نشریه
آب و خاک
(علوم و صنایع کشاورزی)

جلد ۴۰ شماره ۳
سال ۱۴۰۵

شماره پیاپی ۱۰۷

شاپا: ۴۷۵۷-۲۰۰۸

عنوان مقالات

سازوکارهای وابستگی میکوریزایی: تحلیل فرآیندهای فیزیولوژیک و مولکولی مؤثر در برقراری همزیستی میکوریزا آربوسکولار ۲۴۷
حبیب الله نادیان قمشه

تشخیص وضعیت تغذیه‌ای کلزا (*Brassica napus*) در اقلیم‌های مختلف ایران قبل از مرحله گلدهی ۲۷۷
فریدون نورقلی پور- محمد سعید تدین- محمد پسندیده- محمد علی خودشناس

اثر محلول‌پاشی برگی ترکیبات تیولی بر کاهش آسیب اکسیداتیو و تجمع کادمیوم و سرب در گندم کشت‌شده در یک خاک آهکی آلوده ۲۹۵
زهرا قشلاقی- سید شروین هاشمی اول

استخراج هیدروگراف واحد با استفاده از توابع چگالی احتمال (مطالعه موردی: حوضه آبریز سامیان) ۳۱۱
سالار رضائی قاسم‌قشلاقی- مهسا حسنپور کاشانی- محمدرضا نیک‌پور

تحلیل زمانی تأثیر رویدادهای گرد و غبار بر سلامت پوشش گیاهی با استفاده از سنجش از دور در استان خوزستان ۳۲۷
سیما پورهاشمی- مینا فیروزیزدی- مهدی بروغنی

تحلیل تاب‌آوری اجتماعی در برابر خشک‌سالی با استفاده از شاخص LPCIEA (مطالعه موردی: روستاهای محمدآباد و مجدآباد شهرستان مرودشت استان فارس) ۳۴۹
پیام ابراهیمی- سید مسعود سلیمان‌پور

آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

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

جلد 40 شماره 3 پاییز سال 1405

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

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

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

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

اعضای هیئت تحریریه:

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

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

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

پست الکترونیکی: jswa3@um.ac.ir

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

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

بسم الله الرحمن الرحیم

مندرجات

سازوکارهای وابستگی میکوریزایی: تحلیل فرآیندهای فیزیولوژیک و مولکولی مؤثر در برقراری همزیستی میکوریزا آربوسکولار 247
حبیب الله نادیان قمشه

تشخیص وضعیت تغذیه‌ای کلزا (*Brassica napus*) در اقلیم‌های مختلف ایران قبل از مرحله گلدهی 277
فریدون نورقلی پور- محمد سعید تدین- محمد پسندیده- محمد علی خودشناس

اثر محلول‌پاشی برگی ترکیبات تیولی بر کاهش آسیب اکسیداتیو و تجمع کادمیوم و سرب در گندم کشت‌شده در یک خاک آهکی آلوده 295
زهراقشلاقی - سید شروین هاشمی اول

استخراج هیدروگراف واحد با استفاده از توابع چگالی احتمال (مطالعه موردی: حوضه آبریز سامیان) 311
سالار رضائی قاسم‌قشلاقی - مهسا حسنپور کاشانی - محمدرضا نیک‌پور

تحلیل زمانی تأثیر رویدادهای گرد و غبار بر سلامت پوشش گیاهی با استفاده از سنجش از دور در استان خوزستان 327
سیما پورهاشمی - مینا فیروزیزدی - مهدی بروغنی

تحلیل تاب‌آوری اجتماعی در برابر خشک‌سالی با استفاده از شاخص LPCIEA 349
(مطالعه موردی: روستاهای محمدآباد و مجدآباد شهرستان مرودشت استان فارس)
پیام ابراهیمی- سید مسعود سلیمان‌پور

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

Research Article
Vol. 40, No. 3, Fall. 2026, p. 245-273

Mechanisms of Mycorrhizal Dependency: Analysis of the Physiological, and Molecular Processes Involved in the Establishment of Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis

H. Nadian Ghomsheh[1*]
1- Agricultural and Natural Resources University of Khozestan, Ahvaz, Iran
(*- Corresponding Author Email: nadian_habib@yahoo.com)

Received: 21 June 2026
Revised: 03 August 2026
Accepted: 24 August 2026
Available Online: 24 August 2026

How to cite this article:
Nadian Ghomsheh, H. (2026). Mechanisms of mycorrhizal dependency: Analysis of the physiological, and molecular processes involved in the establishment of arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Journal of Soil and Wather*, *40*(3), 245-273. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jsw.2026.99478.1560

Introduction

Mycorrhizal symbiosis, particularly arbuscular mycorrhiza, is recognized as one of the most widespread and beneficial interactions between plants and soil microorganisms and has been extensively studied. This symbiosis plays a significant role in improving plant nutritional status, enhancing resistance to both biotic and abiotic stresses, reducing the impact of certain pathogens, and promoting synergistic interactions with other beneficial microbial communities. Ultimately, these effects contribute to improved crop health and productivity. One of the most important benefits of this association is the enhancement of plant nutrition. Mycorrhizal plants acquire nutrients either directly through their roots or indirectly via the hyphal network of symbiotic fungi. The predominance of either pathway depends on a complex set of biochemical and molecular mechanisms within the common symbiosis pathway, as well as phosphorus availability, plant phenotypic traits (especially root characteristics), and environmental conditions. Despite its importance, the degree of mycorrhizal dependency varies among plant species and cultivars. Mycorrhizal dependency is defined as the extent to which a plant relies on mycorrhizal fungi to achieve optimal growth or yield. It is determined by the interaction between plant genotype and phenotype in combination with environmental factors.

Mycorrhizal symbiosis is the result of a complex molecular dialogue between plant and fungus, involving the exchange of signals at cellular, molecular, and genetic levels. In the early stages of symbiosis, plants secrete compounds such as strigolactones from their roots, which stimulate spore germination and hyphal branching. This is followed by fungal signalling molecules, including chito-lipo-oligosaccharides, which act as key signals in the initiation and regulation of arbuscular mycorrhizal symbiosis. Disruption in this shared signalling pathway can lead to failure of symbiosis establishment or reduced mycorrhizal dependency.

Under high nutrient conditions, particularly high phosphorus availability, plant secretion of strigolactones is typically reduced. This illustrates how excess soil phosphorus can interfere with the common symbiosis signalling pathway and thereby decrease mycorrhizal dependency. The synthesis and secretion of strigolactones are regulated by the upregulation of genes such as D27, CCD7, CCD8, and MAX1.

Recent advances in plant molecular biology and genetics have identified a set of genes involved in the common symbiosis pathway that play essential roles in fungal signal recognition, activation of cellular responses, and the formation of fungal structures such as arbuscules. These genes, including SYMRK, CCaMK, and CYCLOPS, will be discussed in detail later. Depending on the upregulation or downregulation of these genes in the plant–fungus symbiotic pathway, a higher or lower degree of mycorrhizal dependency can be expected, respectively.

Materials and Methods

This analytical review integrates findings from researchers in this field by utilizing up-to-date studies on the

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)
https://doi.org/10.22067/jsw.9.20269478.1560

intensity of plant–fungus symbiosis and the degree of mycorrhizal dependency from morphological, physiological, biochemical, and especially molecular dimensions. These studies are accessible through major international databases, including Web of Science and Scopus. In addition, Google Scholar provides an open-access platform for identifying recent publications, while specialized resources such as ScienceDirect, SpringerLink, and Taylor & Francis offer valuable journal articles, book chapters, and authoritative reference works related to mycorrhizal dependency and the underlying mechanisms involved, particularly from a molecular perspective.

Results

The results of numerous studies indicate that the establishment of symbiosis between plants and arbuscular mycorrhizal fungi requires a series of complex physiological, biochemical, and molecular interactions. This process is initiated by the secretion of Myc-LCO signalling molecules by the fungus, which are subsequently recognized by specific receptors in plant roots, including SYMRK (DMI2). Following recognition, the common symbiosis signalling pathway is activated, and the release of calcium ions (Ca^{2+}) through DMI1 generates rhythmic calcium oscillations within plant cells. These oscillations function as informational codes that are decoded by the calcium and calmodulin-dependent protein kinase (CCaMK). The calcium signals are then translated into molecular responses, leading to the activation of the transcription factor CYCLOPS and the regulation of symbiosis-related gene expression, ultimately resulting in arbuscule formation. Any disruption or interruption in this signalling pathway may prevent arbuscule development, particularly in non-host plants. The degree of plant dependence on mycorrhizal fungi is influenced by a range of factors, including plant, fungal, and environmental characteristics. Among environmental factors, abiotic stresses such as drought play a critical role. Under drought conditions, the influx of Ca^{2+} into the plant cell cytosol decreases, leading to disturbances in cellular ion homeostasis. However, the presence of mycorrhizal fungi enhances the expression of calcium-sensing and signalling genes, including CBLs, CDPKs, and MAPKs, thereby activating Ca^{2+} -dependent signalling pathways. This process regulates and reinforces the increase in cytosolic Ca^{2+} concentration, which acts as an important secondary messenger during the establishment and maintenance of mycorrhizal symbiosis. Furthermore, numerous studies have demonstrated a significant relationship between mycorrhizal dependency and root morphological characteristics. In general, plant species possessing a magnolioid root architecture exhibit a greater degree of dependence on arbuscular mycorrhizal fungi than species with non-magnolioid root systems.

Conclusions

Although many plant species can establish symbiosis with mycorrhizal fungi, the degree of dependency and effectiveness of this association varies considerably. These differences are largely determined by the complexity of signalling pathways and the regulation of symbiosis-related genes. A deeper understanding of the underlying molecular and cellular mechanisms is essential for improving mycorrhizal symbiosis, although significant challenges remain in its practical application.

Keywords: Myc-LCOs, Mycorrhizal growth response, Non-host plant, Root architecture, Sterigolactones

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۴۰، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵، ص. ۲۷۳-۲۴۵

سازوکارهای وابستگی میکوریزایی: تحلیل فرآیندهای فیزیولوژیک و مولکولی مؤثر در برقراری همزیستی میکوریزا آربوسکولار

حبیب الله نادیان قمشه[1*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۳۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۲

چکیده

طیف گسترده‌ای از گیاهان قادرند با قارچ‌های میکوریزا آربسکولار رابطه همزیستی برقرار کنند. این همزیستی سودمند حاصل مجموعه‌ای از تعاملات مولکولی و بیوشیمیایی بسیار پیچیده میان گیاه و قارچ است. برقراری این همزیستی از طریق تبادل پیام‌های شیمیایی ویژه‌ای آغاز می‌شود که هر یک از دو طرف برای شناسایی و برقراری ارتباط با دیگری ترشح می‌کنند و در نهایت به ایجاد یک ارتباط کارآمد منجر می‌گردد. با وجود این، شدت وابستگی گیاهان به قارچ‌های میکوریزا بسیار متفاوت است. هر گونه اختلال در فرآیندهای پیچیده فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و مولکولی میان دو همزیست، می‌تواند به کاهش وابستگی میکوریزایی یا ناقص ماندن مسیر پیام‌رسانی در برقراری رابطه همزیستی و در نهایت عدم تشکیل آربسکول، که به‌عنوان قلب این همزیستی شناخته می‌شود، منجر شود. در "گیاهان نا میزبان" مسیر پیام‌رسانی مشترک بین قارچ و گیاه، مشابه گیاهان میکوریزایی آغاز می‌شود و تا مراحلی پیش می‌رود، با این حال، این مسیر به‌صورت ناقص متوقف شده و تشکیل آربسکول رخ نمی‌دهد. پیشرفت‌های اخیر در زیست‌شناسی مولکولی نشان داده است که مجموعه‌ای از ژن‌ها موسوم به "ژن‌های مسیر همزیستی مشترک" در شناسایی و برقراری همزیستی نقش اساسی دارند. هر چند پیشرفت‌های حاصل در فناوری‌های زیستی افق‌های تازه‌ای را برای بهبود و تقویت همزیستی میکوریزایی گشوده است، با وجود این، هنوز چالش‌های زیادی در شناخت، گسترش و کاربرد آن‌ها وجود دارند. مقاله مروری-تحلیلی حاضر با هدف ارائه یک دیدگاه جامع و یکپارچه به بررسی سازوکارهای مختلف بیوشیمیایی، مولکولی و فنوتیپی دخیل در میزان وابستگی میکوریزایی گیاهان می‌پردازد. چنین دیدگاهی می‌تواند نقش مهمی در پیش‌برد کشاورزی پایدار و استفاده بهینه از منابع طبیعی ایفا نماید.

واژه‌های کلیدی: استریگولاکتون، پاسخ رشد میکوریزایی، فاکتورهای قارچی، غیرمیزبان، معماری ریشه

مقدمه

در سال‌های اخیر، کاهش حاصلخیزی خاک، محدودیت منابع فسفر و پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی، توجه پژوهشگران را به بهره‌گیری از راه‌کارهای زیستی پایدار جلب کرده است. در این میان، همزیستی میکوریزایی، به‌ویژه میکوریزا آربوسکولار، به‌عنوان یکی از رایج‌ترین و سودمندترین روابط بین گیاهان و ریزجانداران خاک مورد توجه و پژوهش‌های فراوان قرار گرفته است. این همزیستی نقش قابل‌توجهی در بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه، افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی (Dastogeer *et al.*, 2020; Nadian, 2026)، کاهش اثرات برخی عوامل بیماری‌زا (Wang & Chen, 2024)، ایجاد هم‌افزایی با سایر جوامع میکروبی مفید و یا تأثیر بر ترکیب آن‌ها (Hestrin *et al.*, 2019; Lu *et al.*, 2023) و در نهایت افزایش سلامت و عملکرد محصولات کشاورزی ایفا می‌کند. شاید بیشترین اثرات مفید این همزیستی را بتوان بهبود تغذیه گیاه میزبان دانست (Qi *et al.*, 2022;

۱- دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، اهواز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: nadian_habib@yahoo.com)

https://doi.org/10.22067/jsw.9.20269478.1560

Lu *et al.*, 2023). گیاهان همزیست با قارچ‌های میکوریزا عناصر غذایی مورد نیاز خود را از دو مسیر بدست می‌آورند. یک مسیر به‌طور مستقیم است که طی آن ریشه گیاه عناصر غذایی را بدون وابستگی به قارچ‌های میکوریزا مستقیماً از خاک جذب می‌کند. در مسیر دیگر، عناصر غذایی از طریق شبکه هیف‌های خارجی[1] قارچ میکوریزا از خاک جذب و پس از انتقال به هیف‌های قارچی درون ریشه‌ها[2] نهایتا از طریق آربسکول‌ها به ریشه گیاه میزبان منتقل می‌شود. اینکه کدام‌یک از این دو مسیر بر دیگری برتری دارد، هم‌چنانکه خواهیم دید، به مجموعه‌ای از سازوکارهای بیوشیمیایی و مولکولی مسیر همزیستی مشترک و در ترکیب پیچیده با شرایط تغذیه‌ی فسفری گیاه، مشخصات فنوتیپی گیاه (به خصوص ریشه گیاه) و شرایط محیطی بستگی دارد (Smith & Read, 2008).

با وجود اهمیت این همزیستی، میزان "وابستگی میکوریزایی[3]" در گونه‌ها و ارقام مختلف گیاهی متفاوت است. بر حسب تعریف، به میزانی که گیاه برای دستیابی به حداکثر رشد یا عملکرد به قارچ میکوریزا وابسته هست اصطلاحا "وابستگی میکوریزایی" گفته می‌شود. این وابستگی به درجات مختلف بین گیاه و شریک قارچی خود دیده می‌شود (Janose, 1980; Brundrett & Kendrick 1988; Navarro *et al.*, 2026). عوامل متعددی، از عوامل محیطی گرفته تا سازوکارهای همزیستی مشترک بکارگرفته شده توسط هر دو همزیست، در این وابستگی دخالت دارند. به عبارت دیگر، میزان وابستگی میکوریزایی یک گیاه نتیجه برهمکنش فنوتیپ و ژنوتیپ گیاه در ترکیب با مؤلفه‌های محیطی می‌باشد. به‌عنوان مثال گیاهان با سیستم ریشه‌ای انبوه، پرانشعاب و ریشه‌های مویی فراوان معمولا وابستگی کمتری به قارچ‌های میکوریزا آربسکولار دارند تا گیاهان با سیستم ریشه‌ای ضعیف و ریشه‌های مویی ناچیز (Baylis, 1975; Nadian *et al.*, 2013a; Ghasemjokar *et al.*, 2016; Ma *et al.*, 2021). وابستگی میکوریزایی یکی از ویژگی‌های کلیدی گیاهان در بهره‌برداری کارآمد از منابع خاک است و شناخت دقیق آن می‌تواند نقش مهمی در افزایش عملکرد محصولات، کاهش مصرف کودهای شیمیایی، بهبود سلامت خاک و افزایش پایداری کشاورزی داشته باشد. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، هنوز شناخت تنوع ژنتیکی گیاهان، انتخاب سویه‌های مؤثر قارچی، درک سازوکارهای مولکولی همزیستی و ارزیابی عملکرد در شرایط واقعی مزرعه از مهم‌ترین اولویت‌های پژوهشی محسوب می‌شوند.

همزیستی میکوریزایی نتیجه یک گفتمان و دادوستد پیچیده بین گیاه و قارچ است که با تبادل پیام‌ها در سطح سلولی، ملکولی و ژنتیکی صورت می‌گیرد. در مراحل اولیه‌ی همزیستی، گیاهان ترکیباتی مانند استریگولاکتون‌ها[4] را از ریشه ترشح می‌کنند که موجب تحریک جوانه‌زنی اسپورها و رشد هیف‌های خارجی قارچ می‌شود. فرآیندی که با پاسخ متقابل قارچ از طریق ترشح فاکتورهای قارچی همراه است (Nagahashi & Douds, 2011; Tian *et al.*, 2019; Mashiguchi *et al.*, 2021). در واقع، ترکیبات کیتو–لیپوالیگوساکاریدها به‌عنوان فاکتورهای پیام دهنده قارچی[5] در آغاز و تنظیم همزیستی بین گیاه و قارچ‌های میکوریزا آربسکولار شناخته می‌شوند. هر گونه اختلال در این مسیر پیام‌رسانی مشترک می‌تواند به عدم شکل‌گیری همزیستی یا کاهش وابستگی گیاه به میکوریزا منجر شود. معمولا تحت شرایط زیادی عناصر غذایی به خصوص فراوانی فسفر ترشح استریگولاکتون توسط گیاه کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که چگونه زیادی فسفر خاک سبب اختلال در مسیر پیام‌رسانی مشترک همزیستی می‌شود و در نتیجه در کاهش وابستگی میکوریزایی گیاه دخیل است (Yoneyama, 2019). سنتز و ترشح استریگولاکتون توسط گیاه از طریق بیان افزایشی ژن‌های دخیل نظیر *D27*[6]، *CCD7*[7]، *CCD8*[8]، *MAX1*[9] می‌باشند (Alder *et al.*, 2012; Ahmed *et al.*, 2025). پیشرفت‌های اخیر در زیست‌شناسی مولکولی و ژنتیک گیاهی نشان داده است که مجموعه‌ای از ژن‌های دخیل در "مسیر همزیستی مشترک[10]" در شناسایی پیام‌رسانی قارچی، فعال‌سازی پاسخ‌های سلولی و تشکیل ساختارهای قارچی مانند آربوسکول‌ها نقش اساسی دارند. این ژن‌ها که شامل *SYMRK*، *CCaMK* و *CYCLOPS* می‌باشند و بعدا مورد اشاره و بحث قرار خواهند گرفت نقش مهمی در برقراری همزیستی میکوریزایی دارند. بسته به میزان بیان "افزایشی" و یا "کاهشی" این ژن‌ها، در مسیر همزیستی مشترک گیاه و قارچ، می‌توان انتظار وابستگی میکوریزایی "زیاد" و یا "کم" را به‌ترتیب داشت.

نتایج بسیاری از مطالعات نشان می‌دهد که گیاه زمانی‌که تحت تنش‌های غیر زنده نظیر شوری و یا خشکی قرار می‌گیرد وابستگی آن به قارچ میکوریزا افزایش می‌یابد (Liang *et al.*, 2022; Dong *et al.*, 2023; Navarro *et al.*, 2026). این افزایش در وابستگی گیاه به قارچ میکوریزا می‌تواند به‌عنوان جبران بخشی از آسیب‌های وارده تحت تنش باشد. گیاهان برای مقابله با این تنش‌ها، مجموعه‌ای از سازوکارهای بیوشمیایی، فیزیولوژیک و مولکولی را فعال می‌کنند. بیشتر مطالعات اتجام شده طی چند دهه اخیر در زمینه نقش قارچ‌های

1- Extraradical hyphae
2- Intraradical fungal structures
3- Mycorrhizal dependency
4- Sterigolactones
5- Myc-LCO
6- DWARF27
7- Carotenoid Cleavage Dioxygenase 7
8- Carotenoid Cleavage Dioxygenase 8
9- More Axillary Growth
10- Common Symbiosis Pathway

آربسکولار میکوریزا در افزایش تحمل گیاهان به تنش‌های محیطی بیشتر بر صفات رشدی و فیزیولوژیک مانند زیست‌توده، هدایت روزنه‌ای، فتوسنتز و جذب عناصر غذایی متمرکز بوده و سازوکارهای مولکولی و تنظیمات ژنی همزیستی در شرایط تنش‌های غیرزنده هنوز به‌طور جامع شناخته نشده‌اند. بنابراین، لازم است آینده تحقیقات در این زمینه از مطالعات صرفاً توصیفی و تک‌صفتی به سمت پژوهش‌های جامع (از ژن تا اکوسیستم) در شرایط واقعی اقلیمی و کشاورزی حرکت کند. اولین گام در مسیر مقابله گیاه با تنش شوری، درک و شناسایی یون سدیم (Na^+) و به‌دنبال آن، فعال‌سازی مسیر پیام‌رسانی وابسته به کلسیم (Ca^{2+}) است. این فرآیند به‌واسطه ژن‌های کلیدی مانند *GIPC*[1] و *MOCA1*[2] انجام می‌شود که نقش مهمی در آغاز پاسخ‌های سلولی به افزایش شوری ایفا می‌کنند. پس از این مرحله، مسیرهای تنظیمی متعددی فعال می‌شوند که به گیاه کمک می‌کنند تعادل یونی خود را حفظ کند. ژن‌های خانواده *SOSs*[3] شامل *SOS1*، *SOS2* و *SOS3* از اجزای اصلی این مسیر یعنی حذف زیادی Na^+ از سیتوپلاسم و تنظیم نسبت K^+/Na^+ می‌باشند (Jiang *et al.*, 2019). علاوه بر این، ناقل‌های خانواده NHXs با دفع و کاهش غلظت Na^+ از سیتوپلاسم نقش مهمی در هموستازی نسبت K^+/Na^+ دارند.

هر چند پیشرفت در فناوری‌های زیستی شرایط جدیدی برای بهبود همزیستی میکوریزایی را فراهم کرده است، با وجود این، پیچیدگی‌ها و ناشناختی‌های فراوانی کماکان وجود دارد. در این خصوص می‌توان به پیچیدگی مسیرهای تنظیمی، تأثیر شرایط محیطی و گیاهی در این مسیرها و چگونگی بیان ژن‌های دخیل اشاره کرد. بنابراین، هدف از این مقاله‌ی مروری-تحلیلی، بررسی جامع سازوکارهای مختلف بیوشیمیایی، مولکولی و فنوتیپی گیاه، دخیل در برقراری همزیستی میکوریزایی و بیان راهکارهای مبتنی بر مهندسی ژنتیک برای افزایش وابستگی میکوریزایی در گیاهان است. این یافته‌ها می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مهم برای توسعه کشاورزی پایدار و بهره‌برداری از منابع طبیعی مورد استفاده قرار گیرد.

برقراری رابطه همزیستی بین قارچ میکوریزا و گیاه

برقراری رابطه همزیستی بین گیاه و قارچ میکوریزا آربسکولار نیازمند انجام مجموعه‌ای از فرآیندهای پیچیده‌ی بیوشیمیایی و تعاملات مولکولی است. در ذیل مراحل مختلف این همزیستی، سازوکارهای برقراری این رابطه، شکاف‌ها و ناشناختی‌های موجود مورد بحث و تحلیل قرار می‌گیرند. در مراحل اولیه همزیستی، پیش از تماس مستقیم ریشه و قارچ، هر دو شریک همزیست با ترشح مولکول‌های پیام‌رسان در ناحیه ریزوسفر، پاسخ‌های فیزیولوژیک و مولکولی اولیه را در یکدیگر برمی‌انگیزند و زمینه را برای برقراری همزیستی فراهم می‌کنند. شواهد و داده‌های موجود نشان می‌دهند که گفت‌وگوی مولکولی میان گیاه و قارچ با استریگولاکتون‌ها آغاز می‌شود. در گذشته بر سر این موضوع که ارسال پیام همزیستی بین گیاه و قارچ ابتدا از کدام شریک همزیست شروع می‌شود اختلاف نظر وجود داشت. ولی امروزه پژوهشگران بر این عقیده هستند که شروع پیام‌های همزیستی از طریق گیاه میزبان می‌باشد (Diaz *et al.*, 2025). استریگولاکتون‌ها گروهی از فیتوهورمون‌های مشتق از کاروتنوئیدها هستند که توسط گیاه تولید شده و علاوه بر ایفای نقش در برقراری همزیستی، بسیاری از فرآیندهای رشد و نمو گیاه را نیز تنظیم می‌کنند (Akiyama *et al.*, 2005; Akiyamaha & Hayash, 2006; Lopez-Obando *et al.*, 2015; Boyno *et al.*, 2022; Diaz *et al.*, 2025). این ترکیبات به‌عنوان پیام شیمیایی توسط قارچ‌های میکوریزا شناسایی می‌شوند و پاسخ و فعالیت‌های متعددی را در قارچ‌ها سبب می‌شوند. استریگولاکتون‌ها باعث جوانه‌زنی اسپورها، ایجاد و رشد جرم تیوب (اولین رشته منشعب از اسپور) و رشد هیف‌ها (Akiyama *et al.*, 2005) می‌شوند (شکل ۱). اسپورها بدون این ملکول‌های پیام‌آور قادر نیستند مسیر رشد خود را طی کنند و از بین میروند. بهمین دلیل به این قارچ‌ها همزیست‌های اجباری نیز گفته می‌شوند. استریگولاکتون‌ها همچنین متابولیسم میتوکندری و تولید الیگوساکاریدهای کیتین را در قارچ‌ها تحریک می‌کنند (Lanfranco *et al.*, 2018). استریگولاکتون‌ها نه تنها به‌عنوان پیام‌های آغازگر فرآیند همزیستی عمل می‌کنند بلکه در برهمکنش با بسیاری از هورمون‌ها قادرند مؤلفه‌های رشدی و تغذیه‌ای گیاه را نیز بهبود بخشند. پژوهش‌های مولکولی اخیر توانسته‌اند چگونگی بیوسنتز استریگولاکتون‌ها و برهمکنش آنها با بعضی از هورمون‌های گیاهی را توضیح دهند (Mashiguchi *et al.*, 2021). علاوه بر استریگولاکتون‌ها، برخی اسیدهای هیدروکسی مانند ۲-هیدروکسی تترادکانوئیک[4] و ۲-هیدروکسی دودکانوئیک[5] نیز رشد هیف قارچ‌ها را تحریک می‌کنند (Nagahashi & Douds, 2011). به‌طور کلی مطالعات زیادی در خصوص چگونگی بیوسنتز استریگولاکتون‌ها و ژن‌های دخیل در انتقال استریگولاکتون‌ها تاکنون صورت گرفته شده است (Mashiguchi *et al.*, 2021; Nagahashi & Douds, 2011; Tian *et al.*, 2019). مطالعات نسبتا جدید نشان می‌دهد استریگولاکتون‌ها تنها ملکول‌های

1- *Glycosyl Inositol Phosphoryl Ceramide* (*GIPC*)
2- Monocation-induced [Ca^{2+}] increase1
(ژنی که در افزایش کلسیم سیتوزولی در پاسخ به کاتیون‌های تک ظرفیتی سدیم نقش دارد)

3- *Salt Overly Sensitive (SOS)* حساسیت بیش از حد به شوری
4- 2-hydroxytetradecanoic acid (2OH-TDA)
5- 2-hydroxydodecanoic acid (2OH-DDA)

پیام‌دهی گیاه در شناسایی سیگنال‌های قارچ نمی‌باشند بلکه ترکیباتی نظیر ناقل N-acetylglucosamine و گیرنده‌های خانواده alpha/beta-fold hydrolase در شناسایی پیام‌های قارچ و آغاز مراحل اولیه همزیستی میکوریزا نقش دارند (Nadal *et al*., 2017; MacLean *et al*., 2017). این یافته‌ها نشان می‌دهند که ادراک قارچ توسط گیاه بسیار پیچیده‌تر از آن چیزی است که پیش‌تر تصور می‌شد و احتمالاً گیرنده‌های دیگری به‌طور همزمان در این فرآیند مشارکت دارند. با توجه به نقش دوگانه استریگولاکتون‌ها در تنظیم فرآیندهای رشدی گیاه و پیام‌رسانی در ریزوسفر، این سؤال اساسی مطرح می‌شود که آیا سنتز این ترکیبات در گیاهان در ابتدا به‌منظور ایفای نقش درون‌زاد آن‌ها به‌عنوان تنظیم‌کننده‌های رشد و نمو بوده است یا آنکه نقش برون‌زاد آن‌ها به‌عنوان مولکول‌های پیام‌رسان برای برقراری همزیستی با قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار، منشأ تکاملی و کارکرد اولیه این ترکیبات را تشکیل می‌دهد. مطالعات جدید پاسخ نسبتاً روشنی به این سؤال داده‌اند. اگرچه امروزه استریگولاکتون‌ها یک هورمون گیاهی شناخته شده محسوب می‌شوند، اما نقش اولیه و احتمالاً اصلی آن‌ها در طول تکامل گیاهان خشکی‌زی، پیام‌رسانی ریزوسفری بوده است. مطالعه کومودا و همکاران (Komoda *et al*., 2022) با استفاده از جهش‌یافته‌های گونه‌ای از گیاه جگرواش[1] نشان دادند که استریگولاکتون‌های ترشح شده و استریگولاکتون‌های دخیل در پیام‌رسانی هورمونی می‌توانند تا حدودی مسیرهای مستقلی داشته باشند. این یافته تائیدی بر این فرضیه است که گیاهان ابتدا از این مولکول‌ها برای جذب قارچ‌های میکوریزا استفاده کرده‌اند و سپس همان مولکول‌ها مشابه را در سیستم تنظیم رشد داخلی خود بکار برده‌اند.

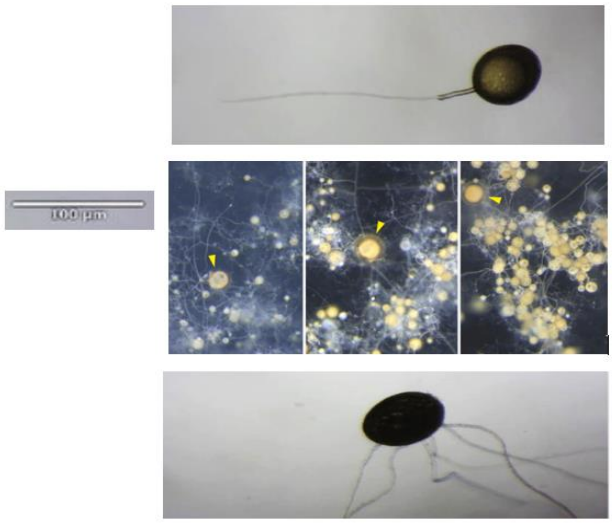
در مقابل، شریک دیگر این همزیستی یعنی قارچ‌های میکوریزا، مجموعه‌ای از مولکول‌های پیام‌دهنده شامل کیتو و لیپوالیگوساکاریدها[2] (Myc-LCOs) سنتز و به ریزوسفر ترشح می‌کنند که به‌عنوان فاکتورهای قارچی[3] شناخته می‌شوند (Maillet *et al*., 2011; Genre *et al*., 2013; He *et al*., 2024). این ترکیبات پیام‌دهنده قارچی قادرند مسیر پیام‌رسانی[4] را برای برقراری رابطه همزیستی با ریشه گیاه فعال نمایند (Genre *et al*., 2013; Ho-Plagaro *et al*., 2022; He *et al*., 2024). قارچ‌های میکوریزا گیرنده‌های بسیار حساس برای دریافت پیام‌رسان استریگولاکتون‌ها دارند، به‌طوری که حتی مقادیر خیلی کم استریگولاکتون‌ها می‌تواند جوانه زنی اسپور و رشد هیف‌ها را فعال کند (Ho-Plagaro & García-Garrido, 2022).

سنتز فاکتورهای قارچی و استریگولاکتون‌ها

نظر به نقش محوری فاکتورهای قارچی (Myc-LCOs) و استریگولاکتون‌ها در آغاز گفت‌وگوی مولکولی و استقرار همزیستی، در این‌جا به اختصار مسیر بیوسنتز این مولکول‌ها و ژن‌های کلیدی دخیل در سنتز و تنظیم آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. اطلاعات ما درباره بیوسنتز فاکتورهای قارچی Myc-LCOs هنوز به اندازه فاکتورهای nod در ریزوبیوم‌ها کامل نیست. با این حال، طی دهه اخیر پیشرفت‌های مهمی حاصل شده است. در همزیستی میان گیاهان لگوم و باکتری‌های ریزوبیومی در فرآیند تثبیت زیستی نیتروژن، مسیر بیوسنتز لیپوکیتوالیگوساکاریدها به‌خوبی شناخته شده است و ژن‌های کلیدی دخیل در این مسیر، به‌ویژه ژن‌های nod شامل nodA، nodB و nodC به‌طور دقیق شناسایی و مطالعه شده‌اند. این ژن‌ها در سنتز ساختار کیتینی الیگوساکاریدی نقش اساسی ایفا می‌کنند (Atkinson *et al*., 1994; Yang *et al*., 2022).

در مقابل، مطالعات انجام‌شده در قارچ‌های میکوریزا آربسکولار، از جمله گونه‌هایی مانند *رایزوفاگوس ایریگولاریس* نشان می‌دهد که پیام‌های Myc-LCO نیز در آغاز فرآیند همزیستی با گیاهان نقش مهمی دارند. در این میان، مجموعه‌ای از ژن‌ها و آنزیم‌های مرتبط با متابولیسم کیتین نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند، از جمله ژن‌های *Chitin synthase* که در سنتز زنجیره‌های کیتینی نقش دارند، و همچنین ژن‌های *Chitin deacetylase* و *Chitinase-like enzymes* که در سنتز الیگوساکاریدهای کیتینی دخیل هستند (Maillet *et al*., 2011; Toro & Brachmann, 2016; Rush *et al*., 2020). با این وجود، برخلاف سیستم ریزوبیومی که در آن مسیر ژنتیکی بیوسنتز LCO ها به‌واسطه مجموعه مشخص ژن‌های nod به‌خوبی تعریف شده است، در قارچ‌های میکوریزا مسیر ژنتیکی و آنزیمی مسئول تولید مستقیم Myc-LCO هنوز به‌طور کامل شناسایی نشده است. تاکنون تنها شواهد غیرمستقیم، به‌ویژه بر اساس داده‌های ژنومی، احتمال وجود ژن‌هایی مشابه با ژن‌های nod را در این قارچ‌ها مطرح کرده‌اند، ولی نقش دقیق این ژن‌ها و میزان مشارکت آن‌ها در بیوسنتز Myc-LCO همچنان نامشخص باقی مانده است. در اینجا باید متذکر شد که شناسایی Myc-LCOها در قارچ‌های میکوریزا بر پایه این فرض صورت گرفته شده است که این مولکول‌ها از نظر ساختار شیمیایی مشابه Nod-factor های باکتری‌های ریزوبیا هستند و به‌عنوان پیام‌های مهم این قارچ‌ها شناخته می‌شوند (Maclean *et al*., 2017)، اما احتمالاً تنها پیام‌های دخیل در برقراری همزیستی نیستند، زیرا قارچ‌ها ممکن است مولکول‌های پیام‌رسان دیگری نیز تولید کنند و همه گیاهان نیز الزاماً Myc-LCOها را به یک شکل شناسایی نکنند.

1- *Marchantia paleacea*
2- Mycorrhizal lipochitooligosaccharides (Myc-LCOs)
3- Myco factor
4- Signaling



شکل ۱- تصویر بالا یک تک اسپور همراه با جرم تیوب (اولین انشعاب سیتوپلاسمی خارج شده از اسپور و شروع رشد هیف) و تصویر زیرین اسپور با تولید چند جرم تیوپ و تصویر میانی اجتماعی از اسپورها به رنگ زرد همراه با جرم تیوب و انشعابات هیفی *رایزوفاگوس ایریگولاریس* (Tanaka *et al*., 2022)

Figure 1- Upper image: a single spore showing a germ tube (the first cytoplasmic protrusion emerging from the spore and representing the initiation of hyphal growth), lower image: a spore producing multiple germ tubes, middle image: a spore community of yellow-colored spores accompanied by germ tubes and hyphal branching of *Rhizophagus irregularis* (Tanaka *et al*., 2022)

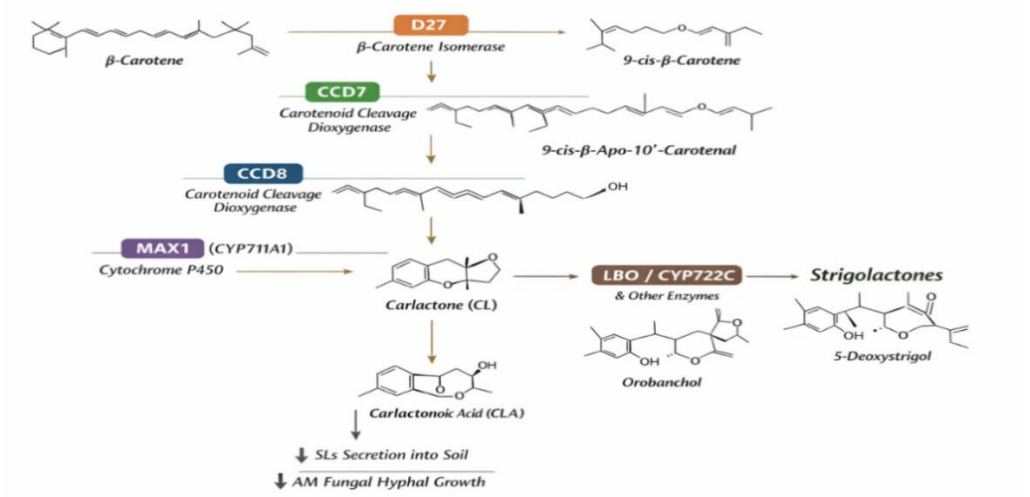
ازاین‌رو سازوکار تشخیص قارچ‌های میکوریزا توسط گیاهان هنوز به‌طور کامل شناخته نشده است. این خلأ تحقیقاتی یکی از چالش‌های اساسی در شناخت سازوکارهای مولکولی برقراری همزیستی میکوریزایی محسوب می‌شود. لذا، شناسایی ژن‌های مسئول سنتز این مولکول‌ها همچنان یکی از موضوعات مهم در مطالعات مولکولی همزیستی میکوریزایی به شمار می‌رود و انتظار می‌رود پیشرفت‌های آینده در این زمینه بتواند به روشن شدن این مسیر بیوسنتزی کمک کند.

از نظر بیوشیمیایی، استریگولاکتون‌ها از کاروتنوئیدها ساخته می‌شوند و چند ژن کلیدی در مسیر سنتز آنها دخیل هستند. مسیر سنتز استریگولاکتون‌ها به صورت ذیل خلاصه می‌شود:

β-carotene → Carlactone → Carlactonoic acid → Strigolactones

ژن‌های دخیل در سنتز استریگولاکتون‌ها شامل *D27*[۱]، *CCD7*[۲]، *CCD8*[۳]، *MAX1*[۴] می‌باشند (Ahmed *et al*., 2025). در این مسیر، آنزیم D27، که به‌عنوان اولین و مهم‌ترین آنزیم در بیوسنتز استریگولاکتون‌ها شناخته می‌شود، ابتدا β-کاروتن را به 9-cis-β-کاروتن ایزومریزه می‌کند[۵]. سپس آنزیم‌های CCD7 و CCD8 با انجام واکنش‌هایی، پیش‌ماده‌ای به نام کارلاکتون[۶] را تولید می‌کنند که حدواسط اصلی در بیوسنتز استریگولاکتون‌ها محسوب می‌شود. در مرحله بعد، آنزیم MAX1، از خانواده سیتوکروم، کارلاکتون را به کارلاکتونوئیک اسید و سپس به انواع مختلف استریگولاکتون‌ها مانند ۵-دئوکسی‌استریگول[۷]، استریگول[۸]، سولاناکول[۹] تبدیل می‌کند. این ترکیبات از ریشه گیاه به ریزوسفر ترشح شده و رشد و شاخه‌زایی هیف قارچ‌های میکوریز آربوسکولار مانند *رایزوفاگوس ایریگولاریس* را تحریک می‌کنند و در نتیجه در برقراری همزیستی میکوریزایی نقش مهمی دارند (Alder *et al*., 2012; Ahmed *et al*., 2025).

1- DWARF27
2- Carotenoid Cleavage Dioxygenase 7
3- Carotenoid Cleavage Dioxygenase 8
4- More Axillary Growth
۵- توضیح اینکه در ژن *D27*، حرف D مخفف Dwarf به معنی کوتوله می‌باشد. در ژنتیک گیاهی، بسیاری از ژن‌هایی که باعث کاهش رشد گیاه یا کوتاه شدن ساقه می شوند با نام DWARF شناخته می شوند. دلیل این نام‌گذاری این ا ست که در گیاهانی که این ژن دچار جهش شده ا ست، فنوتیپ کوتوله م شاهده می شود. عدد ۲۷ به این معنا ست که این ژن بیست و هفتمین ژن شناخته شده از گروه ژن‌های dwarf در گونه‌های گیاهی است.
6- Carlactone
7- 5-Deoxystrigol
8- Strigol
9- Solanacol



شکل ۲- مسیر بیوسنتز استریگولاکتون‌ها در گیاهان

(این تصویر بر مبنای داده‌های مستخرج از مقالات از جمله Alder *et al*., 2012; Yoneyama, 2019 می‌باشد).

Figure 2- Biosynthetic pathway of strigolactones in plants

(this figure is based on data extracted from previous studies, including Alder *et al*., 2012 and Yoneyama, 2019).

زمانی‌که گیاه با کمبود فسفر مواجه هست بیان ژن‌های اشاره شده در بالا به شدت بیان می‌شوند و این منجر به سنتز بیشتر استریگولاکتون در ریشه گیاه، ترشح آن به ریزوسفر و پیام‌رسانی ریشه‌ای می‌شود (Kodama *et al*., 2022). مسیربیوسنتز استریگولاکتون در شکل ۲ نشان داده شده است.

پروتئین D14 (DWARF1) یک گیرنده استریگولاکتون در گیاهان است. در برنج این گیرنده به نام D14L(DWARF14-LIKE) شناخته می‌شود. پس از اتصال استریگولاکتون به D14، این گیرنده فعال شده و با پروتئین‌های پیام‌رسانی مانند MAX2/D3 و SMXL/D53 وارد برهم‌کنش شده و آن‌را تخریب می‌نماید. SMAX1 یک تنظیم‌کننده منفی است؛ بنابراین تخریب آن باعث فعال شدن ژن‌های مورد نیاز برای همزیستی میکوریزایی می‌شود (Stanga *et al*., 2013; Hull *et al*., 2021).

