (*Triticum aestivum* L.)، آزمایشی به صورت کرت‌های خردشده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۳-۰۲ در مزرعه آموزشی مرکز جهاد کشاورزی شهرستان دشت آزادگان انجام شد. کرت اصلی، سه روش کشت مکانیزه (خطی کار، پشته کار و کف کار) و کرت فرعی، کاربرد مقادیر مختلف بقایای گندم (بدون بقایای گیاهی، یک سوم بقایا، دو سوم بقایا و ۱۰۰ درصد بقایا) بود. بیشترین انتقال مجدد ماده خشک مربوط به کشت جوی و پشته‌ای با استفاده از دو سوم و ۱۰۰ درصد بقایای گیاهی (به ترتیب ۱/۶۲ و ۱/۲۸ درصد) و کمترین آن مربوط به تیمار بدون بقایای گیاهی (به ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۸۹ درصد) بود. همچنین کارایی انتقال مجدد ماده خشک، بیشترین مقدار خود را در تیمار کاربرد ۱۰۰ درصد بقایای گیاهی در کشت جوی و پشته‌ای (۲۳/۳ درصد) نشان داد و کمترین آن مربوط به تیمار بدون بقایای گیاهی در کشت خطی کار (۹/۴۲ درصد) بود. کشت خطی کار، بیشترین میزان انتقال مجدد را (۲۲/۴ درصد) به خود اختصاص داد و تیمار بدون بقایای گیاهی، کمترین سهم را داشت (۱۵/۲۷ درصد). سهم فتوسنتز جاری نیز تحت تأثیر روش کشت و مقادیر بقایای گیاهی معنی دار بود، به گونه‌ای که بیشترین سهم در کشت کف کار (۸۳/۲ درصد) و در تیمار ۱۰۰ درصد بقایای گیاهی (۸۴/۷ درصد) مشاهده شد. بیشترین درصد پروتئین دانه مربوط به تیمارهای دو سوم بقایا (۱۶/۶۳ درصد) و ۱۰۰ درصد بقایا (۱۶/۸۶ درصد) بود، اما کمترین درصد پروتئین دانه در تیمارهای بدون بقایای گیاهی و یک سوم بقایا به دست آمد. این پژوهش نشان داد که مدیریت بقایای گیاهی و انتخاب روش کشت مناسب می‌تواند با بهبود شرایط فتوسنتزی و انتقال مجدد ماده خشک، سهم قابل توجهی در رشد و کیفیت دانه گندم ایفا کند.

واژه‌های کلیدی: درصد پروتئین دانه، درصد نیتروژن دانه، سرعت تشکیل عملکرد دانه، کشت جوی و پشته

دارد (Latifi & Shabanali Fami, 2022).

مقدمه

بر اساس گزارش سازمان خواروبار جهانی (فائو)، در سال ۲۰۲۲ تولید جهانی گندم حدود ۸۰۸ میلیون تن بوده که سهم ایران حدود ۱۰ میلیون تن گزارش شده است. این میزان تولید گندم در سال ۱۴۰۱ در ایران برابر با ۱۳/۳ میلیون تن بوده است که استان خوزستان با میزان تولید ۱/۶۷۱ میلیون تن گندم، در رتبه اول استان‌های تولیدکننده گندم کشور قرار دارد (Agricultural Ministry Statistics, 2022).

در این میان، فشار بر اراضی کشاورزی برای برداشت حداکثر سود، بدون توجه به برگرداندن حداقل مواد آلی برای پایداری فیزیکی

با افزایش جمعیت جهان، نگرانی‌ها در مورد تأمین مواد غذایی نیز افزایش می‌یابد. در این میان، گندم (*Triticum aestivum* L.) به عنوان یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی که به صورت گسترده در سراسر جهان مصرف می‌شود، نقش حیاتی در تغذیه بشر، به ویژه در ایران ایفا می‌کند؛ چرا که رژیم غذایی ایرانیان وابستگی بالایی به نان

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

(*)- نویسنده مسئول:
(Email: e.fateh@scu.ac.ir)
<https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.97002.1264>

(2014).

کاربرد بقایای گیاهی منجر به کاهش فرسایش، افزایش ماده آلی و افزایش ذخیره رطوبتی خاک می‌گردد. علاوه بر این، بقایا به عنوان ابزاری مناسب در مدیریت علف‌های هرز به کار گرفته می‌شوند (Heidari, 2020). بقایای گیاهی با افزایش ماده آلی خاک منجر به رشد ریشه و افزایش قابلیت جذب عناصر کم‌مصرف و پرمصرف خاک و در نتیجه باعث افزایش عملکرد در گیاهان می‌شوند. بقایای گیاهی حاوی مقادیر زیادی ماده آلی هستند که دارای خاصیت جذب آب بالایی هستند، بنابراین افزودن بقایای گیاهی به خاک سبب افزایش قابل توجه ظرفیت نگهداری آب خاک خواهد شد (Mirzaee et al., 2016). در این ارتباط، صفری و همکاران (Safari et al., 2013) در آزمایشی روی گندم بیان کردند که اختلاف معنی‌داری بین ۹۰ و ۴۵ درصد بقایا و بدون بقایا به دست آمد، به طوری که در تمامی اعماق خاک، بالاترین درصد رطوبت موجود در خاک در تیمار ۹۰ درصد بقایای گیاهی حاصل گردید. همچنین این محققان اعلام کردند که این بقایا مانند مانعی در سطح خاک عمل می‌کنند و باعث کاهش رواناب و افزایش نفوذ آب در خاک شده و منجر به افزایش میانگین درصد رطوبت وزنی خاک می‌گردد.

یکی دیگر از راهکارهای مدیریتی به منظور افزایش تولید محصول گندم، اتخاذ روش صحیح کاشت در مناطق مختلف با در نظر گرفتن شرایط محیطی و مدیریتی منطقه هدف می‌باشد. روش کاشت از طریق برتری دادن به گیاه زراعی برای استفاده از منابع محیطی، نقش بسیار مؤثری در کاهش تراکم علف‌های هرز دارد (Devi et al., 2017). انتخاب روش صحیح کاشت می‌تواند باعث کاهش تلفات و افزایش راندمان تولید شود. اثر روش کاشت مشابه اثر افزایش تراکم کاشت گیاه زراعی بوده و از طریق تغییر فواصل بین ردیف سبب بهبود قابلیت رقابتی گیاه زراعی می‌شود و بدین وسیله میزان نور قابل دسترس برای علف‌های هرز کاهش یافته و امکان مهار مناسب‌تر علف‌های هرز حاصل می‌گردد (Chen et al., 2017). در پژوهشی روی ذرت *Zea mays* گزارش شد که روش‌های مختلف کشت (کشت بر روی پشته، کشت داخل کف جوی و کشت به صورت کرتی) بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه به طور معنی‌داری اثرگذار بود و بالاترین عملکرد و اجزای عملکرد از تیمار کشت داخل کف جوی به دست آمد. در این تحقیق بیان شد که انتخاب روش کشت مناسب در حصول بالاترین عملکرد، کارآترین روش می‌باشد (Khan et al.,

و شیمیایی خاک سبب کاهش ماده آلی در خاک‌ها و در نتیجه کاهش باروری خاک شده است. در واقع، روش متداول مدیریت بقایای گندم در ایران در کشت آبی که معمولاً دارای حجم زیاد کلس می‌باشد، خارج نمودن قسمت‌های بریده شده گیاه از زمین توسط دستگاه کمباین و دفن کردن بقایای ایستاده با شخم (گاواهن برگرداندار) می‌باشد و یا در خیلی از مناطق، متأسفانه کشاورزان اقدام به سوزاندن بقایا می‌کنند که سبب کاهش میزان مواد غذایی، کربن و مواد آلی خاک، پایداری ساختمان خاک و همچنین افزایش نیاز آبیاری در مناطق خشک به دلیل افزایش میزان تبخیر از سطح خاک می‌شود (Heidari, 2020). همچنین با افزایش دما پیش‌بینی می‌شود که در آینده، سرعت تجزیه بقایای گیاهی و معدنی شدن مواد آلی، آزادسازی عناصر غذایی و به ویژه نیتروژن از خاک افزایش یابد (Skaalsveen et al., 2019).

مطالعات مختلف نشان می‌دهد که بازگرداندن بقایای گیاهی به خاک باعث افزایش خلل و فرج و کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک و در نتیجه افزایش ظرفیت ذخیره آب و تبادل هوا در خاک می‌شود. این مورد اگر در درازمدت ادامه یابد، این عمل منجر به افزایش مواد آلی و بازگشت عناصر به خاک و در نهایت حاصلخیزی خاک می‌شود (Zhao et al., 2016).

نتایج بررسی روش‌های مختلف خاک‌ورزی الگوی کاشت و مدیریت بقایای گیاهی بر عملکرد و اجزای عملکرد کلزا/ *Brassica napus* نشان داد که حفظ بقایا سبب افزایش ماده آلی تا ۱۸ درصد و الگوی کاشت جوی و پشته با افزایش ۱۳/۸ درصد در عملکرد دانه و افزایش ۳۴/۷ درصد در تعداد بوته در مترمربع نسبت به الگوی کاشت مسطح شد (Moosawi et al., 2013). همچنین در بررسی تأثیر مدیریت بقایای گیاهی و منابع مختلف نیتروژن بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم گزارش شد که عملکرد و اجزای عملکرد گندم تحت تأثیر مدیریت‌های مختلف بقایای گیاهی قرار گرفت. به طوری که سوزاندن بقایا در اغلب صفات باعث افزایش و حذف بقایا و منجر به کاهش اجزای عملکرد شد. تیمار برگرداندن بقایا، علی‌رغم دارا بودن بیشترین وزن هزار دانه و شاخص برداشت، عملکرد بیولوژیک را به طور منفی تحت تأثیر قرار داد. بیشترین عملکرد دانه (۶/۶ تن در هکتار) از کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره و سوزاندن بقایای گیاهی و کمترین آن (۶/۲ تن در هکتار) از کاربرد کود بیولوژیک سوپرنیتروپلاس و حذف بقایای گیاهی حاصل شد (Sohrabi et al.,

(2012).

Hordeum vulgare در شرایط آب‌وهوایی ملاثانی بررسی گردید و

جهت اجرای آزمایش از چهار سطح الگوی کشت (مسطح با فواصل ردیف ۱۷ سانتی‌متر، مسطح با فواصل ردیف ۲۵ سانتی‌متر، دو ردیف کشت بر روی پشته ۵۰ سانتی‌متری و سه ردیف کشت بر روی پشته ۵۰ سانتی‌متری) و چهار سطح تراکم (۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ بوته در مترمربع) استفاده کردند. نتایج آزمایش نشان داد که الگوی کشت تأثیر معنی‌داری بر صفات عملکرد بیولوژیک و دانه، وزن هزار دانه و تعداد سنبله در واحد سطح داشت و بیشترین عملکرد بیولوژیک و دانه و تعداد سنبله در واحد سطح از الگوی کشت مسطح با فواصل ردیف ۱۷ سانتی‌متر و بیشترین وزن هزار دانه از الگوی کشت پشته‌ای سه ردیف به دست آمد و همچنین براساس نتایج به‌دست‌آمده، بالاترین عملکرد دانه با میانگین ۵۰۷۲ کیلوگرم در هکتار مربوط به کمترین فاصله ردیف (الگوی کشت مسطح با فواصل ردیف ۱۷ سانتی‌متر) و تراکم بوته ۲۰۰ بوته در مترمربع حاصل گردید (Soleimaniabyat et al., 2014). مقایسه کشت روی پشته و کف فارو از جنبه فراهمی رطوبت برای گیاه، مدیریت مطلوب علف‌های هرز و افزایش راندمان مصرف آب و عناصر غذایی اهمیت ویژه‌ای داشته و می‌تواند منجر به توسعه حوزه کشت و افزایش کمی و کیفی محصول گردد (Wang et al., 2019).

همچنین در این ارتباط گزارش شده که روش کشت می‌تواند سبب بهبود توزیع نور و در نتیجه کاهش رقابت بین گیاهان شود که این عوامل می‌تواند فتوسنتز جاری و در نتیجه سهم فتوسنتز جاری را در عملکرد نهایی افزایش دهد (Rady et al., 2021). با توجه به اینکه بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در ارتباط با روش کشت و بقایای گیاهی با تأثیر بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه بوده و کمتر عوامل فیزیولوژیک مثل انتقال مجدد ماده خشک و فتوسنتز جاری مورد بررسی قرار گرفته، لذا هدف از انجام این پژوهش، انتخاب روش مناسب بین سه روش کشت گندم براساس بررسی انتقال مجدد ماده خشک و سهم فتوسنتز جاری در دانه گندم تحت تأثیر مقادیر مختلف بقایای گیاهی در شرایط آب و هوایی منطقه دشت آزادگان بود.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به‌منظور مقایسه سه روش کشت مکانیزه گندم در شرایط کاربرد مقادیر مختلف بقایای گیاهی گندم طی سال زراعی ۱۴۰۲-۰۳ در مزرعه آموزشی مرکز جهاد کشاورزی شهرستان دشت

کشت گیاهان مختلف در کف جوی، یک شیوه نوین در کشت است که دارای مزایای زیادی می‌باشد. مزایای این روش عبارتند از افزایش بازده آب، سرعت بخشیدن به انجام عملیات آبیاری، همچنین کشت در کف جوی باعث افزایش بهره‌وری از آب می‌شود، به‌دلیل استفاده بهینه از آب و مواد غذایی، سیستم ریشه توسعه بهتر و بیشتری داشته و باعث استقرار مناسب بوته‌ها و مقاومت در برابر خشکی می‌شود، امکان افزایش سطح زیرکشت به‌دلیل افزایش بازده آب وجود دارد و کشت در کف جوی برای مناطق با شوری خاک بالا و دارای بافت سبک خاک توصیه می‌شود (Wang et al., 2019; Reshadsedghi & Nikanfar, 2021). در مطالعه‌ای در چین، کشت پشته‌ای گندم آبی (به تعداد سه خط روی پشته با فواصل ۱۵ سانتی‌متر به‌روش مرسوم کشت روی زمین مسطح با فواصل ۲۲ سانتی‌متر) بررسی و گزارش شد که سیستم کشت پشته‌ای به‌طور معنی‌دار باعث افزایش عملکرد دانه و کاهش مصرف آب گردید (Wang et al., 2021). در آزمایشی اثر روش کاشت روی عملکرد ذرت در مرکز تحقیقات کشاورزی بوشهر بررسی شد و در این آزمایش از روش کاشت (یک ردیف روی پشته، دو ردیف طرفین پشته به‌صورت زیگزاگی و یک ردیف کف فارو) استفاده گردید، بیشترین وزن هزاردانه، شاخص برداشت و عملکرد بیولوژیک در روش کاشت کف فارو و بعد از آن در روش کشت زیگزاگی مشاهده شد (Dawani et al., 2016).

روش دیگر کشت، کاشت در طرفین پشته‌ها برای مقابله با شوری خاک مناسب است، زیرا املاح خاک همراه با رطوبت به بالا و وسط پشته حرکت می‌کند، مشروط بر آنکه آبیاری‌های بعد از کاشت به‌طور سنگین انجام شوند. چون گیاهچه‌ها در کناره پشته‌ها قرار دارند از خسارت متمرکز املاح مصون می‌باشند. آزمایشی با هدف ارزیابی عملکرد گندم و زیست‌توده علف‌های هرز تحت کاربرد الگوهای کاشت در دانشگاه زنجان انجام شد و در آن از چهار روش کاشت استفاده گردید که شامل کشت تک ردیف روی پشته، کشت تک ردیف داخل جوی، کشت سه ردیف روی پشته‌های عریض و کشت سه ردیف داخل جوی بودند و در نهایت این محققان الگوی کاشت سه ردیف روی پشته و الگوی کاشت یک ردیف داخل جوی را به‌دلیل عملکرد بالا و مهار مناسب علف‌های هرز پیشنهاد دادند (Yousefi et al., 2016). در آزمایشی اثر روش کشت و تراکم بوته بر عملکرد جو

آزادگان واقع در جنوب شرقی استان خوزستان با عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۱۹ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۴۱ دقیقه شرقی و ارتفاع پنج متر از سطح دریا انجام شد. شهرستان شادگان در جنوب استان خوزستان واقع شده است. این شهرستان از شمال به شهرستان اهواز، از شرق به شهرستان بندر ماهشهر، از غرب به شهرستان خرمشهر و از جنوب به شهرستان آبادان محدود می‌شود. این شهر دارای آب‌وهوای گرم و مرطوب است. وجود دو رودخانه کارون و جراحی و اراضی قابل کشت، شادگان را به

یکی از مناطق مهم اقتصادی تبدیل کرده است. آمار هواشناسی در محدوده زمانی انجام آزمایش به صورت میانگین ماهانه در جدول ۱ نشان داده شده است.

به منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه، نمونه مرکب از عمق ۰-۳۰ سانتی متری مزرعه آزمایشی تهیه و به آزمایشگاه منتقل و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد تجزیه قرار گرفت. نتایج تجزیه آزمون خاک در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- میانگین ماهانه شرایط آب‌وهوایی در طول فصل رشد در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲

Table 1- Average monthly weather conditions during the growing season in the crop year 2023-2024

ماه	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد
Month	November	December	January	February	March	April	May	June
دمای حداکثر Maximum temperature (°C)	32.3	26.5	25	26	29.7	36.1	46.9	49.9
دمای حداقل Minimum temperature (°C)	11.1	5.6	2.9	6.1	7.1	10.7	19.4	25.8
میانگین دمای ماهانه Average monthly temperature (°C)	19.4	15.3	14.2	15.5	18.3	24.3	33.5	39
بارندگی Rainfall (mm)	15.9	20.5	45.1	13.8	17.2	20	2	0

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 2- Physical and chemical properties of the soil at the test site

عمق Depth (cm)	بافت Texture	پتاسیم قابل جذب Absorbable potassium (mg.kg ⁻¹)	فسفر قابل جذب Absorbable phosphorus (mg.kg ⁻¹)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی Ec (dS.m ⁻¹)	نیترژن N (%)	مواد آلی Organic matters (%)
0-30	رسی - لومی Clay and loam	144	14.4	7.8	1.24	0.1	0.3

طرح آزمایشی به صورت کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. عامل روش کشت که به صورت نواری اجرا شد و شامل سه روش کشت مکانیزه (۱- روش خطی کار، ۲- روش پشته کار و ۳- روش کف کار) و کرت فرعی، کاربرد مقادیر مختلف بقایای گندم در چهار سطح شامل ۱- بدون بقایای گیاهی، ۲- یک سوم بقایا، ۳- دو سوم بقایا و ۴- صد درصد بقایا بود.

ابتدا، قبل از آماده سازی زمین، به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی متری خاک نمونه برداری صورت گرفت. عملیات آماده سازی زمین شامل عملیات شخم، دیسک، ماله، کرت بندی، توسط مرزبند و نه‌رنزی توسط نه‌رکن بود. کود اوره به میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار در سه نوبت، یک سوم در زمان کاشت، یک سوم در اوایل ساقه رفتن و بقیه قبل از ظهور سنبله استفاده شد. کود فسفات به میزان ۹۰ کیلوگرم در

هکتار از منبع سوپر فسفات تریپل در زمان قبل از کاشت استفاده گردید. کود پتاسیم نیز از منبع کود پتاسیم سولفات در زمان قبل از کاشت با خاک کرت‌های مورد نظر مخلوط شد. ابعاد هر کرت آزمایشی برابر با ۳×۴ مترمربع بود. بر این اساس، مقدار کاه مصرفی در تیمار یک سوم معادل ۲۵۰ گرم برای هر مترمربع (۲/۵ تن در هکتار) و در تیمار دو سوم معادل ۵۰۰ گرم کاه برای هر مترمربع (۵ تن در هکتار) و برای تیمار ۱۰۰ درصد معادل ۷۵۰ گرم کاه برای هر مترمربع (۷/۵ تن در هکتار) بود که قبل از کاشت با خاک مخلوط شد. میزان بذر مصرفی ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار بود و کشت در تاریخ ۱۴۰۲/۰۸/۱۸ به صورت مکانیزه انجام شد.

جدول ۳- برخی خصوصیات رشدی گندم نان رقم مهرگان
Table 3- Some growth characteristics of bread wheat cultivar Mehregan

کیفیت نانوائی Baking quality	وضعیت ریزش دانه Seed shedding situation	مقاومت به بیماری زنگ قهوه‌ای Resistance to brown rust disease	مقاومت نسبت به بیماری زنگ زرد Resistance to yellow rust disease	مقاومت به خوابیدگی Lodging resistance	عادت رشدی Growth habit	میانگین عملکرد دانه Average seed yield (kg.ha ⁻¹)
بسیار خوب Excellent	مقاوم Resistance	مقاوم Resistance	مقاوم Resistance	مقاوم Resistance	بهاره Spring	5690

مرحله کود باقی مانده به صورت سرک بود. وجین علف‌های هرز نیز به صورت دستی و در دو نوبت انجام گرفت.

صفات مورد اندازه‌گیری

اندازه‌گیری شاخص‌های ذخیره و انتقال ماده خشک فتوسنتزی

به منظور بررسی سهم میزان ماده خشک انتقال یافته به دانه گندم از فتوسنتز جاری یا انتقال مجدد ماده خشک ذخیره شده در اندام‌های رویشی (غالباً قبل از گرده افشانی)، وزن بخش رویشی بوته‌های گندم (ساقه، برگ و پوشینه) در دو مرحله گرده افشانی و رسیدگی فیزیولوژیکی ثبت شد. زمان گرده افشانی به نقل از ژو و همکاران (Xu et al., 2005) زمانی است که ۵۰ درصد از پرچم‌ها از سنبلچه‌های هر سنبله قابل مشاهده باشند. در هر دو مرحله (گرده افشانی و رسیدگی فیزیولوژیکی)، ۲۰ بوته از هر واحد آزمایشی به طور تصادفی انتخاب و از سطح زمین کف بر شده و معادل سطح زیر کشت آن محاسبه شد. قسمت رویشی بوته‌ها شامل برگ، ساقه، پوشینه، محور سنبله و پوسته دانه‌ها جداسازی گردید. کل نمونه‌ها در آون همانند مراحل قبل خشکانده شد. با داشتن این اطلاعات در دو زمان گرده افشانی و رسیدگی، شاخص‌های بررسی انتقال ماده خشک با استفاده از معادله‌های ۲ تا ۸ اندازه‌گیری گردید (Arduini et al., 2006):

معادله (۱)

وزن اندام هوایی به جز دانه = انتقال مجدد ماده خشک (گرم در بوته)
در زمان رسیدگی - حداکثر ماده خشک تولید شده در زمان گرده افشانی

معادله (۲)

انتقال مجدد ماده خشک

کارایی انتقال مجدد = $\frac{\text{انتقال مجدد ماده خشک}}{\text{حداکثر ماده خشک تولید شده در زمان گرده افشانی}}$

معادله (۳)

در تیمار کشت با دستگاه خطی کار، کشت به صورت ۲۱ ردیفه با عرض مفید ۲/۵ متر و عمق کاشت ۲ سانتی متر و فاصله بین خطوط کشت ۱۳ سانتی متر انجام شد. در تیمار کشت با دستگاه پشته کار با عرض مفید ۲/۵ متر شامل پنج پشته که هر پشته شامل چهار ردیف کشت بود. در تیمار کشت با دستگاه کف کار با عرض مفید ۲/۵ متر، پنج جوی عریض به عرض ۵۰ سانتی متر ایجاد شد که در کف هر جوی چهار ردیف کشت شد. رقم گندم مورد مطالعه در این پژوهش، رقم مهرگان بود که ویژه اقلیم گرم جنوب با شجره SISAO ROTSAP*2/3/NCB*4//ZUAKS از خزانه بین المللی مربوط به مرکز تحقیقات بین المللی ذرت و گندم^۱ انتخاب و در سال زراعی ۱۳۷۸ در کرج مورد ارزیابی مقدماتی و تکثیر بذر قرار گرفت. میانگین عملکرد و برخی خصوصیات رقم مهرگان در جدول ۳ نشان داده شده است.

اولین آبیاری در تاریخ ۱۸ آبان ماه بلافاصله پس از کشت انجام گرفت، از نظر میزان کود مصرفی، تمامی کود فسفات و پتاس و یک سوم کود اوره در زمان کاشت و بقیه کود اوره در دو مرحله (در ابتدای مرحله پنجه دهی و ساقه رفتن و اوایل گل دهی) به صورت سرک (هر مرحله ۵۰ کیلوگرم در هکتار) با دست در مزرعه پخش و دو مرحله نیز از کود ریزمغذی هوموکسال ۹۵ درصد مولتی کم^۲ به صورت محلول پاشی همراه آب آبیاری (به میزان یک کیلوگرم در هکتار) در مرحله ساقه رفتن در کرت‌ها استفاده شد. این کود ریزمغذی شامل ۱۲ درصد پتاسیم محلول در آب^۳، ۴۸ درصد اسید هیومیک^۴ و ۲۵ درصد اسید فولویک^۵ می‌باشد. سایر عملیات زراعی شامل آبیاری کرتی و وجین علف‌های هرز به طور یکسان برای تمامی کرت‌ها اعمال شد. عملیات داشت شامل آبیاری، وجین دستی علف‌های هرز و پخش دو

- 1- CIMMYT
- 2- Humuxal%95
- 3- K₂O
- 4- Humic acid
- 5- Fulvic acid

$$100 \times \frac{\text{انتقال مجدد ماده خشک}}{\text{عملکرد دانه}} = \text{سهم انتقال مجدد در عملکرد دانه}$$

معادله (۴)

انتقال مجدد ماده خشک - عملکرد دانه = میزان فتوسنتز جاری (گرم در بوته)

معادله (۵)

$$\text{فتوسنتز جاری ماده خشک} = \frac{\text{حداکثر ماده خشک تولید شده در زمان گرده افشانی}}{\text{کارایی فتوسنتز جاری}}$$

معادله (۶)

$$100 \times \frac{\text{انتقال جاری ماده خشک}}{\text{عملکرد دانه}} = \text{سهم فتوسنتز جاری ماده خشک در عملکرد دانه}$$

معادله (۷)

$$\text{عملکرد دانه} = \frac{\text{سرعت تشکیل عملکرد دانه}}{\text{روز پس از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیکی}}$$

معادله (۸)

$$\text{عملکرد زیستی} = \frac{\text{سرعت تشکیل عملکرد زیستی}}{\text{روز پس از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیکی}}$$

شاخص سطح برگ

برای تعیین شاخص سطح برگ، از هر واحد آزمایشی نمونه برداری انجام شد و بعد از جدا نمودن برگ ها، سطح برگ با استفاده از دستگاه سطح برگ سنج مدل LI-3000A, USA در مرحله گل دهی اندازه گیری گردید و شاخص سطح برگ از تقسیم سطح برگ به سطح زمین تحت اشغال بوته ها محاسبه شد.

اندازه گیری میزان نیتروژن و پروتئین دانه

به منظور اندازه گیری میزان نیتروژن دانه، ابتدا دانه های برداشت شده از هر کرت به صورت مجزا توسط دستگاه آسیاب به حالت پودر درآمد تا بتوان بر روی آن عملیات هضم و تجزیه انجام داد. بدین منظور، جهت تعیین درصد نیتروژن از دستگاه تعیین نیتروژن (کجلدال) استفاده شد، روش کار به این صورت بود که جهت اندازه گیری میزان نیتروژن، مقدار یک گرم از نمونه را توزین و در لوله مخصوص دستگاه کجلدال ریخته و سپس ۳/۵ گرم کاتالیزور سی سی اسیدسولفوریک خالص اضافه گردید و در ادامه لوله های آماده شده به جای لوله مخصوص به زیر هود (هواکش) منتقل گردید.

ساکنن مربوطه روی لوله ها قرار داده شده و بر روی اجاق دستگاه قرار گرفت. پس از یک ساعت که رنگ محلول به سیاهی تغییر یافت، لوله های هضم با دستگیره جای لوله ها از روی اجاق برداشته شد تا سرد گردد. پس از سرد شدن لوله های هضم به هر لوله ۵۰ سی سی آب مقطر اضافه گردید تا برای مرحله قرائت آماده شود. سپس لوله ها در دستگاه قرار داده شده و عدد نشان داده شده ثبت گردید. این عدد به درصد بیان شد (Bremner & Mulvaney, 1982). برای محاسبه محتوی پروتئین دانه، مقدار نیتروژن در ضریب (۶/۲۵) ضرب گردید. تجزیه واریانس داده ها با استفاده از نرم افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام شد. مقایسه میانگین صفات با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی دار (LSD) در سطح پنج درصد صورت گرفت. برای رسم نمودارها از نرم افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

شاخص سطح برگ در مرحله گل دهی

بررسی نتایج تجزیه واریانس صفات آزمایشی حاکی از تأثیرپذیری شاخص سطح برگ از روش کشت و بقایای گیاهی بود (جدول ۴). مقایسه میانگین روش کشت نشان داد که میانگین شاخص سطح برگ در روش کشت خطی کار برابر با ۵/۳ بود که با روش کشت کف کار اختلاف آماری معنی داری نداشت، ولی نسبت به کشت جوی و پشته ای به طور معنی داری (۳۰ درصد) بالاتر بود (جدول ۴). در بین سطوح اصلی بقایای گیاهی نیز مشاهده شد که تیمارهای بدون کاربرد بقایای گیاهی و یک سوم بقایا اختلاف آماری معنی داری با یکدیگر نداشتند، ولی به طور معنی داری میانگین کمتری نسبت به تیمارهای کاربرد دو سوم و ۱۰۰ درصد بقایای گیاهی داشتند (جدول ۵). گزارش شده است که ذخیره رطوبتی خاک ناشی از مدیریت بقایا می تواند از طریق تأثیر بر فتوسنتز در گسترش سطح برگ گیاه مؤثر باشد. در واقع به نظر می رسد که حفظ بقایای گندم با بهبود نفوذ آب در خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک و تعدیل دمای خاک و بهبود ماده آلی خاک به خصوص نیتروژن توانسته است که به رشد و توسعه بیشتر گیاه به ویژه توسعه برگ ها کمک کند (Ghazinejad et al., 2022).

جدول ۴- تجزیه واریانس سطح برگ و صفات مربوط به انتقال مجدد ماده خشک تحت تأثیر سه روش کشت و مقادیر مختلف بقایای گیاهی
Table 4- Analysis of variance of leaf area and traits related to dry matter remobilization under three cultivation method and different plant residues.

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	شاخص سطح برگ Leaf area Index	میانگین مربعات Mean of squares						سرعت تشکیل عملکرد زیستی Rate of accumulation Biological yield
			انتقال مجدد Remobilization	کارایی انتقال مجدد ماده خشک Efficiency dry matter remobilization	سهم انتقال مجدد ماده خشک Contribution of dry matter remobilization	میزان فتوسنتز جاری Amount of current photosynthesis	کارایی فتوسنتز جاری Efficiency current photosynthesis	سهم فتوسنتز جاری Contribution of current photosynthesis	سرعت تشکیل عملکرد دانه Rate of accumulation seed yield
بلوک Block	2	5921	0.03	10.4	33.4	34.3	668	61.8	0.0003
روش کشت Cultivation method	2	16010**	0.11**	45.8**	91.9*	10.5 ^{ns}	6265 ^{ns}	94.1*	0.0005 ^{ns}
خطای اصلی Main error	4	2310	0.017	9.1	27.4	12.7	2488	14.1	0.00008
بقایای گیاهی Plant residues	3	10920**	0.21**	71**	78.9*	1.53 ^{ns}	2223 ^{ns}	88*	0.00007 ^{ns}
روش کشت × بقایای گیاهی Cultivation method × plant residues	6	10100 ^{ns}	0.13**	38**	16.2 ^{ns}	11.6 ^{ns}	4423 ^{ns}	21.7 ^{ns}	0.00008 ^{ns}
خطای فرعی Sub error	18	1150	0.01	2.36	17.8	7.3	1845	22.9	0.00006
ضریب تغییرات CV (%)	-	14.18	8.46	11.66	21.47	18.11	25.7	5.99	19.23
									16.84

ns, *, ** and ***: are non-significant, significant at 5 and 1% probability levels, respectively.
ns, *, ** and ***: به ترتیب غیر معنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

جدول ۵- مقایسه میانگین صفات سطح برگ و صفات مربوط به انتقال مجدد ماده خشک گندم تحت تأثیر سه روش کشت و مقادیر مختلف بقایای گیاهی
Table 5- Average comparison of leaf area and traits related to dry matter remobilization under three cultivation method and different plant residues.

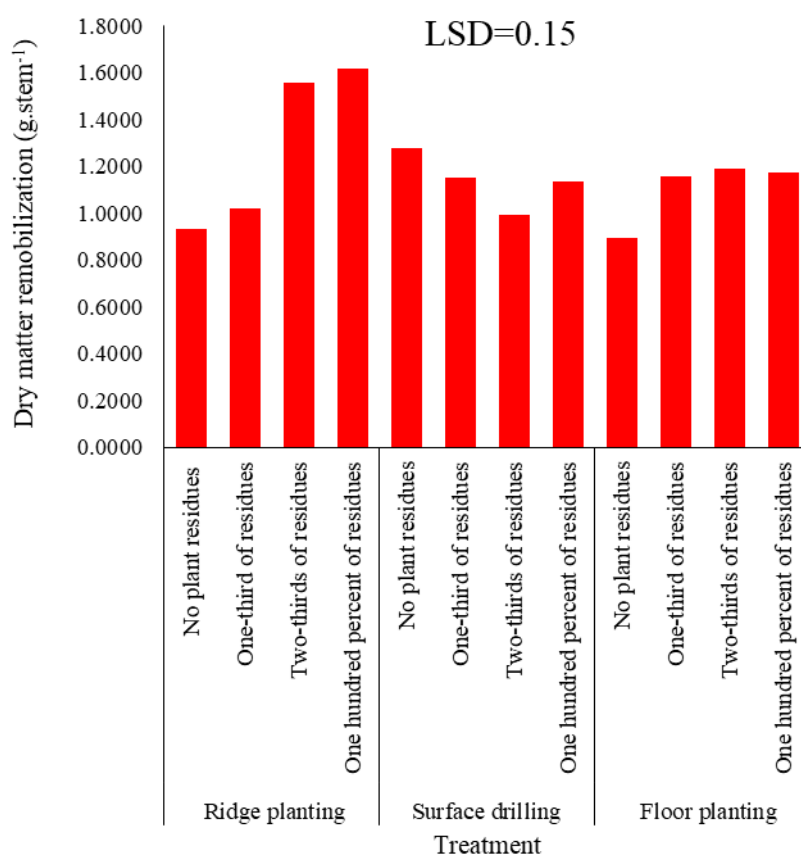
شاخص Leaf area index	انتقال مجدد Remobilization (g.stem ⁻¹)	کارایی انتقال مجدد ماده خشک Efficiency dry matter remobilization (%)	سهم انتقال مجدد ماده خشک Contribution of dry matter remobilization (%)	میزان فتوسنتز جاری Amount of current photosynthesis (g.plant ⁻¹)	کارایی فتوسنتز جاری Efficiency current photosynthesis (%)	سهم فتوسنتز جاری Contribution of current photosynthesis (%)	سرعت تشکیل عملکرد دانه Rate of yield accumulation seed yield (g.day ⁻¹)	سرعت تشکیل عملکرد زیستی Rate of yield accumulation Biological yield (g.day ⁻¹)
روش کشت Cultivation method								
جوی و بشته Ridge planting	1.28	15.43	19.77	15.38	187.19	79.65	0.042	0.108
خطی کار Surface drilling	1.14	11.91	22.36	13.86	142.23	77.64	0.036	0.098
کف کار Floor method	1.1	12.2	16.83	15.56	171.77	83.17	0.045	0.109
LSD (0.05)	0.15	3.2	3.4	2.7	47.4	4.2	0.05	0.02
سطوح بقایا Residues								
بدون بقایا No plant residues	0.99	9.86	15.27	14.78	158.09	77.91	0.043	0.104
یک سوم بقایای گیاهی One-third of residues	1.11	11.85	20.47	15.12	150.07	79.53	0.044	0.105
دو سوم بقایای گیاهی Two-thirds of residues	1.33	15.23	21.32	15.4	184.23	78.44	0.039	0.109
۱۰۰ درصد بقایا One hundred percent of residues	1.27	15.77	21.56	14.45	175.86	84.73	0.038	0.102
LSD (0.05)	0.08	2.8	2.5	1.7	36.8	4.1	0.08	0.09

اگر میزان اختلاف عددی دو تیمار از عدد نشان دهنده تفاوت معنی دار آماری بین آن دو تیمار می باشد.
If the numerical difference between two treatments is greater than the LSD number, it indicates a statistically significant difference between the two treatments.