در برقراری همزیستی بین گیاهان و قارچ‌های میکوریزا آربسکولار، یک مسیر پیام‌رسانی مشترک[1] فعال می‌شود. در این مسیر، ژن‌های کلیدی متعددی نقش دارند (شکل ۳) که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:

گیرنده LysM[2]

گیرنده‌های LysM حسگرهای سطح سلول ریشه هستند که در مراحل اولیه پیام‌های قارچ میکوریزا را مستقیما تشخیص داده و آغازگر مسیر پیام‌رسانی همزیستی بین گیاه و قارچ می‌شوند. بدون وجود و فعال شدن این گیرنده‌ها همزیستی شروع نمی‌شود.

ژن SYMRK[3]

پروتئین SYMRK یک گیرنده کینازی شبه‌گیرنده است که در غشای پلاسمایی سلول‌های ریشه قرار دارد و پیام‌های رسیده از قارچ را از طریق گیرنده‌های LysM دریافت و آن را به اجزای پائین دستی مسیر پیام‌رسانی همزیستی منتقل و یک‌پارچه می‌نماید (شکل ۳). شواهد جدید نشان می‌دهد که SYMRK علاوه بر ایفای نقش یک پروتئین انتقال‌دهنده‌ی پیام، به‌عنوان یک عامل یکپارچه‌کننده مولکولی، در تشکیل کمپلکس‌های گیرنده‌ای و هماهنگ‌سازی رویدادهای اولیه شناسایی همزیست نقش اساسی دارد. فعال شدن این پروتئین، آغازگر مجموعه‌ای از رویدادهای پیام‌رسانی شامل القای نوسانات کلسیمی هسته‌ای و فعال‌سازی ژن‌های اختصاصی همزیستی است که در نهایت به تشکیل آربوسکول و استقرار موفق قارچ در سلول‌های ریشه منجر می‌شود. حذف یا ایجاد جهش در ژن SYMRK در گیاهان مختلف موجب اختلال شدید یا توقف کامل مراحل اولیه برقراری همزیستی میکوریزایی و ریزوبیومی شده است که بیانگر نقش محوری این ژن در آغاز و تداوم مسیر پیام‌رسانی همزیستی است برخلاف تصور اولیه، به نظر می‌رسد SYMRK الزاماً گیرنده مستقیم مولکول‌های Myc-LCOs نیست، بلکه پس از شناسایی این مولکول‌ها توسط گیرنده‌های خانواده LysM، در تشکیل کمپلکس‌های پیام‌رسانی

1- Common symbiosis signaling pathway (CSSP)
2- Lysin Motif
3- Symbiosis receptor-like kinase (SYMRK)

و انتقال مؤثر پیام نقش کلیدی دارد. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که بخش بیرونی این پروتئین تحت فرآیندهای تنظیمی خاص قرار می‌گیرد که می‌تواند در تنظیم حساسیت و شدت پاسخ همزیستی نقش دارد (Antolion Llvora *et al*., 2014). این مکانیزم به گیاه اجازه می‌دهد حساسیت پاسخ خود را بر اساس سطح و غلظت سیگنال‌های دریافتی از قارچ تنظیم کند. اگر این سیستم کنترلی وجود نداشته باشد، پاسخ همزیستی می‌تواند بیش از حد شدید شده و با تحریک سیستم ایمنی گیاه، به یک رابطه پاتوژنی (بیماری‌زا) یا هدررفت انرژی گیاه منجر شود (Holsters, 2008; Antolion Llvora *et al*., 2014).

ژن‌های *DMI1* و *DMI2*[1]

ژن *DMI1*

در مسیر مشترک مولکولی همزیستی میکوریزایی، این ژن نقش کلیدی در ایجاد نوسانات دوره‌ای کلسیم در هسته سلول‌های ریشه گیاه دارند. در واقع، پروتئین DMI1 به‌عنوان یک کانال یونی در غشای هسته آزاد شدن دوره‌ای Ca^{2+} از ذخایر داخلی و ایجاد نوسانات Ca^{2+} در اطراف هسته (Ca^{2+} spiking) در پاسخ به پیام‌های همزیستی را تنظیم می‌کند و جهش در این ژن باعث توقف کامل این نوسانات می‌شود (Charpentier *et al*., 2013; Yuan *et al*., 2022). آنزیم ردوکتاز HMGR1[2] در تعامل با DMI2 برای تولید نوسانات دوره‌ای Ca^{+2} و ادامه مسیر پیام‌رسانی همزیستی ضروری است (Maclean *et al*., 2017).

ژن *DMI2*

این ژن در مسیر مشترک همزیستی قرار دارد و عملکرد آن بین گیرنده‌های اولیه و اجزای هسته‌ای مسیر واقع شده است. در واقع، انتقال پیام از غشا به داخل سلول را تنظیم می‌کند.

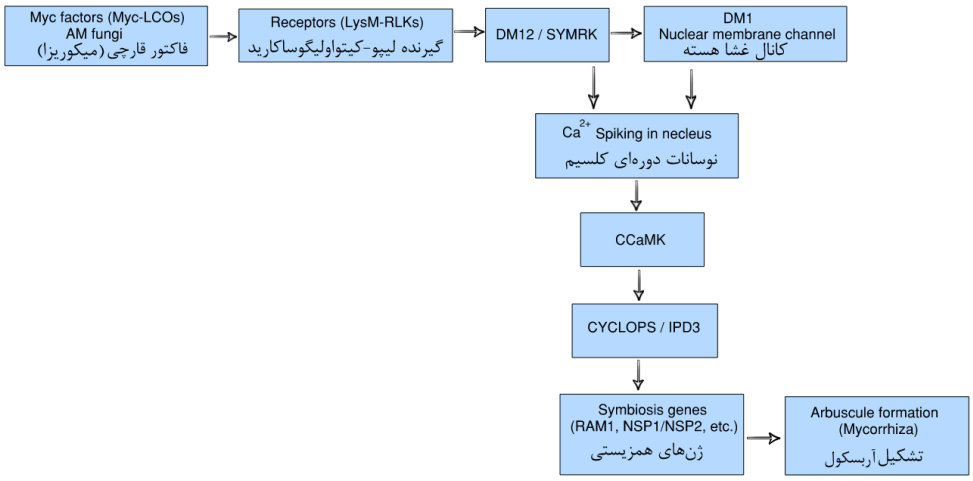
ژن *CCaMK*[3]

این ژن یکی دیگر از ژن‌های کلیدی در "مسیر پیام‌رسانی مشترک همزیستی" در گیاهان است که نقش حیاتی در برقراری و تنظیم همزیستی بین گیاه و قارچ‌های میکوریزا ایفا می‌کند. این ژن یک پروتئین کیناز وابسته به کلسیم و کالمودولین[4] است که در هسته سلول گیاهی قرار دارد (Ho-Plagaro & García-Garrido, 2022). ژن *CCaMK*به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی مسیر پیام‌رسانی همزیستی، وظیفه تشخیص و رمزگشایی[5] نوسانات کلسیم هسته‌ای (Ca^{2+}) را بر عهده دارد و از این طریق فرآیند کلونیزاسیون قارچی و شکل‌گیری روابط همزیستی را تنظیم و هدایت می‌کند. این ژن در شرایط پایه و زمانی که غلظت یون کلسیم در سطح پایینی قرار دارد، به‌صورت غیرفعال باقی می‌ماند. با افزایش میزان Ca^{2+} در هسته، *CCaMK* فعال شده و از طریق انتقال پیام‌های درون‌سلولی، بیان ژن‌های مرتبط با برقراری همزیستی را تحریک می‌کند. لذا، فعالیت این ژن نقش اساسی در آغاز و تداوم ارتباط همزیستی میان گیاه و قارچ ایفا کرده و موجب تشکیل ساختارهای همزیستی و بهبود تعاملات سلولی میان دو شریک همزیست می‌شود. باید توجه داشت تنها افزایش کلسیم فعالیت ژن *CCaMK* را سبب نمی‌شود، زیرا ممکن است افزایش کلسیم ناشی از عوامل دیگری باشد. تنها افزایشی که به‌صورت دوره‌ای یا ریتمیک باشد می‌تواند فعالیت این ژن را در مسیر برقراری همزیستی قرار دهد. منظور از نوسانات دوره‌ای کلسیم در هسته سلول[6]، افزایش سریع Ca^{2+}در هسته و سپس کاهش مجدد آن به سطح اولیه و تکرار این چرخه به‌صورت ریتمیک (هر چند ده ثانیه تا چند دقیقه) است. این نوسانات الگوی اطلاعاتی دارند (فرکانس و دامنه مشخص) و صرفا پیام برقراری همزیستی را بیان می‌کنند. بنابراین، کلسیم در مسیر مشترک همزیستی گیاهان به‌عنوان یک پیام‌رسان ثانویه بسیار مهم و تعیین‌کننده عمل می‌کند که پیام‌های شناسایی قارچ را به الگوهای نوسانی Ca^{2+} در هسته سلول تبدیل می‌نماید. این نوسانات هسته‌ای توسط *CCaMK* رمزگشایی، شناسایی و تفسیر شده و در ادامه، مسیرهای پیام‌رسانی درون‌سلولی مرتبط با همزیستی را فعال می‌کنند. فعال شدن این مسیرها در نهایت موجب القای بیان ژن‌های دخیل در کلونیزاسیون قارچی، تمایز سلولی و تشکیل آربسکول در سلول‌های ریشه گیاه میزبان می‌شود. از این‌رو، کلسیم به‌عنوان حلقه واسط میان تشخیص پیام قارچی و پاسخ ژنتیکی گیاه در فرآیند همزیستی شناخته می‌شود (Sing & Parniske, 2012; Ho-Plagaro & García-Garrido, 2022).

1- Does not make infection
2- 3-Hydroxy-3-Methylglutaryl-Coenzyme A
3 -Calcium/Calmodulin-dependent Protein Kinase (CCaMK)

۴- کالمودولین یک پروتئین تنظیم‌کننده کلسیم است که با پیوند به Ca^{2+}، تغییر شکل داده و فعالیت آنزیم‌ها و پروتئین‌های دیگر را تنظیم می‌کند.

5- Decoder
6- Nuclear Ca^{2+} spiking



شکل ۳- مسیر پیام‌رسانی همزیستی در برقراری همزیستی و تشکیل آربسکول بهمراه ژن‌های دخیل در این مسیر

Figure 3- Symbiotic signaling pathway involved in the establishment of symbiosis and arbuscule formation, along with the genes participating in this pathway

ژن *CYCLOPS*[1]

این ژن نیز یکی دیگر از اجزای کلیدی در مسیر پیام‌دهی همزیستی بین گیاهان و قارچ‌های میکوریزا است و در مرحله‌ای عمل می‌کند که پیام‌رسانی کلسیمی تولید شده در هسته باید به فعال شدن ژن‌های همزیستی تبدیل شوند. این ژن در واقع یک فاکتور رونویسی تنظیمی است که نقش مهمی در تبدیل پیام های Ca^{2+} به پاسخ‌های ژنی دارد (شکل ۳).

در یک جمع‌بندی تحلیلی، می‌توان گفت که از زمانی‌که مایلت و همکاران (Maillet *et al.*, 2011) برای اولین بار سنتز و ترشح لیپوکیتوالیگوساکارید را در قارچ‌های *گلوموس اینترارادیسز* (نام جدید *رایزوفاگوس اینترارادیسز*) همزیست با نوعی یونجه کشف نمودند، تاکنون ۱۷۲ ژن با نقش عملکردی ثابت شده، دخیل در فرآیندهای مختلف همزیستی از جمله پیام‌رسانی مشترک، شناسایی شده‌اند (Wang *et al.*, 2026). علی‌رغم پیش‌رفت‌های حاصل طی دو دهه اخیر هنوز شکاف‌های زیادی در درک سازوکارهای تنظیمی مسیر همزیستی مشترک باقی است و بسیاری از جنبه‌های مولکولی و عملکردی این فرآیندها نیازمند بررسی‌های بیشتر هستند. از جمله مهم‌ترین خلاءهای پژوهشی در این زمینه، شناسایی کامل ماهیت و تنوع پیام‌رسان‌های اولیه تولیدشده توسط قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار و تعیین این موضوع است که آیا گونه‌های مختلف این قارچ‌ها از مجموعه‌ای مشابه از مولکول‌های پیام‌رسان برای آغاز همزیستی استفاده می‌کنند یا هر گونه دارای الگوی پیام‌رسانی اختصاصی است. افزون بر این، سهم نسبی هر یک از دو همزیست در تولید و تنظیم پیام‌های شیمیایی آغازگر همزیستی، به‌ویژه فاکتورهای قارچی و استریگولاکتون‌های ترشح‌شده از ریشه گیاه، هنوز به‌طور دقیق مشخص نشده است. همچنین روشن نیست که تغییرات کمی و کیفی این پیام‌ها چگونه بر کارایی برقراری همزیستی، میزان کلونیزاسیون ریشه، شدت وابستگی میکوریزایی گیاه و نیز برهم‌کنش میان گونه‌های مختلف گیاه و قارچ تأثیر می‌گذارد. از سوی دیگر، چگونگی یکپارچه‌سازی این سیگنال‌ها با مسیر پیام‌رسانی مشترک (CSSP) و تعامل آن‌ها با شبکه‌های هورمونی و پاسخ‌های دفاعی گیاه، همچنان از مهم‌ترین موضوعات پژوهشی در این زمینه به شمار می‌رود. در اینجا لازم به تاکید است که بسیاری از نتایج گزارش شده از میان گونه‌های مختلف قارچ و گیاه بدست آمده است. این در حالی است که هدایت مطالعات آینده به یک جمع‌بندی و تلفیق نظام‌مند نیاز دارد (Wang *et al.*, 2026). بر این اساس و به‌منظور رفع خلاء تحقیقاتی موجود در این زمینه، پیشنهاد می‌شود تا یک مطالعه جامع متاآنالیز[2] به‌طور اختصاصی مسیر مشترک پیام‌رسانی بین گونه‌های مختلف قارچ میکوریزا آربوسکولار و گیاه را از نظر مولکولی و ژنتیکی به‌طور یکپارچه و جامع

۱- در زیست‌شناسی مولکولی، نام CYCLOPS (غول یک چشم) برای این ژن به‌صورت نمادین انتخاب شده است و بیشتر به نام‌گذاری پژوهشی مربوط می‌شود.

۲- متاآنالیز (Meta-Analysis) یک روش آماری پیشرفته است که نتایج مطالعات مستقل و مرتبط را به صورت سیستماتیک ترکیب و تحلیل می‌کند تا به یک نتیجه کلی، جامع و معتبر دست یابد. این نوع مطالعه به ویژه زمانی‌که نتایج مطالعات پراکنده یا متناقض باشند با ترکیب داده‌ها به شناسایی الگوهای کلی کمک کرده و تصمیم‌گیری از شواهد را معتبر می‌سازد.

مورد بررسی و تحلیل قرار دهد.

وابستگی میکوریزایی

قارچ‌های میکوریزا آربسکولار با بیش از ۹۰ درصد گونه‌های گیاهی ارتباط همزیستی برقرار می‌نمایند (Smith & Read, 2008). با وجود این، نتایج بسیاری از مطالعات نشان می‌دهد که گیاهان مختلف دارای وابستگی‌های میکوریزایی[1] متفاوتی می‌باشند (Nadian *et al.*, 2013a; McHaffie & Maherali, 2020; Guo *et al.*, 2022; Romero *et al.*, 2023). در واقع، وابستگی میکوریزایی به میزان نیاز یک گیاه به همزیستی با قارچ‌های میکوریزا برای دستیابی به رشد و تغذیه مناسب و بهتر گفته می‌شود (Gerdemann, 1975; Ghosh *et al.*, 2016). به این ترتیب، زمانی‌که مؤلفه‌های رشدی و تغذیه‌ای یک گیاه با حضور قارچ میکوریزا بیشتر از همان گیاه بدون حضور قارچ میکوریزا باشد می‌توان این گیاه را وابسته به قارچ میکوریزا دانست (Singh, 2001). این پدیده نتیجه مجموعه‌ای از سازوکارهای مولکولی، بیوشیمیایی و فیزیولوژیک میان گیاه و قارچ است. نتایج مطالعات انجام شده در اکوسیستم‌های طبیعی اختلاف‌های قابل ملاحظه‌ای از گونه‌های گیاهی را در شدت و پایداری تشکیل میکوریزا نشان می‌دهند. بنابراین برای یک خاک با درجه حاصلخیزی معین، میزان میکوریزایی شدن گونه‌های گیاهی می‌تواند شدید، متوسط و یا بدون میکوریزا باشند (Janose, 1980; Brundrett & Kendrick, 1988). بر این اساس، میکوریزایی شدن گونه‌های گیاهی می تواند به سه دسته شامل میکوریزایی شدن الزامی[2]، انتخابی[3] و بدون‌میکوریزایی شدن[4] تقسیم شوند. میکوریزایی شدن الزامی به این معنی است که گیاه الزاما نیاز به برقراری ارتباط همزیستی با قارچ میکوریزا دارد (Janose, 1980). این گیاهان کلونیزاسیون میکوریزایی را به‌طور پیوسته در تمام ریشه‌های جوان خود فراهم و حمایت می‌کنند. گیاهانی که به‌طور انتخابی میکوریزایی می‌شوند به این معنی است که شرایط خاص، مثلاً حاصلخیزی ضعیف خاک، برای میکوریزایی شدن گیاه باید وجود داشته باشد. به‌طور کلی گیاهانی که میکوریزایی شدن برای آنها به‌طور پیوسته وجود ندارد و یا میزان کلونیزاسیون میکوریزایی آنها بسیار کم است (کمتر از ۲۵ درصد) به دسته میکوریزایی شدن انتخابی تعلق دارند (Brundrett & Kendrick, 1988). دسته سوم گیاهان غیر میکوریزایی به گیاهانی گفته می‌شوند که وقتی جوان و سالم هستند به‌طور پیوسته در مقابل میکوریزایی شدن از خود مقاومت نشان می‌دهند و از تشکیل ساختارهای قارچی جلوگیری می‌کنند (Brundrett, 1991).

در ارزیابی کارکرد همزیستی میکوریزا آربوسکولار در گیاهان، پلنچتی و همکاران (Plenchette *et al.*, 1398)، با الهام از نظرات پیشین، وابستگی میکوریزایی را برای اولین بار از طریق ارائه معادله زیر تعریف و کمیت سازی نمود:

$$MD\ (\%) = [(MDM - NDM)/MDM] \times 100 \qquad (۱)$$

بر طبق رابطه فوق، وابستگی میکوریزایی (MD) بر حسب درصد برابر با خارج قسمت تفاضل وزن ماده خشک گیاه میکوریزایی (MDM[5]) و غیر میکوریزایی (NMD[6]) بر وزن ماده خشک گیاه میکوریزایی (MDM).

این در حالی است که هتریک و همکاران (Hettrick *et al.*, 1992) پاسخ رشد میکوریزایی (MGR[7]) بر حسب درصد را برابر با خارج قسمت تفاضل وزن ماده خشک گیاه میکوریزایی و غیرمیکوریزایی بر وزن ماده خشک گیاه غیرمیکوریزایی برطبق رابطه ذیل نشان می‌دهد:

$$MGR\ (\%) = [(MDM - NDM)/NDM] \times 100 \qquad (۲)$$

وابستگی میکوریزایی و پاسخ رشد میکوریزایی دو شاخص مهم در ارزیابی کارکرد همزیستی میکوریزا آربوسکولار در گیاهان به شمار می‌روند. این دو شاخص اگر چه بهم ارتباط نزدیکی دارند، اما از نظر مفهومی یکسان نبوده و چندان قابل جایگزینی با یکدیگر نمی‌باشند و استفاده همزمان از آن‌ها می‌تواند تصویر دقیق‌تری از کارکرد و اهمیت همزیستی میکوریزا در سیستم گیاه–خاک را ارائه دهد. همان‌طور که قبلا اشاره گردید، وابستگی میکوریزایی به میزانی اطلاق می‌شود که در آن یک گیاه برای دستیابی به حداکثر رشد و عملکرد، به کلونیزاسیون قارچی نیاز دارد و در واقع بیانگر میزان ناتوانی گیاه در رسیدن به رشد مطلوب در غیاب همزیستی است. در مقابل، پاسخ رشد میکوریزایی بیانگر میزان افزایش رشد گیاه در اثر استقرار همزیستی نسبت به شرایط غیرمیکوریزایی بوده و شاخصی از شدت اثر همزیستی بر عملکرد گیاه محسوب می‌شود. به عبارت دیگر، وابستگی میکوریزایی بیشتر بازتابی از ویژگی‌های فیزیولوژیک و ژنتیکی گیاه است ولی پاسخ رشد میکوریزایی، به میزان زیادی، تحت تأثیر شرایط محیطی به‌ویژه فراهمی عناصر غذایی خاک قرار دارد. زمانی‌که شدت برقراری ارتباط همزیستی بر حسب وابستگی میکوریزایی بیان می‌شود این وابستگی حداکثر ۱۰۰ درصد خواهد بود. ولی زمانی‌که بر حسب پاسخ رشد میکوریزایی بیان شود میزان پاسخ گیاه به قارچ میکوریزا می‌تواند خیلی بیشتر از صد درصد باشد. اگر چه پاسخ رشد میکوریزایی در بعضی مواقع منفی نیز گزارش شده است. در برخی موارد، وابستگی میکوریزایی به‌صورت مشابه با پاسخ رشد میکوریزایی (مطابق فرمول فوق) تعریف می‌شود (Smith & Read, 2008).علاوه بر این، اسمیت و رید (Smith & Smith, 2011) بر این باورند که برای بیان شدت رابطه همزیستی

1- Mycorrhizal dependency (MD)
2- Obligatorily mycorrhizal
3- Faculatively mycorrhizal
4- Nonmycorrhizal

5- Mycorrhizal dry matter (MDM)
6- Non-mycorrhizal dry matter (NMD)
7- Mycorrhizal growth response (MGR)

بین قارچ و گیاه، استفاده از شاخص پاسخ رشد میکوریزایی نسبت به وابستگی میکوریزایی مناسب‌تر است.

زمانی‌که پاسخ رشد میکوریزایی گیاه مثبت است غلظت فسفر (میزان فسفر در واحد وزن گیاه) و به طبع آن تجمع و محتوی فسفر (میزان فسفر در اندام گیاه) در گیاهان میکوریزایی معمولاً بیشتر است تا گیاهان غیرمیکوریزایی. اکنون این سؤال مطرح می‌شود که در صورت عدم پاسخ رشد میکوریزایی آیا اثرات سودآور قارچ میکوریزا از نقطه نظر جذب فسفر نیز از بین می‌رود؟ نتایج مطالعات انجام شده با استفاده از فسفر نشان‌دار (^{33}P) و سیستم گلدانی چند قسمتی[1] نشان می‌دهد که حتی در شرایطی‌که پاسخ رشد میکوریزایی گیاه مثبت نبوده یا منفی است، افزایش جذب فسفر از طریق مسیر قارچ‌های میکوریزا آربسکولار همچنان امکان‌پذیر است (Smith *et al.*, 2003, 2004). بر این اساس، اسمیت و اسمیت (Smith & Smith, 2011) در مقاله تحلیلی خود استدلال می‌کنند که دیدگاه‌های پیشین مبنی بر تلقی عدم پاسخ رشد مثبت (یا پاسخ منفی) به‌عنوان نشانه‌ای از یک رابطه انگلی دور از واقعیت بوده و نیازمند مطالعات بیشتری است (Johnson *et al.*, 1997; Smith, 1980; Bethlenfalvay *et al.*, 1982). در مجموع، با توجه به این شواهد، انجام پژوهش‌های بیشتر برای درک دقیق‌تر این پدیده ضروری به نظر می‌رسد.

علاوه بر این، شاخص دیگری با عنوان شاخص کیفی دیکسون[2] (DQI) برای کمیت‌سازی شدت برقراری ارتباط همزیستی مورد استفاده قرار می گیرد که رابطه آن به‌صورت زیر بیان می‌شود (Dickson *et al.*, 1960):

$$DQI\ (\%) = TD00 \qquad (۳)$$

که در آن: TDM نشان‌دهنده وزن کل ماده خشک گیاه، H بیانگر ارتفاع گیاه، SD معرف قطر ساقه، SDM نشان‌دهنده وزن مادهِ خشک برگ و RDM بیانگر وزن ماده خشک ریشه است. در واقع، شاخص کیفی دیکسون برای گیاه میکوریزایی و غیرمیکوریزایی تعیین و با هم مقایسه می‌شوند. در این رابطه، نتایج یک مطالعه نشان می‌دهد که زمانی‌که گیاه انجیر توسط چند گونه قارچ میکوریزا (*Gigaspora albida*; *Claroideoglomus etunicatum*; *Rhizophagus clarum*; *Gigaspora margarita*) همزیست می‌شود شاخص کیفی دیکسون برای گیاهان میکوریزایی شده در مقایسه با گیاهان شاهد (غیرمیکوریزایی) به میزان معنی‌داری افزایش می‌یابد. در این میان، در سطوح میانی فسفر مصرفی، بیشترین شاخص کیفی دیکسون مربوط به قارچ میکوریزا *رایزوفاگوس کلاروم* بود (Rui *et al.*, 2021).

پاسخ گیاه به قارچ میکوریزا نه تنها از نظر مؤلفه‌های رشد می‌تواند بررسی شود بلکه از نقطه نظر میزان جذب فسفر نیز می‌تواند مورد ارزیابی قرار گیرد. پاسخ گیاه میکوریزایی به جذب فسفر[3] بر حسب درصد از رابطه ذیل محاسبه می‌شود (Nadian, 1997; Smith & Smith, 2011). درواقع، پاسخ میکوریزایی به جذب فسفر برابر با خارج قسمت تفاضل محتوی فسفر گیاه میکوریزایی (MPC[4]) و غیرمیکوریزایی (NPC[5]) بر محتوی فسفرگیاه غیرمیکوریزایی (گیاه شاهد) است. چنین معادله‌ای برای عنصر غذایی دیگر و یا هر مؤلفه رشد دیگری (مانند طول ریشه گیاه، ارتفاع گیاه، شاخص سطح برگ و ....) در همزیستی قارچ میکوریزا و گیاه قابل تعمیم است (Smith & Smith, 2011; Ghosh *et al.*, 2016).

$$MPR\ (\%) = [(MPC - NPC)/NPC] \times 100 \qquad (۴)$$

نقش ساختار و معماری ریشه گیاه در میزان وابستگی میکوریزایی

ساختار و معماری ریشه گیاه از عوامل مهم و اثرگذار در فرآیندهای گوناگون از جمله جذب آب و عناصر غذایی، پاسخ به تنش‌های زیستی و غیرزیستی و برقراری برهم‌کنش‌های پیچیده با جامعه میکروبی خاک به شمار می‌رود و در نهایت نقش تعیین‌کننده‌ای در رشد و عملکرد گیاه ایفا می‌کند. معماری سیستم ریشه‌ای در گیاهان، تحت تأثیر گونه گیاهی و شرایط محیطی، از تنوع ساختاری و مورفولوژیک قابل توجهی برخوردار است. پارامترهای مورد استفاده برای کمی‌سازی و توصیف ساختار ریشه، بسته به هدف مطالعه، شامل مجموع طول ریشه، قطر ریشه (ریشه اصلی و یا انشعابات فرعی)، میزان انبوهی و تراکم ریشه، مجموع طول و تراکم ریشه‌های مویی، جرم و حجم ریشه، چگالی ریشه، و همچنین ویژگی‌های بیومکانیکی نظیر الاستیسیته و پلاستیسیته ریشه می‌باشند. بین معماری ریشه، فیزیولوژی ریشه و پاسخ‌های مولکولی آن روابط بسیار تنظیم شده و متقابل وجود دارد، به گونه‌ای که این سه به‌عنوان یک مجموعه واحد و در هماهنگی کامل با هم، با بهینه نمودن جذب آب و مواد غذایی، مقابله با تنش‌ها و بهره‌گیری از روابط همزیستی با جامعه میکربی خاک نقش اساسی در بهبود عملکرد کمی و کیفی گیاهان دارد. شکل ۴ چند نوع ریشه گیاه با ساختار متفاوت را نشان می‌دهد.

1- Compartmented pot
2- Dickson quality index (DQI)
3- Mycorrhiza P response (MPR)
4- Mycorrhizal P content (MPC)
5- Non-mycorrhizal P content (NPC)



شکل ٤- ریشه گیاهان با معماری و ساختار متفاوت

Figure 4- Plant roots with different architectures and structural characteristics

اولین بار بایلیس (Baylis, 1975) بیان نمود که گیاهان با ساختار ریشه‌ای مگنولیئید[1] وابستگی بیشتری به قارچ‌های میکوریزا دارند تا گیاهان با سیستم ریشه‌ای غیر مگنولیئید. ریشه‌های مگنولیئید به ریشه‌هایی گفته می‌شود که معمولا ضخیم و گوشتی، فاقد انشعابات زیاد و دارای ریشه‌های مویی ناچیز و یا اصلا فاقد ریشه‌های موئین می‌باشند. بر این اساس، گزارش‌های متعدی وجود دارند که نشان می‌دهد گونه‌های گیاهی با ریشه‌های ضخیم و گوشتی و ریشه‌های موئین ناچیز و کم ارتفاع، همچون کاساوا، مرکبات، انگور، پیاز (آلیوم)، تره و اغلب لگوم‌ها وابستگی میکوریزایی قابل ملاحظه‌ای از خود نشان می‌دهند. این فرضیه اولین بار توسط سنت جان (St John, 1980) آزمایش و مورد تائید قرار گرفت. نتایج مطالعات بعدی فرضیه بیلیس را نیز تائید نمودند (Brundrett & Kendrick, 1988; Brundrett, 2002; Fitter, 2004; Zangaro *et al*., 2007; Hany *et al*., 2007; Nadian, 2011; Nadian *et al*., 2013a; Ghasemjokar *et al*, 2016; Ma *et al*., 2021). در همزیستی این گیاهان با قارچ های میکوریزا آربسکولار، از آنجایی‌که هیف‌های قارچ، در مقایسه با ریشه گیاه، می‌توانند به مسافت‌های بسیار دورتری از سطح ریشه گیاه گسترش پیدا کنند لذا فسفر از حجم بیشتری از خاک به گیاه میزبان منتقل می‌شود. این انتقال بیشتر فسفر به گیاه رشد بیشتر گیاه میزبان را در پی خواهد داشت. بر طبق شکل ۵ و شکل ۶ ملاحظه می‌شود که در گیاه غیر میکوریزایی انتقال فسفر از خاک به گیاه فقط از ناحیه اطراف ریشه گیاه صورت می‌گیرد. به همین دلیل است که ناحیه تخلیه فسفر در اطراف ریشه گیاه غیرمیکوریزایی و یا گیاه با وابستگی میکوریزایی کم بسیار زیاد است. معمولاً با مصرف بیشتر کود فسفره پاسخ رشد میکوریزایی این گیاهان کاهش می‌یابد و می‌تواند به صفر برسد و یا حتی منفی شود. هرچند فرضیه اولیه Baylis برای میزان وابستگی گیاه به قارچ میکوریزا پیشنهاد شده بود، اما این مفهوم به‌طور ضمنی گسترش یافته و پاسخ رشد میکوریزایی را نیز در بر می‌گیرد، زیرا این شاخص برآوردی کلی از میزان واکنش گیاهان به تلقیح با قارچ‌های میکوریزا محسوب می‌شود (Menge *et al*., 1978; Klironomos, 2003; Hoeksema, 2010, Maherali 2014).

بلعکس، گیاهان با سیستم ریشه‌ای انبوه و دارای ریشه‌های موئین فراوان و بلند حتی با وجود فسفر ناچیز خاک عموماً دارای وابستگی میکوریزایی کم و یا بدون وابستگی می‌باشند. به‌عنوان مثال غلات نظیر گندم و جو (Hetrick *et al*., 1992; Boan *et al*., 1993; Thirkell *et al*., 2022) و بعضی از گراس‌های مرتعی (Wilson & Hartnett, 1998) وابستگی میکوریزایی ناچیزی دارا می‌باشند. این پژوهشگران رابطه‌ی بین مشخصات ریشه‌ای گیاه و وابستگی میکوریزایی را به خوبی نشان دادند. با وجود این، باید تأکید نمود که اختلافات قابل توجهی در وابستگی میکوریزایی ارقام مختلف یک گونه، از جمله گندم، تحت شرایط آزمایشی یکسان وجود دارد (Hetrick *et al*., 1988, 1992; Thirkell *et al*., 2022).

در مطالعه رابطه بین خصوصییات ریشه گیاه و وابستگی میکوریزایی، نتایج نشان می‌دهد که بعضی از گیاهان با سیستم ریشه‌ای نازک و انبوه نیز می‌توانند وابستگی میکوریزایی قابل توجهی داشته باشند. در یک مطالعه در جامعه گیاهی انگلیس، ملاحظه گردید که اگرچه گیاهان با سیستم ریشه‌ای ضعیف وابستگی میکوریزایی زیادتری دارند اما بعضی از گیاهان با سیستم ریشه‌ای انبوه نیز از وابستگی میکوریزایی بالایی برخوردارند (Fitter, 1989; Fitter & Merryweather, 1992). در اینجا این سوال مطرح می‌شود که چه میزان از تغییرات مورفولوژی ریشه گیاه تحت کنترل ژنتیکی و چه میزان ناشی از شرایط محیطی و حضور قارچ‌های میکوریزا است. در پاسخ به این سوال، نتایج مطالعات گلدانی نشان می‌دهد که زمانی‌که گیاه شبدر زیرزمینی[2] کلنی شده با قارچ *گلوموس اینترارادیسز* (*رایزافاگوس اینترارادیسز*) در خاکی با درجات مختلف فشردگی رشد داده شد مرفولوژی ریشه با افزایش تراکم خاک تغییر نمود. به‌طوری‌که قطر ریشه‌ها بیشتر و انشعاب‌بندی ریشه‌ها کاهش یافت (Nadian *et al*., 1996, 1997). این تغییر در معماری و ساختار ریشه بر خلاف

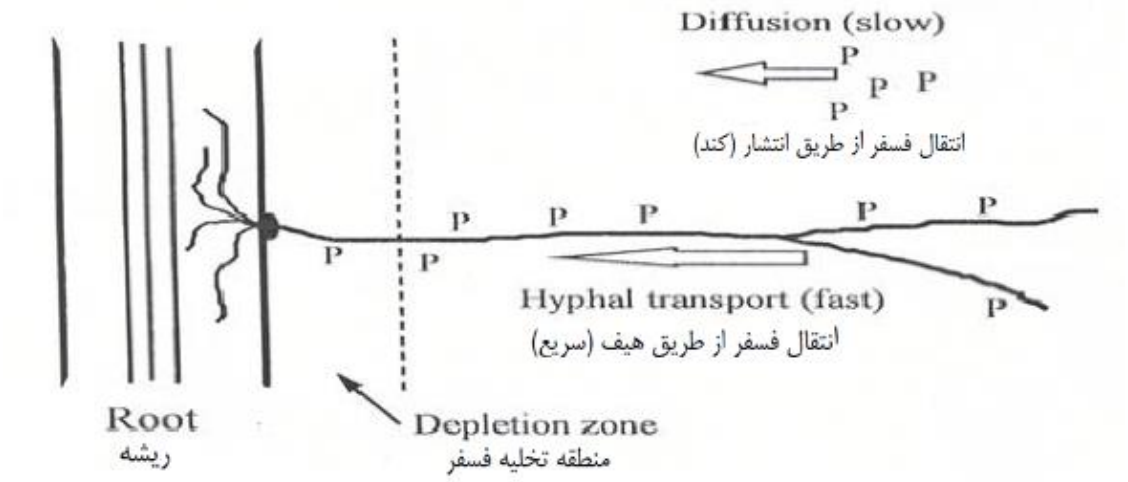
1- Magnolioid root

2- *Trifolium subterranean*

فرضیه Baylis باعث کاهش رشد رویشی و کاهش محتوی فسفر گیاه گردید. این نتایج نشان می‌دهد که پاسخ رشد میکوریزایی همچنانکه در ادامه بحث خواهد آمد تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل مورفولوژیک، فیزیولوژیک، مولکولی و محیطی قرار دارد و نمی‌توان آن را صرفاً بر اساس تغییرات ساختار ریشه تبیین کرد. در تائید این نظر، ماهرعلی (Maherali, 2014) در یک مطالعه متاآنالیز و با هدف آزمون فرضیه Baylis، با استفاده از نتایج آزمایش خود و در ترکیب با نتایج پژوهش‌های پیشین و داده‌های فیلوژنتیکی منتشرشده نشان داد که هیچ رابطه معنی‌داری بین وابستگی میکوریزایی (پاسخ رشد میکوریزایی) و ویژگی‌های ریشه‌ای گیاه وجود ندارد. بر این اساس، وی نتیجه‌گیری کرد که ضخیم و کم انشعاب بودن ریشه‌ها الزاماً شاخص قابل اعتمادی برای وابستگی گیاه به قارچ‌های میکوریزا نیست.

ماهرعلی (Maherali, 2014) چنین نتیجه‌گیری نمود که اگرچه در این مطالعه‌ی متاآنالیز رابطه معنی‌داری بین معماری ریشه و وابستگی میکوریزایی مشاهده نشد، اما احتمال دارد برخی جنبه‌های مهم زیستی در این تحلیل در نظر گرفته نشده باشد. به‌عنوان مثال، در این مطالعه صرفا بعضی از صفات رایج ریشه استفاده شده، در حالی‌که ویژگی‌هایی دیگری مانند میزان انشعاب دهی ریشه و یا سطح ویژه ریشه که فاکتورهای بسیار مهم و تأثیرگذار بر روی وابستگی میکوریزایی هستند مورد استفاده قرار نگرفته است. به بیان دیگر، چنانچه شاخص‌های مختلف معماری ریشه به‌صورت ترکیبی ارزیابی شوند، احتمال شناسایی چنین رابطه‌ای بیشتر خواهد بود. بنابراین، لازم است به این نکته توجه داشت که وابستگی میکوریزایی به عوامل متعددی از جمله به ویژگی‌های گیاه و شریک قارچی بستگی دارد. لذا، در شرایطی که گیاه با قارچ بتواند سازگارتر همراه شود، امکان مشاهده رابطه بین معماری ریشه و پاسخ رشد میکوریزایی افزایش می‌یابد. جدول ۱ سطوح مختلف وابستگی میکوریزایی تعدادی از گونه‌های گیاهی را نشان می‌دهد.

آنچه در بالا در خصوص پاسخ گیاهان به قارچ‌های میکوریزا آربسکولار، خواه بر حسب مؤلفه‌های رشدی گیاه و خواه بر حسب میزان جذب عناصر غذایی به خصوص فسفر، گفته شد مربوط به وضعیتی است که شرایط محیطی ثابت باشد. ولی چناچه گیاه ثابت باشد ولی عوامل محیطی (عوامل جوی و خاکی) تغییر نماید، در شرایط نامطلوب محیطی پاسخ گیاه به قارچ میکوریزا می‌تواند توازن میکوریزایی را از سودآور به خنثی و یا حتی به منفی تغییر دهد (Johanson *et al.*, 1997). به‌عنوان مثال، زمانی‌که فسفر قابل جذب گیاه در خاک زیاد باشد میزان زیست‌توده گیاه میکوریزایی، با ادامه دریافت کربوئیدرات توسط قارچ از گیاه و جذب مستقیم فسفر از خاک توسط ریشه گیاه، ممکن است کاهش قابل توجه پیدا نماید (Peng *et al.*, 1993; Olson *et al.*, 1999; Xu *et al.*, 2018).

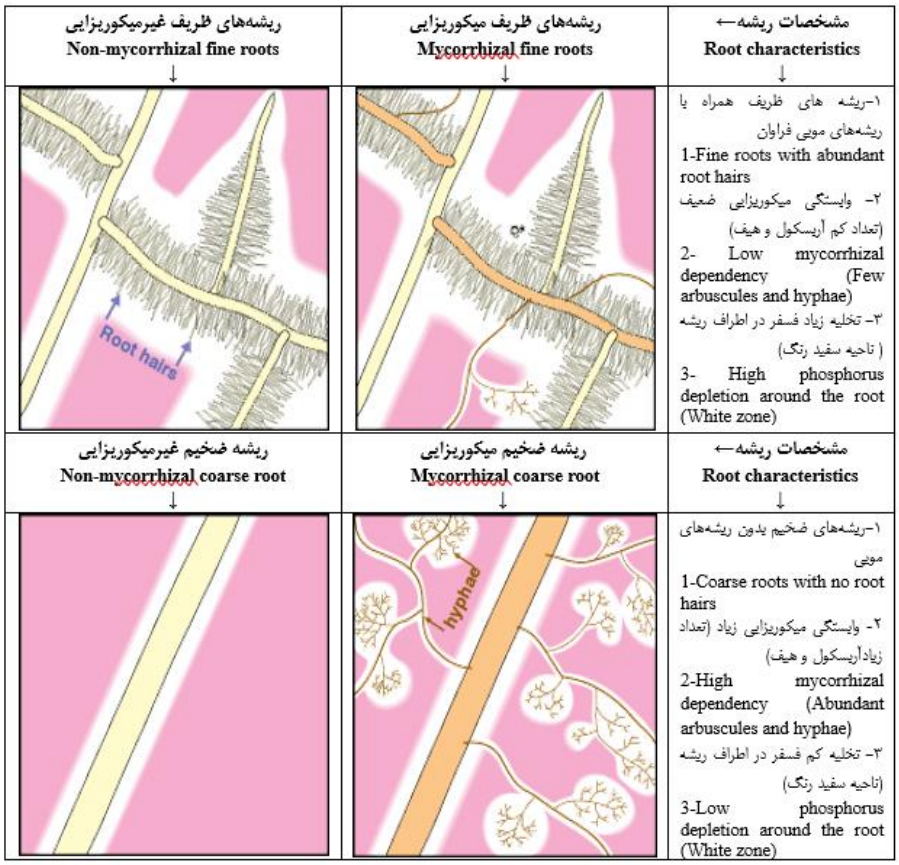


شکل ۵- انتقال فسفر توسط قارچ میکوریزا آربسکولار به گیاه میزبان

در صورت عدم حضور قارچ میکوریزا و یا وابستگی ناچیز گیاه به قارچ میکوریزا، منطقه تخلیه فسفر (Depletion zone) گسترده‌تر خواهد بود (Smith & Read, 2008).

Figure 5- Phosphorus transfer by arbuscular mycorrhizal fungi to the host plant

In the absence of mycorrhizal fungi or low mycorrhizal dependency, the phosphorus depletion zone becomes more extensive (Smith & Read, 2008).



شکل ٦- شدت میزان وابستگی میکوریزایی گیاه به قارچ میکوریزا آربسکولار تحت تأثیر معماری و ساختار ریشه گیاه

ضخامت نوار سفید در اطراف ریشه گیاه میزان تخلیه (جذب) فسفر را نشان می‌دهد. تخلیه بیشتر فسفر در اطراف ریشه گیاه غیرمیکوریزایی (ضخامت بیشتر نوار سفید) به معنی جذب فسفر عمدتا توسط ریشه گیاه، تخلیه کمتر فسفر در اطراف ریشه گیاه (ضخامت کمتر نوار سفید) به معنی جذب فسفر از نقاط دور از دسترس ریشه گیاه میکوریزایی عمدتا توسط هیف‌های خارجی قارچ میکوریزا (http://mycorrhizas.info/methods.html).

Figure 6- The degree of plant mycorrhizal dependency on arbuscular mycorrhizal fungi as influenced by root architecture and structural characteristics

The thickness of the white band surrounding the plant root represents the extent of phosphorus depletion (uptake). Greater phosphorus depletion around non-mycorrhizal plant roots (thicker white band) indicates that phosphorus uptake is mainly carried out by the plant root itself, whereas lower phosphorus depletion around mycorrhizal plant roots (thinner white band) indicates phosphorus uptake from regions beyond the root depletion zone, primarily through the extraradical hyphae of mycorrhizal fungi (http://mycorrhizas.info/methods.html).