انتقال مجدد

نتایج تجزیه واریانس صفات آزمایشی نشان داد که انتقال مجدد تحت تأثیر اثرات روش کشت و بقایای گیاهی و برهم کنش آن‌ها قرار گرفت (جدول ۴). بررسی نتایج برهم کنش عوامل آزمایشی نشان داد که بیشترین انتقال مجدد ماده خشک مربوط به سطوح تیماری کاربرد دو سوم و ۱۰۰ درصد بقایای گیاهی در کشت جوی‌وپشته‌ای بود که به‌طور معنی‌داری بالاتر از سایر سطوح تیماری بود. در مقابل، کمترین میانگین این صفت مربوط به تیمار بدون کاربرد بقایای گیاهی در کشت جوی‌وپشته و کف‌کار بود که به‌طور معنی‌داری کمتر از سایر سطوح تیماری بودند (شکل ۱).

طی مطالعه‌ای مشخص شد که شاخص سطح برگ ذرت در خاک‌ورزی مرسوم (برگرداندن بقایای گیاهی) در مقایسه با کم خاک‌ورزی (باقی ماندن بخشی از بقایای گیاهی) و بدون خاک‌ورزی (حفظ بقایای گیاهی) بیش‌تر بود، اما برای سویا *Glycin max* شاخص سطح برگ در تیمار کم خاک‌ورزی بیش‌تر از خاک‌ورزی مرسوم و بدون خاک‌ورزی بود. تبخیر و تعرق در فصل رشد ذرت برای تیمار بدون خاک‌ورزی و کم خاک‌ورزی در مقایسه با خاک‌ورزی سنتی بیش‌تر بود، اما از این نظر در مورد سویا اختلافی مشاهده نشد (Brunel et al., 2013).

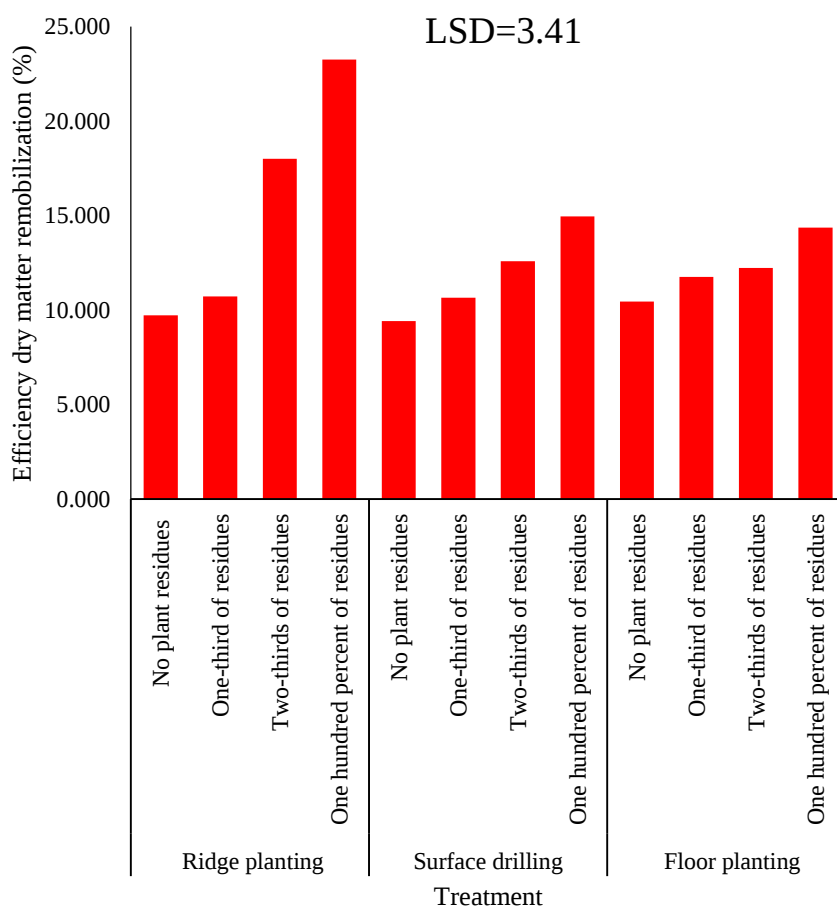


شکل ۱- مقایسه میانگین برهم کنش انتقال مجدد ماده خشک گندم تحت تأثیر روش کشت × بقایای گیاهی (اگر میزان اختلاف عددی دو تیمار از عدد LSD بیشتر باشد نشان دهنده تفاوت معنی دار آماری بین آن دو تیمار می باشد).

Fig. 1- Average comparison of the interaction effect of dry matter remobilization (g.stem^{-1}) of wheat under Cultivation method $\times$ plant residues (If the numerical difference between two treatments is greater than the LSD number, it indicates a statistically significant difference between the two treatments.)

کربوهیدراتی موجود در اندام‌های رویشی علاوه‌بر اینکه از فرآیند تثبیت کربن در برگ‌ها نشأت گرفته، با میزان بهره‌برداری و انتقال به دانه‌ها نیز در ارتباط می‌باشند. پس از مرحله گل‌دهی، میزان فتوسنتز به‌دلیل بروز تنش‌های محیطی کاهش می‌یابد و لذا تحت این شرایط انتقال مجدد مواد فتوسنتزی، سهم قابل توجهی در عملکرد دانه ایفا می‌کند (Hokmalipour & Sharifi, 2016; Naseri et al., 2021).

به نظر می‌رسد که در شرایط کاربرد بقایای گیاهی، در ابتدای رشد شرایط مطلوب‌تر بوده است و گیاه در اواخر دوره رشدی با محدودیت تولید کربوهیدرات‌های جاری توسط سطوح فتوسنتزکننده روبه‌رو شده است، در نتیجه سهم ذخایر انتقال مجدد در پُر شدن دانه‌های تولیدشده افزایش یافته است. تحقیقات مختلف انجام‌شده بر فرآیندهای ذخیره‌سازی و انتقال مجدد مواد فتوسنتزی نشان داده است که عملکرد دانه در صورت عدم تعادل بین حرکت مواد فتوسنتزی از منبع به مخزن که مبتنی بر تولید مواد فتوسنتزی منبع از یک طرف و ظرفیت مخزن از طرف دیگر است، کاهش می‌یابد، ذخایر



شکل ۲- مقایسه میانگین بهره‌کنش کارایی انتقال مجدد ماده خشک گندم تحت تأثیر روش کشت × بقایای گیاهی (اگر میزان اختلاف عددی دو تیمار از عدد LSD بیشتر باشد نشان دهنده تفاوت معنی‌دار آماری بین آن دو تیمار می‌باشد)

Fig. 2- Average comparison of the interaction effect of efficiency dry matter remobilization of wheat under cultivation method × plant residues (If the numerical difference between two treatments is greater than the LSD number, it indicates a statistically significant difference between the two treatments.)

کارایی انتقال مجدد ماده خشک

بررسی نتایج تجزیه واریانس حاکی از تأثیر معنی‌دار اثرات روش کشت، بقایای گیاهی و برهم‌کنش آن‌ها بر صفت کارایی انتقال مجدد ماده خشک بود (جدول ۴). بررسی نتایج برهم‌کنش کارایی انتقال مجدد ماده خشک نشان داد که بیشترین مقدار مربوط به تیمار کاربرد ۱۰۰ درصد بقایای گیاهی در شرایط کشت جوی‌پشته (۲۳/۳ درصد) بود که به‌طور معنی‌داری بالاتر از سایر سطوح تیماری بود (شکل ۲). کمترین میانگین کارایی انتقال مجدد ماده خشک مربوط به تیمار بدون کاربرد بقایای گیاهی در کشت خطی کار (۹/۴۲ درصد) بود، که تفاوت ۶۰ درصدی را نشان دادند (شکل ۲). به نظر می‌رسد که با افزایش تعداد سنبله در سنبله و دانه در سنبله در شرایط کاربرد بقایای گیاهی، فتوسنتز جاری به‌تنهایی قادر به فراهمی مواد پرورده برای پُر کردن دانه‌های تولیدشده نبوده، لذا گیاه برای تأمین نیاز مقاصد فیزیولوژیکی تولیدشده تکیه گسترده‌ای بر انتقال مجدد مواد ذخیره‌شده در اندام‌های رویشی (قبل از گرده‌افشانی) دارد. در واقع، کاربرد بقایای گیاهی نه‌تنها توانست یک هماهنگی بین مراحل رشدی ایجاد کند، بلکه با تکیه بر انتقال مجدد مواد خشک ذخیره‌شده در اندام‌های رویشی، نیاز دانه‌ها را فراهم و بهبود عملکرد را در پی داشته است. در این راستا گزارش شده است که پتانسیل بازانتقال ماده خشک ذخیره‌شده در اندام‌های رویشی به دانه‌ها تحت تأثیر عواملی همچون نوع گیاه، تأثیر گیاه قبلی بر رشد اولیه گندم و همچنین میزان نهاده‌های مصرفی قرار دارد (Sohrabi et al., 2014).

سهم انتقال مجدد ماده خشک

براساس نتایج تجزیه واریانس صفات آزمایشی، سهم انتقال مجدد ماده خشک تنها تحت تأثیر اثرات روش کشت و مقادیر بقایای گیاهی قرار گرفت (جدول ۴). بررسی نتایج مقایسه میانگین صفات آزمایشی نشان داد که بیشترین سهم انتقال مجدد ماده خشک مربوط به کشت خطی کار (۲۲/۴ درصد) بود که به‌طور معنی‌داری بالاتر از کشت جوی‌پشته‌ای (۱۹/۸ درصد) و کشت کف‌کار (۱۶/۸ درصد) بود (جدول ۵). در بین مقادیر مختلف بقایای گیاهی نیز مشاهده شد که کمترین سهم انتقال مجدد ماده خشک مربوط به تیمار عدم کاربرد بقایای گیاهی (۱۵/۲۷ درصد) بود که به‌طور معنی‌داری پایین‌تر از سایر سطوح تیماری بود. در مقابل، بین مقادیر مختلف کاربرد بقایای

گیاهی اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۵). بر این اساس مشاهده شد که تیمار کاربرد یک سوم، دوسوم و ۱۰۰ درصد بقایای گیاهی به‌ترتیب ۳۴، ۴۰ و ۴۱ درصد سهم بیشتری از انتقال مجدد ماده خشک نسبت به تیمار بدون بقایای گیاهی داشتند.

همان‌طور که نتایج این پژوهش نشان داد، در شرایط کاربرد بقایای گیاهی، اجزای عملکرد یعنی تعداد سنبله در بوته، تعداد سنبله در سنبله و تعداد دانه در سنبله افزایش یافت. بنابراین جهت پاسخ‌گویی به نیاز مخازن فیزیولوژیکی، گیاه به مواد فتوسنتزی بیشتری نیاز دارد که تحت این شرایط علاوه بر فتوسنتز جاری، گیاه از مواد فتوسنتزی که قبل از مرحله گرده‌افشانی در مخازن فیزیولوژیکی (ساقه) ذخیره نموده است، استفاده می‌کند که در نهایت سبب افزایش سهم انتقال مجدد ماده خشک شده است. همچنین افزایش سهم انتقال مجدد مواد فتوسنتزی در تعیین عملکرد نهایی را می‌توان به شرایط محیطی نامطلوب آخر فصل (افزایش دما و شدت تبخیر) در شرایط آب‌وهوایی منطقه مورد آزمایش نسبت داد. در واقع، در شرایط مطلوب و دسترسی به منابع کافی، چون فتوسنتز جاری افزایش می‌یابد، تعادل منبع و مخزن تا حد زیادی حفظ و مواد تولیدی منبع می‌تواند در مخزن مورد بهره‌برداری قرار گیرند، اما در شرایط محدودیت‌های محیطی، به‌دلیل عدم دسترسی به عناصر غذایی، تعادل قدرت منبع و مخزن به هم خورده که در چنین شرایطی، قدرت مخزن بیشتر از منبع بوده و به‌دلیل روابط فیزیولوژیکی موجود بین منبع و مخزن، منبع میزان انتقال ماده خشک را افزایش داده تا قسمتی از نیاز شدید مخازن (دانه‌ها) را فراهم آورد (Naseri et al., 2021).

سهم فتوسنتز جاری

بررسی نتایج تجزیه واریانس صفات آزمایشی نشان داد که سهم فتوسنتز جاری در عملکرد نهایی محصول نیز تنها تحت تأثیر روش کشت و مقادیر بقایای گیاهی قرار گرفت (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر روش کشت نشان داد که در الگوهای مختلف کشت، بیشترین سهم فتوسنتز جاری مربوط به روش کشت کف‌کار (۸۳/۲ درصد) بود که با روش کشت جوی‌پشته‌ای (۷۹/۶ درصد) اختلاف معنی‌داری نداشت، ولی نسبت به تیمار کشت خطی کار (۷۷/۶ درصد) برتری آماری معنی‌داری داشتند و تفاوت ۶ درصدی بین کشت کف‌کار و

درصد نیتروژن و پروتئین دانه

نتایج تجزیه واریانس صفات آزمایشی نشان داد که درصد نیتروژن و پروتئین دانه تنها تحت تأثیر اثر بقایای گیاهی در سطح یک درصد قرار گرفت (جدول ۶). براساس نتایج مقایسه میانگین، درصد نیتروژن و پروتئین دانه، بین تیمارهای بدون کاربرد بقایای گیاهی (۲/۸۹ و ۱۵/۲۷ درصد به ترتیب نیتروژن و پروتئین دانه و کاربرد یک سوم بقایای گیاهی (۲/۸۸ و ۱۵/۲ درصد به ترتیب نیتروژن و پروتئین دانه)) اختلاف آماری معنی‌داری وجود نداشت و میانگین پایین‌تری نسبت به دو سطح تیماری دیگر داشتند (جدول ۷). در مقابل، تیمارهای کاربرد دوسوم بقایای گیاهی (۱۵/۳ و ۱۶/۶۳ درصد به ترتیب نیتروژن و پروتئین دانه) و ۱۰۰ درصد بقایای گیاهی (۳/۱۹ و ۱۶/۸۶ درصد به ترتیب نیتروژن و پروتئین دانه) اختلاف آماری معنی‌داری با یکدیگر نداشتند، ولی دارای میانگین بالاتری نسبت به دو سطح تیماری بودند (جدول ۶). نتایج مطالعات مختلف نشان داده است که میزان پروتئین دانه گندم تحت تأثیر مدیریت‌های زراعی نظیر میزان، زمان و چگونگی مصرف نیتروژن، نوع ژنوتیپ و شرایط محیطی در مراحل قبل و پس از گرده‌افشانی قرار دارد (Sohrabi et al., 2014). در این پژوهش، به نظر می‌رسد که در تیمارهای کاربرد دو سوم و ۱۰۰ درصد بقایای گیاهی، به واسطه افزایش حجم بقایای گیاهی گندم و همچنین به دلیل استفاده از کود اوره، تجزیه بقایای گیاهی به خوبی صورت گرفته است و جذب نیتروژن تحت این مدیریت به صورت ذخیره‌سازی و افزایش درصد پروتئین دانه به کار گرفته شده است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تلفیق مدیریت بقایای گیاهی با انتخاب روش کشت مناسب، راهکاری مؤثر برای بهبود کارایی فیزیولوژیک و افزایش عملکرد و کیفیت دانه گندم است، به گونه‌ای که روش‌های کشت جوی‌پشته‌ای و کف‌کار در ترکیب با سطوح بالاتر بقایای گیاهی (دو سوم و ۱۰۰ درصد)، با ایجاد شرایط مطلوب رطوبتی و تغذیه‌ای موجب افزایش شاخص سطح برگ، بهبود انتقال مجدد ماده خشک و ارتقای سهم فتوسنتز جاری در پرشدگی دانه شدند.

خطی‌کار مشاهده شد (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر اصلی مقادیر مختلف بقایای گیاهی نشان داد که در بین سطوح مختلف، تیمارهای بدون کاربرد بقایای گیاهی (۷۷/۹ درصد)، یک سوم و دو سوم بقایای گیاهی (به ترتیب ۷۹/۵ و ۷۸/۴ درصد) اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند و نسبت به تیمار کاربرد ۱۰۰ درصد بقایای گیاهی (۸۴/۷ درصد) به طور معنی‌داری میانگین پایین‌تری داشت (جدول ۵). دلیل افزایش سهم فتوسنتز جاری در این پژوهش را می‌توان به تولید زیست‌توده بیشتر و در نتیجه فتوسنتز جاری بیشتر نسبت داد. در واقع، همان‌طور که قبل‌تر نیز ذکر شد، مخلوط کردن بقایای گیاهی گندم منجر به افزایش مواد آلی خاک، عناصر غذایی خاک (فسفر، پتاسیم و روی)، بهبود فضای توسعه ریشه گیاهان بعدی و حاصلخیزی خاک می‌شود (Pandey et al., 2020) که این موارد سبب بهبود وضعیت فتوسنتزی گیاه و افزایش توان فتوسنتز جاری گیاه خواهد شد که این عوامل بر میزان عملکرد گیاه تأثیرگذار هستند. همچنین گزارش شده است که روش کشت می‌تواند سبب بهبود توزیع نور و در نتیجه کاهش رقابت بین گیاهان شود که این عوامل می‌تواند فتوسنتز جاری و در نتیجه سهم فتوسنتز جاری را در عملکرد نهایی افزایش دهد (Rady et al., 2021).

سرعت تشکیل عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس صفات آزمایشی نشان داد که سرعت تشکیل عملکرد دانه تحت تأثیر روش کشت قرار گرفت (جدول ۴). مقایسه میانگین سرعت تشکیل عملکرد زیستی تحت تأثیر روش کشت نشان داد که میانگین این صفت در شرایط کشت جوی‌پشته‌ای (۰/۴۲ گرم در روز) با کشت کف‌کار (۰/۴۵ گرم در روز) اختلاف آماری معنی‌داری نداشته و به طور معنی‌داری میانگین بالاتری نسبت به تیمار کشت خطی‌کار (۰/۳۶ گرم در روز) نشان داد (جدول ۵). هم‌راستا با این نتایج گزارش شده است که با کاشت بذر در داخل جویچه آبیاری، به دلیل فراهم بودن رطوبت بیشتر در داخل جویچه، کاهش تبخیر از سطح خاک و شست‌وشوی بیشتر نمک خاک از کف جویچه، شرایط مناسبی برای جوانه‌زنی بذر، رشد گیاه و در نتیجه افزایش عملکرد محصول فراهم می‌شود. بنابراین افزایش سرعت تشکیل عملکرد دانه در شرایط کشت جوی‌پشته‌ای و کف‌کار را می‌توان به دلیل شرایط بهتر رشدی گیاه تحت این روش‌های کشت نسبت داد (Li et al., 2010).

جدول ۶- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) درصد نیتروژن و پروتئین دانه گندم تحت تأثیر روش کشت و بقایای گیاهی
Table 6- Analysis of variance (mean of squares) for seed nitrogen and protein percentage of wheat under cultivation method and plant residues

	درجه آزادی df	نیتروژن دانه Seed nitrogen	پروتئین دانه Seed protein
بلوک Block	2	0.046	1.30
روش کشت Cultivation method	2	0.011 ^{ns}	0.32 ^{ns}
خطای اصلی Main error	4	0.030	0.84
بقایای گیاهی Plant residues	3	0.246 ^{**}	6.93 ^{**}
روش کشت × بقایای گیاهی Cultivation method × Plant residues	6	0.009 ^{ns}	0.27 ^{ns}
خطای فرعی Sub error	18	0.018	0.51
ضریب تغییرات CV (%)	-	4.48	4.45

ns، * و **: به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.
ns, * and **: are non-significant, significant at 5 and 1% probability levels, respectively.

جدول ۷- مقایسه میانگین درصد نیتروژن و پروتئین دانه گندم تحت تأثیر روش کشت و بقایای گیاهی
Table 7- Average comparison of seed nitrogen and protein percentage under cultivation method and plant residues

	درصد نیتروژن دانه Seed nitrogen (%)	درصد پروتئین دانه Seed protein (%)
روش کشت Cultivation method		
جوی وپشته Ridge planting	3.06	16.18
خطی کار Surface drilling	3.01	15.91
کف کار Floor method	3.01	15.88
LSD (0.05)	0.08	0.79
سطوح بقایا Residues		
بدون بقایا No plant residues	2.89	15.27
یک سوم بقایای گیاهی One-third of residues	2.88	15.2
دو سوم بقایای گیاهی Two-thirds of residues	3.15	16.63
۱۰۰ درصد بقایا One hundred percent of residues	3.19	16.86
LSD (0.05)	0.22	1.2

اگر میزان اختلاف عددی دو تیمار از عدد LSD بیشتر باشد نشان دهنده تفاوت معنی دار آماری بین آن دو تیمار می باشد.
If the numerical difference between two treatments is greater than the LSD number, it indicates a statistically significant difference between the two treatments.

گیاهی به خاک، به عنوان یک راهکار مدیریتی پایدار و کارآمد برای دستیابی به عملکرد مطلوب و کیفیت بالاتر دانه گندم در مناطق مشابه اقلیمی توصیه می شود.

همچنین کاربرد مقادیر بیشتر بقایا ضمن افزایش معنی دار درصد نیتروژن و پروتئین دانه، با تقویت فعالیت های میکروبی و حاصلخیزی خاک، پایداری سیستم تولید را در شرایط اقلیمی گرم و خشک منطقه مورد مطالعه ارتقاء داد. بنابراین، به کارگیری الگوی کشت جوی وپشته ای یا کف کار همراه با بازگرداندن حداقل دو سوم بقایای

کشاورزی دشت آزادگان و سایر عزیزانی که در انجام این تحقیق

مساعدت و همکاری شایانی داشته‌اند، ابراز می‌داریم.

بدین وسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را از معاونت پژوهشی

دانشگاه شهید چمران اهواز و حمایت‌های مرکز تحقیقات جهاد

References

1. Agricultural Ministry Statistics (Volume 2). (2022). Ministry of Agricultural Jihad.
2. Arduini, I., Masoni, A., Ercoli, L., & Mariotti, M. (2006). Grain yield, and dry matter and nitrogen accumulation and remobilization in durum wheat as affected by variety and seeding rate. *European Journal of Agronomy*, 25(4), 309-318. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.06.009>
3. Bremner, J. M., & Mulvaney, C. S. (1982). Nitrogen-total. In A. L. Page, R. H. Miller, & D. R. Keeney (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. pp. 595-624. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.
4. Brunel, N., Seguel, O., & Acevedo, E. (2013). Conservation tillage and water availability for wheat in the dryland of central Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13(3), 622-637. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162013005000049>.
5. Chen, P., Du, Q., Liu, X., Zhou, L. I., Hussain, S., Lei, L. U., & Yong, T. (2017). Effects of reduced nitrogen inputs on crop yield and nitrogen use efficiency in a long-term maize-soybean relay strip intercropping system. *PloS One*, 12(9), 565-581. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184503>.
6. Dawani, D., Nabipour, M., & Roushanfekr, H. (2016). Investigating the effect of cytokinin and auxin hormones and planting pattern on yield and yield components of grain corn under saline conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 14(1), 171-184. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22055/ppd.2016.12433>
7. Devi, S., Hooda, V. S., Singh, J., & Kumar, A. (2017). Effect of planting techniques and weed control treatments on growth and yield of wheat. *Journal of Applied and Natural Science*, 9(3), 1534-1539. <https://doi.org/10.31018/jans.v9i3.1381>
8. Ghazinejad, M. Monjezi, N., Rahnema Ghahfarokhi, A. & Sheikhdavoodi, M. J. (2022). Effect of tillage method and wheat residues on physical productivity of water and corn yield in Dezful city. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 32(1), 17-33. <https://doi.org/10.22034/saps.2021.24794>
9. Heidari, A. (2020). The effect of crop residue management and tillage on soil resistance and potato yield. *Journal of Applied Potato Sciences*, 3(2), 9-20.
10. Hokmalipour, S., & Sharifi, R. S. (2016). Effect of seed inoculation with plant growth promoting rhizobacteria on dry matter remobilization of spring barley at different levels of nitrogen and phosphorus fertilizers. *Journal of Soil Research*, 29(4), 126-407. <https://doi.org/10.22092/ijsr.2015.105901>
11. Khan, M. B., Yousaf, F., Hussain, M., Haq, M. W., Lee, D. J., & Farooq, M. (2012). Influence of planting methods on root development, crop productivity and water use efficiency in maize hybrids. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 72(4), 556-563. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392012000400015>
12. Latifi, Z., & Shabanali Fami, H. (2022). Forecasting wheat production in Iran using time series technique and artificial neural network. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 24(2), 261-273. <https://doi.org/10.52547/jast.24.2>.
13. Li, Q. Q., Zhou, X. B., Chen, Y. H., & Yu, S. L. (2010). Grain yield and quality of winter wheat in different planting patterns under deficit irrigation regimes. *Plant, Soil and Environment*, 10(1), 482-487. <https://doi.org/10.17221/242/2009-PSE>
14. Mirzaee, M., Mahmoodabadi, M., & Naghavi, H. (2016). Effects of different management practices of barley straw and alfalfa residue on soil moisture content and aeration behavior under field conditions. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(1), 155-170. <https://doi.org/20.1001.1.23222097.1395.23.1.12.4>
15. Moosawi, S. G. H., Asoodar, M. A., & Poormohammadi, P. (2013). Investigating the effects of different tillage methods, planting patterns, and crop residue management on rapeseed (Canola) yield and yield components, The 8th National Congress of Agricultural Machinery Engineering (Biosystem) and Mechanization of Iran,

- Mashhad, Iran. (In Persian)
16. Naseri, R., Mirzaei, A., & Abbasi, A. (2021). Study on remobilization of photosynthetic materials in different barley cultivars influenced by applications of different sources of fertilizer under dryland farming, *Journal of Crops Improvement*, 23(4), 777-794. <https://doi.org/10.22059/jci.2021.320131.2459>
17. Pandey, M., Shrestha, J., Subedi, S., & Shah, K. K. (2020). Role of nutrients in wheat: A review. *Tropical Agrobiodiversity*, 1(1), 18-23. <https://doi.org/10.26480/trab.01.2020.18.23>
18. Rady, M. O., Semida, W. M., Howladar, S. M. & Abd El-Mageed, T. A. (2021). Raised beds modulate physiological responses, yield and water use efficiency of wheat (*Triticum aestivum* L) under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 245(1), 106-121. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106629> .
19. Reshadsedghi, A., & Nikanfar, R. (2021). Increasing water use efficiency in mechanized wheat cultivation using in-furrow seed drill in saline soils conditions. *Journal of Water and Sustainable Development*, 8(1), 89-96. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v8i1.2123>
20. Safari, A., Asoudarghasemi, M., Ghaseminejad, M., & Ebdali Mashadi, A. (2013). Effects of residue management, different conservation tillage and seeding on soil physical properties and wheat grain yield. *Journal of Sustainable Agriculture and Production Science*, 23(2), 49-59.
21. Skaalsveen, K., Ingram, J., & Clarke, L. E. (2019). The effect of no-till farming on the soil functions of water purification and retention in north-western Europe: A literature review. *Soil and Tillage Research*, 189(1), 98-109. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.004>
22. Sohrabi, S. S., Fateh, E., Ayneband, A., & Rahnama, A. (2014). Evaluation the effect of the residue management and different nitrogen sources on wheat yield and components. *Journal of Agroecology*, 6(3), 645-655. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1001.1.20087366.1393.6.3.9.6>
23. Soleimaniabyat, M., Moraditelawat, M. R., Siadat, S. A., & Koochekzadeh, A. (2014). Studying the effect of cropping pattern and plant density on barley yield and yield components. First Electronic Conference on New Findings in Environment and Agricultural Ecosystems, Tehran, Iran. (In Persian)
24. Wang, F. Y., Han, H. Y., Lin, H., Chen, B., Kong, X. H., Ning, X. Z., Wang, X. W., Yu, Y., & Liu, J. D. (2019). Effects of planting patterns on yield, quality, and defoliation in machine-harvested cotton. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(9), 2019-2028. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62615-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62615-0)
25. Wang, Y., Li, S., Cui, Y., Qin, S., Guo, H., Yang, D., & Wang, C. (2021). Effect of drip irrigation on soil water balance and water use efficiency of maize in northwest China. *Water*, 13(2), 217. <https://doi.org/10.3390/w13020217>
26. Xu, Z. Z., Yu, Z. W., Wang, D., & Zhang, Y. L. (2005). Nitrogen accumulation and translocation for winter wheat under different irrigation regimes. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 191(6), 439-449. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2005.00178.x>.
27. Yousefi, A. Z., Pouryousef, M., & Mardani, R. (2016). Evaluation of wheat yield and weed biomass under planting patterns and irrigation regimes. *Agricultural Science and Sustainable Production*, 26(2), 17-30. <https://sid.ir/paper/180609/en> (In Persian with English abstract).
28. Zhao, B., Zhang, J., Yu, Y., Karlen, D. L., & Hao, X. (2016). Crop residue management and fertilization effects on soil organic matter and associated biological properties. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(1), 17581-17591. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6818-7>



Effect of Combining Organic-Chemical Fertilizers and Biofertilizers on Yield, Essential Oil Quality, and Efficiency of some Elements Absorption in Fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.)

Maedeh Ataeinejad¹, Mohammadreza Moradi-Telavat^{1*}, Seyed Ataollah Siadat¹, Ali Moshattati¹ and Ali Ghatel¹

1- Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Khuzestan, Iran

(*- Corresponding author's Email: moraditelavat@asnrkh.ac.ir)

Received: 27-12-2025
Revised: 29-04-2026
Accepted: 09-05-2026
Available Online: 04-04-2026

How to cite this article:

Ataeinejad, A., Moradi-Telavat, M., Siadat, S. A., Moshattati, A., & Ghatel, A. (2026). Effect of combining organic-chemical fertilizers and biofertilizers on yield, essential oil quality, and efficiency of some elements absorption in fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.). *Journal of Agroecology*, 18(1), 119-138. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.97091.1266>

Introduction

Given the diversity of climate and vegetation in Iran, it has provided a great potential for entering the market of medicinal plants and herbal medicines (AmirTeimori et al., 2011). Fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) is one of the oldest medicinal and spice plants in Iran and worldwide, and is widely used in the food, pharmaceutical, cosmetic, and health industries today (Omid Beigi, 2013). Managing fertilizer use, including chemical fertilizers, affects the performance of medicinal plants. Proper nutrition and absorption of essential elements, and improving their concentration in the seed, play a significant role in increasing the quantitative and qualitative performance of the medicinal plant fennel (Kapoor et al., 2004). The present study was designed and implemented with the aim of evaluating the effect of different chemical, organic, and biological nutritional systems on the yield and nutrient absorption of fennel.

Materials and Methods

The experiment was conducted in a split-plot randomized complete block design with three replications during the 2023-2024 crop year at the research farm of Khuzestan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Khuzestan, Iran. In the main plots, the levels of Urea nitrogen fertilizer and sugarcane residue compost were: A₁: control, A₂: 150 kg.ha⁻¹ nitrogen; A₃: 112.5 kg.ha⁻¹ nitrogen + 8 t.ha⁻¹ sugarcane compost, A₄: 75 kg.ha⁻¹ nitrogen + 16 t.ha⁻¹ sugarcane compost, A₅: 37.5 kg.ha⁻¹ nitrogen + 24 t.ha⁻¹ sugarcane compost, and A₆: 32 tons/ha sugarcane compost. In the subplots, the seed inoculation treatment with Biofarm biofertilizer was investigated, with B₀ as the control and B₁ as the treatment. The studied traits included grain yield, biological yield, essential oil percentage and yield, nitrogen percentage and absorption, nitrogen efficiency indices, phosphorus, potassium, iron, and zinc percentage.



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

 <https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.97091.1266>

Results and Discussion

The highest seed yield was obtained in the A₄B₀ and A₂B₁ treatment levels (998 and 938 kg.ha⁻¹). The highest percentage of essential oil was obtained in the A₂ treatment level (2.26%), and the highest yield of fennel essential oil was obtained in the A₂B₁ treatment level (13.22 kg.ha⁻¹). The highest percentage and absorption of nitrogen were obtained in the A₂ treatment level (2.35%) and (68.01 kg.ha⁻¹), respectively. The highest agronomic efficiency of nitrogen was obtained in the A₄B₀ treatment level (6.85 kg.kg⁻¹). The highest phosphorus and potassium content of the whole plant was obtained in the A₅ treatment level (50.8 and 193.75 mg.kg⁻¹), respectively, and the highest iron and zinc concentration of the whole plant was obtained in the A₆ treatment level (3.01 and 0.56 mg.kg⁻¹) of dry matter.

Conclusion

In the present experiment, the highest grain yield was obtained with the application of 75 kg.ha⁻¹ of nitrogen and 16 tons.ha⁻¹ of sugarcane compost, which showed no significant difference from the application of 150 kg.ha⁻¹ of nitrogen. Also, the highest biological and essential oil yields were obtained with the application of 150 kg.ha⁻¹ of nitrogen and biofertilizer. In fact, the application of chemical nitrogen fertilizer in combination with organic fertilizer (sugarcane compost) and the application of biofertilizer increased grain yield and essential oil, and increased the absorption of low- and high-consumption elements required by the fennel plant. It also had similar effects on yield to the application of chemical fertilizers, which can replace combined fertilizers.

Keywords: Biological fertilizer, Medicinal plant, Nitrogen, Sugarcane compost

مقاله پژوهشی

جلد ۱۸، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص ۱۱۹-۱۳۸

اثر تلفیق کودهای آلی-شیمیایی و کود زیستی بر عملکرد، کیفیت اسانس و کارایی جذب برخی عناصر در رازیانه (*Foeniculum vulgare* Mill.)