جدول ۱- وابستگی میکوریزایی (درصد) بعضی از گیاهان (Eo & Eom, 2009)

Table 1- Mycorrhizal dependency (MD) of different plant species (Eo & Eom, 2009)

نام علمی Plant species	نام گیاه Plant	وابستگی میکوریزایی Mycorrhizal dependency (%)
Glycine max	سویا	20.6
Vigna angularis	لوبیا قرمز	57.2
Senna tora	سنا	87.5
Hordeum vulgare	جو	-124.1
Zea mays	ذرت	30.1
Sorghum bicolor	سورگوم	54.2
Allium tuber	تره چینی	90.1
Solanum melongena	بادنجان	-16.5
Capsicum annuum	نوعی فلفل	92.8

واکنش خاک یک فاکتور محیطی مهم دیگر بر روابط همزیستی بین قارچ و گیاه است. به‌عنوان مثال قارچ *رایزوفاگوس اینترارادیسز* نسبت به پی‌اچ اسیدی خاک بسیار حساس است و تحت چنین شرایطی برقراری همزیستی بین قارچ و گیاه بسیار ضعیف و یا حتی غیر ممکن است (مشاهدات شخصی). حال آنکه قارچ *جیگسپورا مارگاریتا* عموماً شرایط اسیدی خاک را طالب هستند. عوامل دیگر نظیر میزان شوری خاک (Nadian *et al*., 2013b)، تنش خشکی (Nadian, 2026)، غلظت عناصر سنگین و سایر آلاینده‌های شیمیایی (Chen *et al*., 2022) و تراکم خاک (Nadian *et al*., 1996) نیز بر میزان پاسخ رشد میکوریزایی نقش بسیار مهم دارد. برهمکنش بین گیاه و قارچ میکوریزا بسته به سن و مراحل نموی گیاه نیز ممکن است از مسالمت‌آمیز[1] به ارتباط انگلی[2] تغییر کند (Grasso *et al*., 2025).

علاوه بر ویژگی‌های گیاه و خاک، گونه قارچ میکوریزا در میزان شدت برقراری ارتباط همزیستی نقش مهمی دارد. برای یک خاک مشخص و یک گونه گیاهی، میزان وابستگی میکوریزایی شدیداً تحت تأثیر گونه قارچ میکوریزا قرار می‌گیرد. به‌عنوان مثال، در یک مطالعه با استفاده از گلدان‌های چندقسمتی نشان داده شد که قارچ *Acaulospora laevis* در مقایسه با قارچ‌های *Glomus* sp. و *Scutellospora calospora* از توانایی بیشتری برای برقراری همزیستی با گیاه میزبان (نوعی شبدر) برخوردار است. همچنین این قارچ در افزایش سرعت جریان فسفر به درون ریشه گیاه که به‌صورت مقدار فسفر جذب‌شده در واحد طول ریشه کلنی‌شده و در واحد زمان تعریف می‌شود عملکرد به‌مراتب مؤثرتری از دو قارچ دیگر نشان داد (Jakobsen *et al*., 1992). این مشاهدات با وابستگی بیشتر گیاه شبدر به قارچ *A. laevis* که هیف‌های خارجی آن توانایی بیشتری در گسترش و انتشار در خاک را داشتند کاملا مطابقت و قابل توجیه می‌باشد. بیشترین گسترش و انتشار هیف‌های خارجی مربوط به قارچ *A. laevis* بود که قادر بودند تا فاصله ۱۱ سانتی‌متری از سطح ریشه گیاه منتشر شوند و بیشترین طول هیف (متر در هر گرم خاک) را تشکیل دهند. این نتایج نشان می‌دهد که توانایی قارچ‌های میکوریزا در میزان انتشار هیف‌های خارجی خود در خاک یکی از عوامل مهم در بهبود تغذیه گیاه به خصوص تغذیه عناصر کم‌تحرک نظیر فسفر می‌باشد.

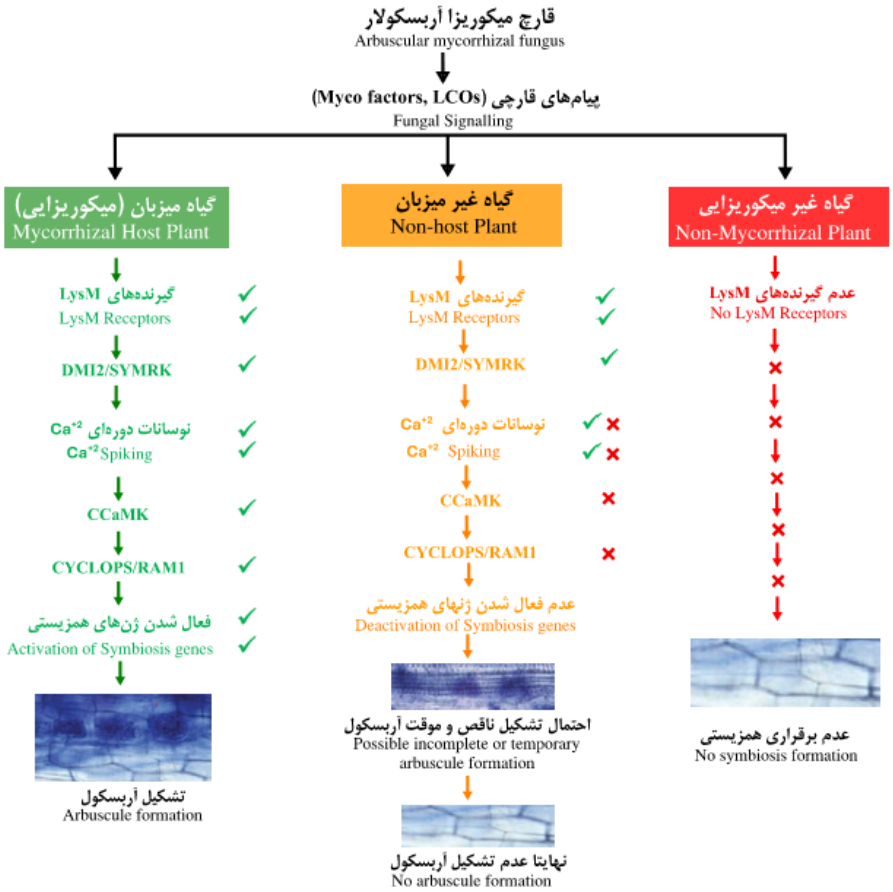
در یک جمع‌بندی کلی، می‌توان گفت که وابستگی میکوریزایی گیاهان تنها تابع ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه گیاه نیست، بلکه حاصل برهم‌کنش پیچیده‌ای میان صفات مورفولوژیکی ریشه، پاسخ‌های مولکولی گیاه– قارچ و ترکیب و میزان ترشحات ریشه است. از سوی دیگر، قارچ میکوریزا نیز با تغییر بیان ژن‌ها، تنظیم هورمون‌های گیاهی و اصلاح معماری ریشه، این فرآیند را تنظیم می‌نماید. این دیدگاه یکپارچه می‌تواند مبنای پژوهش‌های آینده برای شناسایی ژنوتیپ‌های دارای کارایی بالاتر در همزیستی میکوریزایی و توسعه اهداف بیشتری در کشاورزی پایدار باشد.

گیاهان غیر میزبان و گیاهان غیر میکوریزایی

طیف گسترده‌ای از گیاهان، در سطوح مختلفی از وابستگی، قادرند با قارچ‌های میکوریزا نوعی همزیستی برقرار کنند (شکل ۷). به این دسته از گیاهان، "گیاهان میکوریزایی" گفته می‌شود. حدود ۱۰ درصد از گیاهان نیز قادر نیستند هیچ نوعی از همزیستی شناخته شده میکوریزایی را تشکیل دهند (Wang *et al*., 2022). به این گیاهان که تحت هیچ شرایطی قادر به برقراری رابطه همزیستی با این قارچ‌ها نیستند "گیاهان غیرمیکوریزایی[3]" گفته می‌شوند. بین این دو دسته گیاهان، گیاهانی وجود دارند که به آنها "گیاهان غیرمیزبان یا نامیزبان[4]" گفته می‌شوند. بیشتر مواقع، این گیاهان قادرند با قارچ‌های میکوریزا ارتباط همزیستی محدود و ناقص برقرار کنند. در واقع، هیف‌های خارجی قارچ‌های میکوریزا قادرند به ریشه این گیاهان نفوذ کنند و در آن منتشر شوند، حتی پیام‌های مولکولی در بر قراری رابطه همزیستی، هر چند به‌طور ناقص، بین این دو صورت می‌گیرد ولی منجر به تشکیل آربسکول نمی‌شود و در نتیجه تبادل مواد غذایی نیز صورت نمی‌گیرد (Fernandez *et al*., 2019; Wang *et al*., 2022). به‌عنوان مثال، گیاه *آرابیدوپسیس تالیانا* که از اعضای خانواده براسیکاسه می‌باشد به‌عنوان یک گیاه غیرمیزبان شناخته می‌شود و زمانی‌که توسط قارچ میکوریزا تلقیح می‌شود برقراری پیام‌های همزیستی این گیاه و قارچ به صورت ناقص صورت می‌گیرد و نتیجه آن عدم تشکیل آربسکول‌های فعال جهت تبادل مواد غذایی است (Cosme *et al*., 2018). تشکیل آربسکول، که به‌عنوان هسته‌ی اصلی همزیستی و محل تبادل مواد غذایی بین دو شریک عمل می‌کند، شرط اساسی برای برقراری کامل این همزیستی به شمار می‌رود. نتایج یک مطالعه نشان می‌دهد زمانی که گیاه شور دوست *Salsola kali* توسط دو گونه قارچ میکوریزا آربسکولار تلقیح می‌شود، هر چند آربسکول تشکیل می‌شود اما پس از دو روز بخش ریشه کلنی شده قهوه‌ای شده و آربسکول‌ها ناپدید می‌شوند (Allen *et al*., 1989). این نشان می‌دهد که "گیاهان نامیزبان" در تعامل با قارچ‌های میکوریزا و پذیرش ورود هیف‌های قارچ بدرون ریشه‌های خود در مسیر پیام‌رسانی مشترک به‌صورت ناقص مشارکت دارند (Wang *et al*., 2022). تخمین زده می‌شود که حدود ۲۹ درصد از کل گونه‌های گیاهان آوندی، از جمله بعضی از گیاهان

1- Mutualistic
2- Parasitic
3- Non-mycorrhizal plants
4- Non-host plants

زراعی، میزبان واقعی قارچ‌های میکوریزا آربسکولار نیستند (Cosme *et al.*, 2018). معیارهای مورد استفاده برای تعریف گیاهان غیرمیزبان همیشه با چالش‌هایی همراه بوده است و ترسیم مرز مشخصی بین گیاهان میزبان و غیرمیزبان دشوار است. برای مثال، در گذشته هر گیاهی که هرگز توسط قارچ‌های میکوریزا کلونیزه نمی‌شد، به‌عنوان گیاه غیرمیزبان شناخته می‌شد. با این حال، این تعریف امروزه دستخوش تغییر شده است و بسیاری از پژوهشگران بر این باورند که معیار اصلی غیرمیزبان بودن، عدم تشکیل آربسکول‌های فعال در بافت‌های گیاه است، نه صرفاً عدم کلونیزاسیون توسط قارچ میکوریزا. (Glenn *et al.*, 1985; Brundrett & Tedersoo, 2018, Wang *et al.*, 2022). هر چند دو اصطلاح گیاهان "غیرمیکوریزایی" و "غیرمیزبان یا نامیزبان" ممکن است اشتباها به جای یکدیگر به کار گرفته شوند ولی از نظر مفاهیم تخصصی کاملا با هم متفاوت هستند. گیاه غیرمیزبان یعنی اینکه گیاه تحت شرایط خاصی می‌تواند ارتباط میکوریزایی برقرار کند. این اصطلاح بیشتر نسبی و وابسته به نوع قارچ میکوریزا است، به این معنی که یک گیاه ممکن است برای یک قارچ خاص میزبان نباشد اما برای قارچ دیگر بتواند میزبان باشد. بنابراین، می‌بینیم که نامیزبان بودن وابسته به قارچ میکوریزا می‌باشد ولی غیرمیکوریزایی بودن وابسته به ویژگی کلی و ذاتی گیاه است. پس به این ترتیب، هر گیاه غیرمیکوریزایی را می‌توان «نامیزبان» هم در نظر گرفت، اما هر گیاه نامیزبان لزوماً غیرمیکوریزایی نیست (Fernandez *et al.*, 2019, Albornoz *et al.*, 2021, Wang, 2022).



شکل ۷- مسیر پیام‌رسانی مشترک در گیاهان میکوریزایی، غیرمیکوریزایی و غیرمیزبان

علامت ✓ به معنی انجام پیام‌دهی و × به معنی توقف پیام‌دهی می‌باشد (شکل در Word و Table و با استفاده از نرم‌افزار تخصصی Bluebeam Revu x64 - Version 21.1 تهیه و ویرایش شده است).

Figure 7- The common symbiotic signaling pathway in mycorrhizal, non-host, and non-mycorrhizal plants

The symbol ✓ indicates that messaging has been carried out, while × indicates that messaging has been stopped (The diagram was created and edited in Microsoft Word using tables and the specialized software Bluebeam Revu x64 - Version 21.1).

در "گیاهان میکوریزایی" همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد و مطابق شکل ۷، آغاز برقراری همزیستی با تبادل پیام‌های مولکولی و در پاسخ

به فاکتورهای قارچی (Myc LCO) صورت می‌گیرد. این فرآیند با فعال‌شدن گیرنده‌های کینازی (SYMRK) در گیاه و شناسایی شریک قارچی ادامه پیدا می‌کند. در مسیر مشترک پیام‌رسانی همزیستی میکوریزایی، DMI موجب ایجاد نوسانات دوره‌ای یون Ca^{2+} در هسته سلول‌های ریشه می‌شود. این نوسانات توسط ژن *CCaMK* رمزگشایی شده و در نهایت به فعال‌سازی ژن‌های مرتبط با کلونیزاسیون قارچ و تشکیل آربسکول می‌انجامد.

در "گیاهان غیرمیزبان"، همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است، مسیر پیام‌رسانی مشترک بین قارچ و گیاه، مشابه گیاهان میکوریزایی آغاز می‌شود و بسته به نوع گیاه، قارچ میکوریزا و شرایط محیطی تا مراحلی پیش می‌رود. با این حال، این مسیر به‌صورت ناقص متوقف شده و تشکیل آربسکول رخ نمی‌دهد. البته در یک مورد، تشکیل آربسکول ناپایدار و غیرفعال نیز گزارش شده است (Allen *et al.*, 1989).

اگرچه مشخص شده است که در بسیاری از گیاهان غیرمیزبان، مراحل اولیه شناسایی قارچ و حتی نفوذ هیف‌ها انجام می‌شود، اما هنوز به‌طور دقیق مشخص نیست کدام ژن‌ها یا شبکه‌های تنظیمی مانع تشکیل آربوسکول‌های فعال می‌شوند. بیشتر مطالعات تنها چند ژن مسیر مشترک همزیستی را بررسی کرده‌اند، در حالی‌که احتمالاً شبکه‌ای از ژن‌های تنظیم‌کننده، فاکتورهای رونویسی و مسیرهای ایمنی گیاه در این فرآیند نقش دارند. در برخی گیاهان غیرمیزبان، قارچ تا قشر ریشه پیشروی می‌کند، اما در برخی دیگر حتی نفوذ اولیه نیز رخ نمی‌دهد. هنوز مشخص نیست چه عواملی تعیین می‌کنند که توقف همزیستی در کدام مرحله اتفاق صورت می‌گیرد و آیا این توقف تحت کنترل گیاه، قارچ یا هر دو است. اگرچه نقش استریگولاکتون‌ها در آغاز همزیستی شناخته شده است، اما اطلاعات کمی درباره سایر ترکیبات ترشحی ریشه و نقش آن‌ها در پذیرش یا رد قارچ وجود دارد. مشخص نیست آیا تغییر ترکیب ترشحات ریشه می‌تواند گیاهان غیرمیزبان را به سمت برقراری همزیستی سوق دهد یا خیر. پرداختن به این شکاف‌های تحقیقاتی می‌تواند دستاوردهای مهمی برای کشاورزی پایدار داشته باشد.

سازوکارهای مولکولی در افزایش وابستگی میکوریزایی گیاه تحت تأثیر برخی تنش‌های غیرزنده

بسیاری از ویژگی‌های رشدی و تغذیه‌ای گیاهان، همچنین تعاملات زیستی آن‌ها با جامعه میکروبی خاک، تحت تأثیر عوامل محیطی گوناگون، به‌ویژه تنش‌های محیطی قرار می‌گیرند. در میان تنش‌های غیرزنده، تنش شوری و خشکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر این ویژگی‌ها به شمار می‌روند. در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک، تنش شوری با برهم‌زدن هموستاز یونی، کاهش جذب آب و القای تنش‌های اکسیداتیو، موجب کاهش رشد و عملکرد گیاهان می‌شود. گیاهان میکوریزایی برای مقابله با تنش شوری، مجموعه‌ای از سازوکارها از جمله سازوکارهای بیوشیمیایی (نظیر سنتز متابولیت‌های اسمزی و آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی)، فیزیولوژیکی (نظیر هدایت روزنه‌ای و محتوای کلروفیل) و مولکولی (نظیر بیان ژن‌های دخیل در جذب و انتقال پتاسیم و سدیم) را بکار می‌گیرند. در اینجا هدف بررسی جامع تمامی سازوکارهایی نیست که گیاهان میکوریزایی برای مقابله با تنش شوری به‌کار می‌گیرند. ازاین‌رو، با توجه به اهمیت و نقش برجسته هموستازی K^+/Na^+ در کاهش اثرات زیان‌بار شوری و افزایش تحمل گیاهان میکوریزایی به این تنش، این سازوکار به‌اختصار مورد بحث قرار می‌گیرد و سپس به وابستگی میکوریزایی گیاه تحت تنش شوری پرداخته می‌شود. اگر بخواهیم مهم‌ترین نقش گیاهان میکوریزایی در کاهش تنش شوری را بیان کنیم، می‌توان به تنظیم هموستازی یونی " K^+/Na^+ " اشاره نمود. بسیاری از پژوهشگران معتقدند که تحمل شوری در گیاهان میکوریزایی قبل از آنکه ناشی از افزایش آنتی‌اکسیدان‌ها یا تجمع متابولیت‌های اسمزی باشد، نتیجه توانایی آن‌ها در محدود کردن ورود سدیم، افزایش جذب پتاسیم و حفظ تعادل یونی سلول است (Incesu *et al.*, 2025; Marques-Galvez *et al.*, 2025). دلیل این موضوع آن است که نخستین و مخرب‌ترین اثر شوری، اختلال در تعادل یونی سلول‌های گیاهی است. ورود بیش از حد سدیم موجب برهم خوردن عملکرد بسیاری از آنزیم‌ها، کاهش جذب پتاسیم و کلسیم، اختلال در پایداری غشاهای سلولی و کاهش فعالیت فتوسنتزی می‌شود. بنابراین، گیاهی که بتواند نسبت K^+/Na^+را حفظ کند، در واقع بخش عمده‌ای از آسیب‌های ناشی از شوری را کنترل کرده است. مطالعات مولکولی سال‌های اخیر نیز تائیدی است بر این دیدگاه. اولین فرآیند در مسیر کاهش تنش شوری حس نمودن Na^+ و القای پیام‌رسانی کلسیم است که توسط ژن‌های کلیدی *GIPC*[1] و *MOCA1*[2] صورت می‌گیرد. ژن‌های خانواده *SOSs*[3] شامل *SOS*1، *SOS*2 و *SOS*3 از اجزای اصلی این مسیر یعنی حذف زیادی Na^+ از سیتوپلاسم و تنظیم نسبت K^+/Na^+ می‌باشند (Jiang *et al.*, 2019). علاوه بر این، ناقل‌های خانواده NHXs با دفع و کاهش غلظت Na^+ از سیتوپلاسم نقش مهمی در هموستازی

1- *Glycosyl Inositol Phosphoryl Ceramide* (*GIPC*)
2- Monocation-induced [Ca^{2+}] increase1
(ژنی که در افزایش کلسیم سیتوزولی در پاسخ به کاتیون‌های تک ظرفیتی سدیم نقش دارد)

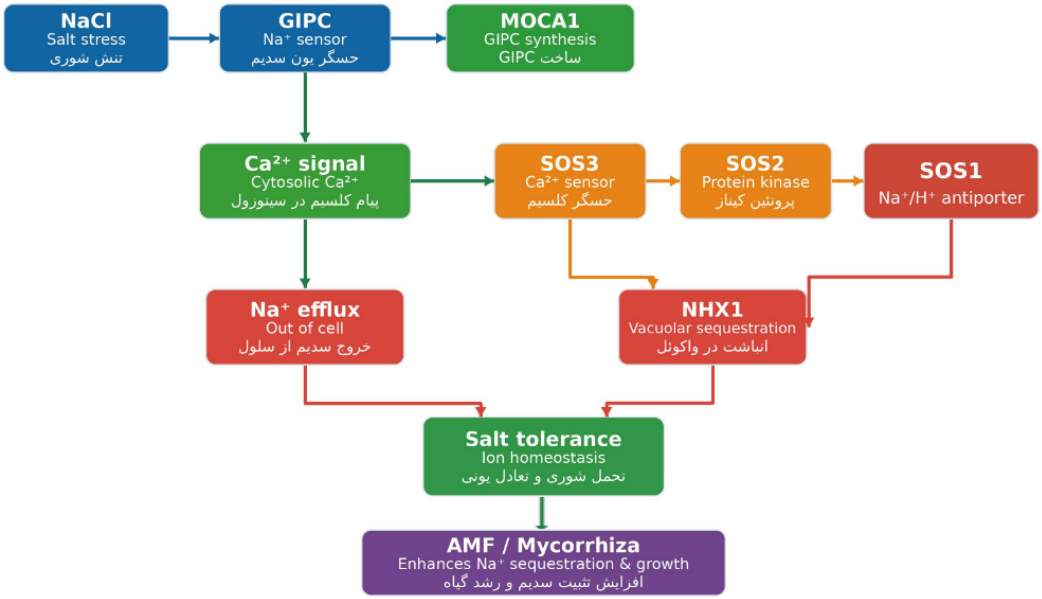
3- *Salt Overly Sensitive (SOS)* حساسیت بیش از حد به شوری

نسبت K^+/Na^+ دارند (Chen *et al.*, 2017). NHX1 ناقل آنتی‌پورتر Na^+/H^+ در غشای واکوئلی است و سبب انتقال و انباشت Na^+ در واکوئل می‌شود، این در حالی است که ناقل NHX7 در غشای سیتوپلاسمی سلول قرار دارد و وظیفه خروج Na^+ از سلول (Efflux) را بعهده دارد. ناقل‌های خانواده HKTs[1] نیز نقش مهمی در جذب K^+ و کاهش جذب Na^+ دارد. فعالیت و هماهنگی ژن‌های این ناقلین در یک سازوکار بسیار پیچیده به خصوص با حضور قارچ‌های میکوریزا موجب بهبود هموستازی یونی و افزایش تحمل گیاه در شرایط تنش شوری می‌شود. در واقع، حضور قارچ‌های میکوریزا نه تنها باعث بهبود جذب آب و مواد غذایی می‌شود، بلکه با بیان افزایشی ژن‌های دخیل در حس شوری (Na^+)، فعال نمودن کانال‌های Ca^{2+} و مسیر پیام‌رسانی ژن‌های خانواده *SOSs* (*SOS1*, *SOS2*, *SOS3*)، همچنانکه خواهیم دید، سبب افزایش بیشتر وابستگی میکوریزیایی گیاهان در شرایط تنش شوری می‌شود. در ذیل به‌طور خلاصه نقش ژن‌های *GIPC*، *MOCA1* و *SOS1-3* در دفع یا کاهش سمیت یون‌های Na^+ با حضور و بدون حضور قارچ‌های میکوریزا ارائه می‌شود.

ژن *GIPC* یکی از ژن‌های مهم در تحمل شوری در گیاهان است که در سال‌های اخیر به‌ویژه در گیاه *آرابیدوپسیس تالیانا* به‌خوبی مطالعه شده است. این ژن در تنظیم پایداری غشاء، تعادل یونی و کاهش سمیت سدیم نقش اساسی دارد و به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی سازوکارهای مقاومت به تنش شوری شناخته می‌شود. این ژن که در غشای پلاسمایی سلول قرار دارد، به‌عنوان حسگر اصلی یون Na^+ عمل می‌کند. با قرار گرفتن گیاه در شرایط تنش شوری، بیان این ژن افزایش می‌یابد و به سرعت یک پیام اولیه را القا می‌کند. این پیام موجب فعال‌سازی و باز شدن کانال‌های کلسیمی (Ca^{2+}) شده و در نتیجه ورود سریع و قابل‌توجه یون کلسیم به سیتوزول را در پی دارد. افزایش غلظت کلسیم سیتوزولی، مسیر پیام‌رسانی ژن‌های SOS را فعال می‌کند که در نهایت منجر به خروج سدیم از سلول و/یا انتقال آن به واکوئل جهت ذخیره‌سازی می‌شود. در نتیجه این فرآیندها، تعادل یونی سلول بهبود یافته و نسبت K^+/Na^+ افزایش می‌یابد (Eveline *et al.*, 2019). ژن دیگری که در تحمل به شوری گیاه دخالت دارد *MOCA1* می‌باشد که به اتفاق *GIPC* در یک مسیر واحد برای حس شوری و شروع پیام‌رسانی Ca^{2+} عمل می‌کنند (شکل ۸). MOCA1 آنزیمی است که برای سنتز GIPC لازم است. بدون وجود این آنزیم حسگری سدیم، فعال شدن کانال‌های کلسیمی و مسیر پیام‌رسانی SOS و در نتیجه هموستازی یونی صورت نمی‌گیرد (Marques-Galvez, 2025; Hou *et al.*, 2026). نتایج یک مطالعه نشان داد که اثرات زیان‌آور شوری بر گوجه فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) میکوریزایی شده توسط *فانلفورمیس موسه* در مقایسه با گیاهان غیرمیکوریزایی بسیار کمتر است (Marques-Galvez *et al.*, 2025). کلونیزاسیون میکوریزایی علاوه بر بهبود مولفه‌های رشدی، قادر است مؤلفه‌های بیوشیمیایی (مانند پرولین و فیتوهورمون‌های گیاهی نظیر اسید جیبرالیک، اسید آبسسیک، اسید جاسمونیک) و فیزیولوژیک گیاه (مانند تبادلات گازی و محتوای کلروفیل) را نیز بهبود بخشد. بررسی نتایج مولکولی این مطالعه نیز نشان می‌دهد که ژن‌های دخیل در پیام‌رسانی Ca^{2+} و حس تنش شوری، از جمله *SlMOCA1* و اجزای مسیر پیام‌رسانی نظیر *SlNHX1;3;4SlSOS1;2* بیان افزایشی داشتند. این پاسخ میکوریزا به تنش شوری که با بهبود هموستاز یونی و تنظیم نسبت K^+/Na^+ همراه بود (Marques-Galvez *et al.*, 2025) وابستگی میکوریزایی بیشتر گیاه به تنش شوری را نشان می‌دهد. مشابهاً، افزایش بیان هشت ژن از خانواده NHX در گیاه صنوبر[2] کلنی شده با قارچ آربسکولار *فانلفورمیس موسه* از یک‌سو موجب افزایش جذب یون‌های K^+ و Ca^{2+} گردید و از سوی دیگر با کاهش غلظت Na^+ در سیتوزول سلولی همراه بود. این تغییرات نه‌تنها به بهبود شاخص‌های رشدی، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه تحت تنش شوری انجامید، بلکه وابستگی میکوریزایی گیاه را تا ۷۸ درصد و پاسخ رشد میکوریزایی را نیز تا ۳۷۳ درصد[3] افزایش داد (Dong *et al.*, 2023). این نشان می‌دهد که قارچ‌های میکوریزا در شرایط تنش نقشی فراتر از بهبود تغذیه گیاه میزبان را بعهده دارند. در تائید این نتایج، مشاهده می‌شود که کلونیزاسیون میکوریزایی گوجه فرنگی توسط *Paraglomus occultum*[4] سبب افزایش بیان ژن‌های پاسخ‌دهنده به تنش شوری، به‌ویژه *SOS1* و *SOS2* و در نتیجه بهبود توازن یونی و بالا بردن مقاومت گیاه گوجه فرنگی در مقابل تنش شوری می‌شود. این در حالی است که گیاهان غیرمیکوریزایی در تیمار تنش شوری کاهش بیان ژن‌های *SOS1* و *SOS2* را از خود نشان می‌دهند (Liu *et al.*, 2023). نتایج مشابهی مبنی بر بیان افزایشی ژن ناقل *SOS1*، از اجزای اصلی مسیر انتقال و حذف Na^+، توسط گوجه فرنگی میکوریزایی شده تحت تنش شوری نیز گزارش شده است. در این مطالعه وابستگی میکوریزایی و پاسخ رشد میکوریزایی گیاه تحت تنش شوری (NaCl) به‌ترتیب ۳۳ و ۴۳ درصد افزایش یافت (Liang *et al.*, 2022).

1- High-affinity K+ Transporter (HKT)
2- *Populus simonii*

۳- اندازه‌ها با استفاده از داده‌های مقاله توسط نگارنده محاسبه شده است.
4- *Glomus occultum* (نام قبلی)



شکل ۸- مسیر مولکولی کاهش تنش شوری (Na^+) توسط ناقل‌های مختلف. بیان افزایشی ژن‌های دخیل قادر است با دفع سدیم از ورود آنها به واکنش‌های زیستی گیاه میکوریزایی جلوگیری نماید

بر طبق شکل فوق Na^+ توسط لیپیدهای غشایی GIPC که بیوسنتز آنها توسط MOCA1 صورت می‌گیرد، حس می‌شود و منجر به فعال شدن کانال‌های Ca^{2+} و افزایش ورود آن به سیتوزول می‌شود (شکل در Word و Table و با استفاده از نرم‌افزار تخصصی Bluebeam Revu x64 - Version 21.1 تهیه و ویرایش شده است).

Figure 8- Molecular pathway of salinity (Na^+) stress reduction mediated by various transporters

Upregulation of the involved genes can prevent sodium entry into plant biological processes by facilitating its efflux in mycorrhizal plants. According to the figure, Na^+ is perceived by GIPC sphingolipids in the plasma membrane, whose biosynthesis is mediated by MOCA1, leading to the activation of Ca^{2+} channels and consequently an increase in cytosolic Ca^{2+} influx (The diagram was created and edited in Microsoft Word using tables and the specialized software Bluebeam Revu x64 - Version 21.1) .

افزون بر این، افزایش وابستگی میکوریزایی گیاه زعفران (Nadian *et al.*, 2013b) و نوعی خرمالو وحشی[1] (Incesu *et al.*, 2025) با افزایش شوری خاک نیز گزارش شده است. به‌طور کلی، بررسی نقش ژن‌های *GIPC*، *MOCA1* و خانواده *SOS* (*SOS1*, *SOS2*, *SOS3*) در گیاهان میکوریزایی و ارتباط آن با وابستگی میکوریزایی، زمینه‌ی مناسبی را برای درک بهتر از سازوکارهای مولکولی تحمل به شوری در کشاورزی فراهم می‌آورد. فعال شدن پیام‌رسانی Ca^{2+} موجب تحریک مسیر ناقل‌های خانواده SOS شامل (*SOS1*, *SOS2*, *SOS3*) می‌شود، به‌طوری‌که در نتیجه آن، یون Na^+ از طریق ناقل NHX7 واقع در غشای پلاسمایی به خارج از سلول منتقل شده و یا توسط ناقل NHX1 مستقر در تونوپلاست، در واکوئل انباشته می‌گردد. همچنین، قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار با تقویت پیام‌رسانی Ca^{2+}، بهبود انتقال یون‌ها و افزایش فعالیت سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی موجب افزایش تحمل به شوری شده و وابستگی میکوریزایی گیاه را در شرایط تنش شوری افزایش می‌دهند.

با توجه به مطالب بالا شاید اگر مجبور باشیم تنها یک نقش را به عنوان مهم‌ترین نقش قارچ‌های آربو سکولار میکوریزا در کاهش تنش شوری انتخاب کنیم، آن نقش حفظ هموستازی یونی گیاه و به‌ویژه حفظ نسبت مناسب K^+/Na^+ باشد. این سازوکار شاید نه تنها اختصاصی‌ترین پاسخ به شوری محسوب می شود، بلکه بسیاری از پاسخ‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی دیگر گیاه نیز به صورت مستقیم یا غیرمستقیم بر پایه آن شکل می‌گیرند. بنابراین، لازم است در یک مطالعه جامع ارتباط بین هموستازی یونی، تنظیم ژنی، پاسخ‌های آنتی‌اکسیدانی و وابستگی میکوریزایی را در یک مجموعه‌ی علت و معلولی تبیین نمود. این موضوع می‌تواند یکی از مهم‌ترین شکاف‌های پژوهشی در این زمینه باشد.

وابستگی میکوریزایی گیاه تحت تنش خشکی

تنش خشکی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی، محدودیت قابل‌توجهی در تولیدات کشاورزی ایجاد می‌کند و افزون بر

1- *Diospyros lotus*

کاهش عملکرد گیاهان و امنیت غذایی، پایداری اکوسیستم‌های زراعی و طبیعی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. در پاسخ به این تنش، گیاهان با فعال‌سازی مجموعه‌ای از سازوکارهای حفاظتی و تطبیقی در سطوح مرفولوژیک، فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و مولکولی تلاش می‌کنند اثرات نامطلوب کمبود آب را کاهش دهند. در این میان، همزیستی با قارچ‌های میکوریزا به‌عنوان یک رویکرد زیستی و مؤثر، نقش مهمی در افزایش تحمل گیاهان به تنش خشکی دارد. این همزیستی از طریق برهم‌کنش‌های هم‌افزا در سطوح سلولی و مولکولی، با تنظیم هماهنگ مسیرهای پیام‌رسانی و تنظیم بیان ژن‌ها در هر دو شریک همزیست، به بهبود سازگاری گیاه و افزایش بیشتر وابستگی گیاه به قارچ میکوریزا در شرایط تنش خشکی کمک می‌کند (جدول ۲). تفاوت در میزان وابستگی میکوریزایی گیاهان در این جدول می‌تواند ناشی از چگونگی برهم‌کنش میان ژنوتیپ گیاه، قارچ میکوریزا، شدت و مدت تنش خشکی، ویژگی‌های خاک و هزینه‌های کربنی همزیستی باشد.

وابستگی میکوریزایی گیاهان تحت تنش خشکی در سطح مولکولی نتیجه‌ی مجموعه‌ای از فرآیندهای پیچیده شامل مسیرهای پیام‌رسانی، تنظیم بیان ژن و تغییر در تعادل هورمونی در اثر همزیستی با قارچ‌های میکوریزا آربسکولار است (شکل ۹). در شرایط تنش خشکی، این وابستگی افزایش می‌یابد زیرا گیاه برای حفظ بقای خود، بیش از پیش به بهره‌برداری از قارچ همزیست خود متکی و وابسته می‌شود. در حقیقت، وابستگی میکوریزایی از همان مراحل ابتدایی پیام‌رسانی آغاز می‌شود، جایی‌که افزایش تولید استریگولاکتون با هدف تحریک رشد و شاخه‌زایی هیف‌های قارچی، موجب تسهیل و تقویت برقراری فرآیندهای همزیستی می‌گردد. استریگولاکتون‌ها علاوه بر محافظت از فرآیند فتوسنتز، افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه و تقویت همزیستی میکوریزایی، از طریق برهم‌کنش با فیتوهورمون‌هایی نظیر اکسین، سیتوکینین، اسید جاسمونیک، اسید سالیسیلیک و اسید آبسیزیک در تنظیم و افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش خشکی و نیز سازگاری آن با شرایط کمبود فسفر نقش مهمی ایفا می‌کنند (Bhoi *et al*., 2021; Kodama *et al*., 2022; Qi *et al*., 2024). استفاده از استریگولاکتون‌های سنتزی (نظیر GR24) که از آن در تحقیقات کشاورزی و گیاه‌شناسی برای بررسی اثرات هورمونی آن استفاده می‌شود، به‌دلیل تجمع زیستی بالاتر آن می‌تواند یکی از رویکردهای ممکن برای ایجاد تحمل تنش‌های غیرزیستی مختلف در گیاهان باشد (Bhoi *et al*., 2021). در واقع، استریگولاکتون‌های سنتزی و استفاده دستی از آنها می‌تواند بیوسنتز استریگولاکتون را در گیاهان القا کند و این می‌تواند آسیب‌های ناشی از تنش‌های غیرزیستی را کاهش دهد.

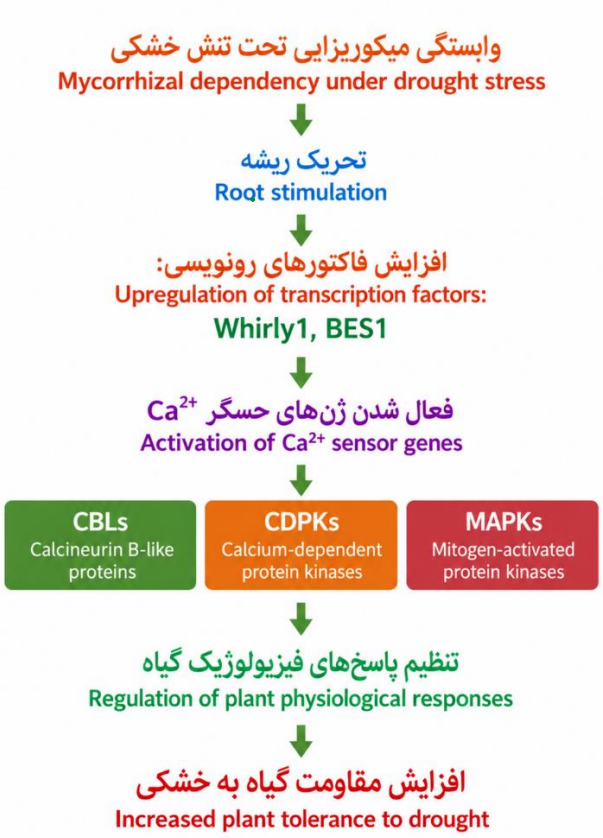
جدول ۲- میزان وابستگی گیاهان مختلف به قارچ میکوریزا تحت تنش خشکی بر حسب درصد

توضیح اینکه بعضی از مقادیر وابستگی گیاهان از داده‌های مقاله توسط نگارنده محاسبه شده است.

Table 1- The percentage of mycorrhizal dependency in different plant species under drought stress conditions

It should be noted that some of the plant dependency values were calculated by the author based on data extracted from published studies.

گیاه Plant	قارچ میکوریزا AM fungus	وابستگی میکوریزایی Mycorrhizal dependency (%)	منبع Reference
Phaseolus vulgaris	*R. intraradices*	34.7	Auge, 2001
Sorghum bicolor L.) Speedfid	*R. intraradices*	50.1	Nadian, 2011
Sorghum bicolor L.) SKF2	*R. intraradices*	62.0	Nadian, 2011
Wheat *Triticum durum* L.	*F. mossae*	10.3	Al-Karaki & Al-Raddad (1997)
Rosa damascena Mill	-	75.2	Abdel-Salam *et al*., 2018
Poncirus trifoliata L.	*Rhizophagus irregularis*	61.0	Zhang *et al*., 2024
Poncirus trifoliata L.	*Rhizophagus irregularis*	25.3	Yin *et al*., 2024
Ephedra foliate	*Funneliformis mosseae* + *Rhizophagus irregularis*	29.1	Al-Arjani *et al*., 2020
Allium porrum L.	*Rhizophagus irregularis*	71.4	Ghasemjokar *et al*., 2016
*Allium ampeloprasum ssp. Persicum (*Shadegan*)*	*Rhizophagus irregularis*	78.8	Ghasemjokar *et al*., 2016
*Allium ampeloprasum ssp. Persicum (*Esfahan*)*	*Rhizophagus irregularis*	73.6	Ghasemjokar *et al*., 2016
Citrus aurantifolia	*Rhizophagus irregularis*	59.1	Haghighatnia *et al*., 2012
Citrus macrophylla Wester	*Rhizophagus irregularis* + *Funneliformis mosseae*	15.7	Navarro *et al*., 2026
Cleopatra' mandarin	*Rhizophagus irregularis* + *Funneliformis mosseae*	9.1	Navarro *et al*., 2026



شکل ۹- مسیر پیام‌رسانی همزیستی میکوریزایی تحت تنش خشکی، شامل سنتز بیشتر پروتئین‌های Whirly1[1] و BES1[2]، بیان افزایشی ژن‌های *CBLs*، *CDPKs*، *MAPKs* بهمراه فعال شدن سیستم پیام‌رسانی Ca^{2+} و نتیجتا افزایش مقاومت گیاه در مقابل تنش خشکی

(شکل در Word و Table و با استفاده از نرم‌افزار تخصصی Bluebeam Revu x64 - Version 21.1 تهیه و ویرایش شده است).

Figure 9– Mycorrhizal symbiotic signaling pathway under drought stress, involving increased synthesis of Whirly1 and BES1 proteins, upregulated expression of CBL, CDPK, and MAPK genes, activation of the Ca^{2+} signaling system, and consequently enhanced plant resistance to drought stress

(The diagram was created and edited in Microsoft Word using tables and the specialized software Bluebeam Revu x64 - Version 21.1) .

یکی از اثرات تنش خشکی در گیاه کاهش جریان Ca^{2+} بدرون سیتوزول سلول و بهم خوردن همستاز یونی آن می‌باشد. این در حالی است که حضور قارچ میکوریزا با فعال نمودن ژن‌های دخیل سبب افزایش ورود یون‌های Ca^{2+} بدرون سیتوزول و حفظ تعادل یونی آن می‌شود (Zhang *et al.*, 2025). این ژن‌ها که به آنها ژن‌های حسگر Ca^{2+} نیز گفته می‌شود شامل *CBLs*[3]، *CDPKs*[4] و *MAPKs*[5] می‌باشند (شکل ۹). در نتیجه بیان افزایشی این ژن‌ها، تحت تنش خشکی، مسیرهای پیام‌رسانی وابسته به یون Ca^{2+} فعال شده و تغییرات افزایشی غلظت Ca^{2+} در سیتوزول را به‌عنوان یک پیام ثانویه مهم در پاسخ به همزیستی میکوریزایی تنظیم می‌کند.

توضیح اینکه، بیان افزایشی ژن‌های حسگر Ca^{2+} نتیجه دخالت برخی فاکتورهای رونویسی از جمله Whirly1 و BES1 می‌باشد که می‌تواند توسط قارچ‌های میکوریزا تشدید شود (Weinl & Kudla, 2009; Xu & Huang, 2017; Su *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2025). در واقع، میکوریزا مثل یک "تقویت‌کننده سیستم ایمنی" برای گیاه عمل می‌کند و این باعث می‌شود ژن‌های مهم دخیل به خوبی

۱- این پروتئین‌ها رفتار غیرمعمول در اتصال به DNA دارند و می‌توانند بین کلروپلاست و هسته "جابجا" شوند. الگوی عملکرد شان شبیه یک گردش/حرکت پویا (whirling movement concept) در تنظیم ژنی تصور شده است.