مأنده عطایی نژاد^۱، محمدرضا مرادی تلاوت^{۱*}، سید عطاءاله سیادت^۱، علی مشتقی^۱ و علی قاطعی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۹

چکیده

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تأثیر سیستم‌های مختلف تغذیه‌ای شیمیایی، آلی و زیستی بر عملکرد و جذب عناصر غذایی تو سط گیاه رازیانه (*Foeniculum vulgare* Mill.) به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان اجرا شد. در کرت‌های اصلی سطوح تلفیق کود نیتروژن و کمپوست بقایای نیشکر شامل A₁: شاهد، A₂: ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن (اوره)، A₃: ۱۱۲/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن + ۸ تن در هکتار کمپوست نیشکر، A₄: ۷۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن + ۱۶ تن در هکتار کمپوست نیشکر، A₅: ۳۷/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن + ۲۴ تن در هکتار کمپوست نیشکر و A₆: ۳۲ تن در هکتار کمپوست نیشکر، در کرت‌های فرعی نیز تیمار تلفیق بذر با کود زیستی بیوفارم شامل B₀: شاهد و B₁: تیمار بررسی شد. صفات مورد مطالعه شامل عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، درصد و عملکرد اسانس، درصد و جذب نیتروژن، شاخص‌های کارایی نیتروژن، درصد فسفر، پتاسیم، آهن و روی بود. بیش‌ترین عملکرد دانه در سطح تیمار A₄B₀ و A₂B₁ (به‌مقدار ۹۹۸ و ۹۳۸ کیلوگرم در هکتار) حاصل شد. بیش‌ترین درصد اسانس در سطح تیمار A₂ (به‌میزان ۲/۲۶ درصد) و بیش‌ترین عملکرد اسانس رازیانه نیز مربوط به سطح تیمار A₂B₁ (به‌میزان ۱۳/۲۲ کیلوگرم در هکتار) بود. بیش‌ترین درصد و جذب نیتروژن در سطح تیمار A₂ (به‌ترتیب ۲/۳۵ درصد و ۶۸/۰۱ کیلوگرم در هکتار) بود. بالاترین مقدار کارایی زراعی نیتروژن مربوط به سطح تیمار A₄B₀ (به‌میزان ۶/۸۵ کیلوگرم بر کیلوگرم) بود. بیش‌ترین مقدار جذب فسفر و پتاسیم کل بوته در سطح تیمار A₅ (به‌ترتیب به‌مقدار ۵۰/۸ و ۱۹۳/۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و بیش‌ترین غلظت آهن و روی کل بوته در سطح تیمار A₆ (به‌ترتیب به‌مقدار ۳/۰۱ و ۰/۵۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) ماده خشک بود. در آزمایش حاضر، بیش‌ترین عملکرد دانه با کاربرد ۷۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و ۱۶ تن در هکتار کمپوست نیشکر حاصل شد که اختلاف معنی‌داری با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن نداشت، همچنین بیش‌ترین عملکرد بیولوژیک و اسانس با مصرف ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و با کاربرد کود زیستی به دست آمد. در واقع، اعمال کود شیمیایی نیتروژن در تلفیق با کود آلی کمپوست نیشکر و نیز کاربرد کود زیستی سبب افزایش عملکرد دانه و اسانس و افزایش جذب عناصر کم‌مصرف و پرمصرف مورد نیاز گیاه رازیانه شد. همچنین اثرات مشابهی در افزایش عملکرد نسبت به کاربرد کودهای شیمیایی داشت که از این طریق می‌توان کودهای تلفیقی را با کودهای شیمیایی جایگزین کرد.

واژه‌های کلیدی: کمپوست نیشکر، کود بیولوژیک، گیاه دارویی، نیتروژن

مقدمه

نقش مهمی دارند. گیاهان دارویی از دیرباز برای درمان بیماری‌های مختلف استفاده می‌شدند (Lopes-Lutz et al., 2008). روی آوردن دنیا، به‌خصوص کشورهای پیشرفته به استفاده از داروهایی با منشأ طبیعی، موجب توسعه روزافزون تولید گیاهان دارویی، فرآوری، مصرف

کاشت گیاهان دارویی از گذشته تاکنون جایگاه ویژه‌ای در نظام‌های زراعی ایران دارد و این نظام‌ها از نظر ایجاد تنوع و پایداری

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران
(*)- نویسنده مسئول: (Email: moraditelavat@asnrukh.ac.ir)

و تجارت آن در سطح دنیا شده است (Kashfi Bonab, 2010). این امر با توجه به تنوع اقلیمی و پوشش گیاهی ایران، توان بسیار خوبی را برای وارد شدن به بازار تجارت گیاهان دارویی و داروهای گیاهی فراهم کرده است (AmirTeimori et al., 2011). رازیانه با نام علمی *Foeniculum vulgare* Mill. از قدیمی‌ترین گیاهان دارویی و ادویه‌ای ایران و جهان است که امروزه از آن در صنایع غذایی، دارویی، آرایشی و بهداشتی استفاده فراوانی می‌شود. رازیانه، گیاهی مدیترانه‌ای است و کشت این گیاه در مناطق با آب‌وهوای گرم موفقیت آمیز است. دمای حداقل برای جوانه‌زنی بذر این گیاه شش تا هشت درجه سلسیوس است، ولی درجه حرارت مطلوب برای جوانه‌زنی ۱۵ تا ۱۶ درجه سلسیوس می‌باشد (Omid Beigi, 2013).

کشاورزی پایدار شامل مدیریت موفق منابع طبیعی و حفظ آن‌ها است (Zortea et al., 2018). کشاورزی ارگانیک به عنوان یک اولویت مهم در سطح جهان، ناشی از افزایش تقاضا برای مواد غذایی سالم، ضرورت پایداری بلندمدت تأمین غذا و نگرانی از آلودگی محیط زیست ناشی از مصرف بی‌رویه مواد شیمیایی است. به نظر می‌رسد تغذیه اکولوژیک گیاهان دارویی از طریق کاربرد کودهای آلی و بیولوژیک، بیشترین تطابق را با اهداف تولید این گیاهان داشته و منجر به بهبود عملکرد کمی و کیفی آن‌ها گردد. (Ratti et al., 2001). حاصلخیزی خاک یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده رشد و عملکرد گیاهان دارویی به حساب می‌آید (Chatterjee, 2002). در واقع، با توجه به آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از استفاده از کودهای شیمیایی، استفاده از کودهای آلی و زیستی می‌تواند برای حفظ حاصلخیزی اراضی مورد استفاده قرار گیرد.

مدیریت مصرف کودها از جمله کودهای شیمیایی بر عملکرد گیاهان دارویی تأثیر دارد. تغذیه و جذب مناسب عناصر پرمصرف و بهبود غلظت آن‌ها در دانه، نقش بسزایی در افزایش عملکرد کمی و کیفی گیاه دارویی رازیانه دارد (Kapoor et al., 2004). عناصر غذایی نه تنها بر بهبود کمیت محصول از جمله گیاهان دارویی مؤثر هستند، بلکه کیفیت محصول را نیز تحت تأثیر قکرار می‌دهند. عنصر نیتروژن بر رشد، عملکرد و کیفیت گیاهان زراعی اثر زیادی دارد (Shafeei et al., 2023). کود نیتروژن باعث افزایش تعداد دانه در بوته گیاهان خانواده چتریان شده و در افزایش عملکرد دانه مؤثر است (Akbarinia et al., 2004). در آزمایش صفایی و همکاران (Shafeei et al., 2023)، کاربرد نیتروژن خالص تا ۱۲۰ کیلوگرم

سبب افزایش عملکرد دانه رازیانه شد، همچنین گزارش شد که کاربرد مقادیر بالای کود نیتروژن سبب کاهش درصد و عملکرد اسانس رازیانه شد. در آزمایش تبریزی (Tabrizi, 2005) روی گیاه اسفزه (*Plantago ovata* L.) و آزمایش میرشکاری و فرحوش (Mirshekari & Faravash, 2009) روی گیاه رازیانه، با افزایش کاربرد کود نیتروژن، عملکرد دانه این گیاهان افزایش یافت. کیانی و همکاران (Kiani et al., 2014) دریافتند که کاربرد مقادیر بالای کود نیتروژن سبب افزایش میزان اسانس گیاه رازیانه شد.

یکی از مهم‌ترین راهکارهای استفاده از ضایعات نیشکر در کشور، تولید بیوکمپوست می‌باشد که به عنوان کودآلی و جایگزین کودهای شیمیایی در گلخانه‌ها و مزارع استفاده می‌شود (Ismayana et al., 2013). کمپوست نیشکر (*Saccharum officinarum* L.) یک ماده آلی پیت‌مانند است که سبب نرمی بافت خاک و افزایش تهویه و ظرفیت نگهداری آب می‌شود (Ali khani & Savagebi, 2014). کمپوست بقایای نیشکر تأثیر بسزایی در تأمین موادآلی، اثر بر غلظت عناصر ریزمغذی، افزایش ظرفیت تبادلات کاتیونی و اصلاح حاصلخیزی خاک دارد (Herwijnen et al., 2007; Alburquerque et al., 2007). عناصر ریزمغذی در گیاهان به مقدار کم استفاده می‌شوند، ولی اثرات مهمی بر جای می‌گذارند. این عناصر در صورت کمبود گاهی به عنوان محدودکننده جذب سایر عناصر غذایی و رشد می‌توانند عمل کنند (Malakouti & Tehrani, 1999). مکوندی و همکاران (Makvandi et al., 2025) گزارش کردند که کمپوست بقایای نیشکر سبب افزایش ماده آلی خاک شد. براساس آزمایش موقتیان و همکاران (Movaghatian et al., 2014)، کاربرد کمپوست بقایای نیشکر به همراه N₁₂₀-P₁₂₀-K₉₆ کود شیمیایی سبب افزایش عملکرد دانه رازیانه شد، به طوری که بیش‌ترین میزان عملکرد دانه رازیانه ۱۹۲/۲ کیلوگرم در هکتار به دست آمد، همچنین گزارش شد که استفاده از کودهای شیمیایی شامل ۱۲۰ کیلوگرم نیتروژن، ۱۲۰ کیلوگرم فسفر و ۹۶ کیلوگرم پتاسیم در هکتار در تلفیق با ۲۰ تن کمپوست ضایعات نیشکر در هکتار سبب افزایش مقدار نیتروژن و فسفر موجود در کمپوست و سبب افزایش رشد گیاه رازیانه شد. در سایر مطالعات انجام شده، نقش مثبت کودهای آلی در افزایش عملکرد اسانس و فعالیت آنتی‌اکسیدانی رازیانه به اثبات رسیده است (Shahat et al., 2011).

با توجه به اثرات تخریبی کودهای شیمیایی نیتروژنه بر خاک‌های

زراعی، نیاز به اصلاح مصرف آن‌ها ضروری است. استفاده از کودهای زیستی از جمله باکتری‌ها و قارچ‌ها به عنوان راه حل بسیار مناسب می‌تواند در کاهش مصرف کودهای نیتروژنه مؤثر باشد (Vali Beigi & Adavi, 2017). نتایج آزمایش ولی‌بیگی و عدوی (Vali Beigi & Adavi, 2017) حاکی از آن بود که کاربرد کود زیستی /زئوباکتر و /زوسپیریلوم به همراه کود شیمیایی نیتروژنه می‌تواند راهکاری در جهت کاهش مصرف کود شیمیایی نیتروژنه باشد، ضمن آنکه از تخریب و آلودگی‌های زیستی ناشی از مصرف بالای این نهاده شیمیایی نیز جلوگیری می‌شود. در آزمایش شباهنگ و همکاران (Shabahang et al., 2013)، به منظور بررسی اثر هم‌زیستی میکوریزایی و سطوح کود نیتروژن بر اجزای عملکرد، عملکرد دانه و اسانس دو گونه دارویی رازیانه گزارش شد که تلقیح بذر رازیانه با میکوریزا به دلیل توسعه سیستم ریشه‌ای و فراهمی عناصر غذایی به ویژه فسفر باعث بهبود عملکرد کمی و کیفی هر دو گونه دارویی رازیانه در مقایسه با شاهد شد. همچنین مصرف نیتروژن نیز با افزایش رشد رویشی منجر به بهبود فتوسنتز و عملکرد کمی شد، ولی کاهش درصد اسانس را به دنبال داشت. در پژوهشی روی رازیانه، کاربرد کود زیستی سبب افزایش میزان کربوهیدرات، عملکرد اسانس و میزان آنتول اسانس شد (Mahfouz & Sharaf-Eldin, 2007).

به‌طور کلی، آزمایش حاضر در راستای اهداف کشاورزی پایدار و ارگانیک، با هدف تأثیر انواع سیستم‌های مختلف تغذیه‌ای بر عملکرد دانه و اسانس و جذب عناصر پرمصرف و کم‌مصرف توسط گیاه رازیانه و نیز کاهش مصرف کودهای شیمیایی به واسطه استفاده از کودهای آلی و بیولوژیک طراحی و اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان به صورت کرت‌های

خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. در کرت‌های اصلی، سطوح تلفیق کود نیتروژن (از منبع اوره) و کمپوست بقایای نیشکر شامل A₁: شاهد، A₂: ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص، A₃: ۱۱۲/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص + ۸ تن در هکتار کمپوست نیشکر، A₄: ۷۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص + ۱۶ تن در هکتار کمپوست نیشکر، A₅: ۳۷/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص + ۲۴ تن در هکتار کمپوست نیشکر و A₆: ۳۲ تن در هکتار کمپوست نیشکر بررسی شد. تعیین سطوح تیمارها با توجه به مطالعات قبلی که در منطقه انجام شده بود از جمله بهترین سطح مصرف کود شیمیایی نیتروژن در منطقه (Kiani et al., 2015; Moradi Telavat et al., 2019) و همچنین مدیریت مصرف کودهای آلی با توجه به میزان ذخایر نیتروژن در این کودها و پیش‌بینی روند آزادسازی ۲۰ تا ۴۰ درصد نیتروژن بسته به دما و رطوبت منطقه در طول فصل رشد صورت گرفت (Siadat & Moradi Telavat, 2018). خصوصیات خاک مورد آزمایش در جدول ۱ و خصوصیات کود کمپوست بقایای نیشکر در جدول ۲ ارائه شده است.

در کرت‌های فرعی نیز تیمار تلقیح بذر با کود زیستی بیوفارم شامل B₀: شاهد (عدم تلقیح بذر با بیوفارم) و B₁: تیمار (تلقیح بذر با بیوفارم) بررسی شد. کود زیستی مورد استفاده در این آزمایش (با نام تجاری بیوفارم)، شامل باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن (زئوباکتر و /زوسپیریلوم) و باکتری تثبیت‌کننده فسفات (سودوموناس) بود که از شرکت فناوری زیستی مهرآسیا تهیه گردید. تعداد سلول زنده در هر گرم مایه تلقیح ۱۰^۸ عدد باکتری بود. با توجه به راهنمای استفاده از محصول، مقدار یک تا دو لیتر کود زیستی بیوفارم در هر هکتار مد نظر قرار داده شد. در تیمارهای کاربرد باکتری‌های محرک رشد، بذور در شرایط بدون نور و در زمان قبل از کاشت با مایه تلقیح باکتری به‌روش بذر مال آغشته شد و سپس بذرها در سایه خشک شده و بلافاصله کشت انجام گردید.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در عمق ۰-۳۰ سانتی متر

Table 1- Physical and chemical properties of the soil at a depth of 0-30 cm

بافت (%) (لوم سیلتی) Texture (%) (Silty loam)			پتاسیم K (mg.kg ⁻¹)	فسفر P (mg.kg ⁻¹)	نیتروژن N (%)	کربن آلی Organic C (%)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	عمق نمونه برداری Depth
Clay	Silt	Sand							
23	50	27	119	7.2	0.0217	0.51	7.9	5.08	0-30 cm

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و شیمیایی کمپوست بقایای نیشکر

Table 2- Physicochemical characteristics of sugarcane residue compost

پتاسیم	فسفر	نیتروژن	ماده آلی	اسیدیته	هدایت الکتریکی
K (mg.kg ⁻¹)	P (mg.kg ⁻¹)	N (%)	Organic matter (%)	pH	EC (dS.m ⁻¹)
2000	72	1	35.80	7.5	3.5

اسانس، مقدار ۵۰ گرم از دانه خشک رازیانه، به همراه یک لیتر آب مقطر، در دستگاه کلونجر قرار گرفت و به روش تقطیر با آب به مدت چهار ساعت فرآیند اسانس‌گیری انجام شد (Sefidkon, 2001). عملکرد اسانس نیز از حاصل ضرب مقدار اسانس در عملکرد دانه به دست آمد. جهت اندازه‌گیری درصد نیتروژن کل بوته‌ها از روش (Bremner, 1996) هضم با اسیدسولفوریک و بعد تیتراسیون با دستگاه کج‌لدال استفاده شد و برای محاسبه شاخص‌های کارایی نیتروژن از معادله‌های زیر استفاده شد (Lopez- Bellido & Lopez- Bellido, 2001; Fageria, 2009).

معادله (۱) = کارایی زراعی مصرف نیتروژن (کیلوگرم بر کیلوگرم)

عملکرد کرت بدون مصرف نیتروژن - عملکرد کرت با مصرف نیتروژن

مقدار مصرف نیتروژن

معادله (۲) = جذب نیتروژن در واحد سطح مزرعه (کیلوگرم در هکتار)

عملکرد ماده خشک × درصد نیتروژن کل بوته

100

معادله (۳) = بازیافت ظاهری نیتروژن (درصد)

جذب نیتروژن در واحد سطح بدون مصرف نیتروژن - جذب نیتروژن در واحد سطح با مصرف نیتروژن

مقدار مصرف نیتروژن

×100

معادله (۴) = کارایی فیزیولوژیکی نیتروژن (کیلوگرم بر کیلوگرم)

عملکرد بیولوژیک بدون مصرف نیتروژن - عملکرد بیولوژیک با مصرف نیتروژن

جذب نیتروژن در واحد سطح بدون مصرف نیتروژن - جذب نیتروژن در واحد سطح با مصرف نیتروژن

جهت اندازه‌گیری فسفر کل بوته نیز از روش اولسن و سومر (Olsen & Sommer, 1982) و روش کالریتری (رنگ زرد مولیبدات وانات) به وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر استفاده شد (Murphy & Riley, 1962). اندازه‌گیری پتاسیم کل بوته نیز توسط دستگاه فیلم‌فوتومتر به روش روحانی‌پور (Rouhanipour, 2010) انجام گردید. اندازه‌گیری عناصر روی و آهن بوته نیز با استفاده از دستگاه جذب اتمی صورت گرفت (Waling et al., 1989). تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها شامل تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها، با استفاده از

کشت به صورت مسطح (کرتی) در عمق یک سانتی‌متری خاک، با تراکم ۱۳ بوته در مترمربع در تاریخ ۲۳ آبان سال ۱۴۰۲ انجام گردید. باتوجه به شرایط اقلیمی، مقدار بذر رازیانه برای هر هکتار ۸ تا ۱۰ کیلوگرم در نظر گرفته می‌شود (Lebaschy et al., 2010). آبیاری متناسب با نیاز گیاه، رطوبت خاک و شرایط آب‌وهوایی منطقه انجام گردید بر این اساس، با توجه به شرایط مطلوب آب‌وهوایی در سال اجرای آزمایش و وقوع بارندگی‌های مؤثر در ماه‌های پاییز و زمستان و اوایل بهار (فصل رشد گیاه در منطقه)، آبیاری چنددانی صورت نگرفت و فقط یک مرتبه آبیاری تکمیلی در فصل بهار (پس از تبخیر حدود ۱۰۰ میلی‌متر آب از تشتک تبخیر) به کار برده شد. وجین علف‌های هرز در چندین مرحله به صورت دستی انجام گردید. در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک در تاریخ ۱۵ خرداد ۱۴۰۳، برداشت به صورت دستی و کف‌بر با داس، از سطح زمین انجام شد. طول و عرض هر کرت فرعی سه متر و شامل شش ردیف کشت با فاصله ۴۰ سانتی‌متری از یکدیگر و به طول یک متر مدنظر قرار داده شد. فاصله دو بوته روی ردیف نیز ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. بین هر واحد آزمایشی یک فاصله یک متری و بین هر بلوک فاصله ۱/۵ متری بود. از شش ردیف کشت شده، برداشت از ردیف‌های سوم و چهارم جهت ارزیابی صفاتی نظیر عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، درصد و عملکرد اسانس، درصد و جذب نیتروژن، شاخص‌های کارایی نیتروژن، درصد فسفر، پتاسیم، آهن و روی انجام گردید.

جهت اندازه‌گیری صفات جذب عناصر توسط گیاه رازیانه، پنج بوته به صورت تصادفی از ردیف‌های سوم و چهارم انتخاب و اندازه‌گیری‌های مذکور انجام شد. بلافاصله پس از برداشت نمونه‌ها از ردیف‌های مربوط به عملکرد نهایی (خطوط سوم و چهارم پس از حذف نیم‌متر حاشیه خطوط کاشت از بالا و پایین) وزن خشک آن‌ها تحت عنوان عملکرد بیولوژیک تعیین گردید.

پس از جدا کردن دانه‌های موجود در هر چتر و خشک شدن آن‌ها در هوای آزاد، وزن آن‌ها جهت تعیین عملکرد اقتصادی (عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار) اندازه‌گیری شد. به منظور تعیین کمی

نرم افزار سیستم SAS نسخه ۹/۴ صورت گرفت. مقایسه میانگین داده‌ها نیز توسط آزمون Duncan در سطح احتمال پنج درصد انجام گردید.

نتایج و بحث

عملکرد دانه: اثر کود تلفیقی و اثر متقابل آن با کود زیستی بر عملکرد دانه به ترتیب در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی دار شد (جدول ۳). بیشترین میزان عملکرد دانه در سطوح تیمارهای ۷۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص + ۱۶ تن در هکتار کمپوست نیشکر بدون اعمال کود زیستی (A_4B_0)، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص تحت تأثیر کود زیستی (A_2B_1) و ۱۱۲/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص + ۸ تن در هکتار کمپوست نیشکر تحت تأثیر کود زیستی (A_3B_1) به ترتیب به میزان ۹۹۸، ۹۳۸ و ۹۱۱ کیلوگرم در هکتار بود. کمترین میزان عملکرد دانه نیز مربوط به سطح شاهد بدون اعمال کود زیستی به میزان ۴۰۳ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۴).

نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که در بذور تلقیح نشده، کاربرد کود نیتروژن تنها یا نیتروژن در تلفیق با کود آلی کمپوست نیشکر سبب افزایش معنی دار عملکرد دانه در مقایسه با شاهد شد، به طوری که عدم کاربرد کود کمترین عملکرد دانه و کاربرد ۷۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص + ۱۶ تن در هکتار کمپوست نیشکر بیشترین عملکرد دانه را به میزان ۲/۴۷ برابر نسبت به شاهد تولید کرد. در بذور تلقیح یافته با باکتری هم کاربرد نیتروژن تنها یا در ترکیب با کمپوست، عملکرد را نسبت به شاهد به طور معنی دار افزایش داد، به طوری که کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص سبب افزایش ۲/۳۳ برابر عملکرد و کاربرد ۱۱۲/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص + ۸ تن در هکتار کمپوست نیشکر بیشترین عملکرد دانه را به میزان ۲/۲۶ برابر نسبت به شاهد تولید کردند. این تیمارها ترکیبی از سطوح مناسب نیتروژن، کمپوست و یا اثر مثبت کود زیستی را داشته‌اند که منجر به تأمین بهتر نیازهای غذایی گیاه و بهبود شرایط رشد شده است. اعمال کود زیستی به تنهایی، عملکرد دانه بذور تلقیح شده را نسبت به بذور تلقیح نشده افزایش داد، اما با کاربرد مقادیر بالای کود کمپوست نیشکر (۲۴ و ۳۲ تن در هکتار) هم در حالت تلقیح و هم بدون تلقیح عملکرد دانه کاهش یافت. این موضوع احتمالاً ناشی از کاهش بیش از حد کود شیمیایی نیتروژن بوده است که نشان

می‌دهد، در تلفیق کودهای آلی و شیمیایی در آزمایش حاضر، لازم است که اتکای عملکرد محصول به کود شیمیایی و تأثیر فوری و قابل توجه این نوع کود مورد توجه قرار گیرد (Ayneband et al., 2020). کاربرد تلفیقی ۷۵ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن خالص + ۱۶ تن در هکتار کود آلی کمپوست نیشکر عملکرد مشابهی با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن خالص به هنگام تلقیح بذور در افزایش عملکرد دانه رازیانه داشت، در واقع احتمالاً کود کمپوست با بهبود کلی شرایط خاک و تغذیه گیاه، بهینه سازی جذب نیتروژن را فراهم کرده و موجب شده است که با مقدار کمتری نیتروژن خالص، عملکرد بالایی حاصل شود. نتایج موقتیان و همکاران (Movaghathian et al., 2014) نشان داد که کاربرد کودهای کمپوست بقایای نیشکر به همراه $N_{120}-P_{120}-K_{96}$ کود شیمیایی سبب افزایش عملکرد دانه رازیانه شد، به طوری که بیشترین میزان عملکرد دانه رازیانه ۱۹۲/۲ کیلوگرم در هکتار شد و از نظر تأثیر کاربرد کود زیستی بیوسولفور نیز عملکرد دانه رازیانه افزایش یافت. براساس گزارش ماکو ندی و همکاران (Makvandi et al., 2024)، مصرف تلفیقی کود نیتروژن و کمپوست بقایای کمپوست نیشکر و باکتری‌های محرک رشد گیاه باعث بهبود صفات کیفی و عملکرد دانه گندم (*Triticum aestivum* L.) شد. طبق نتایج آزمایش شیمیسی و همکاران (Shamisi et al., 2022)، کودهای زیستی قارچ تریکودرما و باکتری باسیلوس سبب بهبود عملکرد و افزایش وزن دانه کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) شدند و نیز استفاده از ۳۰ تن در هکتار کمپوست نیشکر موجب افزایش شاخص برداشت گردید.

عملکرد بیولوژیک: اثر تلفیقی کود نیتروژن و کود کمپوست نیشکر بر عملکرد بیولوژیک در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد (جدول ۳). بیشترین عملکرد بیولوژیک با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص (A_2) به میزان ۳۰۲۱ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. با کاربرد سطوح تیمارهای A_3 و A_4 یعنی ۱۱۲/۵ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن خالص + ۸ تن در هکتار کمپوست نیشکر و ۷۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص + ۱۶ تن در هکتار کمپوست نیشکر، عملکرد بیولوژیک به ترتیب به میزان ۲۳۷۳ و ۲۳۱۶ کیلوگرم در هکتار رسید، اما تأثیر این سطوح به اندازه تأثیر تیمار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن بر عملکرد بیولوژیک نبود.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات اندازه گیری شده رازیانه تحت تأثیر سطوح تیمارهای کود تلفیقی و کود زیستی بیوفارم

Table 3- Results of the analysis of variance (mean squares) for the measured traits of fennel under different levels of integrated fertilizer treatments and biopharm

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f	عملکرد دانه Seed yield	عملکرد بیولوژیک Biological yield	درصد اسانس Essential oil %	عملکرد اسانس Essential oil yield
تکرار Replication	2	32604.22 ^{ns}	191110.00 ^{ns}	0.132 ^{ns}	0.542 ^{ns}
کود تلفیقی Combined fertilizer (Cf)	5	34451.93 ^{**}	2478252.11 ^{**}	0.371 ^{**}	172.942 ^{**}
خطای اصلی Main error	10	29475.60	134118.28	0.0388	2.390
کود زیستی Biofertilizer (B)	1	77951.46 ^{ns}	55763.33 ^{ns}	0.5383 ^{**}	25.406 ^{ns}
کود تلفیقی × کود زیستی Cf × B	5	167295.61 [*]	360091.57 ^{ns}	0.0659 ^{ns}	48.440 ^{**}
خطای فرعی Sub error	12	354.11	202546.19	0.035	9.106
ضریب تغییرات CV (%)		28.85	21.89	9.7	21.31

ns, * and **: are non-significant, significant at 5 and 1% probability levels, respectively.
ns, * and **: are non-significant, significant at 5 and 1% probability levels, respectively.

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح کود تلفیقی و کود زیستی بیوفارم بر عملکرد دانه و عملکرد اسانس

Table 4- Comparison of the average interaction effect of combined fertilizer and Biopharm biofertilizer levels on grain yield and essential oil yield

سطوح کود تلفیقی Compound fertilizer levels (A)	سطوح کود زیستی Biofertilizer levels (B)	عملکرد دانه Seed yield (kg.ha ⁻¹)	عملکرد اسانس Essential oil yield (kg.ha ⁻¹)
A ₁	B ₀	403g*	7.51fg
A ₂	B ₀	863bc	18.72bc
A ₃	B ₀	879bc	15.23de
A ₄	B ₀	998a	19.29b
A ₅	B ₀	643de	12.77e
A ₆	B ₀	483f	6.57g
A ₁	B ₁	496f	9.71f
A ₂	B ₁	938ab	22.13a
A ₃	B ₁	911b	19.47b
A ₄	B ₁	820c	16.04cd
A ₅	B ₁	705d	16.26cd
A ₆	B ₁	621e	10.11f

* در ستون و در هر گروه تیمار، میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند، براساس آزمون دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد نسبت به هم ندارند.

A₁: شاهد، A₂: ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص، A₃: ۱۱۲/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص و ۸ تن در هکتار کمپوست نیشکر، A₄: ۷۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص و ۱۶ تن در هکتار کمپوست نیشکر، A₅: ۳۷/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص و ۲۴ تن در هکتار کمپوست نیشکر، A₆: ۳۲ تن در هکتار کمپوست نیشکر خالص. B₁: تلقیح با کود زیستی، B₀: عدم تلقیح با کود زیستی

* In each column and each treatment group, the averages that have at least one letter in common are not significantly different at the 5% level through Duncan's test.

A₁: control, A₂: 150 kg.ha⁻¹ of pure nitrogen, A₃: 112.5 kg.ha⁻¹ of pure nitrogen and 8 tons.ha⁻¹ of sugarcane compost, A₄: 75 kg.ha⁻¹ of pure nitrogen and 16 tons.ha⁻¹ of sugarcane compost, A₅: 37.5 kg.ha⁻¹ of pure nitrogen and 24 tons per hectare of sugarcane compost, A₆: 32 tons per hectare of pure sugarcane compost. B₁: inoculation with biofertilizer, B₀: no inoculation with biofertilizer

در واقع، نتایج نشان می‌دهد که کود شیمیایی اثر بسزایی در افزایش عملکرد بیولوژیک نسبت به کود آلی دارد. کمترین میزان عملکرد نیز در شاهد به میزان ۱۳۵۱ کیلوگرم در هکتار مشاهده گردید. نتایج مقایسه میانگین برای کاربرد سطوح کود زیستی اختلاف معنی داری نشان داد و بیشترین عملکرد بیولوژیک در تلقیح کود زیستی به میزان ۲۱۶۶ کیلوگرم در هکتار به دست آمد (جدول ۵). باتوجه به نتایج، بهترین تیمار (A₂) با ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن، عملکرد بیولوژیک را به میزان تقریبی ۱۲۳/۶ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. تیمارهای تلفیقی کمپوست و نیتروژن (A₃) و (A₄) به ترتیب حدود ۷۵/۶ درصد و ۷۱/۴ درصد افزایش را نشان دادند. تیمار کود زیستی (B₁) نیز حدود ۶۰/۳ درصد افزایش عملکرد بیولوژیک نسبت به شاهد داشت. کمتر بودن عملکرد در اثر مصرف سطوح بالای کمپوست در مقایسه با کودهای شیمیایی معمولاً به دلیل روند آهسته‌تر تجزیه کودهای آلی و در نتیجه آزادسازی بخش قابل توجهی از نیتروژن آزادشده در اواخر فصل رشد است که ممکن است وابستگی و نیاز عملکرد بیولوژیک گیاه به این عنصر کاهش یافته باشد.

کودهای آلی در صورتی که به صورت تلفیقی همراه با کودهای

شیمیایی مصرف شوند، می‌توانند تأثیر جبرانی داشته باشند. ترکیب کود آلی و شیمیایی، این امکان را فراهم می‌آورد که در دوره ابتدایی رشد گیاهان، کود شیمیایی، مواد غذایی قابل جذب را برای آن‌ها تأمین کرده و در دوره‌های بعدی رشد، کود آلی، مواد غذایی پرمصرف و کم‌مصرف لازم را در اختیار گیاه قرار می‌دهد (Blaise et al., 2005). باین حال در آزمایش حاضر، مصرف کود آلی کمپوست بقایای نیشکر، قادر به جایگزینی کامل کود شیمیایی نبود و دلیل آن هم می‌تواند به آزادسازی آهسته نیتروژن موجود در این کود تا انتهای فصل رشد باشد که با توجه به فصل رشد کوتاه رازیانه در منطقه که به دلیل گرمای هوا در اوایل بهار به اتمام می‌رسد، می‌تواند توجیه شود. به خصوص که در مراحل انتهایی رشد، این گیاه نیاز چندانی به نیتروژن آزاد شده ندارد. در خصوص کود زیستی، رضوانی مقدم و همکاران (Rezvani Moghadam et al., 2013) در پژوهش خود مشاهده نمودند که مصرف کودهای بیولوژیک (نیتراژین، نیتروکسین و ورمی کمپوست) سبب افزایش عملکرد بیولوژیک در گیاه مرزه (*Satureja hortensis* L.) شد که با نتایج آزمایش حاضر مطابقت داشت.

جدول ۵- مقایسه میانگین تأثیر سطوح کود تلفیقی و کود زیستی بیوفارم بر عملکرد بیولوژیک و درصد اسانس

Table 5- Comparison of the average effect of combined fertilizer and Biopharm biofertilizer levels on biological yield and essential oil percentage

درصد اسانس	عملکرد بیولوژیک	سطوح کود تلفیقی و کود زیستی
Percentage of essential oil	Biological yield (kg.ha ⁻¹)	Compound fertilizer levels (A) and biofertilizer levels (B)
1.55d	1351d*	A ₁
2.26a	3021a	A ₂
1.93bc	2373b	A ₃
1.94bc	2316b	A ₄
2.14ab	1873c	A ₅
1.83c	1397d	A ₆
2.06a	2166a	B ₁
1.81b	1906b	B ₀

* در هر ستون و در هر گروه تیمار، میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند، براساس آزمون دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد نسبت به هم ندارند.

A₁: شاهد، A₂: ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص، A₃: ۱۱۲/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص و ۸ تن در هکتار کمپوست نیشکر، A₄: ۷۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص و ۱۶ تن در هکتار کمپوست نیشکر، A₅: ۳۷/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص و ۲۴ تن در هکتار کمپوست نیشکر، A₆: ۳۲ تن در هکتار کمپوست نیشکر خالص. B₁: تلقیح با کود زیستی، B₀: عدم تلقیح با کود زیستی

* In each column and each treatment group, the averages that have at least one letter in common are not significantly different at the 5% level through Duncan's test.