2- Bri1-EMS Suppressor (Brassinosteroids, BRs)
3- Calcineurin B-like protein
4- Calcium-Dependent Protein Kinases
5- Mitogen-Activated Protein Kinase 1

بیان شوند و سیستم پیام‌رسانی کلسیم بهتر کار کند و در نهایت گیاه در برابر خشکی مقاوم‌تر شود.

نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که قارچ‌های میکوریزا در طی دوره تنش خشکی از راه‌های مختلف نظیر افزایش جذب آب و عناصر غذایی به‌خصوص فسفر، سنتز و تجمع تنظیم کننده‌های اسمزی نظیر قندها، پرولین و پلی‌آمین‌ها، افزایش متابولیت‌های آنتی‌اکسیدان نظیر گلوتاتیون و فلاونوئیدها، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نظیر سوپر اکسید دیسموتاز و نیز بهبود تبادلات گازی نظیر فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای و تعرق باعث کاهش اثرات مخرب تنش خشکی بر گیاه میزبان می‌شوند (Ding *et al.*, 2016; Ye *et al.*, 2022, Nadian, 2026). در شرایط تنش خشکی، وابستگی گیاه به قارچ‌های میکوریزا معمولا افزایش می‌یابد (Ghasemjokar *et al.*, 2014) و این می‌تواند به کارایی بیشتر قارچ در جذب بیشتر فسفر و کاهش تنش خشکی منجر شود (Nadian, 2025). به‌عنوان مثال، زمانی‌که گیاه *Rosa damascena* Mill کلنی شده توسط قارچ میکوریزا آربسکولار تحت سطوح مختلف تنش خشکی قرار می‌گیرد بسیاری از مؤلفه‌های رشدی و تغذیه‌ای گیاه در مقایسه با گیاه غیرمیکوریزایی بهبود معنی داری پیدا می‌کند و وابستگی میکوریزایی گیاه به قارچ میکوریزا برای سطوح مختلف تنش خشکی و پارامترهای مختلف از ۱۶ درصد تا ۷۵ درصد افزایش نشان می‌دهد (Abdel-Salam *et al.*, 2018). جالب است که هر چه شدت تنش بیشتر می‌شود میزان وابستگی گیاه به قارچ میکوریزا بیشتر می‌شود (Ghasemjokar *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2024). در یک مطالعه متاآنالیز که بر پایه تجزیه و تحلیل آماری نتایج ۴۶۰ پژوهش منتشرشده انجام شد، مشخص گردید که حضور قارچ‌های میکوریزا آربسکولار می‌تواند هدایت آبی گیاهان تحت تنش خشکی را به‌طور متوسط ۲۴ درصد افزایش دهد (Auge *et al.*, 2015) . این میزان افزایش در شرایطی که گیاه میزبان در معرض تنش شدید خشکی قرار داشت، به بیش از دو برابر مقدار مذکور رسید. نتایج این مطالعه همچنین نشان داد که توانایی گونه‌های مختلف قارچ‌های میکوریز آربسکولار در بهبود هدایت آبی گیاهان تک‌لپه‌ای با یکدیگر متفاوت بوده و به‌ترتیب مربوط به قارچ‌های میکوریزا بومی، *Septoglomus deserticola*، *Claroideoglomus etunicatum* و *Funneliformis mosseae* است. افزون بر این، اثربخشی این قارچ‌ها در کاهش آثار تنش خشکی از طریق بهبود هدایت آبی، در گیاهان دولپه‌ای بیشتر از گیاهان تک‌لپه‌ای گزارش شده‌است (Auge *et al.*, 2015).

هر چند طی دو دهه اخیر بسیاری از سازوکارهای بیوشیمیایی، فیزیولوژیکی و ملکولی گیاهان میکوریزایی در مقابله با تنش‌های شوری و یا خشکی مشخص شده است با وجود این هنوز شکاف‌های تحقیقاتی مهمی وجود دارد. نخست آنکه، تاکنون مدل جامعی برای پیش‌بینی تغییرات وابستگی میکوریزایی در سطوح مختلف این تنش‌ها ارائه نشده است. بیشتر مطالعات، وابستگی میکوریزایی را تنها بر اساس افزایش وزن خشک گیاه محاسبه کرده‌اند، در حالی‌که این شاخص قادر به توصیف تغییرات پیچیده فیزیولوژیک و مولکولی ناشی از تنش خشکی نیست. علاوه بر این، نقش تنوع ژنتیکی قارچ‌های آربسکولار میکوریزا در تعیین میزان وابستگی میکوریزایی هنوز به خوبی شناخته نشده است. به‌عنوان مثال، مشخص نیست که آیا گونه‌های مختلف قارچی، سطوح متفاوتی از وابستگی میکوریزایی را در یک گیاه واحد تحت تنش ایجاد می‌کنند یا خیر. مطالعات مربوط به هزینه‌های کربنی همزیستی در شرایط تنش بسیار محدود هستند و هنوز مشخص نیست در چه نقطه‌ای هزینه انتقال کربن به قارچ از مزایای حاصل از مقاومت در مقابل تنش بیشتر می‌شود. از نگاه مولکولی نیز خلأهای قابل توجهی وجود دارد. تاکنون مطالعات معدودی ارتباط میان ژن‌های مسیر مشترک پیام‌رسانی همزیستی و میزان وابستگی میکوریزایی را در شرایط تنش بررسی کرده‌اند. مطمئنا، پژوهش‌های آینده با تمرکز بر این شکاف‌ها می‌تواند مفهوم کلاسیک وابستگی میکوریزایی را از یک شاخص صرفاً مبتنی بر زیست‌توده به یک شاخص چندبعدی و کاربردی در کشاورزی آینده تبدیل نماید.

نتیجه‌گیری و چشم‌اندازهای آینده

در روابط همزیستی بین گیاه و جامعه زیستی خاک، همزیستی میکوریزایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است به گونه‌ای که نه تنها سبب بهبود اکوسیستم‌های زراعی و باغی می‌شود، بلکه سلامت و کیفیت بیشتر محصولات کشاورزی را در پی دارد. برقراری رابطه همزیستی بین گیاه و قارچ‌های میکوریزا آربسکولار نتیجه انجام دسته‌ای از فرآیندهای پیچیده‌ی فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و مولکولی است. پژوهش‌های سال‌های اخیر ابعاد مختلف این همزیستی را تا حد زیادی روشن ساخته‌اند. با وجود آن‌که طیف گسترده‌ای از گونه‌های گیاهی قادر به برقراری همزیستی با قارچ‌های میکوریزا هستند، شدت و کارایی این تعامل در میان آن‌ها به‌طور قابل توجهی متفاوت است. در واقع، تفاوت در شدت وابستگی گیاهان به قارچ‌های میکوریزا، تا حد زیادی به نحوه عملکرد شبکه‌های پیام‌رسانی و تنظیم بیان ژن‌های مرتبط با همزیستی بستگی دارد. این تفاوت‌ها، به سبب پیچیدگی مسیرهای پیام‌رسانی بین قارچ و گیاه است که انجام و تداوم این همزیستی را کنترل می‌کنند. از این‌رو، شناخت سازوکارهای مولکولی و سلولی دخیل در مسیرهای پیام‌رسانی، می‌تواند شناخت بهتری را از عوامل تعیین‌کننده میزان وابستگی میکوریزایی فراهم آورد. در این میان شناسایی ژن‌ها و مسیرهای پیام‌رسانی کلیدی که در تنظیم پاسخ‌های گیاه به قارچ‌های میکوریزا نقش دارند، امیدهای فراوانی را برای بهبود کارایی این همزیستی ایجاد کرده است. اهمیت این موضوع به‌ویژه در مورد گیاهان "نامیزبان" بیشتر است، گیاهانی که علی‌رغم توانایی کلنی

شدن توسط قارچ‌های میکوریزا، به دلیل نقص و یا توقف در مسیرهای پیام‌رسانی و عدم فعال‌سازی ژن‌های دخیل، قادر به تکمیل مسیر همزیستی و تشکیل آربسکول نیستند. از این‌رو، شناخت دقیق محدودیت‌های مولکولی موجود در این گیاهان و تلاش برای رفع آن‌ها می‌تواند امکان گسترش دامنه گیاهان بهره‌مند از همزیستی میکوریزایی را فراهم سازد. تحقق چنین رویکردی می‌تواند در کاهش مصرف نهاده‌های کشاورزی، بهبود جذب عناصر غذایی و توسعه کشاورزی پایدار مؤثر باشد.

References

1. Abdel-Salam, E., Alatar, A., & El-Sheikh, M.A. (2018). Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi alleviates harmful effects of drought stress on damask rose. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *25*(8), 1772-1780. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.10.015
2. Ahmed, N., Li, J., Li, Y., Deng, L., Deng, L., Chachar, M., Chachar, Z., Chachar, S., Hayat, F., Raza, A., Umrani, J.H., Gong, L., & Tu, P. (2025). Symbiotic synergy: How arbuscular mycorrhizal fungi enhance nutrient uptake, stress tolerance, and soil health through molecular mechanisms and hormonal regulation. *International Mycological Association (IMA) Fungus*, *16*: e144989. https://doi.org/10.3897/imafungus.16.144989
3. Akiyama, K., Matsuzaki, K.I., & Hayashi, H. (2005). Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi, *Nature*, *435*(9), pp.824–827. https://doi.org/10.1038/nature03608
4. Akiyama, K., & Hayashi, H. (2006). Strigolactones: chemical signals for fungal symbionts and parasitic weeds in plant roots. *Annals Botany*, *97*(6), 925–931. https://doi.org/10.1093/aob/mcl063
5. Al-Arjani, A.B.F., Hashem, A., & Abd-Allah, E.F. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi modulates dynamics tolerance expression to mitigate drought stress in *Ephedra foliata* Boiss. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *27*(1), 380-394. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.10.008
6. Albornoz, F.E., Dixon, K.W., & Lambers, H. (2021). Revisiting mycorrhizal dogmas: Are mycorrhizas really functioning as they are widely believed to do? *Soil Ecology Letters*, *3*, 73e82. https://doi.org/10.1007/s42832-020-0070-2
7. Alder, A., Jamil, M., Marzorati, M., Bruno, M., Vermathen, M., Bigler, P., Ghisla, S., Bouwmeester, H., Beyer, P., & Al-Babili, S. (2012). The path from β-carotene to carlactone, a strigolactone-like plant hormone. *Science*, *16*, 335(6074), 1348-51. https://doi.org/101126/science.1218094
8. Al-karaki, G.N., & Al-Raddag, A. (1997). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress on growth and nutrient uptake of two wheat genotypes differing in drought resistance. *Mycorrhiza*, *7*(2), 83–88. http:/doi.org/10.1007/s005720050166
9. Allen, M.F., Allen, E.B., & Friese, C.F. (1989). Responses of the non-mycotrophic plant *Salsola kali* to invasion by vesicular–arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, *111*, 45-49. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1989.tb04216.x
10. Antolın-Llovera, M., Martina, K., Ried, M.K., & Parniske, M. (2014). Cleavage of the symbiosis receprorlike kinas ectodomain promotes complex formation with nod factor receptor. *Current Biology, Cell Press*, *24*(4), 422-427. https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.12.053
11. Atkinson, E.M., Palcic, M.N., Hindsgaul, O., & Long, S.R. (1994). Biosynthesis of *Rhizobium meliloti* lipooligosaccharide Nod factors: NodA is required for an N-asytletransferance activity. The *Proceedings of the National Academy of Sciences*, (*18*), 8418-22. https://doi.org/10.1073/pnas.91.18.8418
12. Auge, R.M. (2001). Foliar dehydration tolerance of mycorrhizal cowpea, soybean and bush bean. *New Phytologist*, *151*, 535–541. https://doi.org/10.1046/j.0028-646X.2001.00187.x
13. Auge, R.M., Toler, H.D., & Saxton, A.M. (2015). Arbuscular mycorrhizal symbiosis alters stomatal conductance of host plants more under drought than under amply watered conditions: a meta-analysis. *Mycorrhiza*, *25*(1), 13-24. https://doi.org/10.1007/s00572-014-0585-4
14. Baylis, G.T.S. (1975). The magnolioid mycorrhiza and mycotrophy in root systems derived from it. *In*: *Endomycorrhizas* (Eds. F. E. Sanders, B. Mosse and P. B. Tinker), pp 373-389, Academic Press, London. Recor ID: 44446a67-a05b-11d5-8aeb-0002a519b2f3.
15. Bethlenfalvay, G.J., Pacovsky, R.W., Brown, M.S., & Fuller, G. (1982). Mycotrophic growth and mutualistic development of host plant and fungal endophyte in an endomycorrhizal symbiosis. *Plant and Soil*, *68*, 43-54. https://doi.org/10.1007/BF02374726
16. Bhoi, A., Yadu, B., Chandra, J., & Keshavkant, S. (2021). Contribution of strigolactone in plant physiology, hormonal interaction and abiotic stresses. *Planta*, *9*:254(2), 28. https://doi.org/10.1007/s00425-021-03678-1
17. Boan, J., Smith, S.E., & Alston, A.M. (1993). Mycorrhizal responses of barley cultivars differing in P efficiency. *Plant and Soil*, *157*, 97–105. https://doi.org/10.1007/BF00038752
18. Boyno, G., Rezaee Danesh, Y., Demir, S., Teniz, N., Mulet, J.M., & Porcel, R. (2023). The complex interplay between arbuscular mycorrhizal fungi and strigolactone: Mechanisms, sinergies, applications and future directions. *International Journal of Molecular Science*, *24*, 16774. https://doi.org/10.3390/ijms242316774

19. Brundrett, M.C., & Tedersoo, L. (2018). Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytologist*, *220*, 1108–1115. https://doi.org/10.1111/nph.14976
20. Brundrett, M.C., & Kendrick, B. (1988). The mycorrhizal status, root anatomy and phenology of plants in a sugar maple forest. *Canadian Journal of Botany*, *66*, 1153-1173. https://doi.org/10.1139/b88-166
21. Brundrett, M.C. (1991). Mycorrhizas in natural ecosystems. *Advances in Ecological Research 21*, 171-313, Academic Press. htpps://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60099-9
22. Brundrett, M.C. (2002). Coevolution of roots and mycorrhizas of land plants. *New Phytologist*, *154*(2), 275-304. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00397.x
23. Charpentier, M., Martins, T.V., Granqvist, E., Oldroyd, G.E.D., & Morris, R.J. (2013). The role of DMI1 in establishing Ca^{2+} oscillations in legume symbioses. *Plant Signalling and Behaviour*, *8*(2), e22894. https://doi.org/10.4161/psb.22894
24. Chen, J., Zhang, H., Zhang, X., & Tang, M. (2017). Arbuscular mycorrhizal symbiosis alleviates salt stress in black locust through improved photosynthesis, water status, and K^+/Na^+ homeostasis. *Frontier Plant Science*, *8*, 1739. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01739
25. Chen, J., Guo, J., Li, Z., Liang, X., You, Y., Li, M., He, Y., & Zhan, F. (2022). Effects of an arbuscular mycorrhizal fungus on the growth of and cadmium uptake in maize grown on polluted wasteland, farmland and slope land soils in a lead-zinc mining area. *Toxics*, *10*, 359. https://doi.org/10.3390/ toxics10070359
26. Cosme, M., Fernandez, I., Van er Heijden, M.G.A., & Pieterse, C.M.J. (2018). Non-mycorrhizal plants: the exceptions that prove the rule. *Trends in Plant Science*, *23*, 577–587. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.04.004
27. Dastogeer, K.M.G., Zahan, M.I., Arif, M.T.U, Akter, M.A., & Okazaki, S. (2020). Plant salinity tolerance conferred by arbuscular mycorrhizal fungi and associated mechanisms: A Meta-analysis. *Frontier in Plant Science*, *9*(11), 588550. https://doi.otg/10.3389/fpls.2020.588550
28. Díaz, V., Villalobos, M., Arriaza, K., Flores, K., HernandezSaravia, L.P., & Velasquez, A. (2025). Decoding the dialog between plants and arbuscular mycorrhizal fungi: A molecular genetic perspective. *Genes*, *16*, 143. https://doi.org/10.3390/genes16020143
29. Dickson, A., Leaf, A.L., & Hosner, J.F. (1960). Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *Forestry Chronicle*, *36*(1), 10-13. https://doi.org/10.5558/tfc36010-1
30. Ding, X., Jiang, Y., He, L., Zhou, Q., Yu, J., Hui, D., & Huang, D. (2016). Exogenous glutathione improves high root-zone temperature tolerance by modulating photosynthesis, antioxidant and osmolytes systems in cucumber seedlings. *Scientific Reports*, *6*, 1–12. https://doi.org/10.1038/srep35424
31. Dong, F., Wang, Y., Tao, J., Xu, T., & Tang, M. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi affect the expression of *PxNHX* gene family, improve photosynthesis and promote *Populus simonii*×*P. nigra* growth under saline-alkali stress. *Frontier in Plant Science*, *14*, 1104095. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1104095
32. Eo, J.K., & Eom, A.H. (2009). Differential growth response of various crop species to arbuscular mycorrhizal inoculation. *Mycobiology 37*(1), 72-76.
33. Evelin, H., Devi, T.S., Gupta, S., & Kapoor, R. (2019). Mitigation of salinity stress in plants by arbuscular mycorrhizal symbiosis: current understanding and new challenges. *Frontier in Plant Science*, *10*, 470. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00470
34. Fernandez, I., Cosme, M., Stringlis, I.A., Yul, K., de Jonge, R., van Wees, S.C.M., Pozo, M.J., Pieterse, C.M.J., & van der Heijiden, M.G.A. (2019). Molecular dialogue between arbuscular mycorrhizal fungi and the nonhost plant *Arabidopsis thaliana* switches from initial detection to antagonism. *New Phytologist*, *223*, 867-881. https://doi.org/10.1111/nph.15798
35. Fitter, A.H. (1989). An ecological flora. *Bulletin of British Ecological Society*, *20*, 199-200.
36. Fitter, A.H. (2004). Magnolioid roots – hairs, architecture and mycorrhizal dependency. *New Phytologist*, *164*(1), 15-16. https://doi.10.1111/j.1469-8137.2004.01193.x
37. Fitter, A.H., & Merryweather, J.W. (1992). Why are some plants more mycorrhizal than others? An ecological enquiry. *In*: Mycorrhizas in Ecosystems (Eds. D. J. Read, D. H. Lewis, A. H. Fitter and I. J. Alexander), pp 26-36, CAB International, Wellingford, UK.
38. Gener, A., Chabaud, M., Balzergue, C., Puech-Pages, V., Novero, M., Rey, T., Fournier, J., Rochange, S., Becard, G., Bonfante P., & Barker D.G. (2013). Short-chain chitin oligomers from arbuscular mycorrhizal fungi trigger nuclear Ca^{2+} spiking in *Medicago truncatula* roots and their production is enhanced by strigolactone production. *New Phytologist*, *198*, 190–202. https://doi.org/10.1111/nph.12146
39. Gerdemann, J.W. (1975). "Vesicular-arbuscular mycorrhiza. In: *The Development and Function of Roots*", ed. J.G. Torrey and D.T. Clarkson. Academic Press, London, 575–592.
40. Ghasemjokar, N., Nadian. H. Khalilimoghdam, B., Haydari, M., & Gharineh, M. (2016). Effect of myorrhizal colonization on plant growth and proline content in some genotype of leeks (*Allium ampeloprasum ssp. persicum* L, *Allium porrum* L.). *Plant productions*, *38*(1), 15-26. (In Persian). https//doi.org/22055/ppd.2015.11115
41. Ghasemjokar, N., Nadian. H. Khalilimoghdam, B., & Haydari, M. (2014). Effects of arbuscular mycorrhizal fungus and drought stress on plant root growth, accumulation of proline and uptake of some nutrients by three genotypes

of leeks. *Journal of Soil Biology*. *1*(2). (In Persian). https://doi.org/10.22092/sbj.2014.128410
42. Ghosh, S., Kuila, D., & Verma, N.K. (2016). Arbuscular mycorrhizal dependency of plants. *In book*: Recent Trends in Biofertilizer, *174*(1-24).
43. Glenn, M.G., Chew, F.S., & Williams, P.H. (1985). Hyphal penetration of Brassica (Cruciferae) roots by a vesicular–arbuscular mycorrhizal fungus. *New Phytologist*, *99*, 463–472, https://doi.org/doi.10.1111/j.1469-8137.1985.tb03673.x
44. Grasso, S.V., Rayan, M.H., Albornoz, E.E., & Renton, M. (2025). A simple plant–mycorrhizal fungal resource trade co- evolution model explains mutualism stability, extinction and transitory parasitism via fitness feedback. *New Phyto*logist, *12*;248(3), 1429–1441. https://doi.org/10.1111/nph.70540
45. Guo, X., Wang, P., Wang, X., Li, Y., & Ji, B. (2022). Specific plant mycorrhizal responses are linked to mycorrhizal fungal species interactions. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 930069. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.930069
46. Haghighania, H., Nadian, H. Ragali, F., & Tavakoli, A.R. (2012). Effect of two species of arbuscular mycorrhizae on vegetative growth and P uptake by Mexican Lime Rootstock (*Citrus aurantifolia*) under drought stress. *Journal of Seed and Plant Production*, *28*(4), 403-417. (In Persian). https://doi.org/10.22092/sppj.2017.110486
47. Hany, A., Nadian, H., & Barzegar, A.R. (2007). Study of mycorrhizal dependency and yield of two clover species. *Journal of Soil and Water Sciences*, *21*(2), 269-276. (In Persian).
48. He, J., Huang, R., & Xie, X. (2024). A gap in the recognition of two mycorrhizal factors: new insights into two LysM-type mycorrhizal receptors. *Frontier in Plant Science*, *15*:14,18699. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1418699
49. Hestrin, R., Hammer, E.C., Muller, C.W., & Lehman, J. (2019). Synergies between mycorrhizal fungi and soil microbial communities increase plant nitrogen acquisition. *Communications Biology*, *2*(1), 233. https://doi.org/10.1038/s42003-019-0481-8
50. Hetrick, B.A.D., Kitt, D.G., & Willson, G.T. (1988). Mycorrhizal dependence and growth habit of warm-season and cool-season tallgrass prairie plants. *Canadian Journal of Botany*, *66*(7). https://doi.org/10.1139/b88-193
51. Hetrick, B.A.D., Wilson, G.W.T., & Cox, T.S. (1992). Mycorrhizal dependence of modern wheat varieties, landraces, and ancestors. *Canadian Journal of Botany*, *70*, 2032–2040. https://doi.org/10.1139/b92-253
52. Hoeksema, J.D. (2010). Ongoing coevolution in mycorrhizal interactions. *New Phytologist*, *187*, 286–300. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03305.x
53. Holsters, M. (2008). SYMRK, an enigmatic receptor guarding and guiding microbial endosymbioses with plant roots. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *18*;*105*(12), 4537–4538. htpps://doi.org/10.1073/pnas.0801270105
54. Hull, R., Choi, J., & Paszkowski, U. (2021). Conditioning plants for arbuscular mycorrhizal symbiosis through DWARF14-LIKE signalling. *Current Opinion in Plant Biology*, 62, 102071. https://doiorg/10.1016/j.pbi.2021.102071
55. Ho-Plagaro, T., & García-Garrido, J.M. (2022). Molecular regulation of arbuscular mycorrhizal symbiosis. *International Journal of Molecular Science*, *23*(11), 5960. https://doi.org/10.3390/ijms23115960
56. Hou, X., Zhou, S., Guan, Y., Shi, H., & Liu, W. (2026). Evolutionary analysis of MOCA1 gene in *Arabidopsis thaliana* and functional comparison with *PGSIP7* and *PGSIP8* genes. *Frontier in Plant Science*, *17*, 1734646. https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1734646
57. Incesu, M., Cimen, B., Yilmaz, B., Yesiloglu, T., & Ortas, I. (2025). Influences of arbuscular mycorrhizal fungi on *Diospyros lotus* seedlings under salinity stress. *Frontiers in Plant Science*, *16*, 1595144. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1595144
58. Jakobsen, I., Abbott, L.K., & Robson, A.D. (1992). External hyphae of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Trifolium subterranean* L. 1. Spread of hyphae and phosphorus inflow into roots. *New Phytologist*, *120*, 371-380. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1992.tb01077.x
59. Janos, D.P. (1980). Vesicular-arbuscular mycorrhizae affect lowland tropical rain forest plant growth. *Ecology*, *61*(1), 151–162. https://doi.org/10.2307/1937165
60. Jiang, J., Zhou, X., Tao, M., Yuan, F., Liu, L., Wu, F., Wu, X., Xiang, Y., Niu, Y., Liu, F., Li, C., Ye, R., Byeon, B., Xue, Y., Zhoa, H., Wang, H.N., Crawford, B.M., Johnson, D.M., Hu,C., Pie, C., Zhou, W., Swift, G.B., Zhang, H., & Vo-Dinh, T. (2019). Plant cell-surface GIPC sphingolipids sense salt to trigger Ca^{2+} influx. *Nature*, *572*, 341–346. http://doi.org/10.1038/s41586-019-1449-z
61. Johnson, N.C., Graham, J.H., & Smith, F.A. (1997). Functioning of mycorrhizal associations along the mutualism-parasitism continuum. *New Phytologist*, *135*, 575–585. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00729.x
62. Klironomos, J.N. (2003). Variation in plant response to native and exotic arbuscular mycorrhizal fungi. *Ecology 84*(9), 2292–2301. https://doi.org/10.1890/02-0413
63. Kodama, K., Rich, M.K., Yado, A., Shimazaki, S., Xie, X., Akiyama, K., Mizuno, Y., Komatsu, A., Luo, Y., Suzuki, H., Kameoka, H., Libourel, C., Keller, J., Sakakibara, K., Nishiyama, T., Nakagawa, T., Mashiguchi, K., Uchida, K., Yoneyama, K., Tanaka, Y., Yamaguchi, S., Shimamura, M., Delaux, P.M., Nomura, T., & Kyozuka, J. (2022). An ancestral function of strigolactones as symbiotic rhizosphere signals. *Nature Commuication*, *13*, 3974.

https://doi.org/10.1038/s41467-022-31708-3
64. Lanfranco, L., Fiorilli, V., Venice, F., & Bonfante, P. (2018). Strigolactones cross the kingdoms: plants, fungi, and bacteria in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Journal of Experimental Botany*, *69*(9), 2175–2188. https://doi.org/10.1093/jxb/erx432
65. Liang, S.M., Li, Q.S., Liu, M.Y., Hashem, A., Al-Arjani, A.B.F., Alenazi, M.M., Abd Allah, E.F., Muthuramalingam, P., & Wu, Q.S. (2022). Mycorrhizal effects on growth and expressions of stress-responsive genes (aquaporins and SOSs) of tomato under salt stress. *Journal of Fungi*, *8*, 1305. https://doi.org/10.3390/jof8121305
66. Liu, M.Y., Li, Q.S., Ding, W.Y., Dong, W.Y., Chen, J.H., Tian, X., Hashem, A., Fahad Al-Arjani, A.B, Alenazi, M.M., Fathi Abd-Allah, E. & Wu, Q.S. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation impacts expression of aquaporins and salt overly sensitive genes and enhances tolerance of salt stress in tomato. *Nature Communications*, *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, *10*, 5. https//doi.10. 1186/ s4053 8-022-00368-2.
67. Lopez-Obando, M., Ligerot Y., Bonhomme, S., Boyer, F.D., & Rameau, C. (2015). Strigolactone biosynthesis and signaling in plant development. *Development*, *142*(21), 3615–3619. https://doi.org/10.1242/dev.120006
68. Lu, Y., Yan, Y., Qin, J., Ou, L., Yang, X., Liu, F., & Xu, Y. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance phosphate uptake and alter bacterial communities in maize rhizosphere soil. *Frontier in Plant Science*, *14*, 1206870. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1206870
69. Ma, X., Li, X., & Ludewig, U. (2021). Arbuscular mycorrhizal colonization outcompetes root hairs in maize under low phosphorus availability. *Annals of Botany*, *2*:127(1), 155–166. https://doi.org/10.1093/aob/mcaa159
70. MacLean, A.M., Bravo, A., & Harrison, M.J. (2017). Plant signalling and metabolic pathways enabling arbuscular mycorrhizal symbiosis. *The Plant Cell*, *29*, 2319–2335. https://doi.org/10.1105/tpc.17.00555
71. Mahherali, H. (2014). Is there an association between root architecture and mycorrhizal growth response? *New Phytologist*, *204*(1), 192-200. https://doi.org/10.1111/nph.12927
72. Maillet, F., Poinsot, V., Andre, O., Puech-Pages, V., Haouy, A., Gueunier, M., Cromer, L., Giraudet, D., Formey, D., Niebel, A., Martinez, E.A., Driguez, H., Becard, G., & Denarie, J. (2011). Fungal lipochitooligosaccharide symbiotic signals in arbuscular mycorrhiza, *Nature*, *7328*(469), 58–63. https://doi.rog/10.1038/nature09622
73. Marques-Galvez, J.E., Giovannini, L., Boccio, P.D., Sillo, F., Zampieri, E., Pagliarani, C., Walter Chitarra, W., De Rose, S., Vita, F., & Balestrini, R. (2025). Arbuscular mycorrhiza induce the regulation of Ca^{2+}, ROS, and SOS pathways under salt stress in tomato roots. *Physiologia Plantarum*, *177*:e70610 1 of 19, https://doi.org/10.1111/ppl.70610
74. Mashiguchi, K., Seto, Y., & Yamaguch, S. (2021). Strigolactone biosynthesis, transport and perception. *The Plant Journal*, *10*(2), 335-350. https://doi.org/10.1111/tpj.15059
75. McHaffie, M.B., & Maherali, H. (2025). Variation in mycorrhizal growth response influences competitive interactions and mechanisms of plant species coexistence. *Oecologia*, *192*(3), 755-765, https://doi.org/10.1007/s00442-020-04609-9
76. Menge, J.A., Johnson, E.L.V., & Platt, R.G. (1978). Mycorrhizal dependency of several citrus cultivars under three nutrient regimes. *New Phytologist*, *81*, 553–559. https://doiorg/10.1111/j.1469-8137.1978.tb01628.x
77. Nadal, M., Sawers, R., Naseem, S., Bassin, B., Kulicke, C., Sharman, A., An, G., An, K., Ahern, K.R., Romag, A., Brutnell, T.P., Gutjahr, C., Geldner, N., Roux, C., Martinoia, E., Konopka, J.B., & Uta Paszkowski, U. (2017). An N-acetylglucosamine transporter required for arbuscular mycorrhizal symbioses in rice and maize. *Nature Plants*, *3*, 17073. https://doi.10.1038/nplants.2017.73
78. Nadian, H., Smith, S.E., Alston, A.M., & Murray, R.S. (1996). The effect of soil compaction on growth and P uptake by *Trifolium subterraneum*: Interactions with mycorrhizal colonization. *Plant and Soil*, *182*, 39–49. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00653.x
79. Nadian, H. (1997). Effects of soil compaction on growth and P uptake by *Trifolium subterraneum* colonized by AM fungi. Ph.D. thesis, Soil Science Department, Waite Campus, The University of Adelaide, Adelaide, Australia.
80. Nadian, H. (2011). The effect of drought stress and mycorrhizal symbiosis on growth and phosphorus uptake by two different sorghum cultivars in root morphology. *Journal of Water and Soil Science*, Esfahan University of Technology, *57*, 25-30. (In Persian)
81. Nadian, H., Fathi, G., & Abdollahi, M. (2013a). Phosphorus inflow into two species of clover root with different morphology colonized by AM Fungi. *Iran Agricultural Research*, *32*(1), 40-54. https://doi.org/10.1038/nplants.2017.73
82. Nadian, H., Haydari, M., Gharineh, M.H., & Daneshvar, M.H. (2013b). Effect of NaCl and mycorrhizal colonization on growth and uptake of P, K and Na by saffron (*Crocus sativus* L.). *Journal of Plant Production* (*Journal of Scientific Agricultural*), *36*(2), 49-59. (In Persian)
83. Nadian, H. (2025). Phosphorus uptake and transport mechanism in symbiotic plants with arbuscular mycorrhizal fungi (knowns and unknowns), *Journal of Soil Biology*, *1*(12), 155-190. (In Persian). https://doi.org/10.22092/SBJ.2024.366288.267
84. Nadian, H. (2026). Plant-mycorrhiza responses to drought stress: Analysis of vital processes and defense

mechanisms. *Journal of Soil Biology*, *14*(1), (In Persian)
85. Nagahashi, G., & Douds, D.D. (2011). The effects of hydroxy fatty acids on the hyphal branching of germinated spores of AM fungi. *Fungal Biology*, *115*(4-5), 351–358. https://doi.org/10.1016/j.funbio.2011.01.006
86. Navarro, J.M., Morte, A., & Pérez-Pérez, J.G. (2026). Mycorrhizal inoculation enhances drought resilience in citrus seedlings of two cultivars by modulating gas exchange and hormonal signalling. *Plants*, *15*, 505. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2026Plnts.15.505N/doi:10.3390/plants15030505
87. Olson, P.A., Thingstrub, I., Jakobsen, I., & Baath, E. (1999). Estimation of the biomass of arbuscular mycorrhizal fungi in a linseed field. *Soil Biology and Biochemistry*, *31*, 1879–1887. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00119-4
88. Peng, S., Eissenatat, D.M., Graham, J.H., Williams, K., & Hodge, N.C. (1993). Growth depression in mycorrhizal citrus at high-phosphorus supply. *Plant Physiology*, *101*(3), 1063–1071. https://doi.org/10.1104/pp.101.3.1063
89. Plenchette, C., Fortin, J.A., & Furlan, V. (1983). Growth responses of several plant species to mycorrhizae in a soil of moderate P-fertility. I. Mycorrhizal dependency under field conditions. *Plant and Soil*, *70*, 199-209. https://doi.org/10.1007/BF02374780
90. Qi, J., Mao, Y., Cui, J., Lu, X., Xu, J., Liu, Y., Zhang, H., Yu, W., & Li, C. (2024). The role of strigolactones in resistance to environmental stress in plants. *Physiologia Plantarum*, *176*(4), e14419, https://doi.org/10.1111/ppl.14419
91. Qi, S., Wang, J., Wan, L., Dai, Z., da Silva Matos, D.M., Du, D., Egan, S., Bonser, S.P., Thomas, T., & Moles, A.T. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi contribute to phosphorous uptake and allocation strategies of *Solidago canadensis* in a phosphorous-deficient environment. *Frontier in Plant Science*, *13*, 831654. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.831654
92. Romero, F., Argüello, A., de Bruin, S., & vander Heijden, M.G.A. (2023). The plant–mycorrhizal fungi collaboration gradient depends on plant functional group. *Functional Ecology*, *37*, 2386–2398. https://doi.org/10.1111/1365-2435.14395
93. Rui, R.F.D., Santos, S.C., Lourente, E.R.P., Scalon, S. P.Q., Schiavo, J.A., & Valim, W.C. (2021). Ecophysiology, quality, and mycorrhizal dependency in *Musa* spp. (cv. Grand naine) seedlings. *Revista. Brasiliera de Frutichltura*, *43*(4), (e-097). https://doi.org/10.1590/0100-29452021097
94. Rush, T.A., Puech-Pagès, V., Bascaules, A., Jargeat, P., Maillet, F., Haouy, A., Maes, A.Q.M., Carriel, C.C., Khokhani, D., Keller-Pearson, M., Tannous, J., Cope, K.R., Garcia, K., Maeda, J., Johnson, C., Kleven, B., Choudhury, Q.J., Labbe, J., Swift, C., O'Malley, M.A., Bok, J.W., Cottaz, S., Fort, S., Poinsot, V., Sussman, M.R., Lefort, C., Nett, J., Keller, N.P., Becard, G., & Ane, J.M. (2020). Lipo-chitooligosaccharides as regulatory signals of fungal growth and development. *Nature Communications*, *4*(11), 3897. https://doi.org/10.1038/s41467-020-17615-5
95. Singh, S. (2001). Mycorrhizal dependency, Part. 1: Selection of efficient mycorrhizal fungi". *Mycorrhiza News*, *11*(1), 2–9.
96. Singh, S., & Parniske, M. (2012). Activation of calcium- and calmodulin-dependent protein kinase (CCaMK), the central regulator of plant root endosymbiosis. *Current Opinion in Plant Biology*, *14*(4), 444-453. https://doi.org.10.1016/j.pbi.2012.04.002
97. Smith, S.E. (1980). Mycorrhizas of autotrophic higher plants. *Biological Reviews*, *55*, 475-510.
98. Smith, S.E., Smith, F.A., & Jakobsen, I. (2003). Mycorrhizal fungi can dominate phosphate supply to plants irrespective of growth responses. *Plant Physiology*, *133*,16–20. https://doi.org/10.1104/pp.103.024380
99. Smith, S.E., Smith, F.A., & Jakobsen, I. (2004). Functional diversity in arbuscular mycorrhizal (AM) symbioses: the contribution of the mycorrhizal P uptake pathway is not correlated with mycorrhizal responses in growth or total P uptake. *New Phytologist*, *162*, 511–524. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01039.x
100. Smith, S.E., & Read, D.J. (2008). *Mycorrhizal symbiosis*. New York, NY, USA: Academic Press.
101. Smith, F. & Smith, S. E. (2011). What is the significance of the arbuscular mycorrhizal colonization of many economically important crop plants. *Plant and Soil*, *348*, 63–79.
102. Stanga, J.P., Smith, S.M., Brigges, W.R., & Nelson, D.C. (2013). Suppressor of more axillary growth controls seed germination and seedling development in Arabidopsis. *Plant Physiology*, *163*, 318–330. https://doi.org/10.1104/pp.113.221259
103. St Jhon, T.V. (1980). Root size, root hairs and mycorrhizal infection: a re-examination of Baylis's hypothesis with tropical trees. *New Phytol*ogist, *84*, 483-487. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1980.tb04555.x
104. Su, H., Wang, Q., Wang, L., & Cui, J. (2024). The Ca^{2+} regulated protein kinase CIPK1 modulates plant response to nitrate deficiency in *Arabidopsis*. *Genes*, *15*, 1235. https://doi.org/10.3390/genes15091235
105. Tanaka, S., Hashimoto, K., Kobayashi, Y., Yano, K., Maeda, T., Kameoka, H., Ezawa, T., Saito, K., Akiyama, K., & Kawaguchi, M. (2022). Asymbiotic mass production of the arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus clarus*. *Communificatios Biology*, *5*, 43. https://doi.org/10.1038/s42003-021-02967-5
106. Tian, H., Wang, R., Li, M., Dang, H., & Solaiman, Z.M. (2019). Molecular signal communication during arbuscular mycorrhizal formation induces significant transcriptional reprogramming of wheat (*Triticum aestivum*) roots.

Annals of Botany, *124*(6), 1109–1119. https://doi.org/10.1093/aob/mcz119
107. Thirkell, T.J., Grimmer, M., James, L., Pastok, D., Allary, T., Elliott, A., Paveley, N., Daniell, T., & Field, K.J. (2022). Variation in mycorrhizal growth response among a spring wheat mapping population shows potential to breed for symbiotic benefit. *Food and Energy Security*, *11*, e370. https://doi.org/10.1002/fes3.370
108. Toro, K.S., & Brachmann, A. (2016). The effector candidate repertoire of the arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus clarus*. *BMC Genomics*, *17*, 101. https://doi.10.1186/s12864-016-2422-y
109. Wang, P., & Chen, Y. (2024). Protecting plants from pathogens through arbuscular mycorrhiza: Role of fungal diversity. *Microbiology Reseach*, *289*, 127919. https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127919
110. Wang, Y., He, X., & Yu, F. (2022). Non-host plants: Are they mycorrhizal networks players? *Plant Diversity*, *44*(2), 127-134. https://doi.org/10.1016/j.pld.2021.06.005
111. Weinl, S., & Kudla, J. (2009). The CBL–CIPK Ca^{2+}-decoding signalling network: function and perspectives. *New Phytologist*, *184*, 517–528. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02938.x
112. Wilson, G.W.T., & Hartnett, D.C. (1998). Interspecific variation in plant responses to mycorrhizal colonization in tallgrass prairie. *American Journal of Botany*, *85*, 1732–1738. https://doi.org/10.2307/2446507
113. Xu, W., & Huang, W. (2017). Calcium-dependent protein kinases in phytohormone signaling pathways. *International Journal of Molecular Science*, *18*, 2436. https://doi.org/10.3390/ijms18112436
114. Xu, P.J., Liu, S., Song, S., Guo, H., Tang, J., Yong, J.W.H., Ma, Y., & Chen, X. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungi influence decomposition and the associated soil microbial community under different soil phosphorus availability. *Soil Biology and Biochemestry*, *120*, 181-190. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.02.010
115. Yang, J., Lan, L., Jin, Y., Yu, N., Wang, D., & Wang, E. (2022). Mechanisms underlying legume–rhizobium symbioses. *Journal of Integrative Plant Biology*, *64*, 244–267. https://doi.org/10.1111/jipb.13207
116. Ye, Q., Wang, H., & Li, H. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi improve growth, photosynthetic activity, and chlorophyll fluorescence of *Vitis vinifera* L. cv. ecolly under drought stress. *Agronomy*, *12*(7), 1563. https://doi.org/10.3390/agronomy12071563
117. Yin, X., Zhang, W., Feng, Z., G., Zhu, H., & Yao, Q. (2024). Improved observation of colonized roots reveals the regulation of arbuscule development and senescence by drought stress in the arbuscular mycorrhizae of citrus. *Horticultural Plant Journal*, *10*(2), 425e436. https://doi.org/10.1016/j.hpj.2023.04.006
118. Yoneyama, K. (2019). How do strigolactones ameliorate nutrient deficiencies in plants? *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, *11*(8), a034686. https://doi.org/10.1101/cshperspect.a034686
119. Yuan, P., Luo, F., Gleason, C., & Poovaiah, B.W. (2022). Calcium/ calmodulin-mediated microbial symbiotic interactions in plants. *Frontier in Plant Science*, *13*, 984909. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.984909
120. Zangaro, W., Nishidate, F.R., Vandresen, J., Andrade, G., & Nogueira, M.A. (2007). Root mycorrhizal colonization and plant responsiveness are related to root plasticity, soil fertility and successional status of native woody species in Southern Brazil. *Journal of Tropical Ecology*, *23*, 53-62. https://doi.org/10.1017/S0266467406003713
121. Zhang, W., Yin, X., Feng, Z., Liu, X., Zhu, F., Zhu, H., & Yao, Q. (2024). Drought stress reduces arbuscular mycorrhizal colonization of *Poncirus trifoliata* L. roots and plant growth promotion via lipid metabolism. *Frontier and Plant Science*, *15*, 1452202. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1452202
122. Zhang, Q., Yang,W., Wang, M., Chen, J., Zhang, Z., Wei, Y., Chang, Q., & Gong, M. (2025). Transcriptome analysis reveals the molecular mechanisms for mycorrhiza- enhanced drought tolerance in maize by regulating the Ca^{2+} signalling pathway. *Journal of Fungi*, *11*, 375. https://doi.org/10.3390/jof11050375
123. Wang, S., Yi, J., Li, Z., Wu, J., Xu, Y., Xue, R., Wang, Y., Duan, L., Zhao, L., & Pi, E. (2026). Functional overview of plant genes essential for arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Genes*, *17*(6), 686. https://doi.org/10.3390/qenes17060686

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

Research Article
Vol. 40, No. 3, Fall. 2026, p. 275-292

Determining the Nutritional Status of Canola (*Brassica napus*) in Different Climates of Iran before the Flowering Stage

F. Nourgholipour[1*], M.S. Tadayon[2], M. Pasandideh[1], M.A. Khodshenas[3]
1- Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: nourfg@yahoo.com)
2- Soil and Water Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Shiraz, Iran
3- Soil and Water Research Department, Markazi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Arak, Iran

Received: 08 February 2026
Revised: 01 August 2026
Accepted: 18 August 2026
Available Online: 18 August 2026

How to cite this article:
Nourgholipour, F., Tadayon, M.S., Pasandideh, M., & Khodshenas, M.A. (2026). Determining the nutritional status of canola (*Brassica napus*) in different climates of Iran before flowering stage. *Journal of Soil and Wather, 40*(3), 275-292. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97760.1525

Introduction

Rapeseed (*Brassica napus* L.), particularly the low erucic acid and glucosinolate cultivars known as canola, is the third largest oilseed crop in the world after soybean and oil palm. In Iran, canola cultivation covers approximately 173 thousand hectares, making it the largest cultivated area among oilseed crops. Golestan and Khuzestan provinces have the largest cultivated areas. Balanced fertilization is crucial for optimizing canola yield, especially under adverse environmental conditions. Plant tissue analysis serves as a fundamental tool for diagnosing nutrient status and exploits the principle that tissue nutrient concentration reflects soil nutrient availability. Advanced diagnostic methods, such as Deviation from Optimum Percentage (DOP) and Nutrient Nalance Index (NBI), provide quantitative measures of nutrient adequacy and imbalance. The DOP method ranks nutrient deficiencies by comparing observed tissue concentrations with those in high-yielding populations. Meanwhile, the NBI integrates multiple nutrient statuses into a single measure (Σ|DOP|) and provides a comprehensive assessment of overall nutrient health.

Materials and Methods

The study was conducted in four provinces: Alborz, Markazi, Golestan, and Ardabil (Moghan region), to reflect the diverse agro-ecological conditions of the country. Thirty farms were randomly selected in each province.

Alborz province (Karaj region) is located at coordinates 35°48'N and 51°10'E. Markazi province (Arak city) is located at coordinates 34°5'30'N and 49°41'30'E. East Golestan Province (Gonbad Kavus region) is located at coordinates 37°16'N and 55°12'E, while Ardabil Province (Parsabad and Moghan regions) is located at coordinates between 39°12'N and 39°42'N and 47°10'E and 48°21'E.

Soil samples were collected from the fields before planting. Plant tissue samples were taken at the begining of stem elongation stage (two-digit growth code 30), which is a sensitive stage for identifying and eliminating nutrient deficiencies before canola flowering. Plant samples were collected as whole plants from 20 random points per hectare, and 20 plants were sampled from each point. Total nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), and micronutrients zinc (Zn), manganese (Mn), iron (Fe), copper (Cu), and boron (B) were measured in plant tissue. Grain yield was measured at maturity. To assess nutrient status and identify yield-limiting factors,

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)
https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97760.1525

the key diagnostic index, deviation from optimum percentage (DOP), quantifies the deviation in nutrient concentrations from the optimal values observed in high-yielding populations. The NBI index was also used in this study.

Results and Discussion

In terms of soil properties, there was significant variation in pH, salinity, organic carbon, and nutrient availability across the studied provinces.

In Alborz province, the average organic carbon content was low (0.81%) and the frequency of nutrient deficiencies was high, including nitrogen (N, 73%), phosphorus (P, 47%), potassium (K, 20%), sulfur (S, 87%), magnesium (Mg, 37%), iron (Fe, 83%), copper (Cu, 20%), zinc (Zn, 50%), manganese (Mn, 43%), and boron (B, 60%). In Markazi Province, with an average salinity of 1.47 dS/m, severe deficiencies of nitrogen (90%), phosphorus (75%), and potassium (37%) were observed. In Golestan Province, non-saline soils in this region with an average organic carbon percentage of 1.4% showed deficiencies of nitrogen (27%), phosphorus (94%), potassium (32%), magnesium (100%), iron (32%), copper (22%), manganese (31%), and zinc (81%). In Ardabil Province, high clay content (40%) and salinity (2.4 dS/m) led to deficiencies of phosphorus (50%), potassium (1%), sulfur (99%), magnesium (99%), iron (50%), copper (3%), zinc (87%), and manganese (10%).

DOP standards for nutrient concentrations in canola shoots during stem elongation were determined as follows: nitrogen 3.61%, phosphorus 0.46%, potassium 2.8%, sulfur 0.513%, magnesium 0.44%, calcium 1-2%, iron 226 mg kg^{-1}, copper 1.8 mg kg^{-1}, manganese 78.5 mg kg^{-1}, zinc 45.8 mg kg^{-1}, and boron 54 mg kg^{-1}.

The nutrient balance index (NBI), calculated as the sum of absolute DOP values, was inversely correlated with yield, confirming that greater nutrient imbalances resulted in reduced yield. Statistical analyses confirmed that NBI thresholds between 133 and 146 corresponded to significant yield reductions ($p<0.01$). Based on these thresholds, yield decreased by 12 to 18% for each unit increase in NBI. It is noteworthy that when NBI exceeds a certain threshold (NBI breakpoint; BPC), yield reduction becomes more evident. Below this threshold, yield is less affected by NBI. Alborz province had the highest BPC (146), followed by Ardabil (139), Markazi (138), and Golestan (133) provinces, respectively. Farmers and advisors can use this range as a guide for fertilizer recommendations.

Conclusion

This study shows that the variability of canola yield in agro-ecological regions of Iran is primarily due to the deficiency of region-specific nutrients, especially phosphorus and zinc, combined with soil alkalinity, low organic carbon, and mineralogical characteristics. By implementing region-specific nutrient management strategies, yield gaps can be closed, and sustainability in semi-arid oilseed systems can be promoted. The Nutrient Balance Index integrates vital nutrient ratios (such as phosphorus:zinc, magnesium:potassium) to detect imbalances.

Acknowledgement

Authors are thankful to and appreciate Soil and Water Research Institute (SWRI) for supporting the project. The results of this article are derived from the national project number 01-10-10-023-970098 of the Soil and Water Research Institute.

Keywords: Concentration, DOP, Nutritional Status, NBI

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ٤٠، شماره ٣، پاییز ١٤٠٥، ص. ٢٩٢-٢٧٥

تشخیص وضعیت تغذیه‌ای کلزا (*Brassica napus*) در اقلیم‌های مختلف ایران قبل از مرحله گلدهی

فریدون نورقلی پور[1*]- محمد سعید تدین[2]- محمد پسندیده[1]- محمد علی خودشناس[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۷

چکیده

کلزا با داشتن بیشترین سطح زیر کشت در میان محصولات دانه‌روغنی در ایران، به‌دلیل مدیریت نامتعادل عناصر غذایی با محدودیت عملکرد مواجه است. در این مطالعه، با به‌کارگیری روش تشخیص خاک-گیاه و رویکردهای مدل‌سازی بیوژئوشیمیایی مبتنی بر شاخص‌های تشخیصی، کمبودهای عناصر غذایی در چهار منطقه کشاورزی-اکولوژیکی کشور (البرز، مرکزی، گلستان و اردبیل) بررسی شد. با تجزیه‌وتحلیل داده‌های ۱۲۰ مزرعه از طریق روش‌های انحراف از درصد بهینه (DOP) و شاخص تعادل تغذیه‌ای (NBI)، کمبود گسترده فسفر و روی در تمامی استان‌ها شناسایی گردید. قلیائیت خاک (pH=۷/۵-۸/۵) و محتوای کم کربن آلی (کمتر از ۱/۴درصد) به‌واسطه رسوب هیدروکسیدی و رقابت کاتیونی، تثبیت عناصر کم‌مصرف به‌ویژه روی (DOP= -۲۴/۶) و آهن (DOP= -۱۶/۴) را تشدید می‌کند. افزون‌براین، خاک‌های آهکی باعث تثبیت فسفر به‌صورت کانی‌های فسفات کلسیم می‌شوند. درحالی‌که خاک‌های غنی از رس در اردبیل، پتاسیم تبادلی (K) را حفظ کرده‌اند، اما به‌دلیل تثبیت بین‌لایه‌ای، کمبود منیزیم نشان دادند. مقادیر NBI برای مزارع کلزای مورد مطالعه از ۱۳۳ تا ۱۴۶ متغیر بود. فراتر از این حدود، عملکرد به ازای هر واحد افزایش NBI، ۱۲ تا ۱۸ درصد کاهش یافت که نشان‌دهنده هم‌افزایی عناصر غذایی است. تغییرات منطقه‌ای در مقادیر NBI به‌شدت با نتایج عملکرد مشاهده‌شده، همبستگی داشت. بررسی آماری آستانه‌های NBI برای کاهش عملکرد (۱۳۳-۱۴۶، $p<۰/۰۱$) نشان داد که نسبت‌های متعادل منیزیم به پتاسیم (۸/۲ :۱) در اردبیل به عملکرد بهتر (۲۸۷۰ کیلوگرم در هکتار) کمک نمود؛ در حالی‌که عملکرد پایین‌تر استان مرکزی (۲۲۴۹ کیلوگرم در هکتار) با کمبود فسفر (۱۱/۳۹ میلی‌گرم در کیلوگرم) و مقادیر بالای NBI (بیش از ۱۳۸) مرتبط بود. این یافته‌ها بر اهمیت توجه به محدودیت‌های عناصر غذایی در خاک‌های آهکی تأکید دارد، زیرا بیش از ۷۵ درصد مزارع کلزای کشور با کمبود فسفر و روی مواجه‌اند. نتایج ما بر ضرورت به‌کارگیری راهبردهای مدیریت عناصر غذایی به‌صورت مکان‌ویژه برای بهبود پایدار عملکرد در اکوسیستم‌های کشاورزی کشور تأکید می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: غلظت، وضعیت تغذیه‌ای، انحراف از درصد بهینه، شاخص تعادل تغذیه‌ای

۱- مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO)، کرج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: nourfg@yahoo.com)
۲- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس (AREEO)، شیراز، ایران
۳- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی (AREEO)، اراک، ایران
https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97760.1525

مقدمه

کلزا (*Brassica napus* L.)، به‌ویژه ارقام با اسید اروسیک و گلوکوزینولات کم که به‌عنوان کانولا شناخته می‌شوند، سومین محصول دانه‌روغنی جهان پس از سویا و نخل روغنی می‌باشد (Statista, 2025). در میان تولیدکنندگان اصلی، کانادا با تولید سالانه بیش از ۸/۱۸ میلیون تن، پیشتاز است (Statista, 2025). کشت کلزا در ایران تقریباً ۱۷۳ هزار هکتار را در بر می‌گیرد و بیشترین مساحت کشت را در میان محصولات زراعی دانه‌روغنی دارد. استان‌های گلستان و خوزستان بیشترین سطح کشت را به خود اختصاص داده‌اند (Agricultural statistics, 2025). علی‌رغم سازگاری با شرایط متنوع کشاورزی–اکولوژیکی، عملکرد کلزا به‌دلیل عدم تعادل عناصر غذایی، ویژگی‌های ناهمگن خاک و روش‌های کوددهی نامتعادل با محدودیت‌های قابل‌توجهی روبه‌رو است که با تغییرپذیری اقلیمی و بروز عوامل تنش‌زای محیطی مانند خشکسالی و شوری تشدید می‌شود (Meena *et al.*, Dönmez, 2024 & Aghabeygi ; 2024). کوددهی متعادل برای بهینه‌سازی عملکرد کلزا، به‌ویژه در شرایط نامساعد محیطی، بسیار مهم است. مطالعات انجام‌شده در آمریکای شمالی، اروپا و استرالیا بر اهمیت کوددهی متعادل برای جبران شکاف‌های عملکردی ناشی از کمبود عناصر غذایی تأکید دارند (Mahmoodi Nezhad Dezfully & Chaleshtori *et al.*, 2021; Mostashari, 2022). اثربخشی راهبردهای کوددهی بسته به نوع خاک، اقلیم و روش‌های مدیریتی به‌طور قابل‌توجهی متفاوت است و نیازمند برنامه‌ریزی ویژه برای هر منطقه می‌باشد. کمبود یا بیش‌بود عناصر غذایی می‌تواند به‌شدت بر رشد گیاه، کیفیت بذر و عملکرد دانه تأثیر بگذارد (Wang *et al.*, 2025). بررسی‌های مزرعه‌ای در مزارع کلزای ایران، کاهش دسترسی به فسفر (P) خاک را نشان می‌دهد. این روند در خاک‌های آهکی در سطح جهانی نیز مشاهده شده است؛ جایی‌که تثبیت فسفر به صورت مواد معدنی نامحلول فسفات کلسیم، قابلیت دسترسی آن را برای گیاه محدود می‌کند (Murphy, 2015 ; Taalab *et al.*, 2019). اجرای مدیریت یکپارچه عناصر غذایی در کاهش این کمبودها مؤثر بوده و گزارش‌ها حاکی از افزایش عملکرد تا ۲۵ درصد در صورت اجرای روش‌های مناسب کوددهی است (Roy *et al.*, 2006Nourgholipour *et al.*, 2022 ;). با این حال، دستیابی به تعادل بهینه عناصر غذایی به‌دلیل تنوع منطقه‌ای از لحاظ خواص خاک، از جمله pH قلیایی (بیش از۷)، کربن آلی کم (کمتر از ۱٪) و درصد بالای آهک خاک که بر قابلیت دسترسی عناصر غذایی تأثیر می‌گذارند، همچنان چالش برانگیز است (Muhammad *et al.*, 20232025 ;).

مکانیسم‌های ایجادکننده محدودیت دسترسی عناصر غذایی در کشت کلزا چندوجهی و اغلب درهم‌تنیده هستند. در خاک‌های آهکی، افزایش سطح کلسیم موجب تشکیل کانی‌های پایدار فسفات کلسیم شده و حلالیت و جذب فسفر توسط گیاه را کاهش می‌دهد (Muhammad *et al.*, 2025). این پدیده به‌ویژه در خاک‌های مناطق نیمه‌خشک ایران با pH قلیایی، تثبیت فسفر را تشدید می‌کند (Hosseini& Tadayon, 2024). مقادیر بالای pH همچنین باعث رسوب هیدروکسید عناصر کم‌مصرفی مانند روی (Zn) و آهن (Fe) شده و آن‌ها را برای گیاه غیرقابل‌دسترس می‌سازد (Taalab *et al.*, 2019). افزون‌براین، رقابت بین کاتیون‌ها برای جایگاه‌های جذب روی کلوئیدهای خاک، دسترسی به عناصر کم‌مصرف را پیچیده‌تر می‌کند (Reddy *et al.*, 2024). محتوای کم ماده آلی (کمتر از ۱ درصد)، معدنی‌شدن نیتروژن را مختل کرده، فعالیت میکروبی را کاهش داده و به‌تدریج حاصلخیزی خاک را کم می‌کند (Naseri Rad ; Jost *et al.*, 2025*et al.*, 2021). این اثرات با کشت تک‌محصولی فشرده و الگوهای نامنظم بارندگی که از ویژگی‌های محیط‌های نیمه‌خشک است، تشدید می‌شوند.

تجزیه بافت گیاهی به‌عنوان ابزاری بنیادی برای تشخیص وضعیت عناصر غذایی عمل می‌کند و از این اصل بهره می‌گیرد که غلظت عناصر غذایی در بافت، نشان‌دهنده در دسترس بودن آن‌ها در خاک است (Reddy *et al.*, 2024). روش‌های تشخیصی پیشرفته‌ای مانند انحراف از درصد بهینه (DOP) و شاخص تعادل تغذیه‌ای (NBI)، معیارهای کمّی از کفایت و عدم تعادل عناصر غذایی ارائه می‌دهند. روش DOP با مقایسه غلظت‌های مشاهده‌شده در بافت با غلظت‌های عناصر در جمعیت‌های پرمحصول، کمبودهای غذایی را رتبه‌بندی کرده و درنتیجه حدود بحرانی را برای هر عنصر مشخص می‌کند (Walworth & Sumner, Mostashari *et al.*, 2018 ; 1987). در همین حال، NBI وضعیت چندین عنصر غذایی را در یک معیار واحد (Σ|DOP|) ادغام کرده و ارزیابی جامعی از سلامت کلی تغذیه ارائه می‌دهد (Khiari *et al.*, Dixon & Qaderi, 2025; 2001a,b). اگرچه DOP به‌طور گسترده در محصولات چندساله مانند گیلاس، انگور و سیب ارزیابی شده است (Goodarzi *et al.*, 2010; Jemenez *et al.*, 2007; Mostashari *et al.*, 2018).

کاربرد این روش در محصولات دانه‌روغنی یک‌ساله مانند کلزا، به‌ویژه در شرایط کشاورزی–اکولوژیکی منحصربه‌فرد ایران، هنوز به‌طور کامل بررسی نشده است. افزون‌براین، به‌دلیل تنوع ویژگی‌های خاک در مناطق مختلف، کالیبراسیون منطقه‌ای شاخص‌های تشخیصی برای اطمینان از ارتباط و دقت آن‌ها ضروری است. با توجه به پیچیدگی برهمکنش‌های عناصر غذایی و چالش‌های ناشی از محیط نیمه‌خشک ایران، این مطالعه با اهداف زیر انجام شد: ۱) تعیین کمّی تنوع مکانی قابلیت دسترسی عناصر غذایی در مناطق کشت کلزا در ایران؛ ۲) رتبه‌بندی کمبودهای عناصر غذایی خاص هر مکان با

استفاده از شاخص DOP؛ و ۳) تعیین حدود بحرانی برای غلظت عناصر غذایی در بافت گیاه کلزا در شرایط مختلف خاک و اقلیمی. دستیابی به این اهداف برای بهبود عملکرد کلزاکاران ایران و پایداری تولید، بسیار مؤثر خواهد بود.

مواد و روش‌ها

مناطق مورد مطالعه و طرح نمونه‌گیری

این مطالعه در چهار استان البرز، مرکزی، گلستان و اردبیل (منطقه مغان) برای نشان‌دادن شرایط متنوع کشاورزی-بوم‌شناختی کشور انجام شد. در هر استان ۳۰ مزرعه به‌صورت تصادفی انتخاب گردید. موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های اقلیمی مناطق مورد مطالعه به شرح زیر است:

- استان البرز (منطقه کرج): واقع در عرض جغرافیایی ′۴۸ °۳۵ شمالی و ′۱۰ °۵۱ شرقی. دارای آب‌وهوای نیمه‌خشک و معتدل سرد با میانگین بارندگی سالانه ۳۰۰–۲۴۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا. میانگین دمای ۳۰ساله ۱۳/۷ درجه سانتی‌گراد و دامنه دمایی ۴۱ تا ۲۱/۷- درجه سانتی‌گراد.

– استان مرکزی (شهر اراک): واقع در مختصات ′۵ °۳۴ شمالی و ′۴۱ °۴۹ شرقی. دارای آب‌وهوای معتدل سرد و نیمه‌خشک با میانگین بارندگی سالانه ۳۴۲ میلی‌متر و میانگین دمای ۱۳/۹ درجه سانتی‌گراد.

– شرق استان گلستان (منطقه گنبد کاووس): واقع در مختصات ′۱۶ °۳۷ شمالی و ′۱۲ °۵۵ شرقی. دارای آب‌وهوای مدیترانه‌ای با میانگین بارندگی ۴۵۳/۷ میلی‌متر، میانگین دمای ۱۷/۸درجه سانتی‌گراد و ارتفاع ۴۰ متر.

– استان اردبیل (مناطق پارس‌آباد و مغان) که در مختصات بین ۳۹ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۲ دقیقه شمالی و ۴۷ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۱ دقیقه شرقی قرار دارد. این منطقه برخی از حاصلخیزترین زمین‌های کشاورزی ایران را در بر می‌گیرد (شکل ۱).

نمونه‌های خاک از لایه سطحی خاک (۰ تا ۳۰ سانتی‌متر) با استفاده از یک روش نمونه‌برداری شبکه‌ای استاندارد جمع‌آوری شدند. نمونه‌های بافت گیاهی در مرحله رشد ساقه دهی (کد دو رقمی رشد ۳۰ مطابق Meier *et al.*, 2009)، که مرحله‌ای حساس برای شناسایی و رفع کمبودهای غذایی پیش از گلدهی است، گرفته شدند. تشخیص زودهنگام کمبودها در این مرحله امکان مداخله به‌موقع برای اصلاح عدم تعادل غذایی را فراهم می‌کند. برای تجزیه‌وتحلیل وضعیت خاک مزارع، نمونه‌های مرکب از نقاط مختلف هر مزرعه تهیه شد. به‌طور مشابه، نمونه‌های گیاهی به‌صورت گیاه کامل از ۲۰ نقطه تصادفی در هر هکتار جمع‌آوری شده و از هر نقطه ۲۰ گیاه نمونه‌برداری شد. این روش، پوشش جامعی از تنوع خاک و گیاه در هر مزرعه را تضمین می‌کرد.

بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتری تعیین شد (Gee & Bauder, 1986). کربن آلی (OC٪) از طریق تکنیک اکسیداسیون مرطوب اندازه‌گیری شد (Nelson & Sommers, 1996). عناصر کم‌مصرف با استفاده از روش DTPA که توسط استخراج شدند (Lindsay & Norvell, 1978). روش استخراج DTPA برای عناصر کممصرف به‌طور مؤثر عواملی مانند رسوب ناشی از pH و رقابت کاتیونی را که جذب روی و آهن را در خاک‌های قلیایی محدود می‌کنند، در نظر می‌گیرد (Lindsay Purakayastha *et al.*, 2023; Loeppert & Norvell, 1978). کربنات کلسیم معادل (Suarez, 1996)، pH خاک و هدایت الکتریکی (EC) (با استفاده از سوسپانسیون ۱:۲/۵ خاک به آب (Rhoades, 1982) نیز اندازه گیری شدند. پتاسیم قابل جذب (K) از طریق عصاره گیر استات آمونیوم (Sparks *et al.*, 1996) و فسفر قابل دسترس (P) با استفاده از روش اولسن (Olsen & Sommers, 1982) اندازه‌گیری شد.

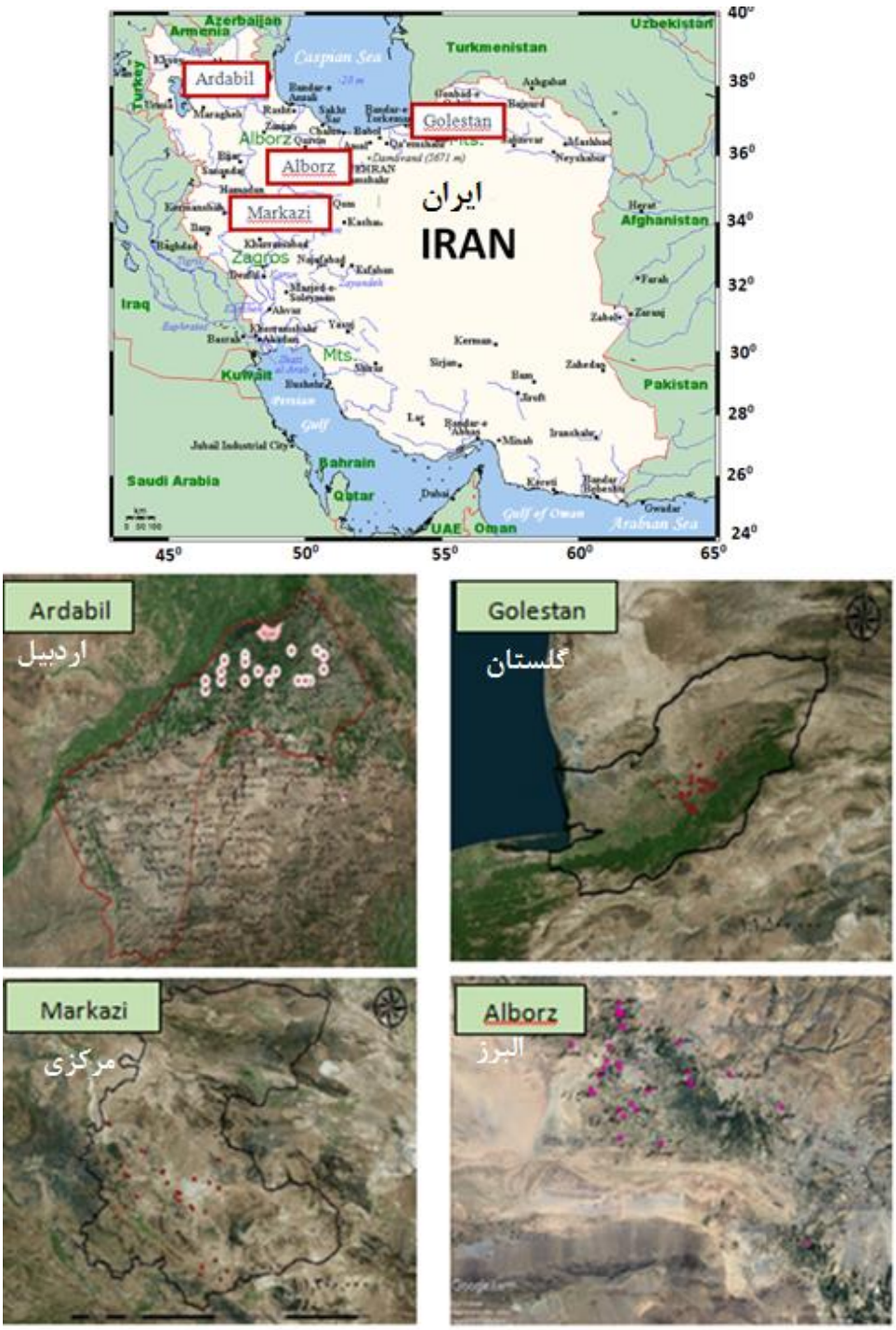
در بافت گیاه، نیتروژن کل (N) با استفاده از روش هضم کجلدال اندازه‌گیری شد (Horneck & Miller, 1998). فسفر (P) به‌صورت رنگ‌سنجی با استفاده از اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. پتاسیم (K) از طریق نورسنجی شعله‌ای تعیین شد (Chapman & Pratt, 1962). عناصر کم‌مصرف روی (Zn)، منگنز (Mn)، آهن (Fe) و مس (Cu) با استفاده از خاکستر خشک و به‌دنبال آن هضم با اسید هیدروکلریک استخراج و با استفاده از طیف‌سنجی جذب اتمی اندازه‌گیری شدند. بور (B) با استفاده از روش آزومتین-H اندازه‌گیری شد (Chapman & Pratt, 1962).

عملکرد دانه در زمان رسیدگی اندازه‌گیری شد. اطلاعات مربوط به رقم، داده‌های هواشناسی دوره رشد، و جزئیات نوع، مقدار، زمان و روش مصرف کودها ثبت گردید.

روش‌های آماری و تشخیصی

برای ارزیابی وضعیت عناصر غذایی و شناسایی عوامل محدودکننده عملکرد، از شاخص تشخیصی کلیدی انحراف از درصد بهینه استفاده شد. رویکردهای مدل‌سازی بیوژئوشیمیایی در این مطالعه شامل استفاده از شاخص‌های DOP و NBI برای کمّی‌سازی فرآیندهای شیمیایی نظیر رسوب هیدروکسیدی، تثبیت فسفات کلسیم و تثبیت بین‌لایه‌ای عناصر در خاک‌های آهکی و رسی است. مدل انحراف از درصد بهینه (DOP)، انحراف در غلظت عناصر غذایی را نسبت به مقادیر بهینه مشاهده‌شده در جمعیت‌های پرمحصول کمّی می‌کند (Sharma *et al.*, 2005). مزارع براساس عملکرد دانه به سه گروه طبقه‌بندی شدند: عملکرد پایین (کمتر از میانگین منهای انحراف معیار)، عملکرد متوسط (بین میانگین ± انحراف معیار) و عملکرد بالا (بیشتر از میانگین به‌علاوه انحراف معیار).

جزئیات طبقه‌بندی برای هر استان در قسمت زیر ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان‌های مورد مطالعه و پراکندگی مزارع کلزای انتخاب شده

Figure 1- Geographical locations of the studied provinces in Iran and the distribution of selected canola fields

- **استان البرز:** پنج مزرعه به‌عنوان مزرعه پرمحصول طبقه‌بندی شدند، در حالی‌که ۲۵ مزرعه در دسته عملکرد کم تا متوسط قرار گرفتند. میانگین عملکرد ۲۷۶۸ کیلوگرم در هکتار با انحراف معیار ۱۲۶۲ کیلوگرم در هکتار بود. مزارع با عملکرد بالا به‌طور متوسط ۴۷۲۵ کیلوگرم در هکتار و مزارع با عملکرد متوسط رو به پایین ۲۳۷۷ کیلوگرم در هکتار تولید دانه داشتند. تفاوت عملکرد

بین این دو گروه با اختلاف ۲۳۴۸ کیلوگرم در هکتار از نظر آماری معنی‌دار بود ($P < 0.01$).

– **استان مرکزی**: پنج مزرعه در گروه با عملکرد بالا و ۲۵ مزرعه در گروه با عملکرد متوسط رو به پایین قرار داشتند. میانگین عملکرد ۲۲۴۹ کیلوگرم در هکتار با انحراف معیار ۱۰۹۱/۴ کیلوگرم در هکتار بود. مزارع با عملکرد بالا به‌طور متوسط ۴۱۰۹ کیلوگرم در هکتار و مزارع با عملکرد پایین به‌طور متوسط ۱۸۷۷ کیلوگرم در هکتار، تولید دانه داشتند. تفاوت عملکرد بین این دو گروه با اختلاف ۲۲۳۲ کیلوگرم در هکتار از نظر آماری معنی‌دار بود ($P < 0.01$).

– **استان گلستان**: شش مزرعه به‌عنوان گروه عملکرد بالا طبقه‌بندی شدند و ۳۱ مزرعه در گروه عملکرد کم تا متوسط قرار گرفتند. میانگین عملکرد ۲۷۲۹ کیلوگرم در هکتار با انحراف معیار ۱۱۰۴ کیلوگرم در هکتار بود. مزارع پربازده به‌طور متوسط ۴۴۴۰ کیلوگرم در هکتار و مزارع کم‌بازده ۲۳۹۷ کیلوگرم در هکتار بودند. تفاوت عملکرد بین گروه‌ها با اختلاف ۲۰۴۳ کیلوگرم در هکتار از نظر آماری معنی‌دار بود ($P < 0.01$).

– **استان اردبیل**: پنج مزرعه در گروه عملکرد بالا و ۲۵ مزرعه در گروه عملکرد پایین قرار گرفتند. میانگین عملکرد ۲۸۷۰ کیلوگرم در هکتار با انحراف معیار ۵۲۲ کیلوگرم در هکتار بود. مزارع با عملکرد بالا به‌طور متوسط ۳۸۲۳ کیلوگرم در هکتار و مزارع با عملکرد متوسط رو به پایین به‌طور متوسط ۲۷۶۴ کیلوگرم در هکتار تولید دانه داشتند. تفاوت عملکرد بین گروه‌ها با اختلاف ۱۰۵۹ کیلوگرم در هکتار از نظر آماری معنی‌دار بود ($P < 0.01$).

شاخص DOP با استفاده از فرمول ۱ محاسبه شد که در آن C غلظت اندازه‌گیری‌شده عنصر در نمونه گیاه و Cref مقدار مرجع حاصل از جمعیت‌های پرمحصول است. همچنین، شاخص تعادل تغذیه‌ای (NBI) با جمع‌زدن مقادیر مطلق شاخص‌های DOP (فرمول ۲)، چندین عنصر غذایی را در یک معیار واحد ادغام می‌کند.

$$DOP = [(C \times ۱۰۰) / Cref] - ۱۰۰ \quad (۱)$$

$$\Sigma DOP = |IA| + |IB| + |IC| + \cdots + |IN| \quad (۲)$$

مقدار بالاتر Σ|DOP| نشان‌دهنده عدم تعادل تغذیه‌ای بیشتر و محدودیت‌های بالقوه برای عملکرد محصول است (Montañés *et al.*, 1993; Dixon & Qaderi, 2025). این شاخص‌ها چارچوبی مستحکم برای تشخیص کمبودهای غذایی و بهینه‌سازی راهبردهای کوددهی منطبق بر نیازهای منطقه‌ای ارائه می‌دهند.

نتایج و بحث

کمبود عناصر غذایی در خاک

ویژگی‌های خاک در استان‌های مورد مطالعه تنوع قابل‌توجهی را نشان داد، به‌طوری‌که تفاوت‌های معنی‌داری در pH، شوری، کربن آلی و قابلیت دسترسی عناصر غذایی وجود داشت (جدول ۱، شکل ۲). غلظت‌های بهینه عناصر غذایی قابل جذب برای کلزا عبارتند از: فسفر= ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم، پتاسیم= ۳۰۰–۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، گوگرد= ۲۲–۲۱ میلی‌گرم در کیلوگرم، منیزیم= ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، آهن۶–۵ میلی‌گرم در کیلوگرم (روش دی‌تی‌پی‌ا)، مس= ۰/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم، روی= ۱ میلی‌گرم در کیلوگرم، منگنز= ۷–۶ میلی‌گرم در کیلوگرم و بور= ۰/۸–۰/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم (Jones & Olson-Rutz, 2016; Faizullahzadeh Ardabili, 2003; Nourgholipour *et al.*, 2022). pH خاک بالاتر از ۷ به‌طور قابل توجهی بر تعدادی از عناصر کم‌مصرف و پر مصرف، به‌ویژه فسفر (P)، روی (Zn) و آهن (Fe) تأثیر می‌گذارد (Landoll, 2018). pH بالای خاک (۸/۵–۷/۵) تشکیل هیدروکسیدهای نامحلول روی و آهن (به‌عنوان مثال، $Zn(OH)_2$، $Fe(OH)_3$) را افزایش می‌دهد. در pH بالا، یون‌های هیدروکسیل (OH^-) با Zn^{2+} و $Fe^{2+/3+}$ واکنش می‌دهند و فراهمی زیستی آنها را ۶/۲۴ درصد (Zn) و ۴/۱۶ درصد (Fe) کاهش می‌دهند. حساسیت کلزا به شوری در مراحل مختلف رشد متفاوت است، به‌طوری‌که آستانه کاهش عملکرد در ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر (۱۰ درصد کاهش)، ۳/۹ دسی‌زیمنس بر متر (۲۵ درصد کاهش) و ۹/۵ دسی‌زیمنس بر متر (۵۰ درصد کاهش) قرار دارد (Bandehagh *et al.*, 2021). این موضوع بر اهمیت مدیریت شوری خاک برای دستیابی به عملکرد بهینه تأکید می‌کند.

تنوع منطقه‌ای در حاصلخیزی خاک

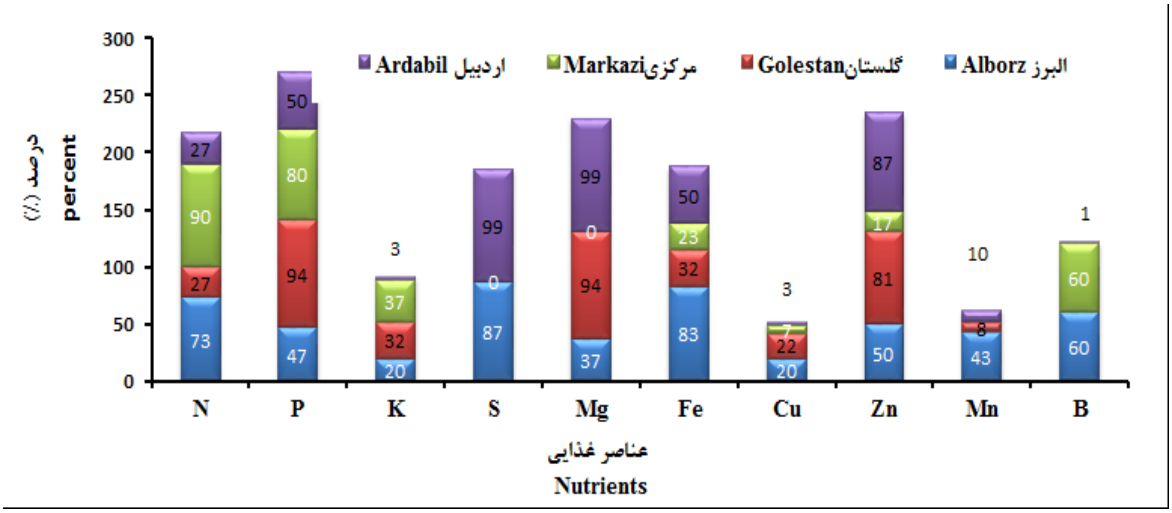
استان البرز: میانگین pH خاک ۸/۰۷، با محتوای کربن آلی پایین (۰/۸۱ درصد) و فراوانی بالای کمبود عناصر غذایی (بر حسب درصد)، از جمله نیتروژن (N، ۷۳)، فسفر (P، ۴۷)، پتاسیم (K، ۲۰)، گوگرد (S، ۸۷)، منیزیم (Mg، ۳۷)، آهن (Fe، ۸۳)، مس (Cu، ۲۰)، روی (Zn، ۵۰)، منگنز (Mn، ۴۳) و بور (B، ۶۰) بود (شکل ۲). pH قلیایی و سطوح پایین کربن آلی، تثبیت عناصر کم‌مصرف به‌ویژه روی و آهن را از طریق رسوب هیدروکسیدی و رقابت کاتیونی تشدید می‌نماید (Molnár *et al.*, 2023; Taalab *et al.*, 2019). **استان مرکزی**: با میانگین pH برابر ۷/۹ و شوری ۱/۴۷ دسی‌زیمنس بر متر، کمبود شدید نیتروژن (۹۰)، فسفر (۷۵) و پتاسیم (۳۷) را نشان داد (واحدها بر حسب درصد) (شکل ۲). سطوح پایین فسفر (۱۱/۳۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و پایین بودن درصد کربن آلی احتمالاً در کمبود گسترده نیتروژن مشاهده شده در ۹۰ درصد از مزارع نقش داشته‌اند (۹۰ درصد مزارع با مقدار کربن آلی کمتر از یک درصد). علی‌رغم مصرف کود، تثبیت فسفر در خاک‌های آهکی دسترسی به آن را محدود کرده است (Raeisi *et al.*, 2021). لذا کمبود فسفر در خاک‌های این استان آشکارتر مشاهده شد. کربنات کلسیم بالا در

خاک‌های آهکی باعث تثبیت فسفر به هیدروکسی آپاتیت نامحلول [$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$] می‌شود و فسفر قابل دسترس گیاه را به سطوح بحرانی (۱۱/۳۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) کاهش می‌دهد. **استان گلستان:** خاک‌های غیرشور این منطقه با میانگین درصد کربن آلی ۱/۴ درصد، کمبود نیتروژن (۲۷)، فسفر (۹۴)، پتاسیم (۳۲)، منیزیم (۱۰۰)، آهن (۳۲)، مس (۲۲)، منگنز (۳۱) و روی (۸۱) را نشان داد (واحدها بر حسب درصد) (شکل ۲). آب‌وهوای مدیترانه‌ای ممکن است به آبشویی منیزیم انجامیده و در کمبود کامل آن در تمامی مزارع نمونه‌برداری‌شده نقش داشته باشد. **استان اردبیل:** محتوای بالای رس (۴۰ درصد) و شوری (۲/۴ دسی‌زیمنس بر متر) منجر به کمبود فسفر (۵۰)، پتاسیم (۱)، گوگرد (۹۹)، منیزیم (۹۹)، آهن (۵۰)، مس (۳)، روی (۸۷) و منگنز (۱۰) شده است (واحدها بر حسب درصد) (شکل ۲). افزایش محتوای رس، ظرفیت نگهداری آب را افزایش داد، اما تثبیت منیزیم در لایه‌های میانی را تشدید کرده و به کمبود منیزیم انجامید (Khouloud *et al.*, 2025; Guo *et al.*, 2016).

در خاک‌های آهکی، افزایش سطح کلسیم تشکیل کانی‌های پایدار فسفات کلسیم را افزایش داده و حلالیت و فراهمی زیستی فسفر را کاهش می‌دهد (Muhammad *et al.*, 2025). این پدیده به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک مانند ایران که pH قلیایی، تثبیت فسفر را تشدید می‌کند، شایع است.

مقادیر pH بالا (بیش از ۷/۵) به رسوب هیدروکسید عناصر کم‌مصرف ضروری مانند روی و آهن کمک می‌کند و آنها را برای جذب گیاه غیرقابل دسترس می‌سازد (Dhaliwal *et al.*, 2021; Molnár *et al.*, 2023). افزون‌براین، رقابت بین کاتیون‌ها برای جایگاه‌های جذب روی کلوئیدهای خاک، دسترسی به عناصر کم‌مصرف را پیچیده‌تر می‌کند (Reddy *et al.*, 2024). سطوح پایین کربن آلی (کمتر از ۱/۴ درصد) منجر به اختلال در معدنی‌شدن نیتروژن، کاهش فعالیت میکروبی و کاهش تدریجی حاصلخیزی خاک می‌شود (Naseri Rad *et al.*, 202; Smith *et al.*, 2024; 1). این اثرات با کشت تک‌محصولی فشرده و الگوهای نامنظم بارندگی که مشخصه محیط‌های نیمه‌خشک است، تشدید می‌شوند. کربن آلی کمتر از ۱/۴ درصد، ساختار خاک را مختل کرده، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) را کاهش داده و فعالیت میکروبی را محدود می‌سازد. میکروارگانیسم‌های حیاتی برای چرخه عناصر غذایی (مانند میکوریزا) غیرفعال می‌شوند.

رقابت کاتیونی، کمبود روی را بیشتر تشدید می‌کند. کمبود روی سنتز اکسین و فعالیت آنزیمی را مختل می‌کند، درحالی‌که کمبود آهن تولید کلروفیل را مختل کرده و به کلروز و توقف رشد می‌انجامد. در تمامی استان‌ها، مواد آهکی باعث تثبیت فسفر به‌صورت کانی‌های کلسیم–فسفر نامحلول شده و جذب آن توسط گیاه را محدود کردند. خاک‌های غنی از رس در استان‌هایی مانند اردبیل، علی‌رغم حفظ سطوح بالای پتاسیم تبادلی (۵۰۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، کمبود منیزیم (DOP برابر ۱۲/۴–) نشان دادند. این کمبود در درجه اول به تثبیت بین لایه‌ای ایلیت نسبت داده می‌شود که یون‌های منیزیم را در ساختارهای رس محبوس می‌کند. در نتیجه، کمبودهای خاص عناصر غذایی با وجود مقدار کل کافی ایجاد می‌شود (Parent *et al.*, 2020). کمبود منیزیم فتوسنتز (کلروفیل) و توزیع کربوهیدرات را مختل کرده و اختلاف عملکرد را تشدید می‌کند. به‌کارگیری اصلاح‌کننده‌های خاص کانی‌های رس (مانند زئولیت) می‌تواند آزادسازی عناصر غذایی را تعدیل نماید.



شکل ۲- توزیع کمبود عناصر غذایی (به‌صورت درصد) در خاک‌های استان‌های مورد مطالعه

برای نیتروژن، مقدار کربن آلی خاک کمتر از ۱٪ به‌عنوان آستانه بحرانی برای نشان دادن کمبود نیتروژن استفاده شد.

Figure 2- Distribution of nutrient deficiencies (expressed as percentages) in the soils of the studied provinces

For nitrogen, a soil organic carbon content of less than 1% was used as the critical threshold to indicate nitrogen deficiency.