A₁: control, A₂: 150 kg.ha⁻¹ of pure nitrogen, A₃: 112.5 kg.ha⁻¹ of pure nitrogen and 8 tons.ha⁻¹ of sugarcane compost, A₄: 75 kg.ha⁻¹ of pure nitrogen and 16 tons.ha⁻¹ of sugarcane compost, A₅: 37.5 kg.ha⁻¹ of pure nitrogen and 24 tons per hectare of sugarcane compost, A₆: 32 tons per hectare of pure sugarcane compost. B₁: inoculation with biofertilizer, B₀: no inoculation with biofertilizer

درصد اسانس دانه: اثر تیمار کود تلفیقی (کود شیمیایی

نیتروژن و کود آلی کمپوست نیشکر) و اثر تیمار کود زیستی بیوفارم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). بیش‌ترین میزان درصد اسانس با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص (A_2) به‌میزان ۲/۲۶ درصد به دست آمد که اختلاف معنی‌داری با کاربرد سایر مقادیر تیمارهای آزمایش داشت، اما با این‌وجود با کاربرد سطوح تیمارهای (A_4) و (A_5) یعنی ۷۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص + ۱۶ تن در هکتار کمپوست نیشکر و ۳۷/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص + ۲۴ تن در هکتار کمپوست نیشکر نیز درصد اسانس به‌میزان ۱/۹۴ و ۲/۱۴ به دست آمد. کم‌ترین میزان درصد اسانس مربوط به شاهد به‌میزان ۱/۵۵ درصد بود. در مورد تیمار کود زیستی، بیش‌ترین درصد اسانس در تیمار تلقیح کود زیستی (B_1) به‌میزان ۲/۰۶ درصد بود که نسبت به شاهد اثر معنی‌داری داشت (جدول ۵). در واقع، کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار (A_2)، درصد اسانس را به ۱/۴۶ برابر نسبت به شاهد افزایش داد. یافته‌ها حاکی از آن است که هر دو ترکیب کودی مورد استفاده در تیمارهای A_5 و A_4 منجر به افزایش قابل توجه درصد اسانس به‌ترتیب به‌مقدار ۱/۳۸ و ۱/۲۵ برابر در مقایسه با شاهد شدند. تیمار تلقیح کود زیستی (B_1) نیز درصد اسانس را به ۱/۳۳ برابر شاهد رساند.

باتوجه به نتایج حاصل از آزمایش، کود شیمیایی به‌تنهایی و هم به‌همراه کود آلی سبب افزایش درصد اسانس رازیانه می‌شود. کودهای تلفیقی (شیمیایی و آلی) و بیولوژیک تأثیر معنی‌داری بر درصد اسانس رازیانه داشتند و جایگزین مناسبی برای کودهای شیمیایی می‌شوند. در طی گزارشی، افزایش مصرف کود اوره در زراعت گیاه دارویی بابونه (*Matricaria chamomilla* L.) منجر به افزایش درصد اسانس، عملکرد رویشی و عملکرد اسانس گیاه دارویی بابونه شد (Omid Beigi & Hasani Malayeri, 2007). رضایی چیا نه و همکاران (Rezaei Chianeh et al., 2014) گزارش کردند که از آنجایی که اسانس‌ها ترکیبات ترپنوئیدی هستند، واحدهای سازنده آن‌ها نیاز مبرم به ATP و NADPH دارند و با توجه به این موضوع که حضور عناصری مانند نیتروژن و فسفر برای تشکیل ترکیب‌های اخیر ضروری می‌باشد، از این‌رو باکتری‌های حل‌کننده فسفات و تثبیت نیتروژن در

کنار باکتری تیوباسیلوس از طریق کاهش pH خاک و فراهم نمودن جذب عناصر غذایی به‌خصوص نیتروژن، فسفر و عناصر کم‌صرف (آهن، منگنز، روی و مس) موجب افزایش اسانس گیاه دارویی رازیانه شدند.

عملکرد اسانس دانه: اثر تیمار کود تلفیقی و نیز اثر متقابل

کود تلفیقی و کود زیستی بر عملکرد اسانس دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). بیش‌ترین عملکرد اسانس رازیانه مربوط به کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن خالص تحت تأثیر تیمار کود زیستی (A_2B_1) به‌میزان ۲۲/۱۳ کیلوگرم در هکتار بود، اما در سطوح تیمارهای ۱۱۲/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص + ۸ تن در هکتار کمپوست نیشکر تحت تأثیر تیمار کود زیستی (A_3B_1) و ۷۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص + ۱۶ تن در هکتار کمپوست نیشکر بدون اعمال کود زیستی (A_4B_0) به‌ترتیب به‌میزان ۱۹/۴۷ و ۱۹/۲۹ کیلوگرم در هکتار نیز سبب افزایش عملکرد اسانس نسبت به شاهد شد. کم‌ترین میزان عملکرد اسانس در تیمار ۳۲ تن در هکتار کمپوست نیشکر بدون اعمال کود زیستی (A_6B_0) به‌میزان ۶/۵۷ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد که این موضوع به‌دلیل کاهش معنی‌دار عملکرد دانه این تیمار در مقایسه با سایر سطوح که بخشی از کود مصرفی را به‌صورت شیمیایی دریافت کرده بودند، روی داد (جدول ۴).

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، کود شیمیایی تأثیر زیادی بر افزایش عملکرد اسانس رازیانه داشت، اما کاربرد کودهای آلی و زیستی از جمله کمپوست نیشکر و بیوفارم نیز بر افزایش عملکرد اسانس مؤثر بودند. خان و اعظم (Khan & Azam, 1999) به افزایش میزان اسانس رازیانه تحت تأثیر استفاده از کودهای شیمیایی اشاره کردند. مونا و همکاران (Mona et al., 2008) و کپور و همکاران (Kapoor et al., 2004) نیز گزارش کردند که کودهای آلی کمپوست سبب افزایش عملکرد اسانس رازیانه شد. در تحقیق فلاحی و همکاران (Fallahi et al., 2009) مشخص شد که گیاه دارویی بابونه آلمانی (*Matricaria chamomilla* L.) تحت تأثیر تیمار باکتری حل‌کننده فسفات و نیتروکسین (تلفیق از تو باکتر و آزوسپریلیوم) بیش‌ترین عملکرد اسانس را داشت.

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس صفات جذب و کارایی نیتروژن تحت تأثیر سطوح تیمارهای کود تلفیقی و کود زیستی بیوفارم
Table 6- Results of variance analysis of nitrogen absorption and efficiency traits under the influence of combined fertilizer and Biopharm biofertilizer treatment levels

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f	درصد نیتروژن بوته Plant nitrogen percentage	جذب نیتروژن در واحد سطح Nitrogen absorption per unit area	کارایی زراعی نیتروژن Nitrogen crop efficiency	کارایی فیزیولوژیکی نیتروژن Physiological efficiency of nitrogen
تکرار Replication	2	0.01353455 ^{ns}	57.20760 ^{ns}	0.40318744 ^{ns}	192.813404 ^{ns}
کود تلفیقی Combined fertilizer (Cf)	5	1.92045267**	2616.14805**	6.27378018**	1275.753866**
خطای اصلی Main error	10	0.01106372	28.35443	0.40523781	54.019101
کود زیستی Biofertilizer (B)	1	0.01076406 ^{ns}	92.82509*	21.33949616**	2848.250742**
کود تلفیقی × کود زیستی Cf × B	5	0.00603240 ^{ns}	28.00334 ^{ns}	4.22473606**	157.985743**
خطای فرعی Sub-plot error	12	0.00254497	17.56905	0.038607958	18.953213
ضریب تغییرات CV (%)		3.92	14.63	18.57	9.71

ns, * و **: به ترتیب معنی دار در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد و غیرمعنی دار.
ns, * and **: are non-significant, significant at 5 and 1% probability levels, respectively.

قابل قبولی (نزدیک به دو برابر شاهد) حفظ کند.

نیتروژن از اجزای اصلی پروتئین ها و از عنصرهای غذایی اصلی و ضروری و پرنیازترین عنصر برای رشد گیاهان به شمار می آید و بعد از کمبود آب، یکی از مهم ترین عوامل محدودکننده رشد گیاهان است (Lemaire et al., 2008). عناصر غذایی معدنی از جمله نیتروژن و فسفر، نقش مهمی در بهبود عملکرد کمی و کیفی دانه رازیانه دارند (Kapoor et al., 2004). در رشد و تولید گیاهان دارویی مقدار و زمان کاربرد نیتروژن اهمیت اساسی دارد (Losak & Richter, 2004). پژوهشگران گزارش کردند که استفاده از کود نیتروژنی، محتوای نیتروژن و عناصر دیگر را در پیازهای گل زنبق (*Iris germanica* L.) افزایش داد (Mahgoub et al., 2006). در تحقیقی روی گیاه دارویی رازیانه مشخص شد که استفاده از کودهای زیستی نیتروژنه به همراه ۵۰ در صد کود شیمیایی، عملکرد بهتری نسبت به استفاده یکنواخت کودهای معدنی داشته است (Mahfouz & Sharaf-Eldin, 2007). در آزمایش ازاز و همکاران (Azzaz et al., 2009) در رازیانه مشاهده شد که کاربرد باکتری های تثبیت کننده نیتروژن سبب افزایش قابل توجه عملکرد و اجزای عملکرد نسبت به شاهد گردید.

درصد نیتروژن بوته: با توجه به نتایج، تنها اثر کود تلفیقی

کود شیمیایی و کود کمپوست نیشکر بر درصد نیتروژن بوته در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۶). براساس نتایج مقایسه میانگین، بیش ترین درصد نیتروژن در سطح تیمار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص (A₂) و ۱۱۲/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص + ۸ تن در هکتار کمپوست نیشکر (A₃) به میزان ۲/۳۵ و ۱/۳۶ در صد و کم ترین در صد نیتروژن در سطح شاهد به میزان ۰/۷ در صد به دست آمد. نتایج مقایسه میانگین برای کاربرد سطوح کود زیستی اختلاف معنی داری نشان نداد، اما بالین وجود بیش ترین میزان در صد نیتروژن در سطح تیمار اعمال کود زیستی (B₁) به میزان ۱/۳ درصد بود (جدول ۷). نتایج نشان داد که اعمال تیمار A₂ منجر به افزایش ۳/۴ برابری نیتروژن نسبت به شاهد گردید. در مقابل، تیمار تلفیقی (A₃) و کود زیستی (B₁)، هر کدام منجر به افزایش حدود ۱/۹ برابری درصد نیتروژن رازیانه نسبت به شاهد شدند. اگرچه غلظت نیتروژن در تیمارهای تلفیقی و زیستی پایین تر از کود شیمیایی خالص بود، اما عملکرد آن ها همچنان دو برابر شرایط بدون کود بوده است. این یافته ها حاکی از آن است که اگرچه کود شیمیایی برای حداکثر جذب سریع ضروری است، اما تلفیق آن با کمپوست نیشکر یا استفاده از کود زیستی می تواند با کاهش مصرف نهاده ها، نیتروژن را تا حد

جدول ۷- مقایسه میانگین درصد و جذب نیتروژن رازیانه تحت تأثیر سطوح کود تلفیقی و کود زیستی بیوفارم

Table 7- Comparison of average percentage and nitrogen absorption of fennel under the influence of combined fertilizer and Biopharm biofertilizer levels

سطوح کود تلفیقی و کود زیستی Compound fertilizer levels (A) and biofertilizer levels (B)	درصد نیتروژن بوته Plant nitrogen percentage	جذب نیتروژن بوته در واحد سطح Plant nitrogen uptake per unit area (kg.ha ⁻¹)
A ₁	0.70d*	9.54d
A ₂	2.35a	68.01a
A ₃	1.36b	32.22b
A ₄	1.09c	24.30c
A ₅	1.13c	23.53c
A ₆	1.04c	14.23d
B ₁	1.30a	30.24a
B ₀	1.26a	27.03b

* در هر ستون و در هر گروه تیمار، میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند، براساس آزمون دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد نسبت به هم ندارند.

A₁: شاهد، A₂: ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص، A₃: ۱۱۲/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص و ۸ تن در هکتار کمپوست نیشکر، A₄: ۷۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص و ۱۶ تن در هکتار کمپوست نیشکر، A₅: ۳۷/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص و ۲۴ تن در هکتار کمپوست نیشکر، A₆: ۳۲ تن در هکتار کمپوست نیشکر خالص. B₁:

تلقیح با کود زیستی، B₀: عدم تلقیح با کود زیستی

* In each column and each treatment group, the averages that have at least one letter in common are not significantly different at the 5% level through Duncan's test.

A₁: control, A₂: 150 kg.ha⁻¹ of pure nitrogen, A₃: 112.5 kg.ha⁻¹ of pure nitrogen and 8 tons.ha⁻¹ of sugarcane compost, A₄: 75 kg.ha⁻¹ of pure nitrogen and 16 tons.ha⁻¹ of sugarcane compost, A₅: 37.5 kg.ha⁻¹ of pure nitrogen and 24 tons per hectare of sugarcane compost, A₆: 32 tons per hectare of pure sugarcane compost. B₁: inoculation with

جذب نیتروژن بوته: اثر هر یک از تیمارهای کود تلفیقی و

کود زیستی بر جذب نیتروژن بوته به ترتیب در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۶). با توجه به نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، بیش‌ترین میزان جذب نیتروژن در سطح تیمار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص (A₂) به میزان ۶۸/۰۱ کیلوگرم در هکتار و کمترین مقدار آن در سطح شاهد به میزان ۹/۵۴ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد. در مورد تیمار کود زیستی، بیش‌ترین میزان جذب نیتروژن در سطح تیمار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص تحت تأثیر کود زیستی (A₂B₁) به میزان ۳۰/۲۴ کیلوگرم در هکتار و کمترین میزان نیز در شاهد به میزان ۲۷/۰۳ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد (جدول ۷). بیش‌ترین جذب نیتروژن در تیمار A₂ (۶۸/۰۱ کیلوگرم در هکتار) ثبت گردید که نسبت به شاهد (۹/۵۴ کیلوگرم در هکتار) نشان‌دهنده افزایش حدود هفت برابری است. این رشد چشمگیر احتمالاً ناشی از ورود مستقیم و غلظت بالای نیتروژن (اوره) است که به سرعت در دسترس ریشه قرار می‌گیرد. در مورد اثر کود زیستی، اگر چه تیمار تلفیقی A₂B₁ (۳۰/۲۴ کیلوگرم) بالاترین مقدار را در گروه‌های دارای کود زیستی داشت، اما جذب آن (حدود ۳۰ کیلوگرم) همچنان کمتر از تیمار خالص A₂ بود. دلیل این امر احتمالاً کندتر

بودن فرآیند آزاد سازی نیتروژن توسط عوامل بیولوژیک در مقایسه با کود شیمیایی فوری است. با این حال، افزایش جذب در تیمار B₁ نسبت به شاهد (۲۷/۳ کیلوگرم) نشان می‌دهد که کود زیستی با بهبود فعالیت میکروبی و توسعه سیستم ریشه، توانست کارایی جذب نیتروژن موجود در خاک را حتی در سطوح پایین‌تر نیز ارتقاء دهد. مولاولی و همکاران (Mollavali et al., 2011) گزارش کردند که افزایش جذب نیتروژن می‌تواند به علت افزایش غلظت نیتروژن در محیط ریشه باشد. در تحقیقی روی گیاه دارویی مرزنجوش (*Origanum majorana* L.) مشاهده گردید که کودهای زیستی حاوی/زئوباکتر و آزوسپریلیوم می‌توانند جایگزین کود شیمیایی نیتروژنه در زراعت این گیاه شوند و ضمن کاهش هزینه‌های تولید ناشی از مصرف کود شیمیایی، از وارد شدن آسیب به محیط زیست نیز جلوگیری کنند (Fatma et al., 2006).

کارایی زراعی نیتروژن: براساس نتایج، اثر کود تلفیقی و کود

زیستی در سطح احتمال یک درصد و نیز اثر متقابل آن‌ها بر کارایی زراعی در سطح احتمال خطای پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۶). طبق نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، بالاترین میزان کارایی زراعی نیتروژن مربوط به سطوح تیمارهای ۷۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن

(et al., 2008). بالاترین کارایی زراعی مصرف نیتروژن با مصرف اولین واحد کود حاصل شد و با افزایش واحدهای بعدی، افزایش کمتری حاصل شد که با نتایج آزمایش حاضر مطابقت دارد، به این دلیل که در آزمایش حاضر نیز با افزایش مقادیر نیتروژن، کارایی زراعی نیتروژن کاهش یافته است و با کاهش مصرف کود شیمیایی و افزایش مصرف کود آلی، کارایی زراعی نیتروژن افزایش یافته است. پژوهش‌ها نشان داده که هرچه مقدار نیتروژن اولیه در خاک بیشتر باشد، کارایی مصرف نیتروژن در مقادیر پایین‌تر تیمارهای کود کاهش می‌یابد (Noshad et al., 2015).

خالص + ۱۶ تن در هکتار کمپوست نیشکر بدون اعمال کود زیستی (A_4B_0) و ۳۷/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص + ۲۴ تن در هکتار کمپوست نیشکر بدون اعمال کود زیستی (A_5B_0) به‌ترتیب به‌میزان ۶/۸۵ و ۴/۲۴ کیلوگرم بر کیلوگرم بود و کم‌ترین میزان کارایی زراعی نیتروژن مربوط به سطح تیمار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار با اعمال کود زیستی (A_2B_1) به‌میزان ۲/۱۱ کیلوگرم بر کیلوگرم بود (جدول ۸). با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، کود زیستی سبب کاهش کارایی زراعی نیتروژن شد. طیف نسبتاً وسیعی از عوامل ژنتیکی و راهکارهای مدیریتی می‌تواند بر کارایی نیتروژن در گیاهان تأثیر بگذارد (Guarda et al., 2004). در پژوهش مدهج و همکاران (Modhej

جدول ۸- مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح کود تلفیقی و کود زیستی بر کارایی نیتروژن بوته رازیانه

Table 8- Comparison of the average interaction effect of combined fertilizer and biofertilizer levels on nitrogen efficiency of fennel plants

سطوح کود تلفیقی Compound fertilizer levels (A)	سطوح کود زیستی Biofertilizer levels (B)	کارایی زراعی نیتروژن Nitrogen crop efficiency (kg.kg ⁻¹)	کارایی فیزیولوژیکی نیتروژن Physiological efficiency of nitrogen (kg.kg ⁻¹)
A ₂	B ₀	2.52cd*	31.28c
A ₃	B ₀	3.51bc	57.38b
A ₄	B ₀	6.85a	67.79a
A ₅	B ₀	4.24b	66.43a
A ₂	B ₁	2.11d	21.24d
A ₃	B ₁	2.58cd	24.01d
A ₄	B ₁	2.65cd	50.62b
A ₅	B ₁	2.25d	39.86bc

* در هر ستون و در هر گروه، تیمار میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند، براساس آزمون دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد نسبت به هم ندارند.

A₁: شاهد، A₂: ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص، A₃: ۱۱۲/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص و ۸ تن در هکتار کمپوست نیشکر، A₄: ۷۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص و ۱۶ تن در هکتار کمپوست نیشکر، A₅: ۳۷/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص و ۲۴ تن در هکتار کمپوست نیشکر، A₆: ۳۲ تن در هکتار کمپوست نیشکر خالص. B₁: تلفیق با کود زیستی، B₀: عدم تلفیق با کود زیستی

* In each column and each treatment group, the averages that have at least one letter in common are not significantly different at the 5% level through Duncan's test.

A₁: control, A₂: 150 kg.ha⁻¹ of pure nitrogen, A₃: 112.5 kg.ha⁻¹ of pure nitrogen and 8 tons.ha⁻¹ of sugarcane compost, A₄: 75 kg.ha⁻¹ of pure nitrogen and 16 tons.ha⁻¹ of sugarcane compost, A₅: 37.5 kg.ha⁻¹ of pure nitrogen and 24 tons per hectare of sugarcane compost, A₆: 32 tons per hectare of pure sugarcane compost. B₁: inoculation with

۶۶/۴۳ کیلوگرم بر کیلوگرم بود که اختلاف معنی‌داری نسبت به هم نداشتند و کم‌ترین میزان کارایی فیزیولوژیکی نیتروژن مربوط به سطح تیمار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص با اعمال کود زیستی (A_2B_1) به‌میزان ۲۱/۲۴ کیلوگرم بر کیلوگرم بود (جدول ۸). کارایی فیزیولوژیکی نیتروژن، میزان تولید اندام اقتصادی (گل، دانه و ...) در هر واحد نیتروژن بازیافت‌شده در زیست‌توده می‌باشد. در کارایی فیزیولوژیکی نیتروژن نیز مانند کارایی زراعی نیتروژن، با افزایش واحدهای کود نیتروژن، نیاز گیاه به این عنصر تأمین شده و واکنش

کارایی فیزیولوژیکی نیتروژن: اثر کود تلفیقی و کود زیستی

در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل آن‌ها بر کارایی فیزیولوژیکی نیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۶). براساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، بیش‌ترین میزان کارایی فیزیولوژیکی نیتروژن مربوط به سطوح تیمارهای ۷۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص + ۱۶ تن در هکتار کمپوست نیشکر بدون اعمال کود زیستی (A_4B_0) و ۳۷/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص + ۲۴ تن در هکتار کمپوست نیشکر بدون اعمال کود زیستی (A_5B_0) به‌ترتیب به‌میزان ۶۷/۷۹ و

دارد. در تحقیقی روی گیاه دارویی رازیانه مشخص شد که استفاده از کودهای زیستی نیتروژنه به همراه ۵۰ درصد کود شیمیایی، عملکرد بهتری نسبت به استفاده یکنواخت کودهای معدنی داشت (Mahfouz & Sharaf-Eldin, 2007).

آن به مقادیر بیشتر نیتروژن کاهش می‌یابد. در گزارش عامری و همکاران (Ameri et al., 2007)، افزایش استفاده از کود نیتروژن باعث کاهش کارایی مصرف نیتروژن در گیاه همیشه بهار (*Calendula officinalis* L.) شد که با نتایج آزمایش حاضر تطابق

جدول ۹- نتایج تجزیه واریانس صفات جذب و کارایی نیتروژن تحت تأثیر سطوح تیمارهای کود تلفیقی و کود زیستی بیوفارم
Table 9- Results of variance analysis of nitrogen absorption and efficiency traits under the influence of combined fertilizer and Biopharm biofertilizer treatment levels

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f	فسفر Phosphorus	پتاسیم Potassium	روی Zinc	آهن Iron
تکرار Replication	2	0.518 ^{ns}	1377.763 ^{ns}	0.0204 ^{ns}	0.141 ^{ns}
کود تلفیقی Combined fertilizer (Cf)	5	4.825 ^{**}	4180.690 ^{**}	0.048 ^{**}	1.337 ^{**}
خطای اصلی Main error	10	0.869	553.488	0.007	0.108
کود زیستی Biofertilizer (B)	1	7.6199 ^{**}	22.168 ^{ns}	0.00025 ^{ns}	0.0743 ^{ns}
کود تلفیقی × کود زیستی Cf × B	5	0.316 ^{ns}	107.201 ^{ns}	0.005 ^{ns}	0.0307 ^{ns}
خطای فرعی Sub-plot error	12	0.0458	230.701	0.016	0.176
ضریب تغییرات CV (%)		18.45	10.20	27.91	17.44

ns, * and **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد و غیرمعنی‌دار.
ns, * and **: are non-significant, significant at 5 and 1% probability levels, respectively.

گیاه می‌شود (جدول ۱۰). عبدال-لطیف و همکاران (Abd El-Latif et al., 2011) با پژوهش‌هایی که روی اسفناج (*Spinacia oleracea* L.) انجام دادند، مشخص کردند که با افزایش سطح نیتروژن مصرفی، غلظت فسفر گیاه کاهش می‌یابد که با آزمایش حاضر مطابقت دارد. موقتیان و همکاران (Movaghathian et al., 2014) گزارش کردند که استفاده از کود شیمیایی در تلفیق کمپوست ضایعات نی‌شکر می‌تواند سبب افزایش مقدار نیتروژن و فسفر موجود در کمپوست شده و موجبات افزایش رشد گیاه رازیانه را نیز فراهم آورد. راتی و همکاران (Ratti et al., 2001) در پژوهشی روی گیاه دارویی علف لیمو (*Cymbopogon martini* L.)، مشاهده نمودند که مصرف یک گونه باکتری حل‌کننده فسفات همراه با یک نوع فسفات معدنی غیرمحللول به نام تری‌کلسیم فسفات موجب بهبود بارز غلظت فسفر ساقه نسبت به شاهد گردید.

فسفر بوته: براساس نتایج، اثر تیمارهای کود تلفیقی و کود زیستی به ترتیب در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۹). بیش‌ترین مقدار فسفر کل بوته در سطح تیمار A₅ یعنی ۳۷/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص + ۲۴ تن در هکتار کمپوست نی‌شکر به میزان ۵۰/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک و کم‌ترین مقدار آن در سطح شاهد به میزان ۲۵/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک حاصل شد (جدول ۱۰). نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن بود که با افزایش کاربرد کود آلی به همراه کود شیمیایی، میزان جذب فسفر بوته رازیانه بیشتر می‌شود که این امر می‌تواند ناشی از وجود فسفر در ترکیبات کود آلی کمپوست نی‌شکر باشد. در مورد تأثیر تیمار کود زیستی نیز بالاترین میزان فسفر جذب شده توسط گیاه ۴۱/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که نسبت به شاهد اختلاف معنی‌داری داشت و در واقع نشان‌دهنده آن بود که کاربرد کود زیستی نیز سبب افزایش جذب عنصر فسفر توسط

جدول ۱۰- مقایسه میانگین فسفر، پتاسیم، روی و آهن بوته تحت تأثیر سطوح کود تلفیقی و کود زیستی بیوفارم
Table 10- Comparison of average phosphorus, potassium, zinc, and iron in plants under the influence of combined fertilizer and Biopharm biofertilizer levels

سُطوح کود تلفیقی و کود زیستی Compound fertilizer levels (A) and biofertilizer levels (B)	فسفر Phosphorus (mg.kg ⁻¹)	پتاسیم Potassium (mg.kg ⁻¹)	روی Zinc (mg.kg ⁻¹)	آهن Iron (mg.kg ⁻¹)
A ₁	25.1c*	113.75c	0.52ab	1.57c
A ₂	42.3ab	141.00bc	0.38c	2.44b
A ₃	35.7bc	140.25bc	0.34c	2.50b
A ₄	34.9bc	146.17b	0.42bc	2.56b
A ₅	50.8a	193.75a	0.52ab	2.33b
A ₆	31.1bc	158.50b	0.56a	3.01a
B ₁	41.3a	30.24a	0.46a	2.44a
B ₀	33.2b	27.03b	0.46a	2.35a

* در هر ستون و در هر گروه تیمار، میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند، براساس آزمون دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد نسبت به هم ندارند.

A₁: شاهد، A₂: ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص، A₃: ۱۱۲/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص و ۸ تن در هکتار کمپوست نیشکر، A₄: ۷۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص و ۱۶ تن در هکتار کمپوست نیشکر، A₅: ۳۷/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص و ۲۴ تن در هکتار کمپوست نیشکر، A₆: ۳۲ تن در هکتار کمپوست نیشکر خالص. B₁: تلقیح با کود زیستی، B₀: عدم تلقیح با کود زیستی

* In each column and each treatment group, the averages that have at least one letter in common are not significantly different at the 5% level through Duncan's test.

A₁: control, A₂: 150 kg.ha⁻¹ of pure nitrogen, A₃: 112.5 kg.ha⁻¹ of pure nitrogen and 8 tons.ha⁻¹ of sugarcane compost, A₄: 75 kg.ha⁻¹ of pure nitrogen and 16 tons.ha⁻¹ of sugarcane compost, A₅: 37.5 kg.ha⁻¹ of pure nitrogen and 24 tons per hectare of sugarcane compost, A₆: 32 tons per hectare of pure sugarcane compost. B₁: inoculation with

آمد.

آهن بوته: اثر تیمار کود تلفیقی بر میزان آهن رازیانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۹). بیش‌ترین مقدار جذب آهن رازیانه در سطح تیمار A₆ یعنی ۳۲ تن در هکتار کمپوست نیشکر به میزان ۳/۰۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک و کم‌ترین مقدار آن در سطح شاهد به میزان ۱/۵۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک حاصل شد. کاربرد کود زیستی اثر معنی‌داری بر افزایش جذب آهن نداشت، اما بیشتر از شاهد بود (جدول ۱۰). با توجه به اینکه کود آلی کمپوست نیشکر حاوی عناصر ریزمغذی از جمله روی و آهن است، کاربرد آن سبب افزایش جذب عنصر آهن توسط گیاه می‌شود. آهن یکی از عناصر ضروری و کم‌مصرف برای رشدونمو گیاهان است که در فرآیندهای فیزیولوژیک نقش مهمی دارد. بررسی‌های انجام‌شده نشان دادند که آهن نقش مهمی در متابولیسم گیاهان دارد و با کمبود آن، فعالیت برخی از آنزیم‌های گیاهی مختل می‌شود (Marschner, 1986; Brittenham, 1994; Miller et al., 1995).

روی بوته: اثر تیمار کود تلفیقی بر میزان جذب روی بوته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۹). بیش‌ترین میزان روی جذب‌شده بوته در سطح تیمار A₆ یعنی ۳۲ تن در هکتار کمپوست نیشکر به میزان ۰/۵۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک و کم‌ترین

پتاسیم بوته: اثر کود تلفیقی بر میزان پتاسیم بوته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۹). بیش‌ترین مقدار پتاسیم جذب‌شده رازیانه در سطح تیمار A₅ یعنی ۳۷/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص + ۲۴ تن در هکتار کمپوست نیشکر به میزان ۱۹۳/۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک و کم‌ترین آن در سطح شاهد به میزان ۱۱۳/۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک مشاهده شد. کاربرد کود زیستی اثر معنی‌داری بر افزایش جذب پتاسیم نداشت و تفاوت چندانی در مقایسه با شاهد نداشت (جدول ۱۰). نتایج آزمایش حاضر نشان داد که کاربرد کودهای آلی در کنار کودهای شیمیایی و زیستی بر افزایش جذب پتاسیم توسط گیاه مؤثر می‌باشد. افزایش جذب پتاسیم رابطه مستقیمی با افزایش رشد سبزینه‌ای گیاه دارد که خود وابسته به جذب نیتروژن در گیاه است (Khamdi et al., 2016). کربن آلی موجود در کمپوست، عناصر غذایی را به آرامی و به‌طور یکنواخت در خاک آزاد کرده و گیاه را قادر به جذب عناصر غذایی می‌نماید. در طی گزارش محفوظ و شرف-الدین (Mahfouz & Sharaf, 2007) روی گیاه رازیانه، بیش‌ترین مقدار نیتروژن، فسفر و پتاسیم در بافت گیاهی زمانی که خاک با باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن تلقیح گردید، حاصل شد. کمترین میزان نیتروژن، پتاسیم و فسفر در بافت گیاه در نمونه‌های تیماری با کودهای شیمیایی به دست

میزان آن در سطح تیمار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص به میزان ۰/۳۸ میلی گرم بر کیلوگرم ماده خشک حاصل شد. کاربرد کود زیستی اثر معنی‌داری بر افزایش جذب روی نداشت و تفاوتی نسبت به شاهد نداشت (جدول ۱۰). نتایج آزمایش نشان داد که کاربرد کود کمپوست نیشکر به‌تنهایی سبب افزایش جذب روی رازیانه شد و کود شیمیایی جذب روی را کمتر کرد. روی یک عنصر ضروری برای گیاهان است که به‌عنوان یک کوفاکتور عملکردی، ساختاری و تنظیمی در ارتباط با متابولیسم ساکاریدها، فتوسنتز و ساخت پروتئین در گیاهان نقش دارد. تأثیر این عنصر بر تشکیل کلروفیل، توسعه کلروپلاست، افزایش سرعت فتوسنتز، جذب بیشتر عناصر غذایی و در کل تولید بیشتر کربوهیدرات‌ها و افزایش رشد عمومی و عملکرد گیاهان گزارش شده است (Marschner, 1993). با توجه به اینکه کود آلی کمپوست نیشکر حاوی عناصر ریزمغذی از جمله روی و آهن است، کاربرد آن سبب افزایش جذب عنصر روی توسط گیاه می‌شود.

نتیجه‌گیری

براساس نتایج حاصل از این آزمایش، کاربرد تیمار ۷۵ کیلوگرم در

هکتار نیتروژن خالص و ۱۶ تن در هکتار کمپوست نیشکر برای افزایش عملکرد دانه رازیانه و نیز کاربرد کودهای زیستی به‌همراه کودهای شیمیایی (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) سبب افزایش عملکرد ا سانس دانه رازیانه شده و نیز کاربرد مقادیر بالای کمپوست نیشکر (۳۲ تن در هکتار) سبب افزایش غلظت عناصر روی و آهن توسط بوته رازیانه گردید. به‌طور کلی، اعمال کودهای آلی کمپوست نیشکر در تلفیق با کودهای شیمیایی و نیز کاربرد کود زیستی سبب افزایش عملکرد و نیز افزایش جذب عناصر کم‌مصرف و پرمصرف مورد نیاز گیاه رازیانه شد. همچنین اثرات مشابهی در افزایش عملکرد نسبت به کاربرد کودهای شیمیایی داشت که از این طریق می‌توان کودهای تلفیقی را با کودهای شیمیایی جایگزین کرد.

سپاسگزاری

از معاونت پژوهشی و فناوری و همچنین معاونت آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان به‌دلیل مساعدت در امور این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

References

1. Abd El-Latif, K. M., Osman, E. A. M., Abdullah, R., & Abd El-Kader, N. (2011). Response of potato plants to potassium fertilizer rates and soil moisture deficit. *Advances in Applied Science Research*, 2(2), 388-397.
2. Akbarinia, A., Ghalavand, A., Sefidcon, F., Rezayi, M., & SharifiAshorabadi, A. (2004). The effect of chemical fertilizer, manure on yield and essential oil content of seeds *Ajowan modulator*. *Research and Development*, 16(4), 32-42. (In Persian).
3. Albuquerque, J. A., Gonzalez, J., Garcia, D., & Cegarra, J. (2007). Effects of a compost made from the solid by-product ("alperujo") of the two-phase centrifugation system for olive oil extraction and cotton gin waste on growth and nutrient content of ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Bioresource Technology*, 98, 940-945. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.04.014>
4. Alikhani, H. A., & Savaqebi, G. (2014). Vermicomposting for sustainable agriculture. *Tehran University Jihad Journal*, 3, 265-267. (In Persian).
5. Ameri, A., Nassiri, M., & Rezvani, P. (2007). Effects of different nitrogen levels and plant density on flower, essential oils and extract production and nitrogen use efficiency of marigold (*Calendula officinalis*). *Iranian Journal of Agricultural Research*, 5(2). (In Persian with English abstract)
6. AmirTeimori, S., Shemshadi, K., & Khalilian, S. (2011). Place of Iran in export of fennel: the export comparative advantage approach. *Journal of Agricultural Economics Research*, 3(4), 81-95. (In Persian with English abstract). [20.1001.1.20086407.1390.3.12.5.6](https://doi.org/10.22034/saps.2021.13088)
7. Ayneband, A., Gorooii, A., Fateh, E., & Kakadezfoli, F. (2020). Comparison of compost fertilizer production from different crop residues and its effect on grain yield and some agronomic characters of wheat. *Journal of Agricultural Knowledge and Sustainable Production*, 31(2), 29-42. (In Persian with English abstract). [10.22034/saps.2021.13088](https://doi.org/10.22034/saps.2021.13088)
8. Azzaz, N. A., Hassan, E. A., & Hamad, E. H. (2009). The chemical constituent and vegetative and yielding characteristics of fennel plants treated with organic and biofertilizer instead of mineral fertilizer. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(2), 579-587.