جدول ۱- محدوده خصوصیات خاک اندازه گیری شده مناطق اجرا (SDانحراف استاندارد)

Table 1: Ranges of measured soil properties in canola fields across the studied regions (*SD: standard deviation)

منطقه Region		pH -	EC-se dS m^{-1}	Clay	Sand	OC	S	K	P	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	B
					٪					قابل دسترس Available (mg kg^{-1})						
البرز Alborz	means	8.07	0.931	32	35.7	0.81	11.72	398	30.01	2492	554	1.38	3.96	5.44	1.23	0.94
	range	7.6-8.5	0.43-2.17	7-53	14-86	0.28-1.6	2.6-31.3	116-745	3-80	1256-3825	94-1412	0.28-2.62	1.3-6.88	1.62-13.46	0.22-2.8	0.18-2.94
	SD	0.2	0.47	11.9	20	0.31	6.7	184	27.3	610	292	0.56	1.7	2.2	0.78	0.77
مرکزی Markazi	means	7.9	1.47	30.2	36.9	0.66	-	307	11.39	-	-	1.48	8.37	16.68	1.56	0.77
	range	7.6-8.4	0.44-3.7	18-48	14-58	0.13-1.21	-	134-602	3.9-18.2	-	-	0.3-3.4	3.9-14.9	11-22	0.7-2.9	0.15-1.72
	SD	0.17	1	7.9	12	0.23	-	131	4	-	-	0.6	3.6	3.7	0.57	0.44
گلستان Golestan	means	7.7	2.1	22	17	1.4	-	240	8.6	408	98.4	2.1	13.4	8.6	0.8	-
	range	7.5-8	0.7-6.9	10-40	8-40	0.7-2.8	-	84-506	1-23.7	64-3441	24-528	0.6-5.5	3.1-47	4.4-24	0.2-2	-
	SD	0.14	1.8	7.2	6.6	0.57	-	99	4.6	753	105	1.3	11	4.1	0.55	-
اردبیل (مغان) Ardabil (Moghan)	means	7.7	2.4	40	11	1.3	14.1	503	14.8	1708	181	2.8	5.4	8.1	0.6	4.2
	range	7.5-8.1	0.6-5.8	25-55	2.32	0.2-3.1	10.2-17.6	234-831	6.4-27.4	1044-2929	114-303	0.8-4.8	1.4-12.5	4.1-12.7	0.2-1.8	2.2-5.5
	SD	0.13	1.2	8.5	8.8	0.56	2	148	6.7	465	57	0.93	2.8	2.4	0.34	0.86

جدول۲- غلظت عناصر غذایی در اندام هوایی کلزا در استان های مختلف (SDانحراف استاندارد)

Table 2- Nutrient's concentration in canola aerial parts in different provinces (*SD: standard deviation)

منطقه Region		عملکرد دانه Grain yield (kg ha^{-1})	N	P	K	S	Mg	Ca	Fe	Cu	Zn	Mn	B
			%						mg kg^{-1}				
البرز Alborz	Mean	2768.4	3.892	0.421	2.343	0.465	0.425	1.41	273	6.922	42.55	98.92	45.9
	Range	664-6115	5.08-2.6	0.54-0.18	3.27-1.25	1.07-0.33	0.99-0.19	2.55-0.75	102-868	13-3.35	75-17	148-49	27-100
	SD	1262	0.616	0.100	0.557	0.151	0.184	0.466	220	2.7	19.7	33	16.52
مرکزی Markazi	Mean	2249	3.360	0.314	2.24	-	-	-	245	5.70	29	73	-
	Range	600-4375	2.54-4.1	0.22-0.43	1.95-3.02	-	-	-	130-624	3.8-8.3	17-52	51-115	-
	SD	1091	0.443	0.060	0.343	-	-	-	136	1.1	8.2	15.4	-
گلستان Golestan	Mean	2729	3.20	0.62	3.74	-	0.55	3.17	186	8.2	41	62	-
	Range	760-4900	3.01-3.51	0.37-0.77	2.55-5.95	-	0.27-1.63	1.69-8.31	92-634	5.1-12.6	13-77	30-131	-
	SD	1104	0.091	0.11	0.88	-	0.37	1.37	128	1.7	14	23	-
اردبیل (مغان) Ardabil (Moghan)	Mean	2870	3.5	0.4	3.3	0.5	0.4	1.6	191	7.9	46	80	-
	Range	1715-4234	3.1-4.6	0.3-0.7	3-4.1	0.5-0.9	0.2-0.8	1.12-2.3	101-341	6.5-11	45-57	78-105	-
	SD	522	0.488	0.101	0.303	0.127	0.13	0.35	80	1.2	7.6	17	-

جدول ۳- انحراف عناصر غذایی از نرم های مرجع درصد بهینه (DOP) برای مزارع کلزا در استان‌های مورد مطالعه

Table 3- Nutrient deviation from the optimum percentage (DOP) reference norms for canola fields in the studied provinces

استان‌ها Provinces	N	P	K	Ca	S	Mg	B	Zn	Mn	Cu	Fe
	%						mg kg^{-1}				
البرز Alborz	3.68	0.412	2.47	1.56	0.44	0.38	54	56	92	8.4	260
مرکزی Markazi	3.62	0.39	2.37	–	–	–	–	33	80	6	284
گلستان Golestan	3.26	0.602	3.05	2.75	–	0.38	–	47	56	8.6	145
مغان Moghan	3.88	0.453	3.25	1.19	0.58	0.56	–	47	86	9.3	214
محدوده Range	3.26-3.88	0.39-0.602	2.37-3.25	1.19-2.75	0.44-0.58	0.38-0.56	54	33-56	56-92	6-9.3	145-284
میانگین Mean	3.61	0.46	2.8	1.83	0.513	0.44	54	45.8	78.5	8.1	226

وضعیت عناصر غذایی گیاه و شاخص‌هایDOP

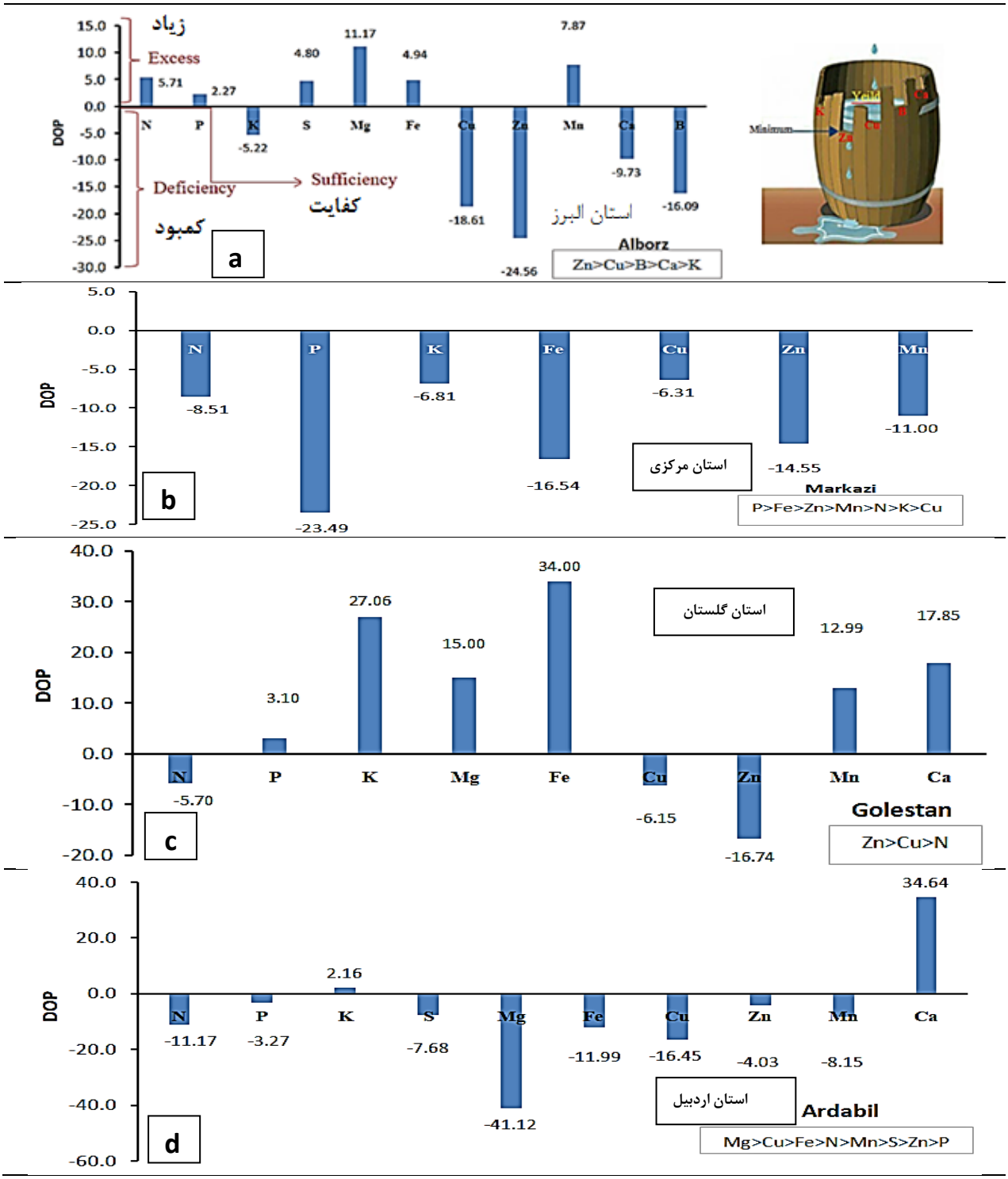
غلظت عناصر غذایی در اندام هوایی کلزا به‌طور قابل توجهی در استان‌های مختلف متفاوت بود (جدول ۲). براساس منابع، آستانه‌های بحرانی برای غلظت عناصر غذایی در اندام هوایی کلزا در مرحله ساقه‌دهی عبارتند از: نیتروژن ۴/۷–۴ درصد، فسفر ۰/۵–۰/۳۵ درصد، پتاسیم ۴/۴–۳ درصد، گوگرد ۰/۵۳–۰/۵ درصد، منیزیم ۰/۴–۰/۱۲ درصد، کلسیم ۲–۱ درصد، آهن ۸۰–۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، مس ۲/۶–۴ میلی‌گرم در کیلوگرم، منگنز ۱۴۰–۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، روی ۳۸–۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و بور ۲۸–۱۶ میلی‌گرم در کیلوگرم (Ma *et al.*, 2024; Grant & Bailey, 1990 ; Reuter & Robinson, 1986). نرم‌های DOP با استفاده از میانگین غلظت عناصر غذایی برگ در جمعیت‌های پرمحصول به‌عنوان مرجع تعیین شدند (جدول ۳).

کشت در منطقه گلستان به‌صورت دیـم -- Golestan is rain-fed region

تجزیه برگ، اختلافاتی بین نتایج خاک و گیاه نشان داد که بر نیاز به رویکردهای تشخیصی یکپارچه تأکید دارد. به‌عنوان مثال، استان البرز با وجود سطوح کافی گوگرد خاک، کمبود گسترده روی (DOP −۲۴/۶) و مس (DOP −۱۸/۲) را نشان داد که احتمالاً به‌دلیل تثبیت ناشی از pH بالا است (Taalab *et al.*, 2019). این با قانون حداقل لیبیگ (Morris & Blackwood, 2007) همسو است (در شکل a۳ با استفاده از بشکه لیبیگ نشان داده شده است). پرداختن به کمبود سایر عناصر غذایی بدون اصلاح کمبود روی، عملکرد دانه را بهبود نخواهد بخشید. نورقلی‌پور و همکاران (Nourgholipour *et al.*, 2022) روی را به‌عنوان یکی از عناصر غذایی دارای کمبود زیاد در خاک‌های تحت کشت کلزای ایران شناسایی کردند. شکل a۳ نشان می‌دهد که در استان البرز، غلظت روی عامل محدودکننده اصلی عملکرد دانه کلزا است. به‌طور مشابه، کمبود فسفر در استان مرکزی (شکل b۳) (DOP −۲۳/۵)، علی‌رغم کوددهی، وجود داشت که نشان‌دهنده تثبیت قوی فسفر در خاک‌های آهکی است (Raiesi *et al.*, 2021). ترتیب اولویت نیازهای غذایی در گیاهان کلزا در این استان به شرح زیر بود: فسفر (۹۳/۵–) < آهن (۱۶/۴–) < روی (۱۴/۶–) < منگنز (۱۱–) < نیتروژن (۸/۵–) < پتاسیم (۶/۸–) < مس (۶/۳–). تجزیه و تحلیل خاک مزارع کلزا در سراسر کشور (Nourgholipour *et al.*, 2022) نشان داد که بیش از ۸۰ درصد مزارع کلزای ایران، فسفر قابل دسترس کمتر از ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم داشتند.

در استان گلستان، تنها سه عنصر غذایی روی، مس و نیتروژن مقادیر DOP منفی نشان دادند (شکل c۳). وضعیت عناصر غذایی این استان بهتر از سایر مناطق بود که احتمالاً به‌دلیل شرایط اقلیمی مطلوب و محتوای بالاتر کربن آلی (۱/۴ درصد) در مقایسه با سایر مناطق است. خاک دارای کربن آلی مناسب به جلوگیری از آبشویی عناصر غذایی کمک کرده و شرایط فیزیکی و بیولوژیکی بهینه خاک را ارتقا می‌دهد (Smith *et al.*, 2024; Murphy, 2015;).

در استان اردبیل (شکل d۳)، منیزیم بحرانی‌ترین عنصر غذایی دارای کمبود بود (DOP = −۱۲/۴۱) و پس از آن گوگرد (۷/۶۸– = DOP) بود که نشان‌دهنده رقابت با پتاسیم در پیوند با رس است (Thapa *et al.*, 2025). تجزیه‌وتحلیل ما از ۱۲۰ مزرعه در چهار استان کشور، تنوع مکانی قابل‌توجهی از لحاظ کمبود عناصر غذایی نشان داد (شکل ۳). فسفر و روی به‌عنوان فراگیرترین محدودیت‌ها بروز نمودند و بین ۴۷ تا ۹۴ درصد مزارع را تحت تأثیر قرار دادند. الگوهای خاص کمبود عناصر غذایی در هر استان متفاوت بود (شکل ۴).



شکل ۳- انحراف از مقادیر شاخص درصد بهینه (DOP) برای عناصر غذایی در مزارع کلزا در استان‌های مورد مطالعه

Figure 3- Deviation from Optimum Percentage (DOP) indicator values for nutrients in canola farms across the studied provinces

جدول ٤- ترتیب کمبود عناصر غذایی در استان‌های مختلف

Table 4- Order of nutrient deficiencies in different provinces

نام استان Province	ترتیب کمبود عناصر غذایی Nutrient deficiency order
البرز Alborz	Zn > Cu > B > Ca
مرکزی Markazi	فسفر > آهن > روی > منگنز P > Fe > Zn > Mn
گلستان Golestan	روی > مس > نیتروژن Zn > Cu > N
اردبیل Ardabil	منیزیم > مس > آهن > گوگرد Mg > Cu > Fe > S

انحراف از درصد بهینه (DOP) این کمبودها را به‌صورت کمّی بیان نمود؛ به‌طوری‌که عنصر روی بالاترین انحراف (۲۴/۶- DOP) و آهن با اختلاف کمی (۱۶/۴- DOP) رتبه دوم را نشان داد. نکته قابل‌توجه این است که کمبود فسفر در استان مرکزی که در آن سطوح فسفر قابل‌دسترس به‌شدت پایین بود (۱۱/۳۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، مشهودتر بود.

عملکرد دانه و شاخص تعادل عناصر غذایی (NBI)

شاخص تعادل عناصر غذایی (NBI) که به‌صورت مجموع مقادیر مطلق DOP محاسبه می‌شود، با عملکرد همبستگی معکوس داشته و تأیید می‌کند که عدم تعادل بیشتر عناصر غذایی به کاهش عملکرد می‌انجامد. تجزیه و تحلیل‌های آماری تأیید کردند که حدود آستانه NBI بین ۱۳۳ تا ۱۴۶ با کاهش قابل‌توجه عملکرد مطابقت دارند ($p<0.01$). همبستگی معکوس بین NBI و عملکرد (شکل ۴) نظر مینا و همکاران (Meena *et al.*, 2024) را تأیید می‌کند، که نشان دادند آستانه‌های NBI بیش از ۱۳۰ با اختلال در زنجیره‌های انتقال الکترون، راندمان فتوسنتز را در کلزای کانادایی کاهش می‌دهد (Kheshtpaz *et al.*, 2024). در سیستم‌های کشت دیم مانند گلستان، NBI بالا را می توان به تنش اکسیداتیو در شرایط کمبود آب مرتبط دانست که باعث تشدید کاهش عملکرد می‌شود. آستانه‌های NBI مختص هر منطقه از ۱۳۳ (گلستان) تا ۱۴۶ (البرز) متغیر بود. فراتر از این حدود، عملکرد به ازای هر واحد افزایش NBI، ۱۲ تا ۱۸ درصد کاهش یافت که نشان‌دهنده هم‌افزایی عناصر غذایی است (شکل ۴ a,b,c,d). تغییرات منطقه‌ای در مقادیر NBI به‌شدت با نتایج عملکرد مشاهده‌شده همبستگی داشت.

نکته قابل توجه این است که وقتی NBI از یک آستانه مشخص (نقطه شکست منحنی NBI یا BPC) فراتر می‌رود، کاهش عملکرد بیشتر مشهود می‌شود. نقطه شکست منحنی NBI (BPC) به‌مثابه آستانه‌ای تعریف می‌شود که فراتر از آن، کاهش عملکرد با شیب تندتری رخ می‌دهد. در زیر این آستانه، عملکرد کمتر تحت تأثیر NBI قرار می‌گیرد. استان البرز بالاترین نقطه شکست منحنی NBI یا BPC (۱۴۶) را داشت و پس از آن به‌ترتیب استان‌های اردبیل (۱۳۹)، مرکزی (۱۳۸) و گلستان (۱۳۳) قرار گرفتند.

– البرز: با ۴۷ درصد خاک‌هایی که پس از نقطه شکست منحنی NBI قرار دارند، با عدم تعادل عناصر غذایی قابل توجهی روبرو است که احتمالاً به‌دلیل کوددهی بیش از حد یا تعادل ضعیف عناصر غذایی است. شیب متوسط (۰/۵۶-) نشان‌دهنده کاهش تدریجی اما تأثیرگذار عملکرد با افزایش NBI است. عنصر روی (۲۴/۶- DOP) و مس (۱۸/۲- DOP) محدودکننده‌ترین عوامل بودند (شکل ۴ a).

– مرکزی: شیب کم (۰/۱۴-) و انحراف معیار پایین (۵۳/۹) نشان‌دهنده پویایی پایدارتر عناصر غذایی است، اگرچه ۲۳ درصد از خاک‌ها بعد از BPC قرار دارند که مدیریت دقیق را ضروری می‌نماید (شکل ۴ b). کاهش عملکرد (۲۲۴۹ کیلوگرم در هکتار) با کمبود شدید فسفر و افزایش مقادیر NBI (بیش از ۱۳۸) همسو بود که نشان‌دهنده عدم تعادل در تأمین عناصر غذایی است. کمبود عنصر فسفر (۲۳/۵- DOP) در این منطقه غالب بود که نشان‌دهنده تثبیت قوی کلسیم–فسفر در خاک‌های آهکی است. کمبود فسفر، متابولیسم انرژی (ATP/ADP) و توسعه ریشه و رشد گیاه را به‌ویژه در مراحل رشدی که نیازمند فسفر است مثل گلدهی، محدود می‌کند.

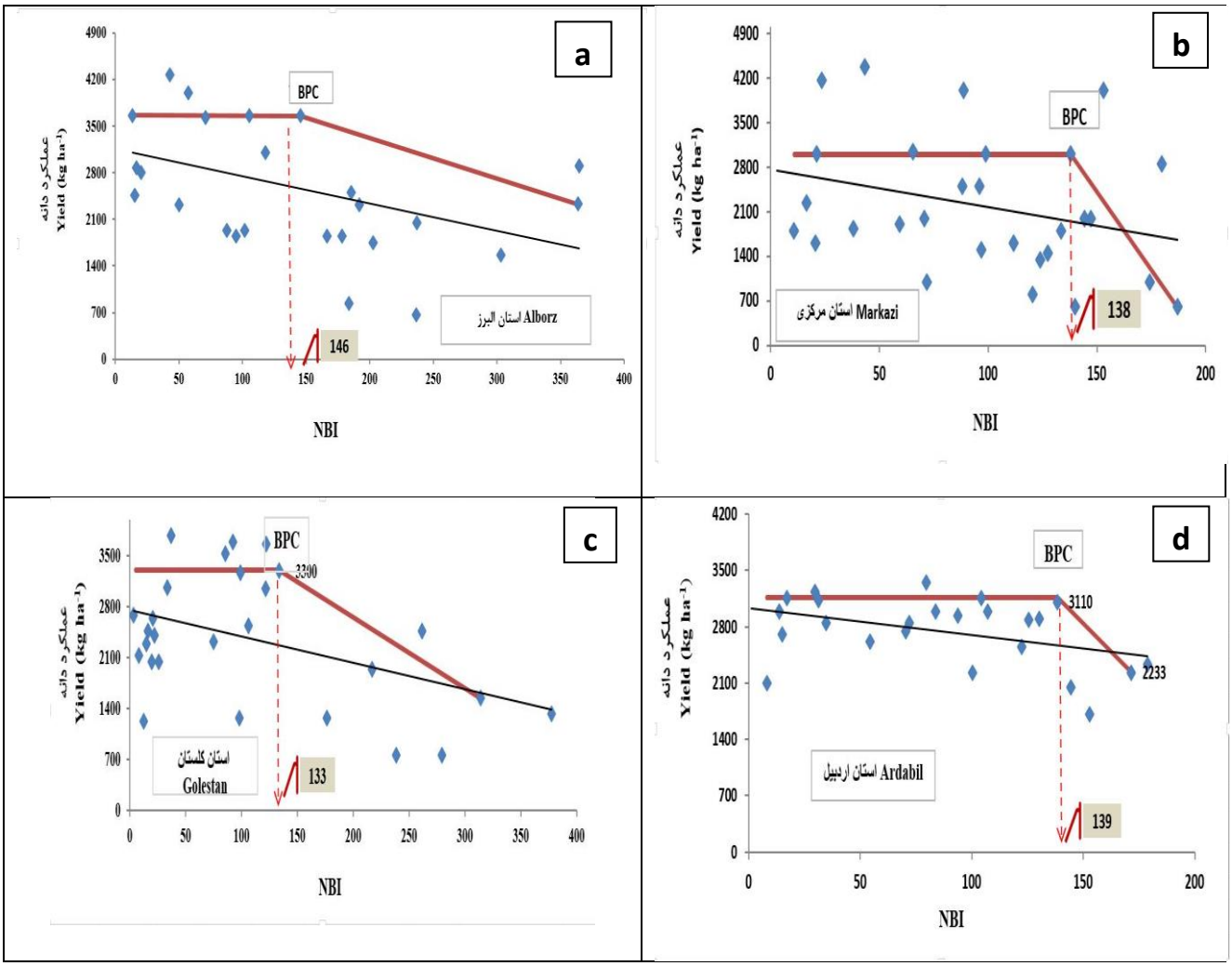
– گلستان: انحراف معیار شدید و دامنه وسیع NBI به شرایط ناهمگن خاک یا شیوه‌های کشاورزی ناسازگار اشاره دارد که مدیریت مناسب را ضروری می سازد. شرایط آب و هوایی بهتر و محتوای بالاتر کربن آلی (۱/۴ درصد) برخی کمبودهای غذایی را کاهش داد، ولی منیزیم و فسفر همچنان محدودیت‌های زیادی داشتند (شکل ۴ c).

– اردبیل: دارای شدیدترین شیب نمودار (۰/۶۹-) است و نشان می‌دهد که که عدم تعادل جزئی عناصر غذایی می‌تواند تولید محصول را به‌شدت کاهش دهد (شکل ۴d). با این حال، درصد پایین‌تر خاک‌های پس از نقطه BPC (۱۷٪) نشان‌دهنده مسائل محلی به‌جای مشکلات گسترده است. عملکرد بهتر (۲۸۷۰ کیلوگرم در

هکتار) در شرایط نسبت متعادل منیزیم: پتاسیم (۱:۸/۲) حاصل شد که نشان‌دهنده بهینه بودن برهمکنش‌های عناصر غذایی است. عناصر منیزیم (DOP −۱۲/۴) و گوگرد (DOP −۱۰/۳) بحرانی‌ترین کمبودها بودند که احتمالاً به‌دلیل رقابت با پتاسیم پیوند خورده با رس بود (Thapa *et al.*, 2025).

به‌طور کلی، مقادیر NBI برای مزارع کلزای مورد مطالعه از ۱۳۳ تا ۱۴۶ متغیر بود. کشاورزان و مشاوران می‌توانند از این محدوده به‌عنوان راهنمایی برای توصیه‌های کودی استفاده کنند. شکل ۴ نشان می‌دهد که توزیع نقاط داده در اطراف خط رگرسیون در همه استان‌ها قابل توجه است، که نشان می‌دهد عملکرد نهایی نه تنها تحت تأثیر NBI بلکه تحت تأثیر عوامل دیگر نیز قرار دارد (Shehu *et al.*, 2023).

این مطالعه بر اهمیت پرداختن به تنوع منطقه‌ای در خواص خاک و پویایی عناصر غذایی برای بهینه‌سازی تولید کلزا تأکید می‌کند. بینش‌های دقیق‌تر در مورد فرآیندهای تثبیت عناصر غذایی، مانند رسوب هیدروکسیدی، رقابت کاتیونی و تثبیت به‌صورت فسفات کلسیم، راهبردهای عملی برای غلبه بر عوامل محدودکننده عملکرد ارائه می‌دهد. اقداماتی مانند استفاده از اصلاح‌کننده‌ها، کودهای زیستی حل‌کننده فسفات، کوددهی دقیق و تناوب زراعی برای افزایش سلامت خاک و کارایی استفاده از عناصر غذایی ضروری هستند (Banerjee *et al.*, 2025; Smith *et al.*, 2024).



شکل ٤- شاخص تعادل عناصر غذایی (NBI) برای مزارع کلزا در استان‌های مورد مطالعه

a: استان البرز، b: استان مرکزی، c: استان گلستان و d: استان اردبیل. NBI: شاخص تعادل تغذیه ای. BPC: نقطه شکست منحنی NBI.

Figure 4- Nutrient Balance Index (NBI) for canola farms across the studied provinces

a: Alborz province, b: Markazi province, c: Golestan province, d: Ardabil province. NBI: nutrient balance index. BPC: break point of NBI curve

این مطالعه نشان می‌دهد که تغییرپذیری عملکرد کلزا در مناطق کشاورزی-اکولوژیکی ایران در درجه اول ناشی از کمبود عناصر غذایی خاص منطقه، به‌ویژه فسفر و روی، همراه با قلیاییت خاک، کربن آلی کم و ویژگی‌های کانی‌شناسی است. بینش‌های دقیق در مورد فرآیندهای تثبیت عناصر غذایی، اهمیت پرداختن به pH خاک، افزایش محتوای مواد آلی و بهینه‌سازی نسبت‌های عناصر غذایی برای بهبود فراهمی زیستی را آشکار می‌سازد. آستانه‌های معتبر NBI دستورالعمل‌های عملی برای کشاورزی دقیق ارائه داده و کشاورزان را قادر می‌سازد تا کاربرد کود را با نیازهای منطقه‌ای تطبیق دهند. با اجرای راهبردهای مدیریت عناصر غذایی خاص منطقه، می‌توان شکاف‌های عملکرد را برطرف کرده و پایداری را در سیستم‌های دانه‌روغنی نیمه‌خشک ارتقا داد. شاخص تعادل، نسبت‌های حیاتی عناصر غذایی (مانند فسفر:روی، منیزیم:پتاسیم) را برای تشخیص عدم تعادل‌ها ادغام می‌کند. با این‌حال، تغییرپذیری عملکرد (شکل ۴) بر لزوم درنظر گرفتن NBI همراه با عوامل محلی (مانند شوری، سمیت بور) تأکید می‌کند.

استفاده از کودهای زیستی، اصلاح‌کننده‌های آلی و فناوری‌های کشاورزی دقیق، در مدیریت عناصر غذایی راه‌های امیدوارکننده‌ای برای غلبه بر این چالش‌ها ارائه می‌دهند. به‌عنوان‌مثال، نشان داده شده است که تلقیح‌کننده‌های زیستی غنی‌شده (مانند باکتری‌های حل‌کننده روی)، انحلال فسفر و جذب روی را در خاک‌های آهکی افزایش می‌دهند (Purakayastha *et al.*, 2023). به‌طور مشابه، کشت پوششی و شیوه‌های خاک‌ورزی حفاظتی می‌توانند محتوای ماده آلی خاک را افزایش دهند، چرخه عناصر غذایی را بهبود دهند و خطرات فرسایش را کاهش دهند (Aliyu *et al.*, 2021). شاخص DOP کمبودهای خاص هر مکان را شناسایی می‌کند. با ترکیب این راهبردها با ابزارهای تشخیصی پیشرفته مانند DOP و NBI، می‌توان راه‌حل‌های زمینه‌مختصی توسعه داد که تولید را با نظارت بر محیط‌زیست متعادل می‌سازد. نقشه‌برداری مکانی می‌تواند مداخلات (مانند اسیدی‌سازی در مناطق با pH بالا، کاربرد اصلاح‌کننده‌های آلی در مناطق با کربن آلی پایین) را هدف قرار دهد.

تحقیقات آینده باید با ادغام عوامل محیطی و داده‌های عملکرد، بر اصلاح آستانه‌های NBI تمرکز کنند، درحالی‌که ذینفعان باید رویکردهای جامعی را برای به‌حداقل‌رساندن اثرات زیست‌محیطی اتخاذ نمایند (Wen *et al.*, 2023Kirkegaard *et al.*, 2021 ;). با همسوسازی روش‌های مدیریتی با شرایط کشاورزی-اکولوژیکی منطقه‌ای، ایران می‌تواند عملکرد کلزا، تاب‌آوری خاک و پایداری کشاورزی بلندمدت را بهبود بخشد.

نتیجه‌گیری

این مطالعه به‌وضوح نشان می‌دهد که محدودیت عملکرد کلزا در اکوسیستم‌های کشاورزی نیمه‌خشک ایران عمدتاً ریشه در کمبودهای غذایی خاص منطقه، به‌ویژه فسفر و روی، دارد که تحت تأثیر شرایط قلیایی خاک، محتوای کم ماده آلی و ویژگی‌های کانی‌شناسی تشدید می‌شوند. با به‌کارگیری روش‌های تشخیصی پیشرفته‌ای مانند انحراف از درصد بهینه (DOP) و شاخص تعادل غذایی (NBI)، نه‌تنها این کمبودها به‌صورت کمّی شناسایی شدند، بلکه آستانه‌های بحرانی عملکرد (NBI = ۱۳۳–۱۴۶) برای هر منطقه تعیین گردید. یافته‌ها حاکی از آن است که حتی با وجود مقادیر کل کافی عناصر در خاک، فرآیندهای شیمیایی مانند تثبیت کلسیمی فسفر، رسوب هیدروکسیدی روی و آهن، و تثبیت بین‌لایه‌ای منیزیم در خاک‌های رسی، قابلیت جذب آن‌ها را به‌شدت محدود می‌کنند. بنابراین، مدیریت یکسان و توصیه‌های کودی عمومی برای این خاک‌های ناهمگن ناکارآمد است. راه‌حل پایدار برای غلبه بر این چالش، گذار از مدیریت سنتی به سمت کشاورزی دقیق و مکان‌محور است. این امر مستلزم تلفیق ابزارهای تشخیصی مانند DOP و NBI با راهبردهای عملی نظیر کاربرد کودهای زیستی (مانند باکتری‌های حل‌کننده فسفر و روی)، افزایش ماده آلی خاک، اصلاح pH، و رعایت نسبت‌های بهینه عناصر غذایی (مانند منیزیم به پتاسیم) است. چنین رویکرد یکپارچه‌ای نه‌تنها شکاف عملکرد را کاهش می‌دهد، بلکه کارایی مصرف کود را افزایش داده و سلامت و تاب‌آوری خاک را در بلندمدت تضمین می‌کند. برای تحقق این هدف، انجام تحقیقات آتی برای بومی‌سازی بیشتر آستانه‌های تشخیصی و ترویج فناوری‌های نقشه‌برداری مکانی در بین کشاورزان و کارشناسان، ضروری به‌نظر می‌رسد.

سپاسگزاری

از مؤسسه تحقیقات خاک و آب به‌پاس فراهم‌آوردن امکانات لازم برای اجرای این پروژه تشکر و قدردانی می‌شود. نتایج این مقاله برگرفته از پروژه ملی به شماره ۰۱-۱۰-۱۰-۰۲۳-۹۶۰۵۶-۹۷۰۰۹۸ مؤسسه تحقیقات خاک و آب می‌باشد.

References

1. Aghabeygi, M., & Dönmez, C. (2024). Estimating yield response functions to nitrogen for annual crops in Iran. *Agronomy, 14*(3), 436. https://doi.org/10.3390/agronomy14030436
2. Agricultural statistics. (2025). *Crop products of 2023-2024. The first volume*. Bureau of Statistics and Information Technology, Vice President of Planning and Economic Affairs. Ministry of Jihad Agriculture, Iran, 163 pages. (In

Persian). https://dpe.maj.ir/uploads/21/2024/Aug/27/AJ1-1401-1402.pdf
3. Aliyu, K.T., Huising, J., Kamara, A.Y., Jibrin, J.M., Mohammed, I.B., Nziguheba, G., Adam, A.M., & Vanlauwe, B. (2021). Understanding nutrient imbalances in maize (*Zea mays* L.) using the diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) approach in the Maize belt of Nigeria. *Scientific Reports*, *11*(1), 16018. https://doi.org/10.1038/s41598-021-95172-7
4. Bandehagh, A., Dehghanian, Z., Henry, R., & Hossain, M.A. (2021). Salinity tolerance in Canola: insights from proteomic studies. In *Brassica Breeding and Biotechnology*. Intech Open. ISBN: 9781839686962. https://doi.org/10.5772/intechopen.96649
5. Banerjee, K., Dutta, S., Das, S., & Sadhukhan, R. (2025). Crop simulation models as decision tools to enhance agricultural system productivity and sustainability – a critical review. *Technology in Agronomy*, *5*, e002. https://doi.org/10.48130/tia-0024-0032
6. Chaleshtori, A.A., Panahpour, E., Iranipour, R., & Moezzi, A. (2021). Diagnosing the nutritional balance of almond (*Prunus* sp.) orchards using DRIS and DOP methods. *Journal of Plant Growth Regulation*, *40*, 1640-1651. https://doi.org/10.1007/s00344-020-10214-0
7. Chapman, H.D., & Pratt, P.F. (1962). Methods of analysis for soils, plants, and waters. *Soil Science*, *93*, 1-68.
8. Dhaliwal, S.S., Sharma, V., & Verma, G. (2021). Agronomic strategies for improving micronutrient use efficiency in crops for nutritional and food security. In *Input Use Efficiency for Food and Environmental Security*, 123-156. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5199-1_5
9. Dixon, S.L., & Qaderi, M.M. (2025). Canola responds differently to nitrogen forms under temperature and carbon dioxide conditions. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, *37*(1), 1-24. https://doi.org/10.1007/s40626-024-00350-3
10. Faizullahzadeh Ardabili, M. (2003). Correlation between sulfur extracted by five methods with responses of Canola plant in some soils of country. *Proceedings of the 8th Congress of Soil Sciences of Iran*, 9-12 September 2003, Iran. (In Persian)
11. Gee, G., & Bauder, J. (1986). Particle-size Analysis. In: A. Klute (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. SSSA and ASA, Madison, WI, 383-411. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15
12. Goodarzi, K., Hosseini Farahi, M., & Kavoosi, B. (2010). Relationship of nutritional balance index (NBI) with yield and quality indices of grape vine (*Vitis vinifera* L.). *Acta Horticulturae*, *931*, 259-266. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.931.28
13. Grant, C.A., & Bailey, L.D. (1990). Fertility management in canola production. In: *Proceed. International Canola Conference*, April 1990, Atlanta, GA, USA. Potash & Phosphate Institute, Atlanta, GA, USA. https://doi.org/10.4141/cjps93-087
14. Guo, W., Nazim, H., Liang, Z., & Yang, D. (2016). Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. *The Crop Journal*, *4*(2), 83-91. https://doi.org/10.1016/j.cj.2015.11.003
15. Horneck, D.A., & Miller, R.O. (1998). Determination of total nitrogen in plant tissue. In: *Handbook of methods for plant analysis* (Kalra, Y.P., Ed.). CRC Press, Boca Raton, FL (USA), pp.75-84. https://doi.org/10.4236/jep.2017.812089
16. Hosseini, S.M., & Tadayon, M.S. (2024). Ionome composition influence wheat yield on saline and calcareous soils: the case of *Triticum aestivum* L. var. 'Sirvan'. *Journal of Plant Nutrition*, 1-16. https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2408398
17. Jemenez, S.J., Pinochet, Y., Gogocena, J.A., & Betran, M.A.M. (2007). Influence of different vigor cherry rootstocks on leaves and shoot mineral composition. *Scientia Horticulturae*, *112*, 73-79. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.12.010
18. Jones, C., & Olson-Rutz, K. (2016). *Soil nutrient management for canola*. EB0224. Montana State University Extension, Bozeman, MT. https://www.montana.edu/extension/pspp/documents/SoilNutrientCanola.pdf
19. Jost, E., Schönhart, M., Mitter, H., Zoboli, O., & Schmid, E. (2025). Integrated modelling of fertilizer and climate change scenario impacts on agricultural production and nitrogen losses in Austria. *Ecological Economics*, *227*, 108398. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108398
20. Kheshtpaz, N., Janmohammadi, M., & Sabaghnia, N. (2024). Foliar spray can improve rapeseed yield components under continuous irrigation. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, *54*, p.e80539. https://doi.org/10.1590/1983-40632024v5480539
21. Khiari, L., Parent, L.E., & Tremblay, N. (2001a). Critical compositional nutrient indexes for sweet corn at early growth stage. *Agronomy Journal*, *93*, 809-814. https://doi.org/10.2134/agronj2001.934809x
22. Khiari, L., Parent, L.E., & Tremblay, N. (2001b). Selecting the high-yield subpopulation for diagnosing nutrient imbalance in crops. *Agronomy Journal*, *93*(4), 802-808. https://doi.org/10.2134/agronj2001.934802x
23. Khouloud, M., Ferji, K., Six, J.L., Beniazza, R., & Lahcini, M. (2025). Clay-based modulation of nutrient release: Ghassoul as nutrient carrier for enhanced fertilizer efficiency. *Emergent Materials*, 1-17. https://doi.org/10.1007/s42247-024-00943-3

24. Kirkegaard, J.A., Lilley, J.M., Berry, P.M., & Rondanini, D.P. (2021). Canola. In *Crop Physiology Case Histories for Major Crops*, 518-549. Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819194-1.00017-7
25. Landoll, E.K. (2018). *Impacts of Soil pH on Winter Canola Cultivars in the Southern Great Plains* (Doctoral dissertation, Oklahoma State University). https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2275074
26. Lindsay, W.L., & Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, *42*, 421-428. https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x
27. Loeppert, R.H., & Suarez, D.L. (1996). Carbonate and Gypsum. In: D.L. Sparks (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods*, SSSA and ASA, Madison, WI, 437-474. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c15
28. Ma, B.L., Herath, A., & Smith, D.L. (2024). Assessing critical plant sulfur concentration and nitrogen to sulfur ratio in spring canola production. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *187*(6), 711-724. https://doi.org/10.1002/jpln.202400096
29. Mahmoodi Nezhad Dezfully, S.H., & Mostashari, M. (2022). Evaluation of nutritional status and priority of nutrients requirement of canola by compositional nutrient diagnosis (CND) and deviation from optimum percentage (DOP) methods in north of Khuzestan. *Iranian Journal of Soil Research*, *36*(1),
30. Mahmoud Soltani, S., Ebadi, A.A., Tajadoditalab Rashti, K., Sartipi, S., & Shakouri Katigari, M. (2025). Foliar spray of glycine-chelated zinc (Zn) and iron (Fe) lowered the effect of macronutrient deficiencies and enhanced rice yield components, yield, and grain biofortification. *Journal of Plant Nutrition*, *48*(1), 147-163. https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2378923
31. Meena, V., Dotaniya, M.L., Meena, M.D., Jat, R.S., Meena, M.K., Choudhary, R.L., Meena, H.S., Meena, B.L., Meena, L.K., & Rai, P.K. (2024). Conjoint application of nutrients as customized fertilizers influences growth and yield characteristics of *Brassica juncea* L., augmented profitability and nutrient use efficiency indices. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-16. https://doi.org/10.1007/s42729-024-02062-8
32. Meier, U., Bleiholder, H., Buhr, L., Feller, C., Hack, H., Heß, M., Lancashire, P.D., Schnock, U., Stauß, R., Van Den Boom, T., & Weber, E. (2009). The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants–history and publications. *Journal für Kulturpflanzen*, *61*(2), 41-52. ISSN 0027-7479
33. Molnár, Z., Solomon, W., Mutum, L., & Janda, T. (2023). Understanding the mechanisms of Fe deficiency in the rhizosphere to promote plant resilience. *Plants*, *12*(10), 1945. https://doi.org/10.3390/plants12101945
34. Montañés, L., Heras, L., Abadia, J., & Sanz, M. (1993). Plant analysis interpretation based on a new index: deviation from optimum percentage. *Journal of Plant Nutrition*, *16*, 1289-1308. https://doi.org/10.1080/019041693 09364613
35. Morris, S.J., & Blackwood, C.B. (2007). The ecology of soil organisms. In *Soil microbiology, ecology and biochemistry*, pp.195-229. Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-047514-1.50012-3
36. Mostashari, M., Khosravinejad, A., & Golmohammadi, M. (2018). Comparative study of DOP and CND methods for leaf nutritional diagnosis of *Vitis Vinifera* in Iran. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *49*(5), 576-584. https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1432633
37. Muhammad, H., Ijaz, M., Sattar, A., Ul-Allah, S., Sher, A., Asif, M., Dilshad, M., Mahmood, K., Riaz, M.W., Zaheer, M.S., & Rizwan, M. (2025). Synergistic effects of PGPRs and fertilizer amendments on improving the yield and productivity of Canola (*Brassica napus* L.). *BMC Plant Biology*, *25*(1), 50. https://doi.org/10.1186/s12870-025-06062-3
38. Murphy, B.W. (2015). Impact of soil organic matter on soil properties—a review with emphasis on Australian soils. *Soil Research*, *53*(6), 605-635. https://doi.org/10.1071/SR14246
39. Naseri Rad, H., Rezvani Moghadam, P., Koocheki, A., & Ashraf Jafari, A. (2021). The effect of cropping systems management and wheat residues on grain yield and efficiency indices of nitrogen and phosphor in autumnal rapeseed. *Applied Field Crops Research*, *34*(2), 142-120. https://doi.org/10.22092/aj.2021.352417.1509
40. Nelson, D., & Sommers, L. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: D.L. Sparks (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods*. SSSA and ASA, Madison, WI, 961-1010. https://doi.org/10.2134/ agronmonogr9.2.2ed.c29
41. Nourgholipour, F., Tohidlu, S., Jafarnejadi, A., Mohammadnejad, Y., Mirzashahi, K., Ghaderi, J., Arzanesh, M., Passandideh, M.H., Bybordi, A., Montajabi, N., Zolfi Bavariani, M., Keshavarz, P., Seilsepour, M., Asadi, A., Izadi, P., Sedighi, S., Davatgar, N., Mohajer, A., & Dadivar, M. (2022). Comparison of farmer-specific fertilization method and the recommended combined fertilization in parts of Iran. *Land Management Journal*, *10*(2), 209-220. https://doi.org/10.22092/lmj.2022.127564
42. Nur, M.A., Kamruzzaman, M., & Amin, M.S. (2025). Microbial immobilization and phosphorus transformation in saline soil: Effects of organic amendments. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-14. https://doi.org/10.1007/s42729-025-02209-1
43. Olsen, S.R., & Sommers, L.E. (1982). Phosphorus. In: A.L. Page (ed.), *Methods of Soil Analysis Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, pp.403-430.

44. Parent, L.E., Rozane, D.E., de Deus, J.A.L., & Natale, W. (2020). Diagnosis of nutrient composition in fruit crops: Major developments. In *Fruit Crops*, 145-156. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818732-6.00012-5
45. Purakayastha, T.J., Bhaduri, D., Kumar, D., Yadav, R., & Trivedi, A. (2023). Soil and plant nutrition. In *Trajectory of 75 years of Indian agriculture after independence*, 365-411. Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/ 978-981-19-7997-2_15
46. Raiesi, T., Moradi, B., & Mousavi, S.M. (2021). Alterations of P fractions and some biochemical features in rhizosphere soil induced by the root activities of citrus rootstocks with different P acquisition efficiency. *Eurasian Soil Science*, *55*(2), 212-220. https://doi.org/10.1134/S1064229322020107
47. Reddy, M.B., Sravani, P., Kumar, S., Rajawat, M.V.S., Jaiswal, D.K., Dhar, S., Azman, E.A., Garg, K., & Kumar, S. (2024). Nitrogen use efficiency reimagined: advancements in agronomic, ecophysiological, and molecular strategies. *Journal of Plant Nutrition*, 1-27. https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2447840
48. Reuter, D.J., & Robinson, J.B. (1986). Plant analysis: An interpretation manual. Inkata Press Pty. Ltd., Melbourne, Australia. ISBN: 9780643101265.
49. Rhoades, J. (1982). Soluble salts. In: Page, A.L. (ed.), *Methods of soil analysis*, Part 2, Chemical and microbiological properties. SSSA and ASA, Madison, WI, 167-179. https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c10
50. Roy, R.N., Finck, A., Blair, G.J., & Tandon, H.L.S. (2006). Plant nutrition for food security: A guide for integrated nutrient management. *Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome*, pp. 348.
51. Sharma, J., Shikhamany, S.D., Singh, R.K., & Raghupathi, H.B. (2005). Diagnosis of nutrient imbalance in Thompson seedless grape grafted on Dog Ridge rootstock by DRIS common. *Soil Science and Plant Analysis*, *36*(11), 2823-2838. https://doi.org/10.1080/00103620500305991
52. Shehu, B.M., Garba, I.I., Jibrin, J.M., Kamara, A.Y., Adam, A.M., Craufurd, P., Aliyu, K.T., Rurinda, J., & Merckx, R. (2023). Compositional nutrient diagnosis and associated yield predictions in maize: A case study in the northern Guinea savanna of Nigeria. *Soil Science Society of America Journal*, *87*(1), 63-81. https://doi.org/10.1002/ saj2.20472
53. Smith, P., Poch, R.M., Lobb, D.A., Bhattacharyya, R., Alloush, G., Eudoxie, G.D., Anjos, L.H., Castellano, M., Ndzana, G.M., Chenu, C., & Naidu, R. (2024). Status of the world's soils. *Annual Review of Environment and Resources*, *49*. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-030323-075629
54. Sparks, D.L., Page, A., Helmke, P., Loeppert, R., Soltanpour, P., Tabatabai, M., Johnston, C., & Sumner, M. (1996). *Methods of Soil Analysis*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
55. Statista, (2025). Leading producing countries of rapeseed in 2023/2024. [online] Available at: https://www.statista.com/statistics/263930/worldwide-production-of-rapeseed-by-country
56. Taalab, A.S., Ageeb, G.W., Siam, H.S., & Mahmoud, S.A. (2019). Some characteristics of calcareous soils. A review. *Middle East Journal of Agriculture Science*, *8*(1), 96-105.
57. Thapa, D., Westra, S., Oas, V., Kilin, D., & Kilina, S. (2025). Tunable magnetic order in Fe-Mg codoped montmorillonite nanoclay interfaced with amino acids. *ACS Omega*. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06483
58. Walworth, J.L., & Sumner, M.E. (1987). The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). *Advances in Soil Science*, *6*, 149-188. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4682-4_4
59. Wang, L., Ju, C., Han, C., Yu, Z., Bai, M.Y., & Wang, C. (2025). The interaction of nutrient uptake with biotic and abiotic stresses in plants. *Journal of Integrative Plant Biology*. https://doi.org/10.1111/jipb.13827
60. Wen, G., Ma, B.L., Luce, M.S., Liu, K., Mooleki, P.S., Crittenden, S., Gulden, R., Semach, G., Tiege, P., & Lokuruge, P. (2023). Optimizing nitrogen fertilization for hybrid canola (*Brassica napus* L.) production across Canada. *Field Crops Research*, *302*, 109048. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109048

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

Research Article
Vol. 40, No. 3, Fall. 2026, p. 293-308

Thiol-Based Foliar Application Mitigates Oxidative Damage and Reduces Cadmium and Lead Accumulation in Wheat Grown in Contaminated Calcareous Soil

Z. Gheshlaghi[1*], S.S. Hashemiaval[1]
1- Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran
(*- Corresponding Author Email: zahra.gheshlaghi@ut.ac.ir)

Received: 06 June 2026
Revised: 20 August 2026
Accepted: 24 August 2026
Available Online: 24 August 2026

How to cite this article:
Gheshlaghi, Z., & Hashemiaval, S.S. (2026). Thiol-based foliar application mitigates oxidative damage and reduces cadmium and lead accumulation in wheat grown in contaminated calcareous soil. *Journal of Soil and Wather*, *40*(3), 293-308. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jsw.2026.99098.1551

Introduction

Cadmium (Cd) and lead (Pb) contamination of calcareous soils can restrict wheat production in arid and semi-arid regions. High pH and calcium carbonate reduce metal solubility but cannot fully prevent root uptake or food-chain entry. Both metals impair nutrient acquisition, damage chloroplasts and membranes, reduce photosynthesis, and promote reactive oxygen species (ROS) production, causing oxidative damage and redox imbalance. Thiols mediate plant responses to metal stress. Cysteine (Cys) supplies sulfur for glutathione (GSH) synthesis, while glutathione supports redox buffering, antioxidant reactions, metal detoxification, and phytochelatin production. Evidence for simultaneous foliar application of cysteine and glutathione under Cd–Pb stress in wheat grown in calcareous soil remains limited. This study examined the effects of individual and combined thiol sprays on wheat growth, oxidative damage, glutathione redox status, and Cd and Pb accumulation under Cd–Pb co-contamination.

Materials and Methods

A pot experiment was conducted in a greenhouse at the Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad. Calcareous clay loam soil was collected from the 0–30 cm layer of agricultural land near Sabzevar, Iran. Soil pH was 7.89 (1:2.5 soil:water), electrical conductivity 2.53 dS m^{-1}, organic matter 1.03%, and calcium carbonate equivalent 24.55%. Diethylenetriaminepentaacetic acid (DTPA)-extractable Cd and Pb were 0.12 and 1.5 mg kg^{-1}, respectively, representing low background levels before contamination.

The experiment used a randomized design with five treatments and three replications (15 pots): control without metals, sprayed with deionized water; heavy metals (HM), with 15 mg Cd kg^{-1} soil and 300 mg Pb kg^{-1} soil; HM+Cys, with 0.41 mM L-cysteine foliar spray; HM+GSH, with 2 mM reduced glutathione; and HM+Cys+GSH, receiving 0.41 mM cysteine plus 2 mM glutathione. L-cysteine and reduced glutathione (≥99% purity) were obtained from Sigma–Aldrich.

Cadmium and Pb were added as $Cd(NO_3)_2$ and $Pb(NO_3)_2$ to 5 kg soil per pot. Nitrate input was identical among contaminated treatments and considered a common HM component. Soils were mixed and incubated for four weeks near field capacity before planting. Wheat seeds (Triticum aestivum L. cv. Falat) were disinfected in 5% sodium hypochlorite for 10 min, rinsed three times with deionized water, and sown in pots 23 cm in diameter and 21.5 cm high. Eight seeds per pot were thinned to five plants after establishment. Foliar treatments were applied at tillering, stem elongation, and booting; controls received equal volumes of deionized water.

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)
https://doi.org/10.22067/jsw.2026.99098.1551

Plants were harvested about 70 days after sowing. Shoot dry biomass was measured after oven drying at 70 °C for 72 h. Total chlorophyll was determined in 80% acetone extracts at 663 and 645 nm following Lichtenthaler (1987). Malondialdehyde (MDA) and Hydrogen peroxide (H_2O_2) were measured at 532 and 390 nm, respectively. Reduced glutathione and oxidized glutathione (GSSG) were assayed in 2% metaphosphoric acid extracts using glutathione reductase, reduced nicotinamide adenine dinucleotide phosphate (NADPH), 5,5′-dithiobis(2-nitrobenzoic acid) (DTNB), and 2-vinylpyridine; the GSH/GSSG ratio was used to assess redox status.

Root and shoot samples were wet-digested with concentrated HNO_3 and H_2O_2, and Cd and Pb concentrations were determined by flame atomic absorption spectrometry (AAS) (Analyst 800, PerkinElmer). Oxidative stress index (OSI), total thiol pool, tolerance index, chlorophyll protection efficiency, and transfer factor were calculated. Data were analyzed by one-way analysis of variance (ANOVA), and means were compared using Duncan's multiple range test.

Results and Discussion

Combined Cd and Pb stress substantially reduced wheat growth. Shoot dry biomass declined from 12.50 g pot^{-1} in the control to 7.10 g pot^{-1} under HM, a 43% reduction. Total chlorophyll decreased from 2.10 to 1.10 mg g^{-1} fresh weight (47%). All thiol treatments improved both traits. Shoot biomass reached 8.60, 9.60, and 11.00 g pot^{-1} in HM+Cys, HM+GSH, and HM+Cys+GSH, respectively, while chlorophyll increased to 1.50, 1.70, and 1.90 mg g^{-1} fresh weight. Tolerance index and chlorophyll protection efficiency showed similar responses. The combined treatment produced the highest values among metal-stressed plants, although neither trait fully reached control values. Oxidative damage increased sharply under HM. MDA increased from 15.00 to 40.00 nmol g^{-1} fresh weight, while H_2O_2 increased from 4.30 to 12.20 μmol g^{-1} fresh weight. Cysteine, glutathione, and their combination reduced both indices. MDA concentrations were 32.00, 27.00, and 22.00 nmol g^{-1} fresh weight in HM+Cys, HM+GSH, and HM+Cys+GSH, respectively; corresponding H_2O_2 values were 9.20, 7.50, and 6.20 μmol g^{-1} fresh weight. The OSI increased from 0.05 in the control to 0.37 under HM. Cysteine reduced it to 0.17, whereas glutathione alone and the combined treatment both reduced it to 0.10. Therefore, the combined treatment did not exceed glutathione alone for this index, showing that treatment superiority differed among traits.

Cd and Pb strongly affected glutathione redox status. GSH declined from 85.30 to 32.90 nmol mg^{-1} protein under HM, whereas GSSG increased from 15.20 to 31.00 nmol mg^{-1} protein. Accordingly, the GSH/GSSG ratio declined from 5.61 to 1.07. Thiol application improved redox status in all treated plants. HM+GSH produced the highest GSH concentration, whereas HM+Cys+GSH produced the highest GSH/GSSG ratio. Under the combined treatment, GSH reached 62.70 nmol mg^{-1} protein, GSSG decreased to 10.50 nmol mg^{-1} protein, and the GSH/GSSG ratio reached 6.00. This ratio differed significantly from all stressed treatments but not from the control, indicating near-control redox restoration. Thiols also reduced Cd and Pb accumulation. Under HM, Cd concentrations were 19.0 mg kg^{-1} in roots and 7.6 mg kg^{-1} in shoots; under HM+Cys+GSH, they decreased to 10.4 and 4.0 mg kg^{-1}, respectively. Root Pb declined from 25.5 to 12.5 mg kg^{-1}, while shoot Pb declined from 9.8 to 5.5 mg kg^{-1}. Cysteine and glutathione alone also lowered both metals, although differences between HM+GSH and HM+Cys+GSH for shoot Cd and Pb were often not significant.Transfer factors for Cd and Pb remained below 0.5, indicating limited root-to-shoot translocation. Roots retained a substantial proportion of absorbed metals, reducing but not eliminating accumulation in shoots.

Conclusion

Cd–Pb co-contamination reduced wheat shoot biomass and chlorophyll, increased MDA and H_2O_2, and disrupted glutathione redox balance. Foliar cysteine and glutathione alleviated these effects. Their combined application produced the strongest response for most growth, oxidative, redox, and tissue-metal traits, improving biomass and chlorophyll, reducing oxidative damage, restoring GSH/GSSG to a control-comparable value, and lowering Cd and Pb in roots and shoots. Transfer factors remained below 0.5, indicating limited root-to-shoot translocation. Field validation and grain-metal measurements are required before recommending this treatment for food production.

Acknowledgement

The authors acknowledge the Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, for providing greenhouse and laboratory facilities for this study.

Keywords: Ascorbate–glutathione cycle, Heavy metal stress, Redox homeostasis, Root metal immobilization, Thiol metabolism

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۴۰، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵، ص. ۳۰۸-۲۹۳

اثر محلول‌پاشی برگی ترکیبات تیولی بر کاهش آسیب اکسیداتیو و تجمع کادمیوم و سرب در گندم کشت‌شده در یک خاک آهکی آلوده

زهراقشلاقی[1*] – سید شروین هاشمی اول[1]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۲

چکیده

آلودگی هم‌زمان خاک‌های آهکی به کادمیم و سرب، با کاهش رشد، اختلال در فتوسنتز و تشدید آسیب اکسیداتیو[2]، تولید گندم را در مناطق خشک و نیمه‌خشک محدود می‌کند و از نظر زراعی و ایمنی غذایی اهمیت ویژه‌ای دارد. با این حال، کارایی کاربرد برگی توأم سیستئین و گلوتاتیون در تعدیل اختلال ردوکسی و کاهش تجمع فلزات در گندم کشت‌شده در خاک آهکی آلوده، به‌طور کامل روشن نشده است. این پژوهش با هدف ارزیابی اثر محلول‌پاشی برگی سیستئین و گلوتاتیون، به‌صورت انفرادی و توأم، بر کاهش تنش هم‌زمان کادمیم و سرب از طریق بهبود رشد، بازگردانی تعادل ردوکس گلوتاتیون و کاهش تجمع فلزات در گیاه گندم رقم فلات (*Triticum aestivum* L. cv. Falat) انجام شد. آزمایش به‌صورت گلدانی در گلخانه و در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۵ تیمار و ۳ تکرار انجام شد. کادمیم و سرب به‌ترتیب با غلظت‌های ۱۵ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک اعمال شدند و اثر تیمارها بر زیست‌توده، غلظت کلروفیل کل، شاخص‌های آسیب اکسیداتیو، مؤلفه‌های ردوکس گلوتاتیون و غلظت فلزات در ریشه و اندام هوایی گیاه گندم بررسی شد. نتایج نشان داد که تنش فلزات سنگین، زیست‌توده خشک اندام هوایی را از ۱۲/۵۰ به ۷/۱۰ گرم در گلدان و غلظت کلروفیل کل را از ۲/۱۰ به ۱/۱۰ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر کاهش داد، در حالی‌که شاخص استرس اکسیداتیو (OSI) از ۰/۰۵ به ۰/۳۷ افزایش یافت و نسبت گلوتاتیون احیا به اکسید شده (GSH/GSSG) از ۵/۶۱ به ۱/۰۷ کاهش پیدا کرد. اثر تیمارها بر زیست‌توده، غلظت کلروفیل، مالون‌دی‌آلدئید، گلوتاتیون احیاشده، گلوتاتیون اکسیدشده، نسبت GSH/GSSG ، شاخص استرس اکسیداتیو و غلظت کادمیم و سرب در ریشه و اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. تیمار توأم، بیشترین اثر را در افزایش زیست‌توده اندام هوایی و غلظت کلروفیل کل، کاهش مالون‌دی‌آلدئید، بهبود وضعیت گلوتاتیون و نسبت GSH/GSSG، و کاهش تجمع کادمیم و سرب در گیاه نشان داد و زیست‌توده را به ۱۱/۰۰ گرم در گلدان، غلظت کلروفیل را به ۱/۹۰ میلی‌گرم بر گرم و نسبت GSH/GSSG را به ۶/۰۰ رساند و هم‌زمان کادمیم ریشه را از ۱۹/۰ به ۱۰/۴ و سرب ریشه را از ۲۵/۵ به ۱۲/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش داد. با این حال، برتری این تیمار در همه شاخص‌ها یکنواخت نبود. در مجموع، محلول‌پاشی برگی ترکیبات تیولی، به‌ویژه تیمار توأم سیستئین و گلوتاتیون، راهبردی فیزیولوژیک و مؤثر برای کاهش تنش هم‌زمان کادمیم و سرب در گندم بود که عمدتاً از طریق بهبود هم‌ایستایی ردوکس[3] و کاهش تجمع فلز در بافت‌ها عمل کرد.

واژه‌های کلیدی: تعادل ردوکس، تنش فلزات سنگین، تثبیت فلزات در ریشه، چرخه آسکوربات–گلوتاتیون، متابولیسم تیولی

۱– گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران
(*– نویسنده مسئول: Email: zahra.gheshlaghi@ut.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/jsw.2026.99098.1551
2- Oxidative damage
3- Redox homeostasis

مقدمه

آلودگی خاک‌های کشاورزی به فلزات سنگین، یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و زراعی در دهه‌های اخیر است؛ زیرا این آلاینده‌ها ضمن کاهش کیفیت خاک، رشد و عملکرد گیاهان زراعی را محدود کرده و از طریق ورود به زنجیره غذایی، سلامت انسان و پایداری سامانه‌های تولید را تهدید می‌کنند. در میان فلزات سنگین، کادمیم و سرب به‌دلیل پایداری بالا در محیط، فقدان هرگونه نقش زیستی ضروری در گیاه، سمیت شدید در غلظت‌های نسبتاً پایین و قابلیت انتقال به اندام‌های مصرفی، از مهم‌ترین عناصر خطرناک در اراضی کشاورزی به‌شمار می‌روند (Hua, 2022; Hassan, 2025 ; Lu, 2019). گزارش شده است که آلودگی فلزی خاک‌ها عمدتاً منشأ انسان‌زاد دارد و می‌تواند در اثر مصرف بلندمدت کودهای فسفاتی، لجن فاضلاب، پساب‌های صنعتی، فعالیت‌های معدنی و احتراق سوخت‌های فسیلی تشدید شود؛ ازاین‌رو کنترل آثار آن در سامانه‌های زراعی به یک اولویت پژوهشی و مدیریتی تبدیل شده است (Bystricka *et al.*, 2019; Lu, 2019).

شواهد موجود از ایران نیز نشان می‌دهد که آلودگی خاک به کادمیم و سرب الگوی یکنواختی ندارد و شدت آن به شرایط منطقه‌ای و منابع محلی آلودگی وابسته است. به‌عنوان نمونه، در برخی خاک‌های شمال ایران در نواحی پیرامون دریاچه ارومیه، آلودگی متوسط تا شدید کادمیم و سرب گزارش شده و در بعضی مناطق، غلظت این عناصر از حدود توصیه‌شده فراتر رفته است (Hosseinpoor *et al.*, 2024). در مقابل، در برخی خاک‌های کشاورزی ایران، از جمله مزارع زعفران گناباد، غلظت کادمیم و سرب در محدوده مجاز ملی و بین‌المللی قرار داشته و خطر قابل‌توجهی از نظر سلامت گزارش نشده است (Taghavi *et al.*, 2023). این ناهمگنی منطقه‌ای نشان می‌دهد که بررسی رفتار کادمیم و سرب و نیز راهکارهای کاهش جذب و سمیت آن‌ها در خاک‌های کشاورزی ایران، به‌ویژه در خاک‌های آهکی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

گندم (*Triticum aestivum* L.) مهم‌ترین غله غذایی در بسیاری از کشورها است و سهم بالایی در تأمین انرژی و پروتئین جمعیت انسانی دارد؛ بنابراین هر عاملی که موجب افت رشد، کاهش عملکرد یا افزایش تجمع فلزات سنگین در این گیاه شود، از دیدگاه امنیت غذایی اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند (Hua, Hassan, 2025 ; 2022). کادمیم و سرب می‌توانند با اختلال در جذب و جابه‌جایی عناصر غذایی، آسیب به غشاها، تخریب ساختار کلروپلاست، اختلال در زنجیره انتقال الکترون و تضعیف فرایندهای متابولیک، رشد و کارایی فتوسنتزی گیاه را به‌شدت کاهش دهند. علاوه بر این، تنش ناشی از این فلزات اغلب با تجمع گونه‌های فعال اکسیژن همراه است و در نتیجه، پراکسیداسیون لیپیدها، اکسایش پروتئین‌ها، آسیب به اسیدهای نوکلئیک و فروپاشی نسبی هم ایستایی سلولی را در پی دارد (Jung, 2020; Vanbuel, 2025; Marques, 2025 ;).

در شرایط آلودگی هم‌زمان به کادمیم و سرب، شدت آسیب معمولاً از تنش تک‌فلزی فراتر می‌رود؛ زیرا برهم‌کنش میان این دو فلز در سطح ریزوسفری، غشایی و درون‌سلولی می‌تواند الگوی جذب، انتقال و سم‌زدایی را پیچیده‌تر کند. کادمیم و سرب از مسیرهای انتقالی مشابه یا نزدیک به هم با کاتیون‌های دوظرفیتی ضروری رقابت می‌کنند و می‌توانند تعادل عناصر غذایی، عملکرد فتوسیستم‌ها و وضعیت اکسایش–کاهش را مختل سازند (Liu, Hua, 2022 ; 2025). از سوی دیگر، در گیاهان زراعی کشت‌شده در خاک‌های آهکی، این موضوع اهمیت بیشتری دارد؛ زیرا اگرچه pH بالا و کربنات کلسیم فراوان ممکن است بخشی از فلزات را در شکل‌های کم‌تحرک‌تر نگه دارد، اما فراهمی زیستی آن‌ها به‌طور کامل حذف نمی‌شود و فلزات همچنان می‌توانند از طریق تغییرات ریزوسفری، ترشحات ریشه و پویایی فاز جامد–محلول وارد گیاه شوند (Bolan *et* Li *et al.*, 2023; Saleem *et al.*, 2023*al.*, 2023 ;). خاک‌های آهکی در بسیاری از اراضی کشاورزی مناطق خشک و نیمه‌خشک غالب‌اند و به‌دلیل pH بالا، کربنات کلسیم زیاد و ویژگی‌های شیمیایی خاص، بر تحرک و زیست‌فراهمی فلزات سنگین اثر می‌گذارند (Bolan *et al.*, 2023). از این‌رو، کارایی روش‌های متداول اصلاح خاک، مانند بیوچار و مواد آلی، در این خاک‌ها همواره یکنواخت نیست و به نوع فلز، ویژگی‌های خاک و شرایط محیطی وابسته است (Guo ; Li *et al.*, 2023; Saleem *et al.*, 2023; *et al.*, 2020 Uchimiya *et al.*, 2010). بنابراین، مداخلات برگیِ هدف‌گیرنده سامانه دفاعی گیاه می‌توانند به‌عنوان رویکردی مکمل، و در برخی شرایط کارآمدتر از اصلاح مستقیم خاک، مطرح باشند.

سامانه تیولی مبتنی بر سیستئین و گلوتاتیون یکی از محورهای اصلی دفاع گیاه در برابر تنش فلزات سنگین است؛ به‌طوری‌که سیستئین با تأمین گوگرد احیاشده، پیش‌ساز اصلی سنتز گلوتاتیون به‌شمار می‌رود و گلوتاتیون نیز در خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن، حفظ وضعیت ردوکس، پایداری غشاها و چرخه آسکوربات–گلوتاتیون نقش دارد و همچنین پیش‌ماده مستقیم سنتز فیتوکلاتین‌ها برای کیلیت‌سازی و سم‌زدایی فلزات است (Rai, Marques, 2025 ; 2023; Wu, 2024). از نظر بیوشیمیایی، کارایی این سامانه به فراهمی سیستئین و فعالیت آنزیم‌های کلیدی بیوسنتز گلوتاتیون، به‌ویژه در مرحله تشکیل-γ گلوتامیل‌سیستئین، وابسته است؛ بنابراین، در تنش شدید و هم‌زمان کادمیم و سرب، مصرف هم‌زمان گلوتاتیون

در خنثی‌سازی ROS و سنتز فیتوکلاتین‌ها می‌تواند به کاهش GSH[1] ، افزایش GSSG[2] و افت نسبت GSH/GSSG[3] منجر شود که نشانه اختلال در هم ایستایی ردوکس و تضعیف ظرفیت دفاعی گیاه است (Zhang *et al.*, 2005Kopylova, 2023 ;).

کاربرد برون‌زاد سیستئین و گلوتاتیون می‌تواند از دو مسیر مکمل به کاهش تنش فلزات سنگین کمک کند؛ به‌طوری که سیستئین با تقویت تأمین پیش‌سازهای سنتز گلوتاتیون و ترکیبات گوگرددار، و گلوتاتیون با بهبود وضعیت ردوکس و پشتیبانی از چرخه آسکوربات–گلوتاتیون، ظرفیت دفاعی گیاه را افزایش می‌دهند (Gheshlaghi & Jung, 2020; Rai, 2023Kafi, 2026 ;). با وجود این، شواهد مربوط به اثر هم‌زمان این دو ترکیب در گندم در شرایط تنش توأم کادمیم و سرب، به‌ویژه در خاک آهکی، هنوز محدود است و همین موضوع ضرورت بررسی تجربی آن را برجسته می‌کند. همچنین، اگرچه در سال‌های اخیر از تعدیل‌کننده‌های شیمیایی، مواد آلی، نانوذرات و تنظیم‌کننده‌های متابولیکی برای کاهش تنش فلزات سنگین استفاده شده است، کارایی این مداخلات به‌شدت به نوع خاک، گونه گیاهی، نوع فلز و شدت تنش وابسته است (Gulsah *et al.*, Kang *et al.*, 2024; Shang, 20242025 ;). از این‌رو، ارزیابی تیمارهای تیولی در خاک آهکی و شرایط آلودگی هم‌زمان Cd و Pb، با سنجش شاخص‌های رشدی، رنگیزه‌ای، اکسیداتیو، ردوکسی و الگوی تجمع فلز، برای تبیین دقیق‌تر پاسخ گندم ضروری است.

با توجه به آنچه بیان شد، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر محلول‌پاشی برگی سیستئین و گلوتاتیون، به‌صورت انفرادی و ترکیبی، بر رشد، محتوای کلروفیل، شاخص‌های استرس اکسیداتیو[4]، وضعیت گلوتاتیون و الگوی تجمع و انتقال کادمیم و سرب در گندم رقم فلات کشت‌شده در خاک آهکی آلوده انجام شد. فرض اصلی پژوهش این بود که تیمارهای تیولی، به‌ویژه کاربرد توأم سیستئین و گلوتاتیون، بتوانند از طریق بهبود وضعیت ردوکس و کاهش شدت آسیب اکسیداتیو، آثار منفی تنش فلزات سنگین را تعدیل کنند؛ هرچند تبیین دقیق مکانیسم‌های مولکولی و درون‌سلولی فراتر از دامنه داده‌های این مطالعه است و بر اساس شاخص‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی مورد بحث قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های خاک و آماده‌سازی گلدان‌ها

این پژوهش به‌صورت آزمایش گلدانی در شرایط گلخانه‌ای در دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. برای اجرای آزمایش، نمونه خاک سطحی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری از اراضی کشاورزی اطراف سبزوار برداشت شد. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، خاک در دمای محیط هواخشک شد و سپس از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد تا بقایای درشت گیاهی، سنگریزه‌ها و ذرات ناهمگن حذف و یکنواختی فیزیکی نمونه‌ها فراهم شود. بر اساس روش (Gee & Bauder, 1986)، خاک مورد استفاده دارای بافت Clay loam، pH برابر ۷/۸۹، هدایت الکتریکی عصاره اشباع برابر ۲/۵۳ دسی‌زیمنس بر متر، ماده آلی ۱/۰۳ درصد و کربنات کلسیم معادل ۲۴/۵۵ درصد بود. همچنین غلظت اولیه کادمیم و سرب قابل استخراج با DTPA به‌ترتیب ۰/۱۲ و ۱/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد (Analyst 800; PerkinElmer Inc., Waltham, MA, USA) (Reynolds, 1989) که نشان می‌دهد خاک پایه، پیش از اعمال تیمارهای آزمایشی، آلودگی زمینه‌ای شدیدی نداشته است و در محدوده‌ای پایین‌تر از مقادیر بحرانی گزارش‌شده برای خاک‌های کشاورزی با کشت گندم قرار داشته است (Bystricka *et al.*, 2019 Six & Smolders, 2014 ;). انتخاب این خاک به‌دلیل ماهیت آهکی و شباهت آن به خاک‌های رایج مناطق خشک و نیمه‌خشک انجام شد؛ خاک‌هایی که به‌واسطه pH بالا، غلبه کربنات‌ها و ویژگی‌های شیمیایی خاص، رفتار متفاوتی در نگهداشت و فراهمی عناصر غذایی و فلزات سنگین از خود نشان می‌دهند (Bolan *et al.*, 2023). ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بر اساس روش‌های متداول آزمایشگاهی (Westerman, 1990) تعیین شد (جدول ۱).

طرح آزمایش و تیمارها

آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با پنج تیمار و سه تکرار، در مجموع ۱۵ واحد آزمایشی، انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل: ۱) شاهد، بدون آلودگی فلزی و با محلول پاشی آب مقطر؛ ۲) تنش فلزات سنگین(HM) ، شامل آلودگی هم‌زمان خاک به ۱۵ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک و ۳۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک؛ ۳) HM + Cys، شامل تنش فلزی به‌همراه محلول‌پاشی برگی سیستئین با غلظت ۰/۴۱ میلی‌مولار؛ ۴) HM + GSH ، شامل تنش فلزی به‌همراه محلول‌پاشی برگی گلوتاتیون با غلظت ۲ میلی‌مولار و ۵) HM + Cys + GSH، شامل تنش فلزی به‌همراه محلول‌پاشی هم‌زمان سیستئین و گلوتاتیون با همان غلظت‌های مذکور.

1 Reduced glutathione
2- Oxidized glutathione
3- Ratio of reduced to oxidized glutathione
4- Oxidative Stress Index

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش

Table 1- Initial physicochemical characteristics of the soil utilized in the experiment

ویژگی‌ها Property	واحد Unit	مقدار Value	روش‌ها Method
بافت خاک Textural class	-	Clay Loam	مثلث بافت خاک USDA textural triangle
pH (نسبت ۱:۲/۵ خاک به آب) pH (1:2.5 soil:water)	-	7.89	اندازه‌گیری در سوسپانسیون خاک و آب با نسبت۱:۲/۵ ، با استفاده از pHمتر Measurement in 1:2.5 soil:water suspension using pH meter
هدایت الکتریکی Electrical Conductivity (ECe)	dS m^{-1}	2.53	عصاره‌گیری از گل اشباع خاک Saturated Paste Extract
ماده آلی Organic Matter (OM)	%	1.03	روش والکی–بلاک Walkley-Black Method
کربنات کلسیم معادل $CaCO_3$ Equivalent (TNV)	%	24.55	روش کلسیمتر Calcimeter Method
کادمیم قابل استخراج با DTPA DTPA-extractable Cd	mg kg^{-1}	0.12	عصاره‌گیری با دی تی پی ای DTPA Extraction
سرب قابل استخراج با DTPA DTPA-extractable Pb	mg kg^{-1}	1.5	عصاره‌گیری با دی تی پی ای DTPA Extraction

برای ایجاد آلودگی فلزی، مقادیر محاسبه‌شده از نمک‌های نیتراتی کادمیم و سرب به خاک هر گلدان ۵ کیلوگرمی افزوده شد، افزودن این نمک‌ها به‌طور ضمنی منجر به ورود مقدار محدودی نیترات(NO_3^-) به خاک شد؛ با توجه به این‌که سطوح آلودگی فلزی و به‌تبع آن مقدار نیترات همراه در همه تیمارهای آلوده (HM، HM+Cys، HM+GSH، HM+Cys+GSH) یکسان بود، اثر نیترات به‌عنوان مؤلفه مشترک بین این تیمارها تلقی و اختلاف میانگین صفات عمدتاً به حضور یا عدم حضور ترکیبات تیولی نسبت داده شد. پس از اختلاط کامل با خاک، گلدان‌ها به‌مدت حدود چهار هفته در شرایط رطوبتی نزدیک به ظرفیت مزرعه نگهداری شدند تا توزیع فلزات در خاک یکنواخت شده و تعادل نسبی بین فازهای جامد و محلول برقرار شود. این مرحله برای شبیه‌سازی بهتر شرایط تماس ریشه با فلزات و جلوگیری از مواجهه آنی و غیرواقعی گیاه با آلودگی فلزی انجام شد و با رویکردهای به‌کاررفته در مطالعات مشابه سازگار است (Shang, 2024Lu, 2019 ;).

کاشت، استقرار گیاه و محلول‌پاشی

بذرهای گندم رقم فلات (*Triticum aestivum* L. cv. Falat) از شرکت کیمیا تجارت زر تهیه و پیش از کاشت با محلول هیپوکلریت سدیم ۵٪ به مدت ۱۰ دقیقه ضدعفونی و سپس سه بار با آب مقطر شست‌وشو داده شدند تا هرگونه اثر احتمالی عوامل میکروبی یا مواد سطحی به حداقل برسد. در هر گلدان (حاوی ۵ کیلوگرم با ابعاد ۲۳ سانتی‌متر قطر و ۲۱/۵سانتی‌متر ارتفاع) تعداد ۸ بذر کشت شد و پس از سبزشدن و استقرار اولیه گیاهچه‌ها، تعداد بوته‌ها به ۵ بوته در هر گلدان کاهش یافت تا تراکم یکنواختی میان واحدهای آزمایشی برقرار شود.

سیستئین (L-cysteine، ≥99% purity) و گلوتاتیون کاهش‌یافته (reduced glutathione، ≥99% purity) از شرکت سیگما آلدریچ تهیه شد و محلول‌پاشی برگی تیمارهای سیستئین و گلوتاتیون به‌ترتیب با غلظت‌های ۰/۴۱ و ۲ میلی‌مولار (به‌ترتیب معادل ۵۰ و ۶۱۵ میلی‌گرم در لیتر)، در سه مرحله کلیدی رشد رویشی گندم شامل آغاز پنجه‌زنی، ساقه‌رفتن و بستن خوشه انجام شد. انتخاب این غلظت‌ها بر اساس مطالعات پیشین انجام گرفت (Shang, 2024Lu, 2019 ;) و زمان‌بندی محلول‌پاشی نیز با توجه به حساسیت فیزیولوژیک گیاه در این مراحل و نقش سیستئین و گلوتاتیون در تنظیم پاسخ آنتی‌اکسیدانی و تعادل ردوکس در نظر گرفته شد (Sun & Yang, 2006Rai, 2023 ;). در تیمار شاهد، در هر مرحله محلول‌پاشی، به‌جای محلول تیولی، همان حجم آب مقطر به‌صورت برگی اعمال شد تا اثر عملیات محلول‌پاشی (اسپری) و آب همراه در همه تیمارها یکسان باشد و تنها تفاوت، حضور یا عدم حضور ترکیبات تیولی باشد.

اندازه‌گیری صفات رشد و رنگیزه‌های فتوسنتزی

در پایان دوره رشد، حدود ۷۰ روز پس از کاشت، گیاهان برداشت شدند و اندام هوایی از ریشه جدا شد. برای اندازه‌گیری زیست‌توده خشک اندام هوایی، نمونه‌ها پس از شست‌وشوی ملایم برای حذف ذرات خاک، در آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس به‌مدت ۷۲ ساعت خشک شدند و سپس با ترازوی دیجیتال توزین شدند. این صفت

به‌عنوان یکی از شاخص‌های اصلی رشد و تحمل گیاه نسبت به تنش فلزات سنگین در نظر گرفته شد. برای تعیین غلظت کلروفیل کل، مقدار مشخصی از بافت تازه برگ در استون ۸۰ درصد استخراج شد و جذب نوری عصاره در طول موج‌های ۶۶۳ و ۶۴۵ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر (WPA S2000, Cary, North Carolina, U.S.A) در محل آزمایشگاه مرکزی دانشگاه تهران قرائت و سپس غلظت کلروفیل کل بر اساس روش لیچتنتالر محاسبه گردید (Lichtenthaler, 1987). اندازه‌گیری غلظت کلروفیل کل به‌عنوان شاخصی از وضعیت دستگاه فتوسنتزی و شدت آسیب ناشی از تنش فلزی انجام شد.

اندازه‌گیری شاخص‌های استرس اکسیداتیو و مؤلفه‌های ردوکس گلوتاتیون

برای ارزیابی شدت استرس اکسیداتیو، مقدار مالون‌دی‌آلدئید به‌عنوان شاخص پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی اندازه‌گیری شد. سنجش این ترکیب با استفاده از واکنش تیوباربیتوریک‌اسید انجام و جذب نوری نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۵۳۲ نانومتر قرائت گردید (Heath, 1968). همچنین غلظت هیدروژن پراکسید با روش مبتنی بر واکنش با یدید پتاسیم و اندازه‌گیری جذب نوری در طول موج ۳۹۰ نانومتر تعیین شد. این دو صفت برای توصیف شدت آسیب اکسیداتیو ناشی از تنش کادمیم و سرب و نیز ارزیابی میزان کارایی تیمارهای تیولی در کاهش این آسیب انتخاب شدند (Jung, 2020; Vanbuel, 2025).

برای اندازه‌گیری GSH و GSSG، نمونه‌های تازه برگ در اسید متافسفریک ۲ درصد سرد استخراج و پس از سانتریفیوژ، سوپرناتانت برای سنجش به‌کار رفت. گلوتاتیون کل به روش آنزیمی–طیف‌سنجی با استفاده از NADPH، DTNB و گلوتاتیون ردوکتاز اندازه‌گیری شد و برای سنجشGSSG، عصاره با ۲-vinylpyridine تیمار گردید. در نهایت، مقدار GSH از تفاضل گلوتاتیون کل و GSSGمحاسبه و نسبت GSH/GSSG به‌عنوان شاخص وضعیت ردوکس سلولی گزارش شد (Griffith, 1980). این نسبت یکی از شاخص‌های حساس برای ارزیابی پایداری محیط احیایی سلول در برابر تنش‌های اکسیداتیو است و کاهش آن معمولاً نشانه غلبه شرایط اکسیداتیو بر ظرفیت دفاعی گیاه تلقی می‌شود (Rai, Jung, 2020 ; 2023).

اندازه‌گیری غلظت کادمیم و سرب در گیاه

برای تعیین غلظت کادمیم و سرب در ریشه و اندام هوایی، نمونه‌های خشک گیاهی پس از آسیاب‌شدن تا رسیدن به پودر یکنواخت، تحت هضم تر قرار گرفتند (Westerman, 1990). هضم نمونه‌ها با استفاده از اسید نیتریک غلیظ و پراکسید هیدروژن انجام شد تا محلولی شفاف و مناسب برای سنجش عناصر به‌دست آید. سپس غلظت کادمیم و سرب در محلول نهایی با استفاده از دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی شعله‌ای (AAS، مدلAnalyst 800، برند PerkinElmer) اندازه‌گیری شد.

محاسبه شاخص‌های تنشی

به‌منظور تفسیر دقیق‌تر پاسخ گیاه به تنش فلزات سنگین و تیمارهای اعمال‌شده، چند شاخص مشتق‌شده نیز محاسبه شد. شاخص استرس اکسیداتیو از نسبت غلظت هیدروژن پراکسید به غلظت گلوتاتیون احیا شده به‌دست آمد ($OSI = \frac{H_2O_2}{GSH}$) تا تصویری فشرده از توازن بین بار اکسیداتیو و ظرفیت دفاع تیولی ارائه دهد. ذخیره کل تیول بر اساس مجموع GSH و دو برابر GSSG محاسبه شد ($TTP = GSH + (2 \times GSSG)$) تا برآوردی از اندازه استخر کل ترکیبات تیولی در دسترس حاصل شود. شاخص تحمل (TI) به‌صورت نسبت زیست‌توده خشک اندام هوایی در هر تیمار به میانگین شاهد و به شکل درصد محاسبه شد. (معادله۱)

$$TI(\%) = \left(\frac{Shoot\ biomass\ under\ stress}{Mean\ shoot\ biomass\ of\ control}\right) \times 100 \quad (۱)$$

همچنین کارایی حفاظت از کلروفیل (CPE) از نسبت غلظت کلروفیل کل هر تیمار به شاهد و به‌صورت درصد محاسبه گردید (Hassan, 2025). (معادله۲)

$$CPE(\%) = \left(\frac{Total\ chlorophyll\ in\ treatment}{Total\ chlorophyll\ in\ control}\right) \times 100 \quad (۲)$$

و برای ارزیابی انتقال نسبی فلزات از ریشه به اندام هوایی نیز فاکتور انتقال (TF) از نسبت غلظت فلز در اندام هوایی به ریشه به‌دست آمد (Wu, 2024). (معادله ۳)

$$TF = \frac{Metal\ concentration\ in\ shoot}{Metal\ concentration\ in\ root} \quad (۳)$$

تحلیل آماری

پیش از انجام تجزیه آماری، نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو–ویلک بررسی شد تا اعتبار فرض نرمالیتی برای انجام تحلیل واریانس ارزیابی گردد. سپس داده‌ها با استفاده از تجزیه واریانس یک طرفه (one-way analysis of variance) در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. این تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای آماری SPSS (نسخه ۲۶) انجام شد. در صورت معنی‌دار بودن اثر تیمارها، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای در سطح احتمال ۵ درصد ($P \leq ۰,۰۵$) انجام گرفت و ترسیم شکل‌ها با نرم‌افزار Origin انجام شد.

جدول ۲ .تجزیه واریانس اثر تیمار بر صفات رشدی، رنگیزه‌ای، اکسیداتیو، ردوکسی و غلظت کادمیم و سرب در گندم

Table 2. Analysis of variance for the effects of treatments on growth, pigment, oxidative, redox, and cadmium and lead concentration traits in wheat

منبع تغییر / S.O.V.	درجه آزادی / Df	زیست‌توده / Biomass	غلظت کلروفیل کل / Total chlorophyll concentration	MDA	GSH	GSSG	GSH/GSSG	OSI	TTP	TI	CPE	Cd ریشه / Root Cd	Cd اندام هوایی / Shoot Cd	Pb ریشه / Root Pb	Pb اندام هوایی / Shoot Pb
تیمار / Treatment	4	13.119**	0.444**	272.10**	1151.44**	178.761**	12.926**	0.04803**	501.726**	839.616**	1006.82**	14.73**	3.18**	39.81**	8.99**
خطا / Error	8	0.0645	0.0025	1.836	8.790	1.274	0.1297	0.00044	6.002	4.128	5.713	0.208	0.138	0.392	0.231
ضریب تغییرات / CV (%)	—	2.60	3.01	4.98	4.81	5.72	9.55	13.24	2.42	2.60	3.02	4.8	8.2	4.5	7.9
$LSD_{0.05}$	—	0.462	0.091	2.465	5.394	2.053	0.655	0.038	4.457	3.696	4.348	1.4	1.1	1.8	1.3

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمار بر صفات اصلی مورد بررسی شامل زیست‌توده خشک اندام هوایی، غلظت کلروفیل کل، مالون‌دی‌آلدئید، گلوتاتیون احیاشده، گلوتاتیون اکسیدشده، نسبت GSH/GSSG، شاخص استرس اکسیداتیو، ذخیره کل تیول و نیز غلظت کادمیم و سرب در ریشه و اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). این الگو نشان می‌دهد که تنش هم‌زمان کادمیم و سرب، پاسخ گندم را در سطوح رشدی، فیزیولوژیک، اکسیداتیو و ردوکسی به‌طور گسترده تحت تأثیر قرار داده و تیمارهای تیولی نیز توانسته‌اند شدت این اختلالات را تعدیل کنند.