9. Blaise, D., Singh, J. V., Bonde, A. N., Tekale, K. U., & Mayee, C. D. (2005). Effects of farmyard manure and fertilizers on yield, fiber quality and nutrient balance of rain fed cotton (*Gossypium hirsutum*). *Bioresource Technology*, 96, 345-349. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.03.008>
10. Bremner, J. M. (1996). Methods of Soil Analysis: Part 3. Chemical Methods. *Soil Science Society of America, Inc.* 1(5), 1085-121. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3>
11. Brittenham, G. M. (1994). New advances in iron metabolism iron deficiency and iron overload. *Current Opinion in Hematology*, 1: 101-106.
12. Chatterjee, S. K. (2002). Cultivation of medicinal and aromatic plants in India: a commercial approach. *ActaHorticulture (ISHS)*, 576, 191-202. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.576.28>
13. Fageria, N. K. (2009). The Use of Nutrients in Crop Plants. CRC Press, New York. <https://doi.org/10.1201/9781420075113>
14. Fallahi, J., Koocheki, A., & Rezvani Moghadam, P. (2009). Effects of biofertilizers on quantitative and qualitative yield of chamomile (*Matricaria recutita*) as a medicinal plant. *Iranian Agricultural Research Journal*, 7(1), 135-127. (In Persian with English abstract). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20081472.1388.7.1.13.1>
15. Fatma, E. M., El-Zamik, T., Tomader, H. I., El-Hadidy, L., Abd El-Fattah, H., & Seham, S. (2006). Efficiency of biofertilizers, organic and inorganic amendments application on growth and essential oil of marjoram (*Majorana hortensis* L.) plants grown in sandy and calcareous soils. Agricultural Microbiology Department, Faculty of Agriculture, Zagazig University; Soil Fertility and Microbiology Department, Desert Research Center, Cairo, Egypt.
16. Guarda, G., Padovan, S., & Delogu, G. (2004). Grain yield, nitrogen-use efficiency and baking quality of old and modern Italian bread-wheat cultivars grown at different nitrogen levels. *European Journal of Agronomy*, 21(2), 181-192. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2003.08.001>
17. Herwijnen, V., Hutchings, T., Al-Tabbaa, A., Moffat, A., Johns, M., & Ouki, S. (2007). Remediation of metal contaminated soil with mineral-amended composts. *Environmental Pollution*, 150, 347-354. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.01.023>
18. Ismayana, A., Indrasti, A. S., & Sane, T. (2013). Co-Composting process of bagasse and sludge from sugarcane industry with influence of difference initial C/N value and aeration. 2nd International Conference on Adaptive and Intelligent Agroindustry, 54-62. <http://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/67800>
19. Kapoor, R., Giri, B., & Mukerji, K. G. (2004). Improved growth and essential oil yield and quality in *foeniculum vulgare* Mill on mycorrhizal inoculation supplemented with P-fertilizer. *Bioresource Technology*, 93, 307-311. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.10.028>
20. Kashfi Bonab, A. (2010). Comparative economic advantage of cultivation and trade of medicinal plants in Iran and its value in world markets. *Journal of Business Studies*, 8(44), 67-78. (In Persian with English abstract).
21. Khamdi, F., Mesgabashi, M., Hasibi, P., Farzaneh, M., & Enayatzamir, M. (2016). Influence of crop residue and nitrogen levels on nutrient content in grain wheat. *Agronomy Journal (Pajouhesh & Sazandegi)*, 28(4), 158-166. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22092/aj.2016.106753>.
22. Khan, M. M., & Azam, Z. M. (1999). Change in the essential oil constituents of *Foeniculum vulgare* in relation of basal and foliar application of nitrogen and phosphorus. *Journal of Plant Nutrition*, 11, 2205-2515. <https://doi.org/10.4141/P98-090>
23. Kiani, S., Siadat, S. A., Moradi Telavat, M. R., Abdali Mashhadi, A. R., & Sari, M. (2014). Effect of nitrogen fertilizer application on forage yield and quality of barley (*Hordeum vulgare* L.) and fennel (*Foeniculum vulgare* L.) intercropping. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 16(2), 77-90. (In Persian with English abstract).
24. Kiani, S., Moradi Telavat, M. R., Siadat, S. A., Abdali Mashhadi, A. R., & Sari, M. (2015). Evaluation of qualitative and quantitative of forage yield in intercropping of barley and fennel at different levels of nitrogen. *Journal of Agricultural Crops*, 16(4), 973-986. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jci.2015.53591>
25. Lebaschy, M. H., Sharifi Ashoorabadi, E., & Bakhtiary, M. (2010). The effects of plant densities on yields of *Foeniculum vulgare* Mill. under dry farming. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 26(1), 121-132. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2010.6987>
26. Lemaire, G., Jeuffroy, M. H., & Gastal, F. (2008). Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage: Theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy*, 28(4), 614-624. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.01.005>
27. Lopes-Lutz, D., Alviano, D. S., Alvino, C. S., & Kolodziejczyk, P. P. (2008). Screening of chemical composition,

- antimicrobial and antioxidant activities of *Artemisia* essential oils. *Phytochemistry*, 69, 1732-1738.
28. Lopez-Bellido, R. J., & Lopez-Bellido, L. (2001). Efficiency of nitrogen in wheat under Mediterranean conditions: Effect of tillage, crop rotation and N fertilization. *Field Crops Research*, 71, 31-46. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00146-0](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00146-0)
 29. Losak, T., & Richter, R. (2004). Split nitrogen doses and their efficiency in poppy (*Papaver somniferum* L.) nutrition. *Plant, Soil and Environment*, 50(11), 484-488. <http://dx.doi.org/10.17221/4062-PSE>
 30. Mahfouz, S. A., & Sharaf-Eldin, M. A. (2007). Effect of mineral vs. biofertilizer on growth, yield, and essential oil content of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.). *International Agrophysics*, 21, 361-366. <http://dx.doi.org/10.1055/s-2007-987419>
 31. Mahgoub, H. M., Rawia, A., & Bedour, A. (2006). Response of Iris bulbs grown in sandy soil to nitrogen and potassium fertilization. *Journal of Applied Sciences Research*, 2(11), 899-903.
 32. Makvandi, M., Bakhshandeh, A. M., Moshtatti, A., Moradi Telavat, M. R., & Khodaei Joqan, A. (2024). The effect of combined use of nitrogen fertilizer and sugarcane residue compost on wheat grain qualitative traits and yield under terminal heat stress conditions in Ahwaz. *Journal of Crops Improvement*, 26(1), 51-74. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jci.2023.358472.2810>
 33. Makvandi, M., Bakhshandeh, A.M., Moshtatti, A., Moradi Telavat, M. R., & Khodaei Joqan, A. (2025). The effect of nitrogen fertilizer and sugarcane residue compost on soil physicochemical properties and wheat grain yield under terminal heat stress in Ahwaz. *Journal of Plant Production*. 48 (3), 383-399. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22055/ppd.2025.48005.2209>
 34. Malakouti, M. J., & Tehrani, M. M. (1999). Effects of Micronutrients on the Yield and Quality of Agricultural Products: Micro Elements with Macro Impact. Publications of Tarbiat Modares University, Tehran. p. 398. (In Persian).
 35. Marschner, H. (1993). Zinc uptake from soil: 59-77. In: A. D. Robon (Ed.). Zinc in Soils and Plants. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 208 p. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0878-2_5
 36. Marschner, H. (1986). Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, 889 p.
 37. Miller, G. W., Huang, L. J., Welkie, G. I. N., & Pushmik, J. C. (1995). Function of iron in plants with special emphasis on chloroplasts and photosynthetic activity: 19-28. In: T. Abadia (Ed.). Iron Nutrition in Soils and Plants. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 401 p. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0503-3_4
 38. Mirshekari, B., & Farahvash, F. (2009). Irrigation management and nitrogen fertilization in fennel in a semiarid climate quarterly. *Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 27(4), 541-550. (In Persian with English abstract). [10.22092/ijmapr.2012.4503](https://doi.org/10.22092/ijmapr.2012.4503)
 39. Modhej, A., Naderi, A., Emam, Y., Aynehband, A., & Normohammadi, G. (2008). Effect of different nitrogen levels on grain yield, grain protein content and agronomic nitrogen use efficiency in wheat genotypes under optimum and post-anthesis heat stress conditions. *Journal of Seed and Plant Production*, 25(4), 353-371. (In Persian with English abstract).
 40. Mollavali, M., Bolandnazar, S., & Tabatabaei, S. J. (2011). Effect of ammonium nitrate and potassium sulfate on concentration of some nutrients in onion. *Journal of Horticultural Sciences*, 25(1), 101-108. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v1390i1.9755>.
 41. Mona, Y., Kandil, A. M., & Swaefy Hend, M. F. (2008). Effect of three different compost levels on fennel and salvia growth character and their essential oils. *Biological Sciences*, 4, 34-39.
 42. Moradi Telavat, M. R., Ghatei, A., Olfati, R., Ghasemi, Z., & Ahmadi, F. (2019). The effect of nitrogen application on the response of growth, yield and nitrogen uptake of fennel to different levels of planting density. 16th Iranian Congress of Agricultural Sciences and Plant Breeding. Khuzestan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Mullasani, Ahvaz. (In Persian).
 43. Movaghatian, A., Fateh, E., Ayneband, A., & Siahpoosh, A. (2014). Effect of different soil fertilizing methods on soil properties, nutrient uptake and quantitative and qualitative yield of fennel (*Foeniculum vulgare* Miller.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 31(3), 512-526. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2015.101922>
 44. Movaghatian, A., Fateh, E., Ayneband, A., & Siahpoosh, A. (2014). Investigation of integrated mineral nutrient management on yield and yield components of fennel (*Foeniculum vulgare*). *Journal of Herbal Products*, 37(2) 113-126. (In Persian with English abstract)

45. Murphy, J., & Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27(1), 31-36. [https://doi.org/10.1016/0003-2670\(62\)80017-7](https://doi.org/10.1016/0003-2670(62)80017-7)
46. Noshad, H., Mohammadian, R., Khayamim, S., & Hamdi, F. (2015). Effect of amino acid containing organic fertilizers on nitrogen use efficiency and qualitative and quantitative properties of sugar beet. *Sugar Beet Scientific Journal*, 30(2), 167-181. (In Persian with English abstract). [10.22092/jsb.2015.11551](https://doi.org/10.22092/jsb.2015.11551)
47. Olsen, S. R., & Sommer, L. E. (1982). Phosphorus. In: A. L. Page, R. H. Miller, & D. R. Keeney (Ed). *Methods of Soil Analysis: Chemical and Microbiological Properties*, Part 2. 2nd Ed. Agron. Monogr. No. 9. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI. pp. 403-430. <https://doi.org/10.2131/agronmonogr9.2.2ed.c24>
48. Omid Beigi, R., & Hasani Malayeri, S. (2007). Investigating the effect of nitrogen and planting density on the fertility of the medicinal plant of Zardband variety of cow-chamomile. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 1-38(2), 309-303. (In Persian with English abstract).
49. Omid Beigi, R. (2007). *Approaches to Production and Processing of Medicinal Plants*. Astan Quds Razavi Publications, 397 p.
50. Omid Beigi, R. (2013). *Approaches to the Production and Processing of Medicinal Plants*. Publication of Astan Quds Razavi, Mashhad, Iran. 6(2), 423 p.
51. Ratti, N., Kumar, S., Verma, H. N., & Gautam, S. P. (2001). Improvement in bioavailability of tricalcium phosphate to *Cymbopogon martinii* var. Motia by rhizobacteria, AMF and *Azospirillum* inoculation. *Microbiological Research*, 156, 145-149. <https://doi.org/10.1078/0944-5013-00095>
52. Rezaei Chianeh, E., Pirzad, A., & Farjami, A. (2014). Effect of nitrogen, phosphorus and sulfur supplier bacteria on seed yield and essential oil of cumin (*Cuminum cyminum* L.). *Journal of Agricultural Knowledge and Sustainable Production*, 24(4), 71-83. (In Persian with English abstract).
53. Rezvani Moghadam, P., AminGhafouri, A., Bakhshaei, S., & Jafari, L. (2013). The effect of organic and biofertilizers on some quantitative characteristics and essential oil content of summer savory (*Satureja hortensis* L.). *Journal of Agricultural Ecology*, 5(2), 105-112. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jag.v5i2.24460>
54. Rouhanipour, A. (2010). Investigating the effect of silicon on corn (*Zea mays*) grown under salinity stress conditions and hydroponic culture. M.Sc. Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
55. Sefidkon, F. (2001). Essential oil content and chemical composition of *Foeniculum vulgare* Mill. at different stage of plant growth. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 10(1), 85-104. (In Persian with English abstract).
56. Shabahang, J., Khorramdel, S., & Gheshm, R. (2013). Evaluation of symbiosis with mycorrhizal on yield, yield components and essential oil of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) and ajowan (*Carum copticum* L.) under different nitrogen levels. *Journal of Agricultural Ecology*, 5(3), 289-298. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jag.v5i3.29001>
57. Shafeei, S., Majidian, M., Mohsenabadi, G., & Kiuomarsi, H. (2023). Effect of nitrogen and manure application on agronomic traits and essential oil content of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.). *Journal of Environmental Research and Technology*, 14(8), 147-161. (In Persian with English abstract). <http://dx.doi.org/10.61186/jert.43867.8.14.147>
58. Shahat, A. A., Ibrahim, A. Y., Hendawy, S. F., Omer, E. A., Hammouda, F. M., Abdel-Rahman, F. H., & Saleh, M. A. (2011). Chemical composition, antimicrobial and antioxidant activities of essential oils from organically cultivated fennel cultivars. *Molecules*, 16(2), 1366-1377. <https://doi.org/10.3390/molecules16021366>
59. Shamisi, A., Khodayi Joghani, A., Lotfi Jalalabadi, A., & Qarineh, M. H. (2022). Assessing yield response of quinoa to sugarcane residue compost and *Trichoderma asperelloides* fungi and *Bacillus subtilis* bacteria inoculation. *Journal of Agricultural Sciences and Sustainable Production*, 32(4), 83-97. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22034/saps.2022.48683.2760>
60. Siadat, S. A., & Moradi Telavat, M. R. (2018). *Practical Aspects of Organic Agriculture*. Agricultural Education and Extension Publications of Tehran, Tehran, Iran. 233 p. (In Persian).
61. Tabrizi, L. (2005). The effect of moisture and manure on quantitative and qualitative characteristics of Fleawort. MSc. Thesis. Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
62. Vali Beigi, A., & Adavi, Z. (2017). Effects of of nitrogen fertilizer and growth promoting rhizobacteria on yield and yield component of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.). *Journal of Plant Ecophysiology*, 11(37), 162-153. (In Persian)

- with English abstract).
63. Waling, I., Van Vark, W., Houba, V. J. G., & Van der Lee, J. J. (1989). Soil and plant analysis, a series of syllabi. Plant analysis procedures, Part 7. Wageningen, the Netherlands: Department of Soil Science and Plant Nutrition, Wageningen Agricultural University.
64. Zortea, R. B., Maciel, V. G., & Passuello, A. (2018). Sustainability assessment of soybean production in Southern Brazil: A life cycle approach. *Sustainable Production and Consumption*, 13, 102-112. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2017.11.002>



Development of a Cropping Pattern for Major Agricultural Products of the Jiroft Plain Based on Water Footprint and Life Cycle Assessment (LCA)

Mojtaba Mandegari Kohan^{1*}, Halimeh Piri^{1*} and Mahdi Keykha^{1*}

1- Department of Water Engineering, College of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

(* - Corresponding author's Email: h_piri2880@uoz.ac.ir)

Received: 03-01-2026
Revised: 04-05-2026
Accepted: 09-05-2026
Available Online: 04-04-2026

How to cite this article:

Mandegari Kohan, M., Piri, H., & Keykha, M. (2026). Development of a cropping pattern for major agricultural products of the Jiroft plain based on Water Footprint and Life Cycle Assessment (LCA). *Journal of Agroecology*, 18(1), 139-164. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.97323.1267>

Introduction

Due to the adverse impacts of agricultural production activities on the environment, particularly water and soil pollution, and pressure on limited natural resources, determining an optimal cropping pattern is one of the most important management decisions. Such a decision should be made in a way that, while maintaining crop productivity and satisfactory yields, minimizes the environmental impacts associated with the use of fertilizers, pesticides, and water. Simultaneous assessment of environmental impacts and water consumption can provide valuable guidance for sustainable cropping planning in arid and water-scarce regions. The objective of this study was to evaluate the environmental impacts and water consumption of eight major agricultural crops: barley, wheat, canola, maize, cucumber, onion, potato, and tomato in the arid region of Jiroft using the Life Cycle Assessment (LCA) approach and analysis of green, blue, and grey water footprints.

Materials and Methods

To this end, data on input consumption, including chemical fertilizers, pesticides, fuel, and energy, as well as crop yields, were collected, and environmental impacts were calculated in three categories: human health, ecosystem quality, and resource depletion. For accurate estimation of crop water requirements and green and blue water footprints, climatic and precipitation data for the period 1993–2023 obtained from the Iranian Meteorological Organization were used, and actual crop water consumption was calculated based on effective rainfall, evapotranspiration, and crop growth period. The grey water footprint was also determined based on chemical fertilizer use and its potential impacts on water quality.

Results and Discussion

The results showed that cereal and oilseed crops such as canola, wheat, barley, and maize imposed the highest environmental burdens. Canola exhibited the greatest negative impact with a single-score value of 86.19 points, compared with cucumber (4.09 points) and onion (5.65 points). In the human health category, canola caused the highest damage (65.23 points), whereas vegetables and tuber crops showed much lower impacts. Regarding ecosystem quality, canola had the highest negative effect (20.25 points), while barley showed the lowest impact (0.33 points). In terms of resource depletion, wheat contributed the most (0.289 points), followed by canola (0.176 points). Water footprint analysis indicated that cereals had the highest blue and grey water consumption, with total



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

 <https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.97323.1267>

water footprints of barley and wheat reaching 2508.19 and 2164.57 $\text{m}^3.\text{t}^{-1}$, respectively, whereas vegetables and tuber crops such as potato had the lowest water footprint ($182.41 \text{ m}^3.\text{t}^{-1}$). The combined results of LCA and water footprint analysis consistently demonstrated that input-intensive and water-demanding crops such as canola and cereals exert substantial pressure on water resources and the environment, while vegetables and tuber crops have comparatively lower impacts.

Conclusion

Based on the LCA results and the crop's environmental burdens, cultivation priority should be given to those with the lowest environmental impacts. Accordingly, vegetables such as cucumber and onion, as well as tuber crops like potato—which exhibit significantly lower environmental burdens—should be prioritized for cultivation. Subsequently, maize and high-input cereals such as wheat and barley may be cultivated. Canola, due to its high environmental burden, should be placed last in the cropping priority and cultivated only under careful management of inputs and water resources in order to reduce pressure on the ecosystem and the region's limited resources. According to the results, the water footprint and Life Cycle Assessment (LCA) analyses provide consistent and complementary findings. Crops with higher environmental burdens in the LCA, such as canola and cereals, also exhibit the highest blue and grey water consumption, exerting greater pressure on the region's water resources. In contrast, crops with lower environmental burdens, such as vegetables and tuber crops, have smaller water footprints and place less strain on water resources. Based on these findings, prioritizing the cultivation of low-impact crops along with optimized management of inputs and water resources can significantly reduce environmental burdens and water consumption. This study demonstrates that integrating Life Cycle Assessment (LCA) with water footprint analysis is an effective tool for sustainable agricultural planning and for reducing pressure on limited environmental resources.

Keywords: Ecosystem health, Environmental sustainability, Resource depletion, Sustainable cultivation pattern, Water resources management

مقاله پژوهشی

جلد ۱۸، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص ۱۶۴-۱۳۹

تدوین الگوی کشت محصولات عمده کشاورزی دشت جیرفت براساس ردپای آب و ارزیابی چرخه حیات LCA

مجتبی ماندگاری کهن^۱، حلیمه پیری^{۱*} و مهدی کیخا^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۹

چکیده

هدف این مطالعه، بررسی اثرات زیست‌محیطی و مصرف آب در هشت محصول عمده کشاورزی جیرفت با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات (LCA) و تحلیل ردپای آب می‌باشد. برای این منظور، داده‌های مصرف نهاده‌ها شامل کودهای شیمیایی، سموم دفع آفات، سوخت و انرژی، و عملکرد محصول جمع‌آوری و اثرات زیست‌محیطی در سه دسته سلامت انسان، بوم‌نظام و تخلیه منابع بررسی شد. برای انجام کار، ابتدا ردپای آب آبی، سبز و خاکستری محصولات محاسبه شد و سپس برای ارزیابی پایداری زیست‌محیطی سیستم‌های کشت و تولید محصول، از شاخص ارزیابی چرخه حیات (LCA) برپایه استاندارد ISO 14040 استفاده گردید. نتایج تحلیل LCA بیانگر آن بود که محصولات دانه‌ای و روغنی از جمله کلزا (*Brassica napus*)، گندم (*Triticum aestivum*)، جو (*Hordeum vulgare*) و ذرت (*Zea mays*) در مقایسه با سایر محصولات بررسی شده، فشار زیست‌محیطی بیشتری بر منابع طبیعی وارد می‌کنند. به‌طور مشخص، کلزا با ۸۶/۱۹ Pt به‌عنوان پراثرترین محصول از نظر پیامدهای زیست‌محیطی شناسایی شد، درحالی‌که خیار و پیاز با مقادیر ۴/۰۹ Pt و ۵/۶۵ Pt در پایین‌ترین سطح اثرات زیست‌محیطی قرار گرفتند. در دسته سلامت انسان، کلزا با ۶۵/۲۳ Pt بیشترین آسیب را ایجاد کرد، درحالی‌که سبزیجات و گیاهان غده‌ای اثرات بسیار پایین‌تری داشتند. در زمینه بوم‌نظام، کلزا با ۲۰/۲۵ Pt بالاترین اثر منفی و جو با ۰/۳۳ Pt پایین‌ترین اثر را داشت. در تخلیه منابع، گندم با ۰/۲۸۹ Pt بیشترین سهم را داشت و کلزا با ۰/۱۷۶ Pt در رتبه بعدی قرار گرفت. تحلیل ردپای آب نشان داد که غلات بیشترین مصرف آب آبی و خاکستری را دارند، به‌طوری‌که ردپای آب کل جو و گندم به‌ترتیب ۲۵۰۸/۱۹ و ۲۱۶۴/۵۷ مترمکعب بر تن بود، درحالی‌که سبزیجات و گیاهان غده‌ای مانند سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum*) با ۱۸۲/۴۱ مترمکعب بر تن کمترین ردپای آب را داشتند. نتایج LCA و ردپای آب به‌طور همسو نشان دادند که محصولات پرنهاده و پرمصرف مانند کلزا و غلات فشار بالایی بر منابع آب و محیط زیست وارد می‌کنند، درحالی‌که سبزیجات و گیاهان غده‌ای کم‌اثر هستند.

واژه‌های کلیدی: الگوی کشت پایدار، پایداری زیست‌محیطی، تخلیه منابع، سلامت بوم‌نظام، مدیریت منابع آب

مقدمه

در صد از برداشت آب جهانی را به خود اختصاص داده است (FAO, 2017). این بخش علاوه بر نقش حیاتی در تأمین امنیت غذایی، از ارکان اصلی اقتصاد، اشتغال‌زایی و توسعه پایدار در بسیاری از کشورها محسوب می‌شود. با این حال، وابستگی شدید تولیدات کشاورزی به منابع آبی محدود، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، چالش‌های

رشد جمعیت جهانی، تغییر الگوهای مصرف غذایی و تشدید اثرات تغییر اقلیم موجب افزایش فشار بر منابع طبیعی به‌ویژه منابع آب شیرین شده است. در این میان، بخش کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب شیرین در سطح جهان، سهمی حدود ۷۰ تا ۷۵

۱- گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران
(Email: h_piri2880@uoz.ac.ir)
(*)- نویسنده مسئول:

جدی در زمینه پایداری ایجاد کرده است.

در بسیاری از این مناطق، تداوم الگوهای کشت سنتی و فاقد انطباق با ظرفیت‌های واقعی منابع آب منجر به برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، افت سطح آبخوان‌ها، افزایش شوری خاک و تخریب تدریجی بوم‌نظام‌های کشاورزی شده است (Gleeson et al., 2012). این روند نه تنها پایداری تولید را تهدید می‌کند، بلکه امنیت غذایی نسل‌های آینده را نیز در معرض خطر قرار می‌دهد. در چنین شرایطی، مدیریت بهینه منابع آب و بازنگری در الگوهای تولید کشاورزی به یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است.

یکی از چالش‌های اساسی در این حوزه، عدم تطابق بین الگوی کشت و ظرفیت‌های بوم‌شناختی و هیدرولوژیکی مناطق مختلف است. در بسیاری از موارد، انتخاب محصولات کشاورزی نه براساس معیارهای علمی مرتبط با مصرف آب و پایداری محیط‌زیست، بلکه تحت تأثیر عوامل اقتصادی کوتاه‌مدت یا الگوهای سنتی انجام می‌شود. این مسئله موجب شده است که فشار مضاعفی بر منابع آب وارد شده و در کنار آن، مصرف بیش از حد نهاده‌های شیمیایی نیز آثار زیست‌محیطی گسترده‌ای ایجاد کند (Nemecek et al., 2008; Bylin et al., 2019).

از این منظر، حرکت به‌سوی کشاورزی پایدار مستلزم استفاده بهینه از منابع تولید به‌ویژه آب و زمین، و طراحی الگوهای کشت مبتنی بر ظرفیت‌های محیطی است. در این چارچوب، استفاده از ابزارهای کمی برای ارزیابی مصرف منابع و اثرات زیست‌محیطی محصولات کشاورزی اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. این ابزارها می‌توانند مبنای علمی لازم را برای تصمیم‌گیری در سطح مزرعه تا سیاست‌گذاری کلان فراهم کنند.

یکی از مهم‌ترین شاخص‌های توسعه‌یافته در این زمینه، مفهوم «ردپای آب» است. ردپای آب به‌عنوان شاخصی جامع، میزان مصرف مستقیم و غیرمستقیم آب در فرآیند تولید کالاها و خدمات را در سه مؤلفه آب سبز، آب آبی و آب خاکستری اندازه‌گیری می‌کند (Hoekstra et al., 2011). این شاخص نه تنها مصرف واقعی آب را در سطح تولید نشان می‌دهد، بلکه اثرات ناشی از آلودگی آب را نیز در نظر می‌گیرد و از این جهت ابزاری مناسب برای تحلیل فشار وارد بر منابع آب محسوب می‌شود.

ردپای آب به‌دلیل ماهیت چندبعدی خود، امکان مقایسه بین

محصولات مختلف کشاورزی را فراهم کرده و می‌تواند نقش مهمی در اصلاح الگوی کشت ایفا کند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که محصولات کشاورزی از نظر میزان ردپای آب، تفاوت‌های قابل توجهی دارند و انتخاب نادرست ترکیب کشت می‌تواند منجر به اتلاف گسترده منابع آبی شود (Mekonnen & Hoekstra, 2014). بنابراین، استفاده از این شاخص در برنامه‌ریزی کشاورزی می‌تواند به بهبود بهره‌وری آب و کاهش فشار بر منابع طبیعی کمک کند.

در مطالعات داخلی نیز نتایج مشابهی گزارش شده است. برای مثال، بررسی ردپای آب و بهره‌وری مصرف آب در محصولات مختلف در اقلیم‌های ایران نشان داده است که شرایط اقلیمی نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی مصرف آب دارد و برخی مناطق از نظر تولید محصولات خاص، کارایی بالاتری دارند (Piri & Mobaraki, 2021). همچنین در مطالعه‌ای در استان سیستان و بلوچستان، تفاوت قابل توجهی بین محصولات زراعی و باغی از نظر ردپای آب مشاهده شد، به‌طوری‌که برخی از محصولات مانند گندم و پسته^۱ دارای بالاترین میزان مصرف آب بودند (Piri & Sarani, 2020). این نتایج نشان می‌دهد که مدیریت منطقه‌ای الگوی کشت براساس شاخص‌های کمی می‌تواند نقش مهمی در کاهش فشار بر منابع آب ایفا کند.

با وجود اهمیت بالای ردپای آب، این شاخص به‌تنهایی قادر به پوشش تمامی اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید محصولات کشاورزی نیست. فرآیند تولید در بخش کشاورزی علاوه بر مصرف آب، شامل مصرف انرژی، استفاده از نهاده‌های شیمیایی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و ایجاد اثرات منفی بر خاک و بوم‌نظام‌های طبیعی است. بنابراین، تحلیل جامع پایداری نیازمند رویکردی گسترده‌تر از صرفاً ارزیابی مصرف آب است.

در این راستا، «ارزیابی چرخه حیات (LCA)» به‌عنوان رویکردی استاندارد و جامع برای بررسی اثرات زیست‌محیطی محصولات در کل زنجیره تولید مطرح شده است. این روش، تمامی مراحل چرخه عمر یک محصول، از استخراج مواد اولیه، تولید، مصرف تا دفع نهایی را مورد ارزیابی قرار می‌دهد (ISO 14040, 2006; Pennington et al., 2004). ارزیابی چرخه حیات امکان بررسی هم‌زمان شاخص‌هایی مانند پتانسیل گرمایش جهانی، مصرف انرژی فسیلی، اسیدی شدن و اوتریفیکاسیون را فراهم می‌کند و در نتیجه تصویری جامع از اثرات زیست‌محیطی ارائه می‌دهد (Guinée et al., 2011).

دشت جیرفت با طول جغرافیایی ۵۷ درجه و ۲۵ دقیقه شمالی و عرض جغرافیایی ۲۷ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی در جنوب شرقی ایران در استان کرمان واقع شده است. وسعت این دشت ۲۲۳۹/۲ کیلومتر مربع و ارتفاع آن از سطح دریا بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ متر متغیر است. متوسط بارش سالانه آن ۱۷۰ میلی‌متر و متوسط رطوبت نسبی سالیانه در این منطقه ۵۵ درصد است. این شهرستان به علت قرار گرفتن در عرض‌های جنوبی کشور و واقع شدن در ارتفاع نه چندان بالا، دارای تابستان‌های گرم و رطوبت نسبی بالا و زمستان‌هایی معتدل و کوتاه است. درجه حرارت آن بین ۴- تا ۴۸+ درجه سانتی‌گراد متغیر می‌باشد. هلیل رود به طول ۴۰۰ کیلومتر، تنها رود دائمی استان کرمان است که از کوهستان‌های اطراف سرچشمه گرفته از مرکز شهر جیرفت می‌گذرد و برای بخش کشاورزی این منطقه بسیار حائز اهمیت است. ۵۰ درصد از سطح زیرکشت این شهرستان را باغات و ۵۰ درصد را محصولات زراعی که عمده آن گندم، جو، کلزا، ذرت، سورگوم^۱، شبدر^۲، سیر^۳، پیاز^۴، گوجه فرنگی^۵، خیار^۶ و سیب‌زمینی می‌باشد. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

محاسبه نیاز آبی گیاهان

از بین محصولات زراعی کشت‌شده دشت جیرفت، هشت محصول عمده شامل گندم، جو، کلزا، ذرت، گوجه‌فرنگی، سیب‌زمینی، خیار و پیاز انتخاب شد. سپس اطلاعات هواشناسی در دوره مطالعاتی ۱۳۷۲-۱۴۰۲ از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. اطلاعات مربوط به کودهای مصرفی و عملکرد هر محصول از سازمان جهاد کشاورزی استان کرمان اخذ گردید. برای برآورد حجم ردپای آب سبز، آبی، خاکستری محصولات مورد مطالعه از روش هوکسترا و چاپاگین (Hoekstra & Chapagain, 2008) در دوره آماری ۱۳۹۲ تا ۱۴۰۲ استفاده شد. برای محاسبه ردپای آب، تبخیر و تعرق گیاهان از روش فائوپن‌مانتیت و با استفاده از نرم‌افزار CROPWAT محاسبه شد.

مطالعات نشان داده‌اند که برخی از محصولات کشاورزی با وجود مصرف پایین آب، دارای اثرات زیست‌محیطی بالایی از نظر انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند، درحالی‌که برخی دیگر ممکن است ردپای آب بالایی داشته، اما از نظر سایر شاخص‌های محیطی عملکرد بهتری داشته باشند (Notarnicola et al., 2017). این موضوع نشان می‌دهد که تکیه بر یک شاخص منفرد برای ارزیابی پایداری کافی نیست.

در سال‌های اخیر، رویکرد تلفیقی ردپای آب و ارزیابی چرخه حیات به‌عنوان یک چارچوب نوین برای تحلیل جامع پایداری سیستم‌های کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است. ریدوت و پفیستر (Ridoutt & Pfister, 2010) نشان دادند که ترکیب این دو شاخص می‌تواند درک دقیق‌تری از ارتباط بین مصرف آب و سایر اثرات زیست‌محیطی فراهم کند. همچنین مطالعات دیگری تأکید کرده‌اند که این رویکرد تلفیقی می‌تواند به بهینه‌سازی الگوی کشت، افزایش بهره‌وری منابع و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی منجر شود (Zhang et al., 2018; Xu et al., 2019).

با وجود پیشرفت‌های علمی در این حوزه، کاربرد عملی این رویکردهای تلفیقی در فرآیند برنامه‌ریزی کشاورزی هنوز محدود است و در بسیاری از مناطق، الگوهای کشت بدون در نظر گرفتن تحلیل جامع زیست‌محیطی تدوین می‌شوند. این شکاف علمی و کاربردی نشان‌دهنده نیاز به توسعه چارچوب‌های یکپارچه برای تصمیم‌گیری در حوزه مدیریت منابع آب و کشاورزی پایدار است. در مجموع، استفاده هم‌زمان از شاخص ردپای آب و ارزیابی چرخه حیات می‌تواند مبنای علمی مناسبی برای طراحی الگوی کشت بهینه فراهم کند. این رویکرد نه تنها به کاهش مصرف منابع آب و بهبود بهره‌وری کمک می‌کند، بلکه زمینه‌ساز کاهش اثرات زیست‌محیطی، افزایش تاب‌آوری سیستم‌های کشاورزی و حرکت به‌سوی توسعه پایدار خواهد بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

4- Onion (*Allium cepa*)

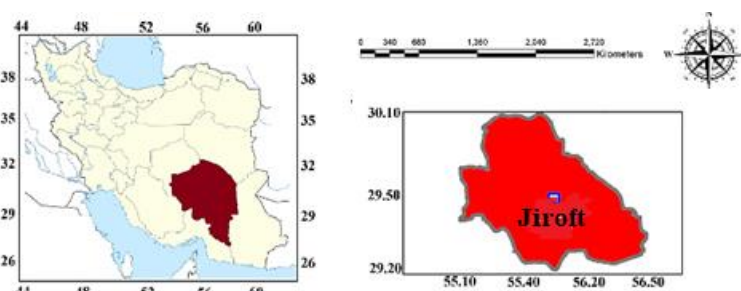
5- Tomato (*Solanum lycopersicum*)

6- Cucumber (*Cucumis sativus*)

1- Sorghum (*Sorghum bicolor*)

2- Clover (*Trifolium spp.*)

3- Garlic (*Allium sativum*)



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Fig. 1- Geographical location of the study area

بنابراین ردپای آب کل^۴ به صورت معادله ۳ بیان می‌گردد.

$$WF_t = WF_{green} + WF_{blue} + WF_{gray} \quad \text{معادله (۳)}$$

که در آن: WF_t : رد پای کل، WF_{green} : رد پای آب سبز، WF_{blue} : رد پای آب آبی و WF_{gray} : رد پای آب خاکستری می‌باشد. هر کدام از اجزای رد پای آب به شرح زیر محاسبه گردید:

ردپای آب سبز

مصرف آب در این دوره با توجه به محاسبه تبخیر و تعرق گیاه در طول دوره رشد، مورد بررسی قرار گرفت که در نهایت به صورت عددی با واحد مترمکعب بر تن بیان می‌شود. رد پای آب سبز محصول با استفاده از معادله ۴ محاسبه شد.

$$WF_{green} = \frac{CWU_{green}}{Y} \quad \text{معادله (۴)}$$

که در آن، WF_{green} : رد پای آب سبز (مترمکعب بر تن)، Y : عملکرد گیاه (تن در هکتار) است که بسته به نوع محصول به صورت عملکرد تر یا عملکرد خشک در نظر گرفته می‌شود و CWU_{green} : مقدار مصرف آب سبز گیاه (مترمکعب در هکتار) می‌باشد.

مقدار مصرف آب سبز گیاه از مجموع تبخیر و تعرق روزانه در طی فصل رشد گیاه به دست می‌آید (معادله ۵).

$$CWU_{green} = 10 \times \sum_{d=1}^T ET_{green} \quad \text{معادله (۵)}$$

که در آن، T : طول دوره رشد گیاه (روز)، ET_{green} : تبخیر و تعرق آب سبز (میلی‌متر در سال)، عدد ۱۰: تبخیر و تعرق را از میلی‌متر (ارتفاع) به حجم آب در سطح زمین (مترمکعب در هکتار) تبدیل می‌کند.

در این معادله فرض شده است که تنها وقتی آب سبز موجود در

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_d U_2)} \quad \text{معادله (۱)}$$

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad \text{معادله (۲)}$$

که در آن، ET_0 : تبخیر و تعرق مرجع (mm.day^{-1}), ET_c : تبخیر و تعرق گیاه (mm.day^{-1}), K_c : ضریب گیاهی، Rn : تابش خالص ورودی به سطح گیاه ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$), G : شار گرمای خاک ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$), T_{mean} : میانگین دمای هوای روزانه ($^{\circ}\text{C}$), U_2 : میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین (m.s^{-1}), e_s : فشار بخار اشباع (KPa), e_a : فشار بخار واقعی (KPa), $e_s - e_a$: کمبود فشار بخار اشباع (KPa), Δ : شیب منحنی فشار بخار اشباع ($\text{KPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ : ضریب سایکرومتری ($\text{KPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$), C_n : ضریبی برای گیاه مرجع که مقدار آن ۹۰۰ می‌باشد ($\text{kg}^{\circ}\text{K.kj}^{-1}.\text{day}^{-1}$), C_d : ضریب باد برای گیاه مرجع که مقدار آن $0.34 / (\text{s.m}^{-1})$ می‌باشد و K_c : ضریب گیاهی است که از نشریه فائو ۵۶ اقتباس شده است.

محاسبات ردپای آب

اجزای رد پای آب در این تحقیق شامل رد پای آب سبز^۱، رد پای آب آبی^۲ و رد پای آب خاکستری^۳ می‌باشد. رد پای آب آبی، به حجم آب آبیاری مصرفی (آب‌های سطحی و زیرزمینی) که جهت تولید محصول به گیاه داده می‌شود، اشاره دارد. رد پای آب سبز، به سهم آب حاصل از بارندگی مؤثر مرتبط است و به حجم آبی اطلاق می‌شود که در مناطق غیراشباع خاک به صورت رطوبت خاک ذخیره می‌شود و گیاه از آن استفاده می‌کند. رد پای آب خاکستری، به حجمی از آب شیرین اطلاق می‌شود که برای از بین بردن آلودگی‌های ایجاد شده ناشی از کشت گیاه و تولید محصول در محیط استفاده شده‌اند، مورد نیاز است.

همکاران (Hoekstra et al., 2011) می‌باشد. آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا با توجه به پژوهش چاپاگین و همکاران (Chapagain et al., 2006)، حداکثر غلظت مجاز نیتروژن در منابع آب سطحی و زیرزمینی را ۱۰ میلی گرم بر لیتر توصیه کرده است. این استاندارد از زمانی اتخاذ شد که آب‌های ناشی از فعالیت کشاورزی دوباره جمع‌آوری می‌شدند و بعد از انتقال به منابع اولیه خود، در مصارف شهری مورد استفاده قرار می‌گرفتند. لذا لازم بود تا غلظت این عامل کمتر از یک آستانه قرار گیرد. از آنجایی که هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد غلظت طبیعی نیتروژن در آب و محیط در دسترس نبود، مقدار آن در این مطالعه صفر در نظر گرفته شد (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

$$WF_{gray} = \frac{\alpha \times NAR}{C_{Max} - C_{Nat}} \times \frac{1}{Y} \quad \text{معادله (۱۰)}$$

که در آن، α : درصد تلفات کودهای نیتروژن، NAR: مقدار مصرف کود نیتروژن برای گیاه (کیلوگرم بر هکتار)، C_{Max} : غلظت بحرانی نیتروژن (کیلوگرم بر هکتار) و C_{Nat} : غلظت نیتروژن در آب دریافت‌کننده است.

شاخص زیست‌محیطی (شاخص ارزیابی چرخه حیات (LCA))

یکی از جامع‌ترین شاخص‌ها برای ارزیابی پایداری زیست‌محیطی سیستم‌های کشت و تولید محصول، شاخص ارزیابی چرخه حیات (LCA) بر پایه استاندارد ISO 14040 می‌باشد (Nabavi et al., 2017). این روش شامل گردآوری و ارزیابی ورودی‌ها، خروجی‌ها و پیامدهای بالقوه محیط زیستی تولید نهایی یک محصول در سراسر چرخه حیات آن می‌باشد (ISO 14040, 2006). بدین ترتیب، هر مطالعه ارزیابی چرخه حیات دارای چهار مرحله تعیین هدف و حوزه مطالعه، ممیزی چرخه حیات (LCI)، ارزیابی اثر (LCIA) و تفسیر می‌باشد (Georgiopolou & Lyberatos, 2018). شکل ۲ مراحل اجرای ارزیابی چرخه حیات را نشان می‌دهد.

خاک برای استفاده گیاه کافی نباشد، گیاه از آب آبی موجود استفاده می‌کند (Yousefi et al., 2016). از این رو، تبخیر و تعرق سبز گیاه از روش ارائه‌شده توسط هوکسترا و همکاران (Hoekstra et al., 2011) به دست می‌آید (معادله ۶).

$$ET_{green} = \min(ET_c, P_e) \quad \text{معادله (۶)}$$

که در آن: ET_c : مقدار تبخیر و تعرق گیاه و P_e : مقدار باران مؤثر می‌باشد.

ردپای آب آبی

ردپای آب آبی نیز مشابه ردپای آب سبز محاسبه می‌شود و به صورت زیر ارائه می‌گردد.

$$WF_{blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \quad \text{معادله (۷)}$$

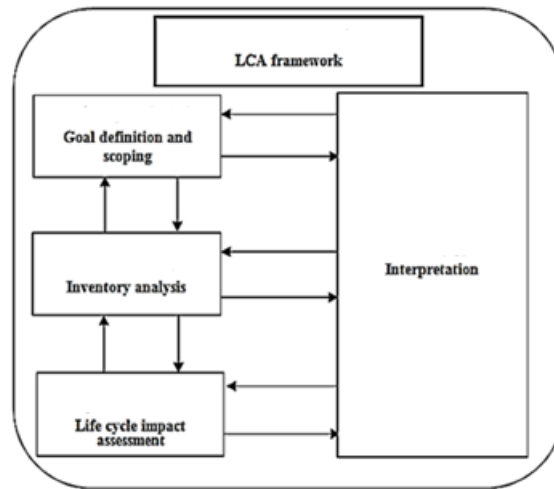
$$CWU_{blue} = 10 \times \sum_{d=1}^T ET_{blue} \quad \text{معادله (۸)}$$

$$ET_{blue} = \max(0, ET_c - P_e) \quad \text{معادله (۹)}$$

که در آن، CWU_{blue} : مقدار مصرف رد پای آب آبی گیاه (مترمکعب در هکتار) و ET_{blue} : تبخیر و تعرق آب آبی (میلی‌متر در سال) می‌باشد.

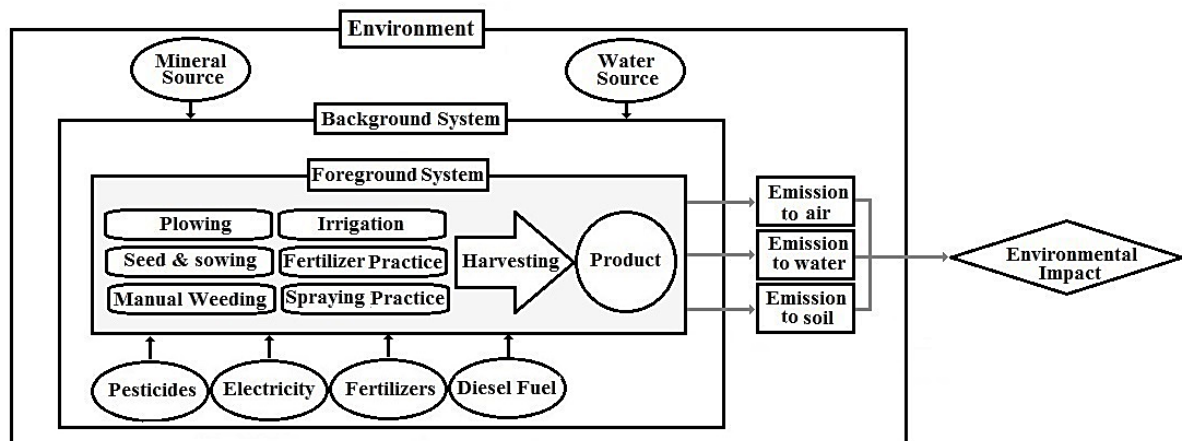
ردپای آب خاکستری

یکی دیگر از اجزای ردپای آب در تولید محصول، حجم آب مورد نیاز برای رقیق سازی کودهای کشاورزی با استفاده از رواناب یا نفوذ عمقی است که به آن آب خاکستری گفته می‌شود (Hoekstra et al., 2011). در این پژوهش، ردپای آب خاکستری تنها برای کودهای نیتروژن به عنوان منبع آلودگی آب محاسبه شده است. بدین منظور، تنها استفاده از کود از ته به عنوان منبع ایجاد آلودگی مورد مطالعه قرار گرفت. اطلاعات مربوط به میانگین میزان کود نیتروژن از جهاد کشاورزی استان گرفته شد. محاسبه براساس روش ارائه‌شده توسط چاپاگین و همکاران (Chapagain et al., 2006) و هوکسترا و



شکل ۲- مراحل اجرای ارزیابی چرخه حیات

Fig. 2- Stages of conducting a Life Cycle Assessment (LCA) (Georgiopoulou & Lyberatos, 2018)



شکل ۳- مرزهای تولید محصولات زراعی در روش ارزیابی چرخه حیات (LCA)

Fig. 3- System boundaries of agricultural product production in the Life Cycle Assessment (LCA) method (Rebitzer et al., 2004)

ارزیابی انتخاب شد (شکل ۳). واحد کارکردی نیز نشان‌دهنده معیاری کمی از عناصر تولید محصول نهایی است که اثرات محیطی بر مبنای آن محاسبه می‌گردد، باید مشخص گردد (Rebitzer et al., 2004). در این راستا، واحد کارکردی تولید یک تن از محصولات نهایی ذکر شده به ازای هر هکتار زمین در نظر گرفته شد.

تجزیه و تحلیل ورودی‌ها (LCI)

در این مرحله، کلیه ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم تولید تحت

هدف، واحد کارکردی و مرزهای سیستم

بر این اساس، در مرحله اول باید محصول نهایی، مرزهای سیستم مورد مطالعه، واحد کارکردی و در نهایت فرض‌های مطالعه مشخص گردد. برای این کار از دستورالعمل پیشنهادات سیستم داده‌های بین‌المللی چرخه حیات^۱ استفاده می‌گردد. هدف از این مطالعه، ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی تولید محصولات مختلف در شهرستان جیرفت بود. با توجه به تعداد محصولات و داده‌های در دسترس در این طرح، محدوده از تولید منابع ورودی تا خروجی مزرعه به‌عنوان محدوده

کار گرفته شده است نیز از پایگاه داده‌های Ecoinvent version 3.11 استفاده گردید.

ارزیابی اثرات (LCIA)

در مرحله ارزیابی با هدف تجزیه و تحلیل کمی، نتایج بخش ممیزی چرخه حیات در قالب سه زیربخش طبقه‌بندی، نرمال سازی و وزن‌دهی تقسیم‌بندی می‌شود (Roy et al., 2009)؛ که مرحله طبقه‌بندی لازم و دو مرحله دیگر اختیاری می‌باشد. در مرحله طبقه‌بندی، هرکدام از مقادیر به‌دست‌آمده از بخش دو، یعنی مصرف منابع فسیلی، الکتریکی، کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها و مصرف آب به اثرات زیست‌محیطی آن مرتبط می‌گردد. برای محاسبات اثرات زیست‌محیطی کشت محصولات مذکور در منطقه، از نرم‌افزار SimaPro V10.2 (Pré -Sustainability, 2018) و روش ReCiPe 2016 V1.1 (Huijbregts et al., 2017) استفاده شد. این روش که یکی از جدیدترین و به‌روزترین روش‌های ارزیابی تأثیر است، انتشارات و استخراج منابع را به تعداد محدودی از مقادیر اثرات زیست‌محیطی با استفاده از عوامل به اصطلاح مشخصه تبدیل می‌کند. عوامل مشخصه معمولاً در قالب دو سطح میانی و نقطه پایانی ارائه می‌گردد (Goedkoop et al., 2009). روش ReCiPe از این لحاظ دارای ۱۸ نقطه میانی و سه نقطه پایانی می‌باشد. شاخص‌های نقطه میانی بر مشکلات محیطی مستقل از جمله تغییر آب‌وهوا یا اسیدی شدن زمین متمرکز می‌باشد، اما شاخص‌های نقطه پایانی تأثیر زیست‌محیطی را در سه سطح تجمع بالاتر شامل ۱- تأثیر بر سلامت انسان (HT)، ۲- بوم‌نظام‌ها (EQ) و ۳- کمبود منابع (RC) نشان می‌دهند. به‌طوری‌که گرمایش جهانی، مصرف آب، تخریب لایه ازن، افزایش اوزون تروپوسفر، بیماری‌زایی، بیماری‌زایی سرطانی، تشعشع یونیزه‌کننده و پراکنش ذرات ریز موجب آسیب به سلامتی انسان می‌گردد. همچنین گرمایش جهانی، مصرف آب، اسیدی سازی خاک، سمیت آب شیرین، اوروفیکاسیون آب شیرین، اوروفیکاسیون دریایی، افزایش اوزون تروپوسفری، سمیت خاک، تغییر کاربری زمین و سمیت دریایی باعث اثر بر بوم‌نظام‌های زمینی و آبی می‌شود. در نهایت نیز تخلیه مواد معدنی و منابع فسیلی برای تولید انرژی و منابع ورودی به مزرعه موجب کاهش منابع و افزایش هزینه استخراج آن‌ها می‌شود.

بررسی که شامل داده‌های مربوط به مصرف منابع، انرژی و انتشار آلاینده‌های حاصل از هر یک از فعالیت‌های مرتبط با تولید محصولات زراعی و براساس واحد مرجع مطابق با استاندارد ISO 14040 جمع‌آوری می‌شود (Brenttrup et al., 2004). برای انجام این مرحله از دو مجموعه داده شامل پیش‌زمینه^۱ و پس‌زمینه^۲ استفاده می‌شود (Nabavi-Pelesaraei et al., 2017). پیش‌زمینه شامل همه انتشارات مستقیم ناشی از مصرف منابع ورودی برای تولید محصولات زراعی در سطح مزرعه می‌باشد که منجر به ورود این آلاینده‌ها به آب، خاک و هوا می‌شود. به‌طوری‌که در این مرحله، میزان مصرف نهاده‌های آب، گازوئیل، الکتریسیته، کودهای شیمیایی، کارگر، کود حیوانی، ماشین‌آلات کشاورزی و آفت‌کش‌ها و مقادیر آلاینده‌های انتشار یافته ناشی از کاربرد آن‌ها بر مبنای واحد عملکردی محاسبه شد. همچنین پس‌زمینه شامل انتشار آلاینده‌های ناشی از تولید منابع ورودی مصرف‌شده در سطح مزرعه است.

انتشار آلاینده‌ها در سطح مزرعه در چند بخش شامل انتشارات آلاینده‌های ناشی از احتراق گازوئیل، مصرف کودهای شیمیایی و سموم شیمیایی طبقه‌بندی شد. میزان تولید مستقیم گازهای آلاینده ناشی از مصرف یک لیتر گازوئیل براساس پایگاه داده U.S.LCI در جدول ۱ ارائه شده است (U.S.LCI, 2015). در جدول ۲ نیز ضرایب برای محاسبه انتشار مستقیم از مزرعه حاصل از کاربرد ورودی‌ها نشان داده شده است. آبشویی فسفات حاصل از مصرف کودهای فسفاته در آب‌های سطحی، آبشویی نیترات (NO_3^-) ناشی از مصرف کودهای نیترژنه به آب‌های زیرزمینی، دی‌نیترژن مونوکساید (N_2O) و آمونیاک (NH_3) حاصل از مصرف کودهای شیمیایی و انتشار اکسیدهای نیترژن (NO_x) ناشی از کاربرد کودهای نیترژنه به هوا و دی‌اکسید کربن (CO_2) ناشی از فعالیت‌های انسانی به هوا با استفاده از مدل‌های انتشار محاسبه شد. میزان انتشار سموم شیمیایی در هوا و خاک با استفاده از روش وان دن برگ و همکاران (1999) محاسبه گردید. همچنین فلزات سنگین انتشار یافته به خاک به‌واسطه کاربرد کودهای شیمیایی در جدول ۳ براساس تحقیقات دورلینگر و همکاران (Durlinger et al., 2015) و موسوی اول و همکاران (Mousavi-Avval et al., 2017) برآورد شد. برای آلاینده‌های خارج از مزرعه، حاصل از مصرف کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها، کاربرد ماشین‌آلات کشاورزی، الکتریسیته و گازوئیل که جهت تولید محصولات زراعی به

همچنین در این روش منابع مختلف عدم قطعیت و انتخاب‌های متفاوت براساس نظریه فرهنگی (Thompson et al., 1990) در سه دیدگاه یا سناریو فردگرایانه، سلسله مراتبی و برابری طلبانه گروه‌بندی می‌شوند. به‌طوری‌که دیدگاه فردگرایانه مبتنی بر اثرات کوتاه‌مدت ۲۰ ساله بوده و معتقد به تأثیر بلامنازع بر محیط زیست و سازگاری انسان است. دیدگاه سلسله مراتبی مبتنی بر اجماع علمی با توجه به چارچوب

زمانی و قابل قبول بودن سازوکارهای تأثیر در میان‌مدت (۱۰۰ سال) بنا نهاده شده است. همچنین دیدگاه برابری طلبانه بر مبنای چشم‌انداز پیشگیری و با در نظر گرفتن طولانی‌ترین بازه زمانی (۱۰۰۰ سال) قرار داده شده است (Huijbregts et al. 2017). در این مطالعه، با توجه به مدت زمان در نظر گرفته‌شده در دوره آتی، از روش فردگرایانه برای ارزیابی زیست‌محیطی مناطق مورد مطالعه استفاده شد.

جدول ۱- میزان تولید گازهای آلاینده ناشی از مصرف یک لیتر گازوئیل

Table 1- Amount of pollutant gas emissions resulting from the consumption of one liter of diesel fuel (Durlinger et al., 2015; Mousavi-Avval et al., 2017)

مشخصات Specifications	ضریب انتشار به هوا Air emission factor
آرسنیک Arsenic	6.65E-08
برلیوم Beryllium	4.99E-08
کادمیوم Cadmium	4.99E-08
دی اکسید کربن Carbon dioxide	002.73E
مونوکسید کربن Carbon monoxide	6.00E-04
کرومیوم Chromium	4.99E-08
مس Copper	9.97E-08
دیوکسین، ۲،۳،۷،۸ تتراکلرودینزوپ Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p	1.66E-12
کلراید هیدروژن Hydrogen chloride	8.38E-05
سرب Lead	1.50E-07
منگنز Manganese	9.97E-08
جیوه Mercury	4.99E-08
متان، فسیل Methane, fossil	6.10E-06

متان، دی کلرو Methane, dichloro-, HCC-30	5.36E-07
نیکل Nickel	4.99E-08
اکسید نیتروژن Nitrogen oxides	2.89E-03
ذرات معلق Particulates, > 2.5 µm, and <10 µm	1.20E-04
اتان، تتراکلر Ethene, tetrachloro	9.14E-09
فنل Phenols, unspecified	4.04E-07

جدول ۲- ضرایب مورد استفاده جهت محاسبه انتشار ناشی از مصرف منابع ورودی از سطح مزرعه

Table 2- Coefficients used to calculate emissions resulting from the consumption of input resources at the farm level

مشخصات Specifications	ضریب Coefficient	مرجع Source
انتشار ناشی از مصرف کودهای شیمیایی Emissions associated with the use of chemical fertilizers		
$\left[\frac{\text{Kg N}_2\text{O} - \text{N}}{\text{Kg N}_{\text{in fertilizers applied}}} \right]$	0.01 (to air)	(IPCC, 2006)
$\left[\frac{\text{Kg NH}_3 - \text{N}}{\text{Kg N}_{\text{in fertilizers applied}}} \right]$	0.1 (to air)	(IPCC, 2006)
$\left[\frac{\text{Kg N}_2\text{O} - \text{N}}{\text{Kg N}_{\text{in atmospheric deposition}}} \right]$	0.001 (to air)	(IPCC, 2006)
$\left[\frac{\text{Kg NO}_3^- - \text{N}}{\text{Kg N}_{\text{in atmospheric deposition}}} \right]$	0.1 (to water)	(IPCC, 2006)
$\left[\frac{\text{Kg NO}_x}{\text{Kg P}_{\text{in fertilizers applied}}} \right]$	0.02 (to water)	(IPCC, 2006)
$\left[\frac{\text{Kg P emission}}{\text{Kg N}_2\text{O}_{\text{from fertilizers and soil}}} \right]$	0.21 (to air)	(IPCC, 2006)
تبدیل انتشار Emission conversion		
Conversion from kg CO ₂ -C to kg CO ₂	$\left(\frac{44}{12} \right)$	IPCC (2006)
Conversion from kg N ₂ O-N to kg N ₂ O	$\left(\frac{44}{28} \right)$	IPCC (2006)
Conversion from kg NH ₃ -N to kg NH ₃	$\left(\frac{17}{14} \right)$	IPCC (2006)
Conversion from kg NO ₃ -N to kg NO ₃	$\left(\frac{62}{14} \right)$	IPCC (2006)
Conversion from kg P ₂ O ₅ to kg P	$\left(\frac{62}{164} \right)$	IPCC (2006)
انتشار از کارگر Emissions from labor		
$\left[\frac{\text{Kg CO}_2}{\text{man} - \text{h Human labor}} \right]$	0.7 (to air)	(Mousavi-Avval et al., 2017)

انتشار ناشی از آفت‌کش‌ها Emissions resulting from pesticides		
$\left[\frac{\text{Kg effective material}}{\text{Kg biocides}} \right]$	0.1 (to air)	(Margni et al., 2002)
$\left[\frac{\text{Kg effective material}}{\text{Kg biocides}} \right]$	0.85 (to soil)	(Margni et al., 2002)

جدول ۳- ضرایب استاندارد انتشار فلزات سنگین به خاک ناشی از مصرف کودهای شیمیایی

Table 3- Standard coefficients for heavy metal emissions to soil from chemical fertilizer application (Ecoinvent version 3.11)

کود شیمیایی Chemical fertilizer	انتشار فلزات سنگین به خاک Emission of heavy metals into soil						
	Hg	Cr	Ni	Pb	Zn	Cu	Cd
	(mg.kg ⁻¹)						
ضریب یک کیلوگرم کود نیتروژن Emission factor per kg of nitrogen fertilizer	6	26	203	5409	20.9	77.9	0.1
ضریب یک کیلوگرم کود فسفات Emission factor per kg of phosphate fertilizer	39.5	90.5	839	67	88.3	543	0.3
ضریب یک کیلوگرم کود پتاسیم Emission factor per kg of potassium fertilizer	0.1	4.8	6.2	0.8	2.5	5.8	0

$$CF_{E_{x,c,a}} = CF_{m_{x,c}} \times F_{M \rightarrow E,c,a} \quad \text{معادله (۱۳)}$$

که در آن، c: نمایانگر دیدگاه فرهنگی است، a: نشان‌دهنده ناحیه حفاظتی (سلامت انسان، بوم‌نظام‌های زمینی، بوم‌نظام‌های آب شیرین، بوم‌نظام‌های دریایی یا کمبود منابع)، x: نشان‌دهنده عامل تنش‌زا و $F_{M \rightarrow E,c,a}$: تبدیل نقطه میانی به نقطه پایانی برای دیدگاه فرهنگی c و منطقه حفاظتی a است. این عوامل نقطه میانی تا نقطه پایانی در هر دسته تأثیر ثابت هستند، زیرا سازوکارهای محیطی برای همه عوامل تنش‌زا پس از مکان تأثیر نقطه میانی در مسیر علت- معلولی یکسان در نظر گرفته می‌شوند. جدول ۴، ضرایب تبدیل عوامل میانی به نقطه پایانی برای آسیب به سلامت انسان، آسیب بوم‌نظام زمینی، آسیب بوم‌نظام آب شیرین، آسیب بوم‌نظام دریایی و کمبود منابع را برای دیدگاه فرهنگی فردگرا ارائه می‌دهد. در نهایت، نتایج اثرات زیست‌محیطی بررسی و برای هر سطح کود نیتروژن در هر دو منطقه مورد مطالعه، تفسیر منطقی ارائه شد.

در نهایت در بخش تفسیر نتایج، اثرات زیست‌محیطی مده بررسی شد. برای تجزیه و تحلیل اثرات زیست‌محیطی محصولات زراعی از نرم‌افزار SIMAPRO 10.3 استفاده شد. این نرم‌افزار می‌تواند اثرات زیست‌محیطی محصولات و خدمات را در سراسر مراحل چرخه زندگی آن‌ها اندازه‌گیری کرده و همچنین اثرات همه مراحل از استخراج مواد خام تا تولید، توزیع، استفاده و دفع را شناسایی نماید و ابزارهای حرفه‌ای را برای جمع‌آوری، ارزیابی و پایش کارایی زیست‌محیطی محصولات، فرآیندها و خدمات مهیا کند. با استفاده از ماتریس

در مرحله نرمال‌سازی، سهم اثرات زیست‌محیطی سامانه تولید هر محصول در کل اثرات زیست‌محیطی منطقه مورد مطالعه مشخص می‌گردد (Brenttrup et al., 2004).

$$N_i = \frac{I_i}{I_{i,ref}} \quad \text{معادله (۱۱)}$$

که در آن، N_i : مقدار نرمال‌شده شاخص مربوط به گروه تأثیر i به‌ازای واحد عملکردی، I_i : مقدار محاسبه شده شاخص مربوط به گروه تأثیر i و $I_{i,ref}$: مقدار شاخص مربوط به هر گروه تأثیر در شرایط مرجع در استاندارد ISO 14040 می‌باشد. همچنین در مرحله نرمال‌سازی نیز جهت مقایسه آسان‌تر مقادیر به‌دست‌آمده، شاخص‌های طبقه‌بندی گروه‌های تأثیر، بدون بُعد می‌شوند. در مرحله وزن‌دهی نیز با توجه به پتانسیلی که هر اثر زیست‌محیطی برای آسیب زدن به محیط زیست دارد، یک وزن داده می‌شود و هر گروه تأثیر که دارای پتانسیل آسیب بیشتری باشد، وزن بیشتری به آن اختصاص می‌یابد. بر این اساس، شاخص‌های نرمال‌شده با استفاده از معادله ۱۲ وزن‌دهی می‌گردند.

$$W_{ijk} = \frac{C_{ijk}}{T_{ijk}} \quad \text{معادله (۱۲)}$$

که در آن، W_{ijk} : وزن مربوط به شاخص i در منطقه j در سال k، C_{ijk} : مقدار فعلی شاخص i در منطقه j در سال k و T_{ijk} : مقدار هدف برای شاخص i در منطقه j در سال k می‌باشد.

به جهت محاسبه به فاکتورهای مشخصه نهایی (CFe)، ضرایب ارائه شده در جدول ۴ در مقادیر مشخصه میانی (CFm) ضرب شده‌اند (Huijbregts et al., 2017).

معکوس، محاسبات مربوط به نظام تولید را انجام دهد و در نتیجه استفاده از الگوریتم‌های با کارایی بسیار بالا، امکان محاسبه هزاران فرآیند مرتبط به تولید، انتقال، فراوری و بازیافت یک محصول را فراهم نماید.

نتایج و بحث

در این پژوهش ابتدا محصولات به چهار دسته دانه‌های روغنی، غلات، صیفی‌جات و گیاهان غده‌ای دسته‌بندی شدند. جدول ۵، میانگین سطح زیرکشت، نیاز آبی و عملکرد این محصولات را در دروه آماری مورد مطالعه (۱۴۰۲-۱۳۷۲) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین سطح زیرکشت اراضی کشاورزی منطقه به کشت غلات (گندم و ذرت دانه‌ای) اختصاص دارد.

متوسط ردپای آب محصولات مورد مطالعه در بخش آب سبز، آب

جدول ۴- ضرایب استاندارد تبدیل اثرات میانی به اثرات نهایی از دیدگاه فرهنگی فردگرایانه

Table 4- Standard conversion coefficients from midpoint to endpoint impacts from an individualist cultural perspective (Huijbregts et al., 2017)

اثر زیست‌محیطی Environmental impact	واحد Unit	I
سلامت انسان Human health		
تغییر اقلیم Climate change	Yr.kg ⁻¹ CO ₂ to air	8.1E-08
تخریب اوزون استراتوسفری Stratospheric ozone depletion	yr.kg ⁻¹ CFC11 to air	2.4E-04
تشعشع یونیزه‌کننده Ionizing radiation	yr.kg ⁻¹ Bq Co-60 to air	6.8E-09
پراکنش ذرات ریز Particulate matter dispersion	yr.kg ⁻¹ PM _{2.5} to air	6.3E-04
تشکیل اوزون تروپوسفری Tropospheric ozone formation	yr.kg ⁻¹ NO _x to air	9.1E-07
سرطان‌زایی Carcinogenicity	yr.kg ⁻¹ 1,4-DCB to air	3.3E-06
بیماری‌زایی غیرسرطانی Non-carcinogenic health effects	yr.kg ⁻¹ 1,4-DCB to air	6.7E-09
مصرف آب Water consumption	Yr.m ⁻³ water	3.1E-06
کیفیت بوم‌نظام خشکی Terrestrial ecosystem quality		
تغییر اقلیم Climate change	species.yr.kg ⁻¹ CO ₂ to air	5.3E-10
تشکیل اوزون تروپوسفری Tropospheric ozone formation	species.yr.kg ⁻¹ NO _x to air	1.3E-07
اسیدی شدن خاک Soil acidification	species.yr.kg ⁻¹ SO ₂ to air	2.1E-07
سمیت زمینی Terrestrial toxicity	species.yr.kg ⁻¹ 1,4- DCB to industrial soil	5.4E-08
مصرف آب Water consumption	species.yr.m ⁻³ water consumed	0
تغییر کاربری زمین Land use change	species.m ⁻² annual crop land	8.9E-09
کیفیت بوم‌نظام آبی Aquatic ecosystem quality		

آبی و آب خاکستری در جدول ۶ داده شده است. همان‌گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌گردد، سهم آب سبز در تولید محصولات منطقه بسیار پایین است که علت آن، بارندگی‌های بسیار کم و خشکسالی‌های شدید در این منطقه کویری کشور می‌باشد. در محصولات زمستانه مانند گندم، جو و کلزا، مقدار ردپای آب سبز بیشتر از سایر محصولات بود که علت آن را می‌توان به بیشتر بودن باران مؤثر در فصل کشت این محصولات نسبت داد. سهم آب سبز در محصولات خارج از فصل مانند گوجه‌فرنگی و خیار نیز بالا بود، اما بالا بودن عملکرد در واحد سطح این محصولات سبب کاهش قابل ملاحظه ردپای سبز در تولید این محصولات شده است. بنابراین می‌توان گفت که راندمان آبیاری به‌طور قابل توجهی در کاهش مقدار رد پای آب مؤثر است (Roholamini et al., 2025).

تغییر اقلیم Climate change	species.yr.kg ⁻¹ CO ₂	1.5E-14
اوروفیکاسیون آب شیرین Freshwater eutrophication	species.yr.kg ⁻¹ P to fresh water	6.1E-07
سمیت آب شیرین Freshwater toxicity	species.yr.kg ⁻¹ 1,4- DCB to fresh water	7.0E-10
مصرف آب Water consumption	species.yr.m ⁻³ water consumed	6.0E-13
کیفیت بوم‌نظام دریایی Marine ecosystem quality		
سمیت دریایی Marine toxicity	species.yr.kg ⁻¹ 1,4-DCB	1.1E-10
یوتروفیکاسیون دریایی Marine eutrophication	species.yr.kg ⁻¹ N to marine water	1.7E-09
کمبود منابع Resource depletion		
مواد معدنی Minerals	minerals USD ₂₀₁₃ \$.kg ⁻¹ Cu	0.16
سوخت فسیلی Fossil fuel	fossils3 USD ₂₀₁₃ \$.kg ⁻¹ crude oil	0.46
	USD ₂₀₁₃ \$.kg ⁻¹ hard coal	0.03
	USD ₂₀₁₃ \$.Nm ⁻³ natural gas	0.30

جدول ۵- اطلاعات محصولات کشاورزی مورد مطالعه در شهرستان جیرفت (جهاد کشاورزی شهرستان جیرفت)

Table 5- Information on the agricultural crops studied in Jiroft County (Jihad agricultural city of jiroft)

نوع محصول Crop category	محصول Crop	سطح زیرکشت Cultivated area (ha)	میانگین عملکرد Yield (t.ha ⁻¹)	کود نیتروژن Nitrogen fertilizer (kg.ha ⁻¹)	تبخیر و تعرق Evapotranspiration (mm)	باران مؤثر Effective rainfall (mm)
دانه‌های روغنی Oilseeds	کلزا Canola	375	6.56	200	376.52	72.11
غلات Cereals	گندم Wheat	43,400	4.42	200	576.68	91.77
	جو Barley	8,500	3.11	150	472.23	81.73
	ذرت دانه‌ای Grain maize	23,150	8.46	250	918.20	3.27
صیفی‌جات Vegetables	گوجه‌فرنگی Tomato	8,878	39.95	250	501.62	77.45
	خیار Cucumber	4,220	38.67	250	419.56	79.41
	پیاز Onion	13,973	58.21	200	738.86	103.23
گیاهان غده‌ای Tuber crops	سیب‌زمینی Potato	18,073	38.15	250	312.37	52.39

نشان می‌دهد که منابع آب آبی شامل آب‌های سطحی و زیرزمینی، منابع آب برای محصولات کشاورزی دشت جیرفت می‌باشند. همچنین مشاهده می‌گردد که در بین محصولات مورد مطالعه، غلات بیشترین ردپای آب را دارا بودند. بالاتر بودن ردپای آب در غلات به علت بالاتر بودن ردپای آب آبی و خاکستری در این محصولات می‌باشد. عربی و همکاران (Arabi et al., 2012) و علی‌قلی نیا همکاران

یحیی‌زاده و همکاران (Yahyazadeh et al., 2021) در برآورد ردپای آب گوجه‌فرنگی در ایران نشان دادند که استان‌های جنوبی ایران دارای بالاترین سهم ردپای آب سبز در تولید گوجه‌فرنگی می‌باشند که مهم‌ترین دلیل آن، کشت خارج از فصل این گیاه در مناطق جنوبی ایران است که به قطب تولید گوجه‌فرنگی زمستانه نیز معروف هستند. بالا بودن ردپای آب آبی نسبت به ردپای آب سبز

(Aligholnia et al., 2015) نیز در تحقیقات خود به نتایج مشابه دست یافتند و بیان داشتند از بین محصولات زراعی، غلات بیشترین مصرف آب را دارد. از نظر ردپای آب خاکستری، گندم و جو بالاترین ردپای آب خاکستری (به ترتیب ۸۴۸/۴۱ و ۹۱۶/۶۶ مترمکعب بر تن) را دارا بودند. علت آن نیز بیشتر بودن آب در فصل کشت این گیاهان و تمایل زیاد کشاورزان به استفاده از کود جهت رشد و محصول بیشتر می باشد. این مسئله با توجه به سطح زیرکشت عمده این محصولات، ضرورت بررسی جوانب ناشی از این میزان مصرف آب در جزء خاکستری را حائز اهمیت می کند. در مجموع، رد پای آب جو (۲۵۰۸/۱۹ مترمکعب بر تن) بیشتر از رد پای آب گندم (۲۱۶۴/۵۷ مترمکعب بر تن) بود. این افزایش می تواند ناشی از رد پای خاکستری نیز باشد که مقدار آن در محصول جو بیشتر از محصول گندم بود و نشان از بالاتر بودن سهم جو در ایجاد آلودگی آب های منطقه می باشد. پیری و سارانی (Piri & Sarani, 2020) و یوسفی و همکاران (Yousefi et al., 2016) نیز در تحقیقات خود در خصوص رد پای آب جو و گندم در ورامین و زاهدان به نتایج مشابهی دست یافتند و علت بالاتر بودن رد پای آب جو نسبت به گندم را بالاتر بودن رد پای

آب خاکستری و مصرف بیشتر کود در این محصول بیان نمودند. کمترین رد پای آب خاکستری متعلق به صیفی جات بود که نشان دهنده تمایل کشاورزان به استفاده کمتر از کود در تولید این محصولات و اکولوژیک بودن آن ها می باشد. گیاهان غده ای و صیفی جات در مجموع رد پای آب خیلی کمتری نسبت به گیاهان روغنی و غلات داشتند. سیب زمینی با ۱۸۲/۴۱ مترمکعب بر تن، کمترین رد پای آب در بین محصولات کشاورزی مورد مطالعه منطقه جیرفت را داشت. براساس نتایج رد پای آب، محصولات با کمترین مصرف آب و اثر کمتر بر منابع آبی باید در اولویت کشت قرار گیرند و محصولات با بیشترین رد پای آب، به ویژه رد پای آب آبی و خاکستری، بهتر است پس از آن کشت شوند. بنابراین، صیفی جات مانند خیار و پیاز و گیاهان غده ای مانند سیب زمینی به دلیل پایین بودن رد پای آب، اولویت اولیه کشت را دارند، در حالی که غلات (گندم و جو) و محصولات روغنی مانند کلزا به دلیل مصرف بالای آب آبی و خاکستری بهتر است در مراحل بعدی کشت برنامه ریزی شوند تا فشار بر منابع آب منطقه کاهش یابد.

جدول ۶- مقادیر رد پای آب سبز، آب آبی و آب خاکستری محصولات کشاورزی مورد مطالعه

Table 6- Green, blue, and grey water footprint values of the agricultural crops studied

نوع محصول Crop category	محصول Crop	رد پای آب سبز Green water footprint	رد پای آب آبی Blue water footprint	رد پای آب خاکستری Grey water footprint	مجموع رد پای آب Total water footprint
(m ³ .ton ⁻¹)					
دانه های روغنی Oilseeds	کلزا Canola	109.92	465.58	495.42	1,070.92
غلات Cereals	گندم Wheat	207.63	1,108.53	848.41	2,164.57
	جو Barley	272.45	1,319.08	916.66	2,508.19
	ذرت دانه ای Grain maize	4.09	1,143.66	531.26	1,679.01
صیفی جات Vegetables	گوچه فرنگی Tomato	19.36	85.79	93.77	198.92
	خیار Cucumber	20.36	89.05	96.15	205.56
	پیاز Onion	17.79	110.87	64.65	193.31
گیاهان غده ای Tuber crops	سیب زمینی Potato	13.78	69.95	98.68	182.41

در ادامه، اثرات زیست‌محیطی تولید هر محصول مورد بررسی قرار گرفت تا براساس تأثیر تولید محصول بر محیط زیست نیز اولویت کشت محصولات مورد مطالعه تعیین گردد. به دلیل طولانی شدن مطلب، محصولات گندم، جو و کلزا که رد پای آب خاکستری بیشتری داشتند، مورد بررسی قرار گرفتند. شکل‌های ۴ تا ۶، سهم هر نهاده کشاورزی را در ایجاد اثرات زیست‌محیطی تولید محصولات مورد مطالعه نشان می‌دهد.

شکل ۴: نتایج ارزیابی زیست‌محیطی کشت جو بر اساس روش ارزیابی چرخه حیات (LCA) را نشان می‌دهد. نهاده‌های بررسی شده شامل کود نیتروژن، کود پتاسیم، کود فسفات، آفت‌کش^۱، گازوئیل^۲، ماشین‌آلات کشاورزی^۳ و الکتریسیته^۴ هستند. نتایج نشان می‌دهد که در کشت جو، بیشترین بار زیست‌محیطی از مصرف گازوئیل و کودهای شیمیایی به‌ویژه کود ازت ناشی می‌شود، درحالی‌که الکتریسیته و کود پتاسیم کمترین سهم را دارند. این الگو با دانش علمی LCA در محصولات غلات هم‌خوانی کامل دارد، زیرا تولید و مصرف کودهای نیتروژنی و سوخت‌های فسیلی مراحل پربار زیست‌محیطی در این سیستم‌ها هستند. این الگو نشان می‌دهد که ساختار نهاده‌محور سیستم‌های غلات، حتی در محصولی نسبتاً کم‌نهاده مانند جو، به شدت تحت تأثیر مصرف انرژی فسیلی و کودهای نیتروژنی است. تولید کود نیتروژن به دلیل وابستگی مستقیم به فرآیند انرژی بر هابر-بوش و مصرف گاز طبیعی، یکی از مراحل چرخه حیات است که بیشترین کربن را دارا می‌باشد، درحالی‌که مصرف گازوئیل در مراحل کاشت، داشت و برداشت، سهم غالبی در انتشار آلاینده‌های هوا دارد. مطالعات LCA در سیستم‌های غلات نیز به‌طور مکرر گزارش کرده‌اند که سوخت و کود نیتروژن مهم‌ترین نقاط داغ زیست‌محیطی^۵ در این سیستم‌ها هستند (Brenttrup et al., 2004; Nemecek et al., 2011).

در دسته سلامت انسان، گازوئیل با ۱/۹۶۳ واحد بیشترین آسیب را ایجاد می‌کند و پس از آن کود نیتروژن با ۱/۲۳۰ واحد (۳۷ درصد کمتر از گازوئیل)، ماشین‌آلات کشاورزی با ۱/۹۶۳ واحد (مشابه گازوئیل)، کود فسفات با ۰/۵۷۱ واحد (۷۱ درصد کمتر از گازوئیل)،

آفت‌کش با ۰/۶۲۲ واحد (۶۸ درصد کمتر)، کود پتاسیم با ۰/۵۲۶ واحد (۹۷ درصد کمتر) و الکتریسیته با ۰/۴۰۱ واحد (۸۰ درصد کمتر از گازوئیل) قرار دارند. گازوئیل و ماشین‌آلات (که عمدتاً مصرف‌کننده همان گازوئیل هستند) بیش از ۵۰ درصد کل آسیب به سلامت انسان را تشکیل می‌دهند. این آسیب عمدتاً از انتشار ذرات معلق (PM)، اکسیدهای نیتروژن (NOx) و دی‌اکسید گوگرد (SO₂) در احتراق دیزل ناشی می‌شود که مشکلات تنفسی و قلبی-عروقی ایجاد می‌کنند. کود ازت نیز با انتشار آمونیاک (NH₃) و N₂O سهم قابل توجهی دارد، درحالی‌که آفت‌کش‌ها از طریق سمیت مستقیم مواد فعالشان تأثیر می‌گذارند. غلبه گازوئیل و ماشین‌آلات در دسته سلامت انسان با منطق روش‌های ارزیابی اثر مانند ReCiPe و IMPACT+ 2002 سازگار است، زیرا این روش‌ها انتشار ذرات معلق، NOx و SO₂ را به‌طور مستقیم به شاخص‌های بیماری‌های تنفسی و قلبی-عروقی مرتبط می‌کنند. تشابه سهم ماشین‌آلات و گازوئیل نیز بیانگر آن است که اثرات زیست‌محیطی ماشین‌آلات عمدتاً از مصرف سوخت آن‌ها ناشی می‌شود، نه از فرآیند ساخت تجهیزات. نتایج مشابهی در مطالعات LCA غلات گزارش شده است که نشان می‌دهد بیش از ۵۰ تا ۷۰ درصد آسیب‌های مرتبط با سلامت انسان به مصرف سوخت‌های فسیلی در عملیات مزرعه‌ای نسبت داده می‌شود (Cellura et al., 2012; Khoshnevisan et al., 2014).

در دسته بوم‌نظام، کود نیتروژن با ۰/۵۲۶ واحد پیش‌تاز است و کود فسفات با ۰/۱۱۴ واحد (۷۸ درصد کمتر از نیتروژن)، آفت‌کش با ۰/۱۵۴ واحد (۷۱ درصد کمتر)، گازوئیل با ۰/۰۳۱ واحد (۹۴ درصد کمتر)، ماشین‌آلات با ۰/۰۲۰ واحد (۹۶ درصد کمتر)، کود پتاسیم با ۰/۰۰۶ واحد (۹۹ درصد کمتر) و الکتریسیته با ۰/۰۱۸ واحد (۹۶ درصد کمتر از ازت) دنبال می‌کنند. کود نیتروژن به‌تنهایی بیش از ۶۰ درصد کل آسیب به بوم‌نظام را ایجاد می‌کند. دلیل اصلی، شست‌وشوی نیترات به آب‌های سطحی و زیرزمینی (اوروفیکاسیون)، اسیدی شدن خاک و انتشار N₂O است که تنوع زیستی آبزیان و خاکزیان را به شدت تهدید می‌کند. کود فسفات و آفت‌کش نیز از طریق روان‌آب^۶ سفر و سمیت بوم‌شناختی سهم دارند، اما گازوئیل و ماشین‌آلات در

4- Electricity
1- Hotspots
2- Runoff

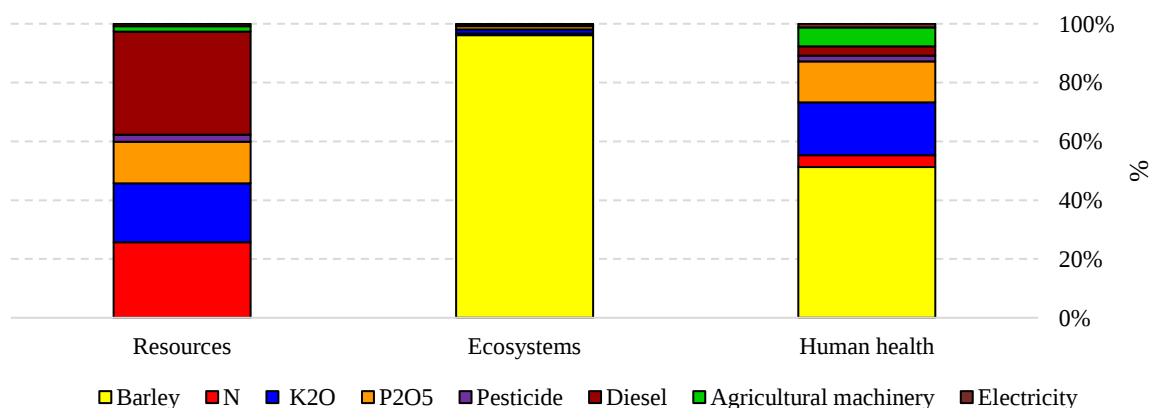
1- Pesticide
2- Diesel
3- Agricultural machinery

نشان می‌دهد. اگرچه کود نیتروژن نیز به دلیل مصرف گاز طبیعی در فرآیند تولید، سهم قابل توجهی دارد، اما مصرف مستقیم سوخت در مزرعه همچنان عامل غالب در این دسته محسوب می‌شود (Guinée, 2002; Cherubini et al., 2009).

به طور کلی، در کشت جو بیش از ۶۰-۷۰ درصد بار زیست‌محیطی از دو نهاده اصلی یعنی گازوئیل (و ماشین‌آلات مرتبط) و کود نیتروژن ناشی می‌شود. گازوئیل عمدتاً سلامت انسان و تخلیه منابع را تحت تأثیر قرار می‌دهد، در حالی که کود نیتروژن بیشترین آسیب را به بوم‌نظام و سهم قابل توجهی در دو دسته دیگر وارد می‌کند. کود فسفات و آفت‌کش سهم متوسط دارند، اما کود پتاسیم و الکتریسیته تأثیر بسیار ناچیزی نشان می‌دهند. این نتایج با مطالعات جهانی LCA غلات همخوانی دارد که نشان می‌دهد حدود ۴۰-۶۰ درصد بار کلی از مرحله مصرف سوخت و ۳۰-۵۰ درصد از کودهای نیتروژنی تأمین می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که کاهش بار زیست‌محیطی کشت جو بیش از هر چیز وابسته به مدیریت مصرف گازوئیل و بهینه‌سازی مصرف کود است. به کارگیری روش‌هایی مانند کاهش عملیات خاک‌ورزی، استفاده از ماشین‌آلات کارآمدتر و بهبود بهره‌وری مصرف نیتروژن می‌تواند به طور همزمان آسیب به سلامت انسان، بوم‌نظام و منابع طبیعی را کاهش دهد. مطالعات پیشین نیز تأکید کرده‌اند که افزایش کارایی نهاده‌ها، مؤثرترین راهکار برای ارتقای پایداری زیست‌محیطی سیستم‌های غلات است (Snyder et al., 2014; Lal, 2015).

این دسته تأثیر بسیار ناچیزی نشان می‌دهند. برتری قاطع کود نیتروژن در دسته آسیب به بوم‌نظام نشان‌دهنده حساسیت بالای محیط‌های خاکی و آبی به نشت ترکیبات نیتروژنی در سیستم‌های زراعی است. آبشویی نترات و رواناب نیتروژن موجب اوروفیکاسیون آب‌های سطحی، کاهش اکسیژن محلول و افت تنوع زیستی آبریان می‌شود، در حالی که انتشار N_2O و اسیدی شدن خاک، عملکرد بوم‌نظام‌های خشکی را نیز مختل می‌کند. پژوهش‌های متعدد LCA در محصولات غلات گزارش کرده‌اند که کود نیتروژن به‌تنهایی بیش از ۵۰ تا ۶۵ درصد آسیب‌های بوم‌نظامی را ایجاد می‌کند، در حالی که نقش فسفر و آفت‌کش‌ها ثانویه اما غیرقابل چشم‌پوشی است (Leip et al., 2015; Bouwman et al., 2013).

در دسته تخلیه منابع، گازوئیل با ۱۱۵/۰ واحد بیشترین سهم را دارد و ماشین‌آلات کشاورزی با ۰/۰۰۶ واحد (۹۵ درصد کمتر از گازوئیل)، کود نیتروژن با ۰/۰۸۴ واحد (۲۷ درصد کمتر از گازوئیل)، کود فسفات با ۰/۰۴۷ واحد (۵۹ درصد کمتر)، آفت‌کش با ۰/۰۰۷ واحد (۹۳ درصد کمتر)، الکتریسیته با ۰/۰۰۲ واحد (۹۸ درصد کمتر)، کود پتاسیم با ۰/۰۰۶ واحد (۹۵ درصد کمتر) قرار دارند. بالاتر بودن میزان مصرف گازوئیل در دسته تخلیه منابع بیانگر وابستگی شدید سیستم کشت جو به منابع انرژی تجدیدناپذیر است. شاخص تخلیه منابع غیرزیستی در LCA عمدتاً مصرف سوخت‌های فسیلی و مواد معدنی محدود را منعکس می‌کند، از این رو مصرف مستقیم گازوئیل و انرژی نهفته در تولید نهاده‌ها، سهم بالاتری نسبت به سایر ورودی‌ها



شکل ۴- اثرات نهاده‌های کشاورزی و منابع ورودی بر سلامت انسان، بوم‌نظام و منابع در کشت جو

Fig. 4- Effects of agricultural inputs and input resources on human health, ecosystem, and resources in barley cultivation

شکل ۵، سهم هر نهاده کشاورزی را در ایجاد اثرات زیست‌محیطی کلی کشت کلزا براساس روش ارزیابی چرخه حیات نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در کشت کلزا، بار زیست‌محیطی بسیار بالا عمدتاً از مصرف بالای کود فسفات، ماشین‌آلات کشاورزی، کود ازت و گازوئیل ناشی می‌شود، درحالی‌که الکتریسیته و آفت‌کش سهم نسبتاً کمتری دارند. این الگو با ویژگی‌های کشت صنعتی کلزا به‌عنوان یک محصول روغن‌دار پرنیاز به نهاده‌های شیمیایی و مکانیزاسیون سنگین کاملاً هم‌خوانی دارد و توضیح‌دهنده بار زیست‌محیطی بسیار بالای این محصول در مقایسه با غلات مانند جو و گندم است. الگوی مشاهده شده در کشت کلزا نشان می‌دهد که این محصول به‌دلیل ماهیت روغنی و عملکرد بالقوه بالا، وابستگی شدیدی به نهاده‌های شیمیایی و مکانیزاسیون دارد. نیاز بالای کلزا به فسفر برای توسعه ریشه، گل‌دهی و تشکیل دانه، در کنار عملیات مکانیزه سنگین باعث می‌شود که نقاط داغ زیست‌محیطی آن نسبت به غلات تشدید شود. مطالعات LCA در محصولات روغنی نیز گزارش کرده‌اند که کلزا در مقایسه با غلات، به‌ویژه از نظر سلامت انسان و تخلیه منابع، بار زیست‌محیطی بالاتری دارد که عمدتاً به مصرف بالای کودهای فسفاته و سوخت‌های فسیلی مرتبط است (Brenttrup et al., 2004; Nemecek et al., 2011).

در دسته سلامت انسان، کود فسفات با $10/448$ واحد، بیشترین آسیب را ایجاد می‌کند و پس از آن ماشین‌آلات کشاورزی با $5,368$ واحد (۴۹ درصد کمتر از فسفات)، کود ازت با $2/461$ واحد (۷۶ درصد کمتر)، گازوئیل با $2/468$ واحد (۷۶ درصد کمتر)، آفت‌کش با $1/401$ واحد (۸۷ درصد کمتر)، الکتریسیته با $0/761$ واحد (۹۳ درصد کمتر) و کود پتاسیم با $0/105$ واحد (۹۹ درصد کمتر از فسفات) قرار دارند. کود فسفات به‌تنهایی حدود ۴۵ درصد کل آسیب به سلامت انسان را تشکیل می‌دهد و همراه با ماشین‌آلات بیش از ۷۰ درصد سهم دارد. این سهم بسیار بالای فسفات ناشی از انتشار فلزات سنگین (مانند کادمیوم) و ذرات معلق در زنجیره تأمین فسفات معدنی است که اثرات تنفسی و سرطان‌زا ایجاد می‌کنند. ماشین‌آلات و گازوئیل نیز با انتشار ذرات PM ، NO_x و SO_2 در احتراق دیزل تأثیرگذار هستند.

غلبه کود فسفات در دسته سلامت انسان نشان‌دهنده اهمیت زنجیره تأمین این نهاده در ارزیابی‌های LCA است. سنگ فسفات به‌طور طبیعی حاوی فلزات سنگینی مانند کادمیوم و سرب است که در مراحل استخراج، فرآوری و حمل‌ونقل آزاد شده و در شاخص‌های

سلامت انسان وزن بالایی دارند. روش‌های ارزیابی اثر مانند ReCiPe این آلاینده‌ها را با اثرات سرطان‌زایی و آسیب‌های مزمن مرتبط می‌کنند. مطالعات انجام شده روی سیستم‌های کشت کلزا نیز گزارش کرده‌اند که کود فسفاته می‌تواند تا ۴۰-۵۰ درصد کل آسیب‌های مرتبط با سلامت انسان را به خود اختصاص دهد، به‌ویژه در سیستم‌های با مصرف بالای کود (Cellura et al., 2012; Leip et al., 2015).

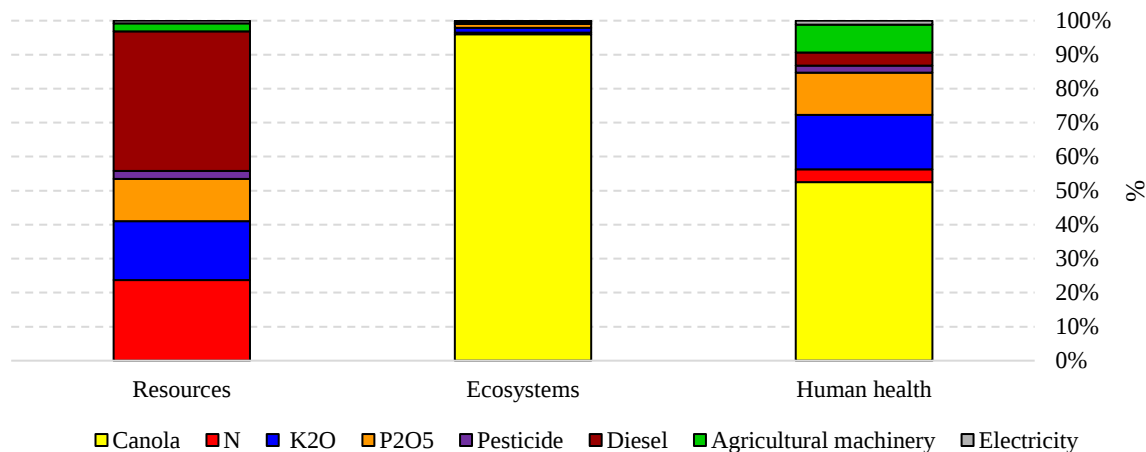
در دسته بوم‌نظام، کود نیتروژن با $0/463$ واحد پیش‌تاز است و پس از آن کود فسفات با $0/216$ واحد (۵۳ درصد کمتر از نیتروژن)، آفت‌کش با $0/035$ واحد (۹۲ درصد کمتر)، گازوئیل با $0/079$ واحد (۸۳ درصد کمتر)، ماشین‌آلات با $0/056$ واحد (۸۸ درصد کمتر)، الکتریسیته با $0/035$ واحد (۹۲ درصد کمتر) و کود پتاسیم با $0/124$ واحد (۷۳ درصد کمتر از ازت) قرار دارد. کود ازت حدود ۴۵ درصد و همراه با کود فسفات بیش از ۶۵ درصد کل آسیب به بوم‌نظام را ایجاد می‌کند. دلیل اصلی، شست‌وشوی بالای نیترات و فسفات به آب‌های سطحی (اوروفیکا سیون شدید)، اسیدی شدن خاک و انتشار N_2O است که تنوع زیستی آبزیان و خاکزیان را تهدید می‌کند. آفت‌کش در کلزا سهم کمتری نسبت به غلات دارد، احتمالاً به‌دلیل مدیریت متفاوت آفات در این محصول است. سهم بالای هم‌زمان کودهای نیتروژن و فسفات در دسته آسیب به بوم‌نظام بیانگر شدت فرآیند اوروفیکا سیون در سیستم‌های کشت کلزا است. کلزا به‌دلیل پوشش اولیه ضعیف و دوره رشد طولانی، مستعد شست‌وشوی نیترات و فسفر به آب‌های سطحی و زیرزمینی است. این پدیده منجر به شکوفایی جلبکی، کاهش اکسیژن محلول و افت شدید تنوع زیستی در بوم‌نظام‌های آبی می‌شود. پژوهش‌های LCA در کلزا نشان داده‌اند که مجموع اثرات بوم‌نظامی کودهای N و P معمولاً بیش از ۶۰ درصد کل آسیب را شامل می‌شود و از این نظر کلزا یکی از حساس‌ترین محصولات زراعی محسوب می‌شود (Bouwman et al., 2013; Payen et al., 2015).

در دسته تخلیه منابع، گازوئیل با $0/294$ واحد بیشترین سهم را دارد و پس از آن کود نیتروژن با $0/170$ واحد (۴۲ درصد کمتر از گازوئیل)، کود فسفات با $0/089$ واحد (۷۰ درصد کمتر)، ماشین‌آلات با $0/017$ واحد (۹۴ درصد کمتر)، کود پتاسیم با $0/124$ واحد (۵۸ درصد کمتر)، آفت‌کش با $0/017$ واحد (۹۴ درصد کمتر) و الکتریسیته با $0/006$ واحد (۹۸ درصد کمتر از گازوئیل) قرار دارند. گازوئیل و کود

منابع) و کود ازت (در بوم‌نظام و منابع) ناشی می‌شود. نکته برجسته در مقایسه با جو و گندم، سهم بسیار بالای کود فسفات و ماشین‌آلات است که توضیح می‌دهد چرا کلزا در جدول کلی محصولات، بیشترین بار زیست‌محیطی را دارد. این نتایج با مطالعات جهانی LCA کلزا هم‌خوانی دارد که معمولاً مصرف بالای فسفر و عملیات مکانیزه را به‌عنوان نقاط داغ اصلی شناسایی می‌کنند. مقایسه نتایج کشت کلزا با محصولات غله‌ای مانند جو و گندم نشان می‌دهد که بار زیست‌محیطی بالاتر کلزا ناشی از ترکیب مصرف بالای کود فسفات، شدت مکانیزاسیون و نیاز قابل توجه به کود ازت است. این ویژگی‌ها کلزا را به محصولی با حساسیت زیست‌محیطی بالا تبدیل می‌کند، به‌گونه‌ای که حتی بهبودهای جزئی در مدیریت کود و سوخت می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش اثرات زیست‌محیطی آن داشته باشد. مطالعات پیشین نیز تأکید کرده‌اند که افزایش کارایی مصرف فسفر، کاهش عملیات مکانیزه غیرضروری و بهینه‌سازی مصرف ازت، مؤثرترین راهکارها برای ارتقای پایداری زیست‌محیطی کشت کلزا هستند (Lal, 2015; Snyder et al., 2014).

نیتروژن با هم بیش از ۶۵ درصد کل تخلیه منابع را تشکیل می‌دهند. مصرف بالای گازوئیل نشان‌دهنده مکانیزاسیون سنگین در کشت، برداشت و حمل کلزا است، درحالی‌که تولید کود نیتروژن نیز فرآیندی شدیداً انرژی‌بر است. غلبه گازوئیل در دسته تخلیه منابع نشان‌دهنده سطح بالای مکانیزاسیون در کشت کلزا، از آماده‌سازی زمین تا برداشت و حمل محصول است. شاخص تخلیه منابع غیرزیستی در LCA به‌طور مستقیم مصرف انرژی‌های فسیلی و منابع محدود را منعکس می‌کند، از این‌رو عملیات مزرعه‌ای پرمصرف انرژی، نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. علاوه بر این، تولید کود ازت نیز به‌دلیل مصرف بالای گاز طبیعی، سهم قابل توجهی در این دسته دارد. نتایج مشابهی در مطالعات بین‌المللی LCA کلزا گزارش شده است که در آن‌ها سوخت و کود ازت به‌عنوان عوامل اصلی تخلیه منابع معرفی شده‌اند (Cherubini et al., 2009; Snyder et al., 2014).

به‌طور کلی، در کشت کلزا بیش از ۷۰-۸۰ درصد بار زیست‌محیطی از چهار نهاده اصلی یعنی کود فسفات (به‌ویژه در سلامت انسان)، ماشین‌آلات و گازوئیل (در سلامت انسان و تخلیه



شکل ۵- اثرات نهاده‌های کشاورزی و منابع ورودی بر سلامت انسان، بوم‌نظام و منابع در کشت کلزا

Fig. 5- Effects of agricultural inputs and input resources on human health, ecosystem, and resources in canola cultivation

زیست‌محیطی از مصرف کودهای شیمیایی به‌ویژه کود فسفات و کود نیتروژن و همچنین گازوئیل و ماشین‌آلات ناشی می‌شود، درحالی‌که الکتریسیته و آفت‌کش کمترین سهم را دارند. این الگو کاملاً با

شکل ۶، سهم هر نهاده کشاورزی را در ایجاد اثرات زیست‌محیطی کلی کشت گندم براساس روش ارزیابی چرخه حیات نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در کشت گندم، مانند جو، بیشترین بار

ویژگی‌های کشت غلات دیم یا آبی در مقیاس وسیع هم‌خوانی دارد، جایی که نهاده‌های شیمیایی و مکانیزاسیون سنگین نقش غالب را ایفا می‌کنند. الگوی مشاهده‌شده در کشت گندم نشان می‌دهد که این محصول، مشابه سایر غلات، به شدت تحت تأثیر مصرف نهاده‌های شیمیایی و انرژی فسیلی قرار دارد. با وجود اینکه گندم نسبت به محصولات روغنی نیاز نهاده‌ای کمتری دارد، سطح زیرکشت گسترده و تکرار عملیات مکانیزه باعث می‌شود که اثر تجمعی کودهای شیمیایی و سوخت‌های فسیلی قابل توجه باشد. مطالعات LCA در سیستم‌های گندم نیز نشان داده‌اند که کودهای شیمیایی و گازوئیل به‌طور پایدار مهم‌ترین نقاط داغ زیست‌محیطی این محصول هستند، به‌ویژه در سیستم‌های آبی و نیمه‌خشک (Brenttrup et al., 2004; Nemecek et al., 2011).

در دسته سلامت انسان، کود فسفات با $4/714$ واحد بی‌شترین آسیب را ایجاد می‌کند و پس از آن ماشین‌آلات کشاورزی با $1/506$ واحد (۶۸ درصد کمتر از فسفات)، گازوئیل با $0/805$ واحد (۸۳ درصد کمتر)، کود نیتروژن با $1/113$ واحد (۷۶ درصد کمتر)، آفت‌کش با $0/492$ واحد (۹۰ درصد کمتر)، الکتروسیته با $0/343$ واحد (۹۳ درصد کمتر) و کود پتاسیم با $0/048$ واحد (۹۹ درصد کمتر از فسفات) قرار دارند. کود فسفات به‌تنهایی بیش از ۵۰ درصد کل آسیب به سلامت انسان را تشکیل می‌دهد. این سهم بالای فسفات عمدتاً ناشی از انتشار فلزات سنگین (مانند کادمیوم) و ذرات معلق در مراحل استخراج و تولید فسفات معدنی است که اثرات تنفسی و سرطان‌زا دارند. ماشین‌آلات و گازوئیل نیز از طریق انتشار ذرات PM و NOx سهم قابل توجهی دارند، درحالی‌که کود نیتروژن با انتشار آمونیاک تأثیرگذار است. غلبه کود فسفات در دسته سلامت انسان بیانگر اهمیت کیفیت و منبع فسفات معدنی مورد استفاده در کشت گندم است. وجود فلزات سنگین به‌ویژه کادمیوم در سنگ فسفات موجب افزایش قابل توجه شاخص‌های سمیت انسانی در روش‌های ارزیابی اثر مانند ReCiPe می‌شود. این موضوع در گندم از اهمیت بی‌شتری برخوردار است، زیرا این محصول به‌طور مستقیم در زنجیره غذایی انسان قرار دارد. نتایج مشابهی در مطالعات LCA گندم گزارش شده است که نشان می‌دهد کود فسفات می‌تواند بیش از ۴۰ تا ۵۵ درصد کل آسیب‌های مرتبط با سلامت انسان را به خود اختصاص دهد، حتی در شرایطی که مقدار مصرف آن کمتر از کود نیتروژن باشد (Cellura et al., 2012; Leip et al., 2015).

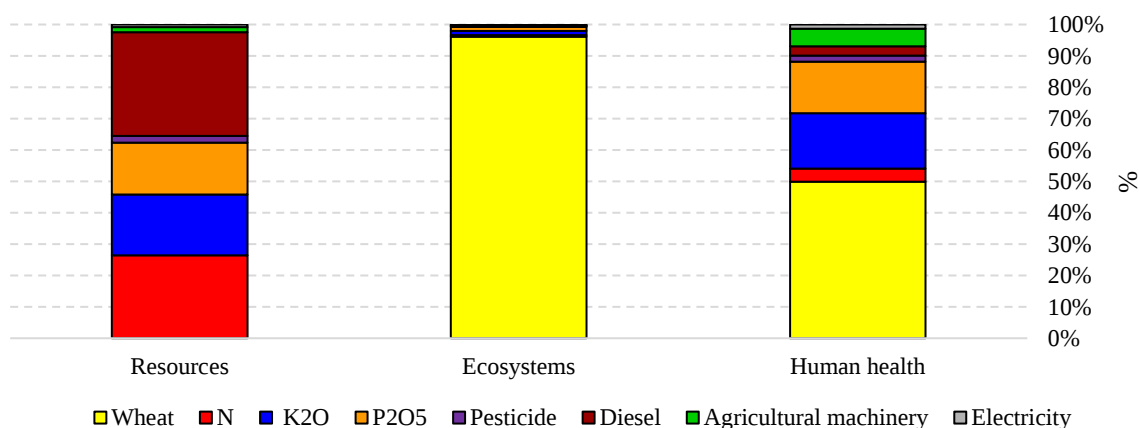
در دسته بوم‌نظام، کود نیتروژن با $0/488$ واحد پیش‌تاز است و پس از آن کود فسفات با $0/129$ واحد (۷۴ درصد کمتر از ازت)، آفت‌کش با $0/122$ واحد (۷۵ درصد کمتر)، گازوئیل با $0/26$ واحد (۴۷ درصد کمتر)، ماشین‌آلات با $0/015$ واحد (۹۷ درصد کمتر)، الکتروسیته با $0/016$ واحد (۹۷ درصد کمتر) و کود پتاسیم با $0/051$ واحد (۹۰ درصد کمتر از ازت) دنبال می‌کنند. کود نیتروژن به‌تنهایی حدود ۵۵ درصد کل آسیب به بوم‌نظام را ایجاد می‌کند. دلیل اصلی، شست‌وشوی نیترات به آب‌ها (اوروفیکا سیون)، اسیدی شدن خاک و انتشار N_2O است که تنوع زیستی را تهدید می‌کند. کود فسفات و آفت‌کش نیز از طریق روان‌آب فوسفور و سمیت بوم‌شناختی سهم مشابهی دارند، اما جالب اینکه گازوئیل در این دسته تأثیر کمتری نسبت به سلامت انسان نشان می‌دهد. برتری کود نیتروژن در دسته آسیب به بوم‌نظام نشان‌دهنده نقش کلیدی چرخه نیتروژن در اثرات زیست‌محیطی کشت گندم است. شست‌وشوی نیترات به آب‌های سطحی و زیرزمینی، انتشار N_2O و اسیدی شدن خاک، از مهم‌ترین مسیرهای اثرگذاری نیتروژن بر بوم‌نظام‌های آبی و خشکی محسوب می‌شوند. گندم به‌دلیل سطح زیرکشت وسیع و مصرف مکرر کود ازت، سهم بالایی در فرآیند اورتروفیکاسیون منطقه‌ای دارد. مطالعات پیشین LCA نیز گزارش کرده‌اند که کود ازت معمولاً ۵۰ تا ۶۰ درصد کل آسیب‌های بوم‌نظامی در کشت گندم را تشکیل می‌دهد، درحالی‌که نقش فوسفور و آفت‌کش‌ها در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرد (Bouwman et al., 2013; Payen et al., 2015).

در دسته تخلیه منابع، گازوئیل با $0/096$ واحد بی‌شترین سهم را دارد و پس از آن کود نیتروژن با $0/077$ واحد (۲۰ درصد کمتر از گازوئیل)، کود فسفات با $0/048$ واحد (۵۰ درصد کمتر)، ماشین‌آلات با $0/005$ واحد (۹۵ درصد کمتر)، کود پتاسیم با $0/051$ واحد (۴۷ درصد کمتر)، آفت‌کش با $0/006$ واحد (۹۴ درصد کمتر) و الکتروسیته با $0/003$ واحد (۹۷ درصد کمتر از گازوئیل) قرار دارند. گازوئیل و کود نیتروژن با هم بیش از ۶۵ درصد کل تخلیه منابع را تشکیل می‌دهند. این امر کاملاً منطقی است، زیرا گازوئیل به‌طور مستقیم سوخت فسیلی مصرفی در عملیات مزرعه است و تولید کود نیتروژن نیز فرآیندی شدیداً انرژی‌بر (وابسته به گاز طبیعی) محسوب می‌شود. غلبه گازوئیل در دسته تخلیه منابع بازتاب‌دهنده وابستگی بالای کشت گندم به انرژی‌های فسیلی در عملیات آماده‌سازی زمین، کاشت، داشت و برداشت است. شاخص تخلیه منابع غیرزیستی در LCA

LCA گندم هم‌خوانی دارد که معمولاً ۴۰-۶۰ درصد بار را به کودهای شیمیایی و ۲۰-۳۰ درصد را به مصرف سوخت نسبت می‌دهند. مقایسه نتایج کشت گندم با جو نشان می‌دهد که اگرچه الگوی کلی اثرات زیست‌محیطی در این دو محصول مشابه است، اما سهم بالاتر کود فسفات در آسیب به سلامت انسان در گندم، آن را از جو متمایز می‌کند. این تفاوت می‌تواند ناشی از نیاز تغذیه‌ای بالاتر گندم در برخی از خاک‌ها یا تفاوت در منبع و کیفیت کود فسفات مصرفی باشد. به‌طور کلی، کاهش بار زیست‌محیطی کشت گندم مستلزم بهبود کارایی مصرف کودهای شیمیایی به‌ویژه ازت و فسفر، و کاهش مصرف گازوئیل از طریق بهینه‌سازی عملیات مکانیزه است. پیشین نیز تأکید کرده‌اند که افزایش بهره‌وری نهاده‌ها، مؤثرترین راهکار برای ارتقای پایداری زیست‌محیطی سیستم‌های تولید گندم محسوب می‌شود (Lal, 2015; Snyder et al., 2014).

به‌طور مستقیم مصرف سوخت‌های فسیلی و منابع انرژی محدود را منعکس می‌کند، از این رو حتی مصرف متوسط گازوئیل در مقیاس وسیع سطح زیرکشت، اثر قابل توجهی ایجاد می‌کند. علاوه بر این، تولید کود ازت نیز به دلیل وابستگی به گاز طبیعی، سهم بالایی در تخلیه منابع دارد. نتایج مشابهی در مطالعات بین‌المللی LCA گندم گزارش شده است که مصرف سوخت و کود ازت را به عنوان عوامل اصلی تخلیه منابع معرفی می‌کنند (Cherubini et al., 2009; Snyder et al., 2014).

به‌طور کلی، در کشت گندم بیش از ۶۰-۷۰ درصد بار زیست‌محیطی از سه نهاده اصلی یعنی کود فسفات (به‌ویژه در سلامت انسان)، کود نیتروژن (به‌ویژه در بوم‌نظام) و گازوئیل (به‌ویژه در تخلیه منابع) ناشی می‌شود. نکته قابل توجه در مقایسه با جو، سهم بسیار بالای کود فسفات در آسیب به سلامت انسان است که احتمالاً به دلیل مصرف بالاتر فسفات در خاک‌های نیازمند به این عنصر یا تفاوت در منبع فسفات مورد استفاده بازمی‌گردد. این نتایج با مطالعات جهانی



شکل ۶- اثرات نهاده‌های کشاورزی و منابع ورودی بر سلامت انسان، بوم‌نظام و منابع در کشت گندم

Fig. 6- Effects of agricultural inputs and input resources on human health, ecosystem, and resources in wheat cultivation

کلی تک‌نقطه‌ای مجموع این اثرات ارائه شده است. مقایسه هم‌زمان هشت محصول زراعی نشان می‌دهد که نوع محصول و ساختار سیستم تولید، تعیین‌کننده اصلی شدت اثرات زیست‌محیطی است. محصولات دانه‌ای و روغن‌دار مانند کلزا، گندم، جو و ذرت به دلیل سطح زیرکشت وسیع، مصرف بالای کودهای شیمیایی و وابستگی شدید به مکانیزاسیون، بار زیست‌محیطی بسیار بالاتری نسبت به سبزیجات دارند (Roy et al., 2009; Nemecek & Kägi, 2007).

شکل ۷ نشان‌دهنده میزان اثرات زیست‌محیطی نهایی کشت هشت محصول کشاورزی مورد مطالعه شامل جو، کلزا، ذرت، خیار، پیاز، سیب‌زمینی، گوجه‌فرنگی و گندم براساس روش ارزیابی چرخه حیات می‌باشد. این اثرات در سه دسته اصلی آسیب نهایی تقسیم‌بندی شده‌اند: سلامت انسان، کیفیت بوم‌نظام که کاهش تنوع گونه‌های زیستی را بیان می‌کند و تخلیه منابع که انرژی اضافی لازم برای استخراج منابع کمیاب در آینده را نشان می‌دهد؛ در نهایت نیز امتیاز

سلامت انسان در محصولات دانه‌ای به‌ویژه کلزا، نشان‌دهنده نقش مستقیم نهاده‌های شیمیایی در ایجاد مخاطرات انسانی است (Fantke & Jolliet, 2016; Goedkoop et al., 2013). انتشار ذرات معلق، آمونیاک، اکسیدهای نیتروژن و ترکیبات سمی ناشی از کودها و آفت‌کش‌ها، با افزایش خطر بیماری‌های تنفسی، قلبی-عروقی و سرطان‌زایی مرتبط هستند. سبزیجات به‌دلیل مصرف محدود این نهاده‌ها، اثر بسیار ناچیزی بر سلامت انسان دارند (Roy et al., 2009).

در زمینه آسیب به بوم‌نظام، کلزا با ۲۰/۲۵ واحد بیشترین اثر منفی را دارد و گندم با ۹/۲۵ واحد (۵۴ درصد کمتر)، ذرت با ۷/۱۳ واحد (۶۵ درصد کمتر)، سیب‌زمینی با ۱/۰۰ واحد (۹۵ درصد کمتر)، گوجه‌فرنگی با ۱/۰۴ واحد (۹۵ درصد کمتر)، پیاز با ۱/۰۴ واحد (۹۵ درصد کمتر)، خیار با ۰/۹۵ واحد (۹۵ درصد کمتر) و جو با ۰/۳۳ واحد (۹۸ درصد کمتر از کلزا) در رتبه‌های بعدی هستند. کلزا بیش از ۲۱ برابر خیار و بیش از ۶۰ برابر جو به بوم‌نظام آسیب می‌رساند. این آسیب‌ها بیشتر از اسیدی شدن خاک، اوروفیکاسیون آب‌ها به‌دلیل شست‌وشوی نیتروژن و فسفر، و سمیت بوم‌شناختی سموم ناشی می‌شوند که تنوع زیستی را به شدت تهدید می‌کنند (Payen et al., 2015; Bouwman et al., 2013). کلزا به‌دلیل نیاز تغذیه‌ای بالا و پوشش اولیه ضعیف، مستعد شست‌وشوی عناصر غذایی و انتقال آن‌ها به بوم‌نظام‌های آبی است که منجر به کاهش شدید تنوع زیستی می‌شود. محصولات سبزی با مدیریت دقیق‌تر و چرخه رشد کوتاه‌تر، فشار بسیار کمتری بر بوم‌نظام‌های خاکی و آبی وارد می‌کنند (Nemecek & Kägi, 2007).

در دسته تخلیه منابع نیز، گندم با ۰/۲۸۹ واحد بیشترین مقدار را دارد و پس از آن ذرت با ۰/۲۵۳ واحد (۱۲ درصد کمتر از گندم)، کلزا با ۰/۱۷۶ واحد (۳۹ درصد کمتر از گندم)، جو با ۰/۳۳۱ واحد (فقط ۱۴ درصد بیشتر از گندم اما در کل بالا)، سیب‌زمینی با ۰/۰۴۹ واحد (۸۳ درصد کمتر از گندم)، گوجه‌فرنگی با ۰/۰۴۱ واحد (۸۶ درصد کمتر)، خیار با ۰/۰۴۲ واحد (۸۵ درصد کمتر) و پیاز با ۰/۰۲۹ واحد (۹۰ درصد کمتر از گندم) قرار دارند. محصولات غلات و روغن‌دار منابع را به مراتب بیشتر تخلیه می‌کنند.

به‌طور کلی، محصولات دانه‌ای به‌ویژه کلزا و غلات پرمصرف مانند ذرت و گندم به‌دلیل وابستگی شدید به کودهای نیتروژنی، سموم و ماشین‌آلات، بار زیست‌محیطی بسیار بالاتری (اغلب ۷ تا ۲۱ برابر) نسبت به سبزیجات دارند. برتری محصولات غله‌ای و دانه‌ای در تخلیه

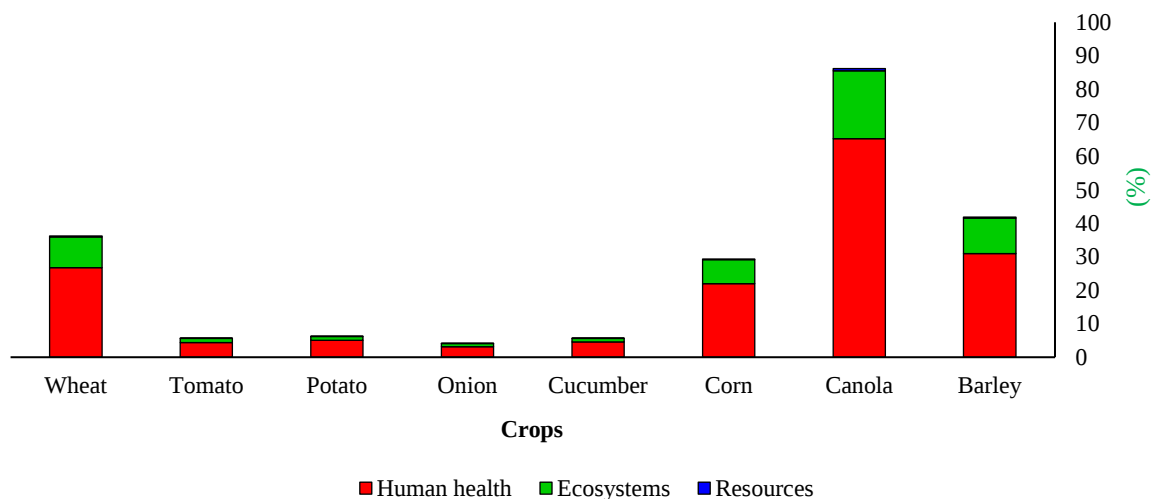
در مقابل، سبزیجات به‌دلیل دوره رشد کوتاه‌تر، نیاز کمتر به کود و سم، و شدت مکانیزاسیون پایین‌تر، اثرات زیست‌محیطی به‌مراتب کمتری نشان می‌دهند (Brenttrup et al., 2004; Nemecek et al., 2011). بررسی اثرات نهایی زیست‌محیطی نشان می‌دهد که کلزا با ۸۶/۱۹ واحد بیشترین بار را دارد و پس از آن گندم با ۳۶/۲۳ واحد (۵۸ درصد کمتر از کلزا)، جو با ۴۱/۸۵ واحد (۵۱ درصد کمتر از کلزا)، ذرت با ۲۹/۳۵ واحد (۶۶ درصد کمتر از کلزا)، سیب‌زمینی با ۶/۲۰ واحد (۹۳ درصد کمتر از کلزا)، گوجه‌فرنگی با ۵/۷۰ واحد (۹۳ درصد کمتر از کلزا)، پیاز با ۵/۶۵ واحد (۹۳ درصد کمتر از کلزا) و خیار با ۴/۰۹ واحد (۹۵ درصد کمتر از کلزا) قرار دارند. به عبارت دیگر، کشت یک واحد کلزا بیش از ۲۱ برابر خیار اثرات زیست‌محیطی منفی ایجاد می‌کند، درحالی‌که گندم و جو حدود نه برابر و ذرت حدود هفت برابر خیار بار دارند. این تفاوت چشمگیر عمدتاً ناشی از مصرف بالای کودهای نیتروژنی، سموم دفع آفات و سوخت ماشین‌آلات در محصولات دانه‌ای صنعتی است، درحالی‌که سبزیجات اغلب با دوره رشد کوتاه‌تر، برداشت دستی‌تر و نیاز کمتر به نهاده‌های شیمیایی کشت می‌شوند. برتری مطلق کلزا در امتیاز کلی تک‌نقطه‌ای نشان می‌دهد که تجمع اثرات نهاده‌های پرمصرف می‌تواند یک محصول را به نقطه داغ زیست‌محیطی تبدیل کند (Brenttrup et al., 2004; Nemecek et al., 2011). اختلاف بیش از ۲۰ برابری بین کلزا و محصولاتی مانند خیار و پیاز، صرفاً ناشی از تفاوت عملکرد یا زیست‌توده تولیدی نیست، بلکه نتیجه مصرف سنگین کودهای نیتروژنی و فسفات، سموم و سوخت‌های فسیلی است (Roy et al., 2009).

در دسته سلامت انسان، کلزا با ۶۵/۲۳ واحد پیش‌تاز است و پس از آن جو با ۳۰/۹۳ واحد (۵۳ درصد کمتر)، گندم با ۲۶/۹۵ واحد (۵۹ درصد کمتر)، ذرت با ۲۱/۹۷ واحد (۶۶ درصد کمتر)، سیب‌زمینی با ۵/۰۵ واحد (۹۲ درصد کمتر)، گوجه‌فرنگی با ۴/۳۴ واحد (۹۳ درصد کمتر)، پیاز با ۳/۱۰ واحد (۹۵ درصد کمتر) و خیار با ۳/۰۸ واحد (۹۵ درصد کمتر از کلزا) قرار دارند. کلزا بیش از ۲۱ برابر خیار و پیاز به سلامت انسان آسیب ایجاد می‌کند. این آسیب‌ها عمدتاً از انتشار ذرات معلق، آمونیاک، اکسیدهای نیتروژن و سموم ناشی از مصرف بالای کود و آفت‌کش به وجود می‌آیند که می‌توانند مشکلات تنفسی و سرطان‌زا ایجاد کنند. سبزیجات به‌دلیل مصرف کمتر این نهاده‌ها، تأثیر بسیار ناچیزی بر سلامت انسان دارند. تمرکز بالای آسیب به

بازنگری در اولویتهای الگوی کشت و مدیریت نهاده‌ها است. کاهش سهم محصولات پرنهاده مانند کلزا و غلات صنعتی، بهبود کارایی مصرف کود و سوخت، و گسترش کشت سبزیجات کم‌اثر می‌تواند نقش مهمی در کاهش بار زیست‌محیطی کشاورزی ایفا کند (Brenttrup et al., 2004; Roy et al., 2009; Nemecek & Kägi, 2007). LCA ابزار مؤثری برای شناسایی محصولات و نهاده‌های پرریسک و مبنای تصمیم‌گیری سیاست‌گذاران است (Goedkoop et al., 2013; Fantke & Joliet, 2016).

با توجه به نتایج LCA و بار زیست‌محیطی محصولات، اولویت کشت باید به محصولاتی با کمترین اثرات زیست‌محیطی اختصاص یابد. بنابراین، سبزیجاتی مانند خیار و پیاز و گیاهان غده‌ای مانند سیب‌زمینی که بار زیست‌محیطی بسیار پایین‌تری دارند، در اولویت کشت قرار گیرند. پس از آن می‌توان ذرت و غلات پرمصرف مانند گندم و جو را کشت کرد، و کلزا به دلیل بالاترین بار زیست‌محیطی، بهتر است در آخر و با مدیریت دقیق نهاده‌ها و منابع آبی کشت شود تا فشار بر بوم‌نظام و منابع محدود منطقه کاهش یابد.

منابع نشان‌دهنده وابستگی شدید این سیستم‌ها به انرژی‌های فسیلی و منابع تجدیدناپذیر است (Cherubini et al., 2009; Snyder et al., 2014). مصرف بالای گازوئیل در عملیات مکانیزه و انرژی نهفته در تولید کودهای شیمیایی به‌ویژه کود ازت، نقش اصلی را ایفا می‌کند. حتی اختلاف‌های نسبتاً کوچک در مقادیر مصرف سوخت، در مقیاس وسیع سطح زیرکشت، به تخلیه قابل توجه منابع منجر می‌شود (Roy et al., 2009). برای کاهش این اثرات، استفاده از کوددهی دقیق و هوشمند، جایگزینی بخشی از کودهای شیمیایی با کودهای اکولوژیک، اجرای تناوب زراعی مناسب، و گسترش کشت گلخانه‌ای کارآمد برای سبزیجات توصیه می‌شود. در غلات نیز مدیریت دقیق‌تر نهاده‌ها و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی می‌تواند بار زیست‌محیطی را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد. در نهایت، اگر هدف حرکت به سمت کشاورزی پایدارتر باشد، اولویت دادن به کشت سبزیجاتی مانند خیار و پیاز (که ۹۳ تا ۹۵ درصد بار کمتری دارند) و بهبود مدیریت در غلات و محصولات روغن‌دار، منطقی‌ترین راهکار به نظر می‌رسد. نتایج مقایسه‌ای نشان می‌دهد که حرکت به سمت کشاورزی پایدار مستلزم



شکل ۷- اثرات نهایی زیست‌محیطی کشت محصولات مختلف در منطقه جیرفت در سه گروه تأثیر سلامت انسان، بوم‌نظام و منابع

Fig. 7- Final environmental effects of cultivating different crops in jiroft region in three groups of human health, ecosystem and resources

می‌کنند. در مقابل، محصولات با بار زیست‌محیطی پایین‌تر مانند سبزیجات و گیاهان غده‌ای، ردپای آب کمی دارند و منابع آب را کمتر تخلیه می‌کنند. بنابراین، مدیریت کشت براساس LCA هم‌زمان می‌تواند بهینه‌سازی مصرف آب و کاهش اثرات محیط‌زیستی را

با توجه به نتایج، ردپای آب و ارزیابی چرخه حیات (LCA) نتایج هم‌سو و مکملی را نشان می‌دهند. محصولاتی که بار زیست‌محیطی بالاتری در LCA داشتند، مانند کلزا و غلات، هم بیشترین مصرف آب آبی و خاک‌ستری را دارند و هم فشار بیشتری بر منابع آب منطقه وارد

تضمین کند.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که اثرات زیست‌محیطی و مصرف آب در محصولات کشاورزی تحت تأثیر مستقیم نوع محصول، سطح زیرکشت و شدت استفاده از نهاده‌های کشاورزی قرار دارند. محصولات دانه‌ای و روغن‌دار مانند کلزا، گندم، جو و ذرت به دلیل مصرف بالای کودهای نیتروژنی و فسفات، سموم دفع آفات و سوخت‌های فسیلی ما به‌ازای تولید یک تن محصول، بیشترین بار زیست‌محیطی را در تمامی دسته‌های LCA شامل سلامت انسان، بوم‌نظام و تخلیه منابع نشان دادند. این محصولات همچنین بیشترین ردپای آب آبی و خاکستری را دارند که نشان‌دهنده فشار بالا بر منابع آب زیرزمینی و سطحی منطقه است. در مقابل، سبزیجات و گیاهان غده‌ای مانند خیار، پیاز و سیب‌زمینی هم بار زیست‌محیطی و هم ردپای آب بسیار پایین‌تری دارند، که به دلیل نیاز کمتر به نهاده‌های شیمیایی، دوره رشد کوتاه‌تر و برداشت دستی‌تر است. مقایسه نتایج LCA و ردپای آب نشان داد که هر دو شاخص هم‌سو بوده و می‌توانند به عنوان ابزارهای مکمل برای

شناسایی محصولات پرمصرف و پرریسک و مدیریت بهینه منابع آب و کاهش اثرات زیست‌محیطی مورد استفاده قرار گیرند. براساس این یافته‌ها، پیشنهاد می‌شود که اولویت کشت به محصولات کم‌اثر مانند سبزیجات و گیاهان غده‌ای داده شود و غلات و محصولات پرنهاده مانند کلزا با مدیریت دقیق نهاده‌ها و منابع آبی کشت شوند. همچنین به‌کارگیری روش‌های کشاورزی هوشمند شامل کوددهی بهینه، جایگزینی بخشی از کودهای شیمیایی با کودهای اکولوژیک، تناوب زراعی مناسب و افزایش بهره‌وری آبیاری، می‌تواند بار زیست‌محیطی و مصرف آب را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد. این نتایج اهمیت برنامه‌ریزی هوشمند کشاورزی و اتخاذ سیاست‌های پایدار را در مناطق کم‌آب و کویری تأکید می‌کنند و می‌توانند راهنمای تصمیم‌گیری کشاورزان و سیاست‌گذاران برای حرکت به سمت کشاورزی پایدارتر و کم‌اثر بر محیط زیست باشند.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه زابل انجام شده است. کد پژوهانه IR-UOZ-GR-1837

References

1. Aligholnia, T., Rezaie, H., Bahmanesh, J., & Montaseri, M. (2015). Sustainable management of water resources to maximize water extraction using the water footprint approach. MSc. Thesis, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. (In Persian).
2. Bouwman, A. F., Beusen, A. H. W., & Billen, G. (2013). Human alteration of the global nitrogen cycle and its environmental consequences. *Global Biogeochemical Cycles*, 27, 1-17. <https://doi.org/10.1002/gbc.20026>
3. Bouwman, A. F., Beusen, A. H. W., & Billen, G. (2013). Human alteration of the global nitrogen and phosphorus cycles. *Global Biogeochemical Cycles*, 27, 1-17. <https://doi.org/10.1002/gbc.20026>
4. Brentrup, F., Küsters, J., Lammel, J., & Kuhlmann, H. (2004). Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology. *European Journal of Agronomy*, 20, 247-264. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(03\)00024-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(03)00024-8)
5. Bylin, C., Misra, R., Murch, M., & Riegerink, W. (2004). Sustainable agriculture: Development of an on-farm assessment tool. MSc. Thesis, University of Michigan, Michigan, USA.
6. Cellura, M., Longo, S., & Mistretta, M. (2012). Life cycle assessment of energy and environmental impacts of cereal production in Italy. *Journal of Cleaner Production*, 28, 89-99. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.019>
7. Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y., Savenije, H. H. G., & Gautam, R. (2006). The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological Economics*, 60, 186-203. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.11.027>
8. Cherubini, F., Bird, N. D., Cowie, A., Jungmeier, G., Schlamadinger, B., & Woess-Gallasch, S. (2009). Energy- and greenhouse gas-based LCA of bioenergy systems. *Bioresource Technology*, 100, 465-473. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.031>
9. Durlinger, B., Smeets, E., & van der Sluis, S. (2015). Agri-footprint methodology report. Blonk Consultants, Gouda, The Netherlands.

10. Fantke, P., & Jolliet, O. (2016). Life cycle human health impacts of pesticide exposure. *Environment International*, 94, 422-438. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.06.003>
11. FAO. (2017). Water for sustainable food and agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
12. Georgiopoulou, E., & Lyberatos, G. (2018). Life cycle assessment of the use of alternative fuels in cement kilns: A review. *Journal of Environmental Management*, 216, 224-234. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.059>
13. Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F. P., & van Beek, L. P. H. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488, 197-200. <https://doi.org/10.1038/nature11295>
14. Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & van Zelm, R. (2013). ReCiPe 2016 – A harmonised life cycle impact assessment method: Report I: Characterisation.
15. Guinée, J. B. (Ed.). (2002). Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
16. Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., & Rydberg, T. (2011). Life cycle assessment: Past, present, and future. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 90-96.
17. Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2008). Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources. Blackwell, Oxford, UK.
18. Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Earthscan, London, UK.
19. Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, 138-147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
20. ISO. (2006). ISO 14040: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
21. Khoshnevisan, B., Rafiee, S., Omid, M., & Mousazadeh, H. (2014). Environmental impact assessment of wheat production using life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 73, 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.029>
22. Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7, 5875-5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>
23. Leip, A., et al. (2015). Impacts of nitrogen use in agriculture on the environment. *Environmental Research Letters*, 10, 115004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/11/115004>
24. Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577-1600. [doi:10.5194/hess-15-1577-2011](https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011)
25. Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2014). Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment. *Ecological Indicators*, 46, 214-223. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.013>
26. Mousavi-Avval, S. H., Rafiee, S., Jafari, A., & Mohammadi, A. (2017). Life cycle assessment and optimization of energy consumption in oilseed production systems. *Journal of Cleaner Production*, 142, 449-460. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.111>
27. Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Mohtasebi, S. S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Chau, K. W. (2017). Energy consumption enhancement and environmental life cycle assessment in paddy production using optimization techniques. *Journal of Cleaner Production*, 162, 571-586. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.071>
28. Nemecek, T., & Kägi, T. (2007). Life cycle inventories of agricultural production systems. Ecoinvent Report No. 15, Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
29. Nemecek, T., Dubois, D., Huguenin-Elie, O., & Gaillard, G. (2011). Life cycle assessment of Swiss farming systems: I. Integrated and organic farming. *Agricultural Systems*, 104, 217-232. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2010.10.002>
30. Notarnicola, B., Tassielli, G., Renzulli, P. A., Castellani, V., & Sala, S. (2017). Environmental impacts of food consumption in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 140, 753-765. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.080>
31. Payen, S., Barles, S., & Cellura, M. (2015). Life cycle assessment of eutrophication impacts of agriculture. *Environmental Science & Technology*, 49, 11554-11562. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02393>

32. Pennington, D. W., Potting, J., Finnveden, G., Lindeijer, E., Joliet, O., Rydberg, T., & Rebitzer, G. (2004). Life cycle assessment part 2: Current impact assessment practice. *Environment International*, 30, 721-739.
33. Pré Sustainability. (2018). SimaPro LCA software (Version 10.2). Pré Sustainability, Amersfoort, The Netherlands. Website: <https://pre-sustainability.com/simapro/>
34. Piri, H., & Mobaraki, M. (2021). Investigating water footprints and water consumption efficiency of potato, sugar beet, tomato and forage corn crops in different climates of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(6), 103-120. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2021.18398.3399>
35. Piri, H., & Sarani, R. (2020). Investigation of economic productivity of crop products in Sistan and Baluchestan province using the water footprint approach. *Iranian Soil and Water Research*, 51(5), 1093-1104. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.289567.668325>
36. Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.-P., Suh, S., Weidema, B. P., & Pennington, D. W. (2004). Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, 30(5), 701-720. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005>
37. Ridoutt, B. G., & Pfister, S. (2010). A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity. *Global Environmental Change*, 20(1), 113-120. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.08.003>
38. Roholamini, N., Bazrafshan, O., & Nafarzadefan, A. (2025). Optimizing the cultivation area of agricultural products based on the water footprint framework (case study: Minab County). *Irrigation Sciences and Engineering*, 48(2), 49-64. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22055/jise.2024.45065.2098>
39. Roy, P., Nei, D., Orikasa, T., Xu, Q., Okadome, H., Nakamura, N., & Shiina, T. (2009). Life cycle assessment of agricultural products: A review. *Journal of Cleaner Production*, 17, 747-762. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.12.016>
40. Snyder, C. S., Bruulsema, T. W., Jensen, T. L., & Fixen, P. E. (2014). Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 133, 247-266. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.021>
41. Thompson, M., Ellis, R., & Wildavsky, A. (1990). Cultural Theory. Boulder, CO: Westview Press.
42. Xu, X., Lan, Y., Ren, C., & Wang, Z. (2019). Life cycle assessment of agricultural production systems: A case study of major crops. *Science of the Total Environment*, 682, 91-102.
43. U.S. Life Cycle Inventory Database (U.S. LCI). (2015). National Renewable Energy Laboratory (NREL), U.S. Department of Energy. Available at: <https://www.nrel.gov/lci/>
44. Yahyazadeh, M., Bazrafshan, O., & Esmaeilpour, Y. (2021). Assessing spatio-temporal changes of ecological water footprint and economic value of water in tomato production in Iran. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 14(6), 2047-2059. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/20.1001.1.20087942.2021.14.6.6.7>
45. Yousefi, H., Mohammadi, A., Nourollahi, Y., & Sadatinejad, J. (2016). Evaluation of water footprint index of crops in Tehran province. *Soil Conservation*, 24(6), 67-85. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2017.13718.2842>
46. Zhang, Y., Huang, G., Wang, L., & Zhang, X. (2018). Integrating water footprint and life cycle assessment for sustainable agricultural production. *Agricultural Systems*, 162, 11-21.

Contents

Effects of Irrigation Regimes, Titanium Dioxide Nanoparticles, and Mycorrhizal Fungi on the Quantitative and Qualitative Yield and Physiological Traits of Sage (<i>Salvia officinalis</i> L.) in Intercropping with Peppermint (<i>Mentha piperita</i> L.)	1
Abdollah Javanmard, Ali Ostadi and Haniyeh Shabkhiz	
Analysis of Canola (<i>Brassica napus</i> L.) Yield Limiting Factors in Miankaleh, Behshahr County, Using Comparative Performance Analysis (CPA)	39
Atieh Jafari, Afshin Soltani, Ebrahim Zeinali and Safoora Jafar Nodeh	
Land Suitability Assessment and Estimation of Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Production Potential in the Yaneh-Sar District of Behshahr County	۶۳
Karim Riahi, Hossein Kazemi, Afshin Soltani and Fardin Sadeghzadeh	
The Evaluation of Effect Solid Vermicompost, Vermicompost Extract and Seaweed on some Physio-Morphological Characteristics, of Roselle (<i>Hibiscus sabdariffa</i> L.)	81
F. Rigi, M. Dahmardeh, M. R. Asgharipou, M. Heidari Majd and A. R. Sirosmehr	
Evaluation of Dry Matter Remobilization and Contribution of Current Photosynthesis of Wheat Grain (<i>Triticum aestivum</i> L.) affected as Three Cultivation Methods and Plant Residues	101
Masoumeh Shabibi, Esfandiar Fateh and Amir Aynehband	
Effect of Combining Organic-Chemical Fertilizers and Biofertilizers on Yield, Essential Oil Quality, and Efficiency of some Elements Absorption in Fennel (<i>Foeniculum vulgare</i> Mill.)	119
Maedeh Ataei nejad, Mohammadreza Moradi-Telavat, Seyed Ataollah Siadat, Ali Moshattati and Ali Ghatei	
Development of a Cropping Pattern for Major Agricultural Products of the Jiroft Plain Based on Water Footprint and Life Cycle Assessment (LCA)	139
Mojtaba Mandegari Kohan, Halimeh Piri and Mahdi Keykha	

Journal of Agroecology (Quarterly)

Vol. 18

No. 1

2026

Published by: Ferdowsi University of Mashhad

Editor in charge: Prof. Behnam Kamkar

Editor in chief: Prof. Parviz Rezvani Moghaddam

Internal manager: Dr. Surur Khorramdel

Editorial Board:

Dr. Amir Bezaad Bazrgar, Post Doctorate Fellow, University of Guelph, Canada

Prof. Morteza Barmaki, Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili

Prof. Mohammad Pessarakli, Research Professor, School of Plant Sciences, the University of Arizona

Prof. Hemmatolla Pirdashti, Genetic & Agricultural Biotechnology Institute of Tabarestan

Dr. Amir Hajjarpoor, Research scientist, Julius Kühn-Institut, Germany

Dr. Surur Khorramdel, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

Prof. Adel Dabagh Mohammadi Nasab, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

Prof. Mehdi Rastgoo, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

Prof. Parviz Rezvani Moghaddam, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

Prof. Ahmad Zare Feizabadi, Agricultural Research Institute of Khorasan Razavi

Prof. Saeed Zehtab Salmasi, New Mexico State University, USA

Dr. Hamid Shahandeh Research Soil Scientist, Soil and Crop Sciences Department, Texas A & M University

Dr. Omid Abdi, Department of Forest Sciences, University of Helsinki Finland

Prof. Farshid Ghaderifar, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources

Prof. Mansour Ghorbanpour, Faculty of Agriculture, University of Arak

Prof. Behnam Kamkar, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

Prof. Mohammad Reza Moradi Telavat, Agricultural Sciences & Natural Resources University of Khuzestan

Dr. Ahmad Mosaddegh Manschadi, Associate Professor, Institute of Agronomy, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna

Prof. Mehdi Nassiri Mahallati, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad Press

Address: Journal of Agroecology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad,

P.O. Box: 91775-1163, Mashhad, Iran

Tel: +98-51- 38804654

Fax: +98-51-38787430

Email: agroecology@um.ac.ir

Web site: <http://agry.um.ac.ir>



Ferdowsi University
of Mashhad

Vol. 18 No. 1

Spring 2026

Journal of Agroecology (Quarterly)

ISSN: 2008-7713

Contents

- Effects of Irrigation Regimes, Titanium Dioxide Nanoparticles, and Mycorrhizal Fungi on the Quantitative and Qualitative Yield and Physiological Traits of Sage (*Salvia officinalis* L.) in Intercropping with Peppermint (*Mentha piperita* L.)** 1
Abdollah Javanmard, Ali Ostadi and Haniyeh Shabkhiz
- Analysis of Canola (*Brassica napus* L.) Yield Limiting Factors in Miankaleh, Behshahr County, Using Comparative Performance Analysis (CPA)** 39
Atieh Jafari, Afshin Soltani, Ebrahim Zeinali and Safoora Jafar Nodeh
- Land Suitability Assessment and Estimation of Rice (*Oryza sativa* L.) Production Potential in the Yaneh-Sar District of Behshahr County** 63
Karim Riahi, Hossein Kazemi, Afshin Soltani and Fardin Sadeghzadeh
- The Evaluation of Effect Solid Vermicompost, Vermicompost Extract and Seaweed on some Physio-Morphological Characteristics, of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.)** 81
F. Rigi, M. Dahmardeh, M. R. Asgharipou, M. Heidari Majd and A. R. Sirosmehr
- Evaluation of Dry Matter Remobilization and Contribution of Current Photosynthesis of Wheat Grain (*Triticum aestivum* L.) affected as Three Cultivation Methods and Plant Residues** 101
Masoumeh Shabibi, Esfandiar Fateh and Amir Aynehband
- Effect of Combining Organic-Chemical Fertilizers and Biofertilizers on Yield, Essential Oil Quality, and Efficiency of some Elements Absorption in Fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.)** 119
Maedeh Ataei nejad, Mohammadreza Moradi-Telavat, Seyed Ataollah Siadat, Ali Moshattati and Ali Ghatei
- Development of a Cropping Pattern for Major Agricultural Products of the Jiroft Plain Based on Water Footprint and Life Cycle Assessment (LCA)** 139
Mojtaba Mandegari Kohan, Halimeh Piri and Mahdi Keykha