زیست‌توده اندام هوایی، غلظت کلروفیل کل و شاخص‌های مشتق‌شده

تنش هم‌زمان کادمیم و سرب موجب کاهش معنی‌دار زیست‌توده خشک اندام هوایی از ۱۲/۵۰ گرم در گلدان در شاهد به ۷/۱۰ گرم در گلدان در تیمار HM شد؛ یعنی حدود ۴۳ درصد افت نسبت به شاهد (جدول ۳). کاربرد برگی سیستئین و گلوتاتیون، این کاهش را تا حدی جبران کرد؛ به‌طوری‌که زیست‌توده در تیمارهای HM+Cys و HM+GSH به‌ترتیب به ۸/۶۰ و ۹/۶۰ گرم در گلدان رسید و بیشترین مقدار در میان تیمارهای در شرایط تنش در تیمار HM+Cys+GSH با ۱۱/۰۰ گرم در گلدان مشاهده شد. با توجه به مقدار $LSD_{0.05}$ برای زیست‌توده (۰/۴۶۲)، اختلاف بین همه این میانگین‌ها معنی‌دار بود؛ بنابراین تیمار ترکیبی از نظر بازیابی رشد، به‌طور معنی‌داری از تیمارهای انفرادی کاراتر بود، هرچند همچنان به سطح شاهد نرسید.

شاخص تحمل نیز همین روند را تأیید کرد؛ به‌طوری‌که این شاخص از ۱۰۰ درصد در شاهد به ۵۶/۸۰ درصد در تیمار HM کاهش یافت، اما در تیمارهای HM+Cys، HM+GSH و HM+Cys+GSHبه‌ترتیب به ۶۸/۸۰، ۷۶/۸۰ و ۸۸/۰۰ درصد افزایش پیدا کرد (جدول ۳). اختلاف این میانگین‌ها نیز با توجه به $LSD_{0.05}$برابر ۳/۶۹۶ همگی معنی‌دار بود و نشان داد که تیمار توأم، بیشترین ظرفیت را برای حفظ رشد در شرایط تنش فلزی داشته است. این بهبود رشد را می‌توان با کاهش فشار اکسیداتیو و حفظ بهتر کارکردهای متابولیکی تبیین کرد؛ زیرا کادمیم و سرب معمولاً با رقابت با کاتیون‌های دوظرفیتی ضروری، اختلال در انتقال عناصر غذایی و آسیب به ساختارهای فتوسنتزی موجب محدودیت رشد می‌شوند (Marques, 2025Hua, 2022 ;).

روند تغییرات غلظت کلروفیل کل نیز با پاسخ زیست‌توده هم‌سو بود. تنش فلزی، غلظت کلروفیل کل را از ۲/۱۰ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر در شاهد به ۱/۱۰ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر در تیمار HM کاهش داد که بیانگر افتی معادل ۴۷ درصد بود (جدول ۳). محلول‌پاشی سیستئین و گلوتاتیون به‌ترتیب این مقدار را به ۱/۵۰ و ۱/۷۰ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر افزایش داد و تیمار ترکیبی با ۱/۹۰ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر، بیشترین غلظت کلروفیل را در بین گیاهان در شرایط تنش نشان داد. از آنجاکه $LSD_{0.05}$ کلروفیل کل برابر ۰/۰۹۱ بود، اختلاف بین تمام میانگین‌ها معنی‌دار بود و بنابراین ترتیب اثر تیمارها به‌صورت شاهد< HM+Cys > HM قابل دفاع است.

شاخص کارایی حفاظت از کلروفیل نیز از ۵۲/۴۰ درصد در تیمار HM به ۷۱/۴۰، ۸۰/۹۷ و ۹۰/۵۰ درصد در تیمارهای HM+Cys، HM+GSH و HM+Cys+GSH افزایش یافت و برتری تیمار ترکیبی نسبت به تیمارهای انفرادی از نظر آماری معنی‌دار بود (جدول ۳). این الگو نشان می‌دهد که کاربرد تیول‌ها، به‌ویژه در حالت توأم، توانسته است شدت تخریب رنگیزه‌های فتوسنتزی را کاهش دهد. از نظر فیزیولوژیک، افت غلظت کلروفیل در حضور کادمیم و سرب معمولاً با اختلال در جذب و جابه‌جایی عناصر معدنی، آسیب به کلروپلاست، برهم‌خوردن زنجیره انتقال الکترون و افزایش گونه‌های فعال اکسیژن مرتبط است و بنابراین هر عاملی که تعادل ردوکس را بهبود دهد، می‌تواند به حفظ ساختار فتوسنتزی کمک کند (Rai, 2023Liu, 2025 ;).

شاخص‌های استرس اکسیداتیو و آسیب غشایی

تنش هم‌زمان کادمیم و سرب موجب افزایش شدید شاخص‌های آسیب اکسیداتیو شد. غلظت MDA از ۱۵/۰۰ نانومول بر گرم وزن‌تر در شاهد به ۴۰/۰۰ نانومول بر گرم وزن‌تر در تیمار HM افزایش یافت که نشانه تشدید پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی در اثر تنش فلزی است (جدول ۴). کاربرد سیستئین، گلوتاتیون و تیمار ترکیبی به‌ترتیب MDA را به ۳۲/۰۰، ۲۷/۰۰ و ۲۲/۰۰ نانومول بر گرم وزن‌تر کاهش داد. با توجه به $LSD_{0.05}$ برابر ۲/۴۶۵، تمام این اختلاف‌ها معنی‌دار بودند و بنابراین تیمار ترکیبی مؤثرترین تیمار در کاهش آسیب غشایی ناشی از تنش بود.

غلظت هیدروژن پراکسید نیز از ۴/۳۰ میکرومول بر گرم وزن‌تر در شاهد به ۱۲/۲۰ میکرومول بر گرم وزن‌تر در تیمار HM افزایش یافت و سپس در تیمارهای HM+Cys، HM+GSH و HM+Cys+GSHبه‌ترتیب به ۹/۲۰، ۷/۵۰ و ۶/۲۰ میکرومول بر

1- One-way ANOVA

گرم وزن‌تر کاهش پیدا کرد (جدول ۴). روند میانگین‌ها نشان می‌دهد که هر سه تیمار تیولی شدت بار اکسیداتیو را کاهش داده‌اند و تیمار گلوتاتیون و به‌ویژه تیمار ترکیبی از نظر عددی مؤثرتر از سیستئین به‌تنهایی بوده‌اند.

شاخص استرس اکسیداتیو نیز از ۰/۰۵ در شاهد به ۰/۳۷ در تیمار HM افزایش یافت که بیانگر غلبه شرایط اکسیداتیو بر ظرفیت دفاعی مبتنی بر گلوتاتیون است (جدول ۴). محلول‌پاشی سیستئین این شاخص را به ۰/۱۷ و محلول‌پاشی گلوتاتیون و تیمار ترکیبی هر دو آن را به ۰/۱۰ کاهش دادند. با توجه به $LSD_{0.05}$ برابر ۰/۰۳۸، کاهش OSI در تیمارهای HM+GSH و HM+Cys+GSH نسبت به HM و HM+Cys معنی‌دار بود، اما بین M+GSH و HM+Cys+GSH اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. در نتیجه، بر اساس این شاخص، تیمار ترکیبی از گلوتاتیون به‌تنهایی برتر نبود، بلکه هر دو تیمار در کاهش عدم تعادل اکسیداتیو کارایی مشابهی نشان دادند.

ذخیره کل تیول از ۱۱۵/۷۰ نانومول بر گرم وزن‌تر در شاهد به ۹۰/۹۴ در تیمار HM کاهش یافت و در تیمار HM+Cys به ۹۹/۶۰، در HM+GSH به ۱۱۱/۷۰ و در HM+Cys+GSH به ۸۳/۷۰ نانومول بر گرم وزن‌تر رسید (جدول ۴). بر اساس $LSD_{0.05}$=۴/۴۵۷، تیمار HM+Cys+GSH کمترین مقدار TTP را به‌طور معنی‌دار نشان داد، در حالی‌که اختلاف بین شاهد و HM+GSH از نظر آماری معنی‌دار نبود. این کاهش TTP در تیمار ترکیبی را نمی‌توان به‌صورت قطعی به یک مکانیسم واحد نسبت داد، اما می‌توان آن را به‌عنوان نشانه‌ای از مصرف بیشتر تیول‌ها در فرآیندهای دفاعی و سم‌زدایی در نظر گرفت؛ تفسیری که با نقش گلوتاتیون و مشتقات آن در پاسخ به تنش فلزات سنگین سازگار است (Wu, 2024Marques, 2025 ;).

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف بر صفات رشدی، رنگیزه‌ای و شاخص‌های مشتق‌شده گندم

Table 3- Comparison of the effects of various treatments on growth characteristics, photosynthetic pigments, and derived indices of wheat

تیمار Treatment	CPE (%)	TI (%)	غلظت کلروفیل کل Total chlorophyll Concentration (mg g^{-1} FW)	زیست‌توده Biomass (g pot^{-1})
شاهد Control	100.00 ± 1.39 a	100.00 ± 1.44 a	2.10 ± 0.03 a	12.50 ± 0.18 a
تنش HM	52.40 ± 1.39 e	56.80 ± 1.51 e	1.10 ± 0.03 e	7.10 ± 0.19 e
تنش + سیستئین HM+ Cys	71.40 ± 1.39 d	68.80 ± 1.06 d	1.50 ± 0.03 d	8.60 ± 0.13 d
تنش + گلوتاتیون HM+ GSH	80.97 ± 1.36 c	76.80 ± 0.83 c	1.70 ± 0.03 c	9.60 ± 0.10 c
تنش+سیستئین +گلوتاتیونHM+Cys+GSH	90.50 ± 1.39 b	88.00 ± 0.83 b	1.90 ± 0.03 b	11.00 ± 0.10 b

داده‌ها به‌صورت میانگین ± خطای استاندارد ارائه شده‌اند (n = ۳). در هر ستون، میانگین‌هایی که حداقل یک حرف کوچک انگلیسی مشترک دارند، در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌دار ندارند :TI .شاخص تحمل؛ :CPE کارایی حفاظت از کلروفیل؛ :FW وزن‌تر

جدول ٤- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف بر شاخص‌های استرس اکسیداتیو گندم

Table 4- Comparison of the mean effects of different treatments on oxidative stress indices in wheat

تیمار	TTP (nmol g^{-1} FW)	OSI	H_2O_2 (µmol g^{-1} FW)	MDA (nmol g^{-1} FW)
شاهد Control	115.70 ± 2.91 a	0.05 ± 0.00 d	4.30 ± 0.15 e	15.00 ± 0.40 e
تنش HM	94.90 ± 0.86 c	0.37 ± 0.02 a	12.20 ± 0.38 a	40.00 ± 0.79 a
تنش + سیستئین HM+ Cys	99.60 ± 0.32 b	0.17 ± 0.01 b	9.20 ± 0.21 b	32.00 ± 0.98 b
تنش + گلوتاتیون HM+ GSH	111.70 ± 0.60 a	0.10 ± 0.01 c	7.50 ± 0.17 c	27.00 ± 0.83 c
تنش+سیستئین +گلوتاتیونHM+Cys+GSH	83.70 ± 0.57 d	0.10 ± 0.00 c	6.20 ± 0.21 d	22.00 ± 0.78 d

داده‌ها به‌صورت میانگین ± خطای استاندارد ارائه شده‌اند (n = ۳). در هر ستون، میانگین‌هایی که حداقل یک حرف کوچک انگلیسی مشترک دارند، در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌دار ندارند :MDA .مالون‌دی‌آلدئید؛ :H_2O_2 پراکسید هیدروژن؛ :OSI شاخص تنش اکسیداتیو؛ :TTP ذخیره کل تیول؛ :FW وزن‌تر

به‌طور کلی، افزایش MDA، H_2O_2 و OSI در تیمار HM تأیید می‌کند که تنش توأم کادمیم و سرب موجب برهم‌خوردن تعادل اکسایش-کاهش و تشدید شاخص استرس اکسیداتیو در گندم شده است. کاهش این شاخص‌ها در تیمارهای تیولی، به‌ویژه در حضور گلوتاتیون، نشان می‌دهد که تأمین مستقیم یا غیرمستقیم ترکیبات تیولی می‌تواند بخشی از خسارت ناشی از ROS را کاهش دهد؛ موضوعی که با نقش شناخته‌شده گلوتاتیون در چرخه آسکوربات-گلوتاتیون و پایداری وضعیت ردوکس سلول هم‌خوانی دارد (Jung, 2020; Rai, 2023).

هم‌ایستایی سیستم گلوتاتیون و تعادل ردوکسی

هم‌ایستایی سیستم گلوتاتیون به توانایی سلول در حفظ تعادل میان شکل احیاشده گلوتاتیون (GSH) و شکل اکسیدشده آن (GSSG) از طریق تنظیم سنتز، بازتولید و مصرف این ترکیبات گفته می‌شود. تعادل ردوکس نیز بیانگر وضعیت نسبی اکسایش-کاهش درون‌سلولی است و نسبت GSH/GSSG یکی از شاخص‌های مهم آن به‌شمار می‌رود؛ به‌طوری‌که کاهش این نسبت معمولاً نشان‌دهنده غلبه شرایط اکسیدکننده و تضعیف ظرفیت دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه است. تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمار بر غلظت GSH، GSSG و نسبت GSH/GSSG در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). یکی از روشن‌ترین پاسخ‌های گیاه به تنش فلزی در این پژوهش، تغییر در اجزای سامانه گلوتاتیون بود. در تیمار HM، غلظت GSH از ۸۵/۳۰ نانومول بر میلی‌گرم پروتئین در شاهد به ۳۲/۹۰ کاهش یافت، در حالی‌که GSSG از ۱۵/۲۰ به ۳۱/۰۰ نانومول بر میلی‌گرم پروتئین افزایش پیدا کرد. در نتیجه، نسبت GSH/GSSG از ۵/۶۱ در شاهد به ۱/۰۷ در تیمار HM کاهش یافت که به‌خوبی نشان‌دهنده جابه‌جایی محیط درون‌سلولی به سمت وضعیت اکسیداتیو است (شکل ۱).

کاربرد سیستئین، GSH را به ۵۵/۴۰ و نسبت GSH/GSSG را به ۲/۵۲ رساند، در حالی‌که گلوتاتیون برون‌زاد این مقادیر را به‌ترتیب به ۷۲/۱۰ و ۳/۶۶ افزایش داد. در تیمار HM+Cys+GSH، GSH برابر ۶۲/۷۰، GSSG برابر ۱۰/۵۰ و نسبت GSH/GSSG برابر ۶/۰۰ گزارش شد. بر اساس مقدار $LSD_{0.05}$ برای GSH برابر ۵/۳۹۴، هر سه تیمار تیولی در مقایسه با HM موجب افزایش معنی‌دار GSH شدند و HM+GSH از HM+Cys و HM+Cys+GSH نیز GSH بیشتری داشت.

برای GSSG نیز اختلاف‌ها معنی‌دار بود و تیمار HM+Cys+GSH کمترین مقدار را در بین همه تیمارها نشان داد. از آنجاکه $LSD_{0.05}$ برای نسبت GSH/GSSG برابر ۰/۶۵۵ است، نسبت ۶/۰۰ در تیمار ترکیبی به‌طور معنی‌داری از HM، HM+Cys و HM+GSH بیشتر بود، اما اختلاف آن با شاهد ۵/۶۱ معنی‌دار نبود، زیرا اختلاف ۰/۳۹ از مقدار LSD کمتر است. به عبارتی تیمار ترکیبی نسبت GSH/GSSG را تا سطحی هم‌ارز با شاهد بازیابی کرد.

افت شدید GSH و نسبت GSH/GSSG در تیمار HM نشان می‌دهد که گندم در شرایط تنش توأم Cd و Pb با فشار شدید بر استخر گلوتاتیون[1] مواجه شده است (شکل ۱). این الگو با این مفهوم سازگار است که گلوتاتیون در شرایط تنش فلزی باید هم‌زمان در خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن و در مسیرهای سم‌زدایی فلزات مشارکت کند و به همین دلیل ذخیره احیاشده آن کاهش می‌یابد (Jung, 2020; Wu, 2024Gheshlaghi & Kafi, 2026). بهبود نسبت GSH/GSSG در تیمارهای تیولی، به‌ویژه در تیمار ترکیبی، نشان می‌دهد که این تیمارها توانسته‌اند ظرفیت احیایی سلول را تا حد زیادی بازسازی کنند. به عبارتی تأمین سیستئین احتمالاً از طریق تقویت دسترسی به پیش‌سازهای بیوسنتز گلوتاتیون و تأمین گلوتاتیون برون‌زاد احتمالاً از طریق پشتیبانی مستقیم از سامانه دفاع ردوکسی، به بهبود هم‌ایستایی گلوتاتیون کمک کرده است (Hothorn *et al.*, 2006; Rai, 2023; Zhang *et al.*, 2005).

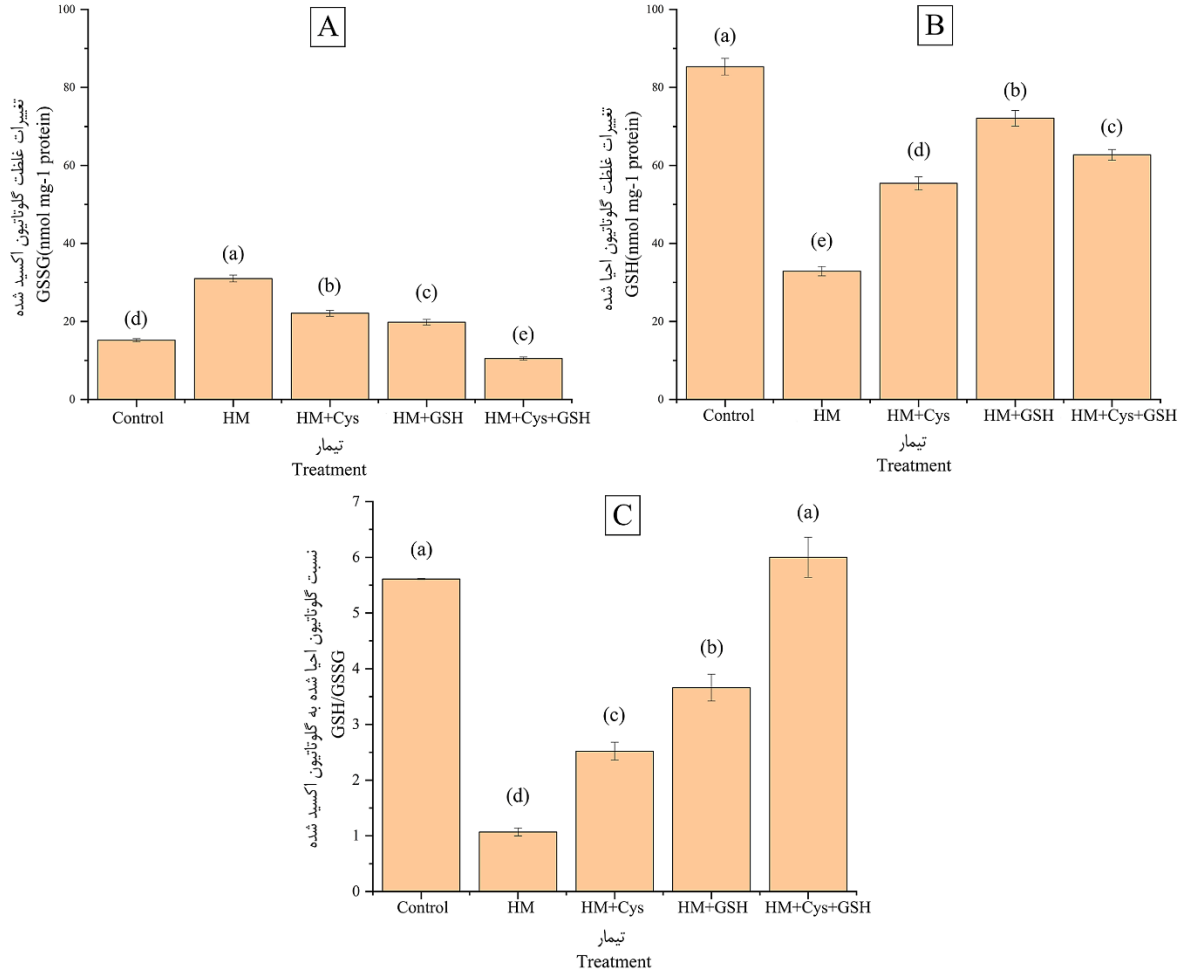
غلظت کادمیم و سرب در ریشه و اندام هوایی و فاکتور انتقال

غلظت هر دو فلز در ریشه و اندام هوایی تحت تأثیر تیمارها قرار گرفت. در تیمار HM، غلظت کادمیم در ریشه و اندام هوایی به‌ترتیب ۱۹/۰ و ۷/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود، در حالی‌که این مقادیر در تیمار HM+Cys به ۱۵/۵ و ۵/۲، در HM+GSH به ۱۴/۲و ۴/۸ و در HM+Cys+GSH به ۱۰/۴ و ۴/۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش یافت. بر اساس $LSD_{0.05}$ معادل ۱/۴ برای Cd ریشه، تیمار ترکیبی به‌طور معنی‌داری کمتر از همه تیمارهای دیگر بود، اما اختلاف بین HM+Cys و HM+GSH برای Cd ریشه معنی‌دار نبود، زیرا ۱/۳ واحد و کمتر از LSD بود. برای Cd اندام هوایی نیز با توجه به $LSD_{0.05}$ برابر ۱/۱، تیمار HM+Cys+GSH به‌طور معنی‌داری کمتر از HM و HM+Cys بود، اما با HM+GSH اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۲).

برای سرب نیز روند مشابهی مشاهده شد. غلظت سرب در ریشه از ۲۵/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم در HM به ۱۹/۸ در HM+Cys، ۱۷/۸ در HM+GSH و ۱۲/۵ در HM+Cys+GSH کاهش یافت و با توجه به $LSD_{0.05}$ برابر ۱/۸، اختلاف بین همه این میانگین‌ها معنی‌دار

1- Glutathione pool

بود. غلظت سرب در اندام هوایی نیز از ۹/۸ در HM به ۷/۵، ۶/۵ و ۵/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم در سه تیمار تیولی کاهش یافت. با این حال، برای Pb اندام هوایی و با $LSD_{0.05}$ برابر ۱/۳، تیمار HM+Cys+GSH فقط نسبت به HM و HM+Cys کاهش معنی‌دار نشان داد و با HM+GSH اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۲). این داده‌ها نشان می‌دهد که تیمارهای تیولی، به‌ویژه تیمار ترکیبی، توانسته‌اند تجمع هر دو فلز را در گیاه کاهش دهند، اما شدت این کاهش در همه اجزا و برای هر دو فلز یکسان نبوده است. کاهش غلظت فلزات در بافت گیاه می‌تواند با کاهش آسیب غشایی، بهبود تعادل ردوکس، و احتمالاً افزایش ظرفیت کمپلکس‌سازی درون‌سلولی مرتبط باشد (Marques, 2025; Wu, Gupta *et al*., 2013 ; 2024).

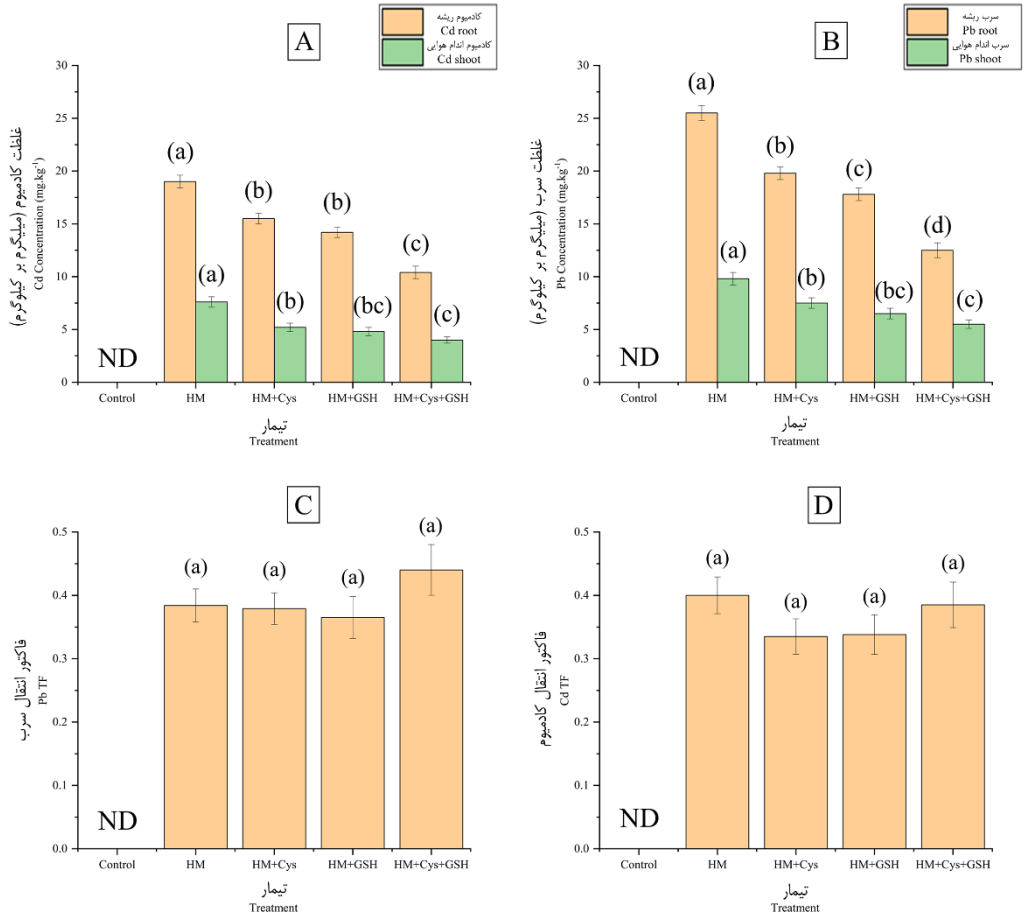


شکل ۱- تغییرات غلظت گلوتاتیون اکسیدشده(A) (GSSG) ، گلوتاتیون احیاشده (B) (GSH) و نسبت GSH/GSSG (C) در گیاه گندم تحت تأثیر تیمارهای مختلف در شرایط تنش فلزات سنگین

ستون‌ها میانگین سه تکرار را نشان می‌دهند و میله‌های خطا نشان‌دهنده خطای استاندارد میانگین هستند (n = ۳). حروف کوچک انگلیسی متفاوت بالای ستون‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار میان میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد هستند؛ ستون‌هایی که دست‌کم یک حرف مشترک دارند، اختلاف معنی‌دار ندارند .HM: تنش هم‌زمان فلزات سنگین؛ Cys: سیستئین؛ GSH: گلوتاتیون احیاشده.

Figure 1- Changes in oxidized glutathione (GSSG) concentration (A), reduced glutathione (GSH) concentration (B), and GSH/GSSG ratio (C) in wheat plants as affected by different treatments under heavy metal stress

Bars represent means of three replicates and vertical error bars indicate the standard error of the mean (n = 3). Different lowercase letters above bars indicate significant differences among treatment means at $P \leq 0.05$; bars sharing at least one letter are not significantly different. HM: combined heavy metal stress; Cys: cysteine; GSH: reduced glutathione



شکل ۲- غلظت کادمیم در ریشه و اندام هوایی (A)، غلظت سرب در ریشه و اندام هوایی (B)، فاکتور انتقال سرب (C) و فاکتور انتقال کادمیم (D) در گیاه گندم تحت تأثیر کاربرد برگی سیستئین و گلوتاتیون در شرایط تنش همزمان فلزات سنگین

ستون‌ها میانگین سه تکرار را نشان می‌دهند و میله‌های خطا نشان‌دهنده خطای استاندارد میانگین هستند (n = ۳). حروف کوچک انگلیسی متفاوت بالای ستون‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار میان میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد هستند؛ ستون‌هایی که دست‌کم یک حرف مشترک دارند، اختلاف معنی‌دار ندا رند .ND :غیرقابل تشخیص؛ HM: تنش همزمان فلزات سنگین؛ Cys: سیستئین؛ GSH: گلوتاتیون احیاشده؛ TF: فاکتور انتقال.

Figure 2- Cadmium concentration in roots and shoots (A), lead concentration in roots and shoots (B), lead transfer factor (C), and cadmium transfer factor (D) in wheat plants as affected by foliar application of cysteine and glutathione under combined heavy metal stress

Bars represent means of three replicates and vertical error bars indicate the standard error of the mean (n = 3). Different lowercase letters above bars indicate significant differences among treatment means at $P \leq 0.05$; bars sharing at least one letter are not significantly different. ND: not detected; HM: combined heavy metal stress; Cys: cysteine; GSH: reduced glutathione; TF: transfer factor.

فاکتور انتقال کادمیم در تیمار HM برابر ۰/۴۰ بود و در تیمارهای HM+Cysو HM+GSH به ۰/۳۴ کاهش یافت، اما در تیمار HM+Cys+GSH به ۰/۳۸ رسید. فاکتور انتقال سرب نیز از ۰/۳۸ در HM به ۰/۳۸ در HM+Cys، ۰/۳۷ در HM+GSH و ۰/۴۴ در HM+Cys+GSH تغییر یافت (شکل ۲). تمام مقادیر TF برای هر دو فلز کمتر از ۰/۵ بودند که نشان می‌دهد انتقال از ریشه به اندام هوایی در همه تیمارها محدود بوده و ریشه نقش سد اصلی در برابر جابه‌جایی این فلزات را ایفا کرده است. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که تنش توأم کادمیم و سرب در خاک آهکی باعث افت رشد، کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی، افزایش آسیب اکسیداتیو و فروپاشی نسبی تعادل ردوکس در گندم شد. تیمارهای تیولی توانستند این اختلالات را تا حدی تعدیل کنند و در بیشتر شاخص‌های اصلی، تیمار HM+Cys+GSH بهترین پاسخ را در میان تیمارهای در شرایط تنش نشان داد.

نتیجه‌گیری

تنش همزمان کادمیم و سرب در خاک آهکی باعث کاهش معنی‌دار رشد و کارایی فتوسنتزی گندم و همزمان موجب تشدید

آسیب اکسیداتیو و برهم‌خوردن تعادل ردوکس سلولی شد. کاهش زیست‌توده اندام هوایی، افت غلظت کلروفیل کل، افزایش مالون‌دی‌آلدئید و هیدروژن پراکسید، و کاهش شدید نسبت GSH/GSSG نشان داد که فشار فلزی اعمال‌شده، سامانه دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه را به‌طور جدی مختل کرده است. محلول‌پاشی برگی سیستئین و گلوتاتیون هر دو توانستند بخشی از آثار زیان‌بار تنش فلزی را تعدیل کنند، اما در مجموع، تیمار توأم سیستئین + گلوتاتیون بهترین پاسخ کلی را در بیشتر صفات اصلی نشان داد. این تیمار بیشترین بازیابی زیست‌توده و غلظت کلروفیل کل را در میان گیاهان در شرایط تنش ایجاد کرد، غلظت MDA و GSSGرا به حداقل رساند، نسبت GSH/GSSG را تا سطحی مشابه شاهد بازگرداند، و کمترین غلظت مشاهده‌شده کادمیم و سرب را در بافت‌های گیاه ثبت کرد. تیمار ترکیبی سیستئین و گلوتاتیون اگرچه در بیشتر صفات پاسخ مطلوب‌تری ایجاد کرد، برتری آن در همه شاخص‌ها یکنواخت و مطلق نبود. در برخی صفات، از جمله شاخص استرس اکسیداتیو و غلظت فلزات در اندام هوایی، تفاوت این تیمار با گلوتاتیون به‌تنهایی در همه موارد معنی‌دار نبود. همچنین، با وجود پایین بودن فاکتور انتقال در همه تیمارها و نقش بازدارنده ریشه در جابه‌جایی فلزات، نتایج این پژوهش بیش از آن‌که مؤید افزایش قطعی تثبیت گیاهی باشد، بیانگر کاهش تجمع فلز و حفظ الگوی انتقال محدود در گیاه گندم است. در مجموع، محلول‌پاشی توأم سیستئین و گلوتاتیون را می‌توان یک راهبرد فیزیولوژیک مؤثر و قابل استفاده برای کاهش آسیب ناشی از تنش توأم کادمیم و سرب در گندم کشت‌شده در خاک آهکی دانست. برای تعمیم این نتایج، انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای، اندازه‌گیری غلظت فلزات در دانه، و بررسی مستقیم شاخص‌های مولکولی و بیوشیمیایی مانند فیتوکلاتین‌ها، فعالیت آنزیم‌های مرتبط با متابولیسم گلوتاتیون و الگوی تفکیک زیرسلولی فلزات ضروری است.

سپاسگزاری

نویسندگان از دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد به‌منظور حمایت از این طرح پژوهشی صمیمانه قدردانی می‌کنند.

References

1. Bolan, N., Srivastava, P., Rao, C.S., Satyanaraya, P., Anderson, G.C., Bolan, S., Nortjé, G.P., Kronenberg, R., Bardhan, S., & Abbott, L.K. (2023). Distribution, characteristics and management of calcareous soils. *Advances in Agronomy*, *182*, 81-130. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2023.06.002
2. Bystricka, J., Kovarovic, J., Musilova, J., Arvay, J., & Harangozo, L. (2019). The quality of contamination of agriculturally used soils by risky metals in southern Slovakia. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, *19*(3.2), 553-560. https://doi.org/10.5593/sgem2019/3.2/s13.072
3. Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1986). Particle-size analysis In A. Klute (Ed.) 2nd ed. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, *5*, 383-411. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15
4. Gheshlaghi, Z., & Kafi, M. (2026). Synergistic cysteine-glutathione foliar application enhances wheat tolerance to cadmium-lead co-stress in calcareous soils: Mechanisms and phytoremediation implications. *Plant Stress*, Article 101234. https://doi.org/10.1016/j.stress.2026.101234
5. Griffith, O.W. (1980). Determination of glutathione and glutathione disulfide using glutathione reductase and 2-vinylpyridine. *Analytical biochemistry*, *106*(1), 207-212. https://doi.org/10.1016/0003-2697(80)90139-6
6. Gulsah, B., Faizan, M., Sultan, H., Alam, P., Albalawi, T., & Ahmad, S. (2025). Hormone–nanoparticle synergy: co-application of melatonin and nano-biochar enhances soybean resilience to arsenic stress via modulation of proline metabolism and oxidative stress markers. *Plant Stress*, 101026. https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.101026
7. Guo, M., Song, W., & Tian, J. (2020). Biochar-facilitated soil remediation: mechanisms and efficacy variations. *Frontiers in Environmental Science*, *8*, 521512. https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.521512
8. Gupta, D.K., Vandenhove, H., & Inouhe, M. (2013). Role of phytochelatins in heavy metal stress and detoxification mechanisms in plants In D. K. Gupta, F. J. Corpas, & J. M. Palma (Eds.). In *Heavy metal stress in plants* (pp. 73-94). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38469-1_4
9. Hassan, R.F., Jeber, F.J., & Kareem, F.T. (2025). Determination of some heavy metals concentrations in green and yellow wheat crops from Iraqi fields: A comparative analysis of heavy metal accumulation. *Environmental Monitoring and Assessment*, *197*(8), Article 522. https://doi.org/10.1007/s10661-025-13981-z
10. Heath, R.L., & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, *125*(1), *189–198*. https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1
11. Hosseinpoor, S., Habibi, S., & Mohammadi, A. (2024). Understanding heavy metal contamination in the vicinity of Lake Urmia, NW Iran: Environmental and health Perspectives. *Heliyon*, *10*(13). https://doi.org/10.1016/

j.heliyon.2024.e34198
12. Hothorn, M., Wachter, A., Gromes, R., Stuwe, T., Rausch, T., & Scheffzek, K. (2006). Structural basis for the redox control of plant glutamate cysteine ligase. *Journal of Biological Chemistry*, *281*(37), 27557-27565. https://doi.org/10.1074/jbc.M602770200
13. Hua, Y.P., Chen, J.F., Zhou, T., Zhang, T.Y., Shen, D.D., Feng, Y.N., & Yue, C.P. (2022). Multiomics reveals an essential role of long-distance translocation in regulating plant cadmium resistance and grain accumulation in allohexaploid wheat (*Triticum aestivum*). *Journal of Experimental Botany*, *73(*22), 7516-7537. https://doi.org/10.1093/jxb/erac364
14. Jung, H.I., Lee, B.R., Chae, M.J., Lee, E.J., Lee, T.G., Jung, G.B., Kim, M.S., & Lee, J. (2020). Ascorbate-mediated modulation of cadmium stress responses: Reactive oxygen species and redox status in *Brassica napus*. *Front Plant Science*, *11*, 586547. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.586547
15. Kang, Y., Qin, H., Wang, G., Lei, B., Yang, X., & Zhong, M. (2024). Selenium nanoparticles mitigate cadmium stress in tomato through enhanced accumulation and transport of sulfate/selenite and polyamines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *72*(3), 1473-1486. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c07504
16. Kopylova, V.S., Boronovskiy, S.E., Nartsissov, Y.R. (2023). Simulation modeling of glutamate cysteine ligase activity. *Biophysics (Russian Federation)*. https://doi.org/10.1134/S0006350923020100
17. Li, H., Li, Z., Huang, L., Mao, X., Dong, Y., Fu, S., Su, R., Chang, Y., & Zhang, C. (2023). Environmental factors influence the effects of biochar on the bioavailability of Cd and Pb in soil under flooding condition. *Water, Air, & Soil Pollution*, *234*(2), 100. https://doi.org/10.1007/s11270-023-06130-0
18. Lichtenthaler, H.K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In *Methods in Enzymology*, (*148*), 350-382. Elsevier. https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1
19. Liu, W., Liu, J., Yang, K., Zhou, Y., Yang, F., Li, C., & Xiong, S. (2025). Insights into the SULTR gene family of *Solanum americanum*: Genome-wide identification, expression profiling, and functional response to cadmium stress. *Plant Stress*, *18*, 101003. https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.101003
20. Lu, Y., Wang, Q. F., Li, J., Xiong, J., Zhou, L.N., He, S.L., Zhang, J.Q., Chen, Z.A., He, S.G., & Liu, H. (2019). Effects of exogenous sulfur on alleviating cadmium stress in tartary buckwheat. *Scientific Reports*, *9*(1), *Article 7397*. https://doi.org/10.1038/s41598-019-43901-4
21. Marques, D.N., Thiengo, C.C., & Azevedo, R.A. (2025). Phytochelatins and cadmium mitigation: Harnessing genetic avenues for plant functional manipulation. *International Journal of Molecular Sciences*, *26*(10), 4767. https://doi.org/10.3390/ijms26104767
22. Rai, G.K., Kumar, P., Choudhary, S.M., Singh, H., Adab, K., Kosser, R., Magotra, I., Kumar, R.R., Singh, M., Sharma, R., Corrado, G., & Rouphael, Y. (2023). Antioxidant potential of glutathione and crosstalk with phytohormones in enhancing abiotic stress tolerance in crop plants. *Plants*, *12*(5), 1133. https://doi.org/10.3390/plants12051133
23. Reynolds, H.L. (1989). Association of official analytical chemists: 1964–1988. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology: Continuation of Residue Reviews*, 109-136. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-7086-4_3
24. Saleem, A., Ur Rahim, H., Khan, U., Irfan, M., Akbar, W., Akbar, Z., & Alatalo, J. (2023). Organic materials amendments can improve NPK availability and maize growth by reducing heavy metals stress in calcareous soil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *21*(3), 2533-2546. https://doi.org/10.1007/s13762-023-05135-w
25. Shang, H., Li, Y., Zhang, Y., Hou, J., Zhao, X., Xu, X., Wu, L., & Li, Q. (2024). Biosynthesized selenium nanoparticles as an effective tool to combat soil metal stresses in rice (*Oryza sativa* L.). *ACS Nano*, *18*(11), *8432–8447*. https://doi.org/10.1021/acsnano.3c10888
26. Six, L., & Smolders, E. (2014). Future trends in soil cadmium concentration under current cadmium fluxes to European agricultural soils. *Science of the Total Environment*, *485*, 319-328. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.109
27. Sun, X., & Yang, Z. (2006). Plant sulfate assimilation and regulation of the activity of related enzymes under cadmium stress. *Zhi wu Sheng li yu fen zi Sheng wu xue xue bao= Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, *32*(1), 9-16.
28. Taghavi, M., Darvishiyan, M., Momeni, M., Eslami, H., Fallahzadeh, R.A., & Zarei, A. (2023). Ecological risk assessment of trace elements (TEs) pollution and human health risk exposure in agricultural soils used for saffron cultivation. *Scientific Reports*, *13*(1), 4556. https://doi.org/10.1038/s41598-023-31681-x
29. Uchimiya, M., Lima, I.M., Klasson, K.T., & Wartelle, L.H. (2010). Contaminant immobilization and nutrient release by biochar soil amendment: roles of natural organic matter. *Chemosphere*, *80*(8), 935-940. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.05.020
30. Vanbuel, I., Iven, V., Depaepe, T., Heleven, M., Jozefczak, M., Smeets, K., Hernández, L.E., Prinsen, E., Van Der Straeten, D., Hendrix, S., & Cuypers, A. (2025). Cadmium-induced ER stress, autophagy and ethylene biosynthesis in leaves and roots of *Arabidopsis thaliana* and their dependence on stress intensity. *Plant Stress*, *18*,

100996. https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.100996
31. Westerman, R.L. (1990). *Soil testing and plant analysis*.
32. Wu, C., Zhang, J., Chen, M., Liu, J., & Tang, Y. (2024). Characterization of a *Nicotiana tabacum* phytochelatin synthase 1 and its response to cadmium stress. *Frontiers in Plant Science*, *15*, Article 1418762. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1418762
33. Zhang, H., Forman, H. J., & Choi, J. (2005). γ-Glutamyl transpeptidase in glutathione biosynthesis. *Methods in enzymology*, *401*, 468-483. https://doi.org/10.1016/S0076-6879(05)01028-1

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

Research Article
Vol. 40, No. 3, Fall. 2026, p. 309-323

Unit Hydrograph Extraction Using Probability Density Functions (Case Study: Samian Watershed)

S. Rezaei Ghasem Gheshlaghi[1], M. Hasanpour Kashani[1*], M.R. Nikpour[1]
1- Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
(*- Corresponding Author Email: m.hkashani@uma.ac.ir)

Received: 25 July 2026
Revised: 17 August 2026
Accepted: 08 September 2026
Available Online: 08 September 2026

How to cite this article:
Rezaei Ghasem Gheshlaghi, S., Hasanpour Kashani, M., & Nikpour, M.R. (2026). Unit hydrograph extraction using probability density functions (case study: Samian Watershed). *Journal of Soil and Wather, 40*(3), 309-323. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jsw.2026.100040.1572

Introduction

A large amount of precipitation is lost annually. Therefore, studying the precipitation-runoff process and predicting runoff are essential in water resources studies and plans, as well as in water engineering discussions. Thus, choosing a model that can predict runoff from rainfall with acceptable accuracy using effective factors seems essential. The aim of this research is to estimate the components of unit hydrographs resulting from several precipitation-runoff events in the Samian Watershed located in Ardabil Province using a nonlinear optimization method along with the application of probability distribution functions.

Materials and Methods

In order to determine the optimal values of the distribution function parameters, the objective function is considered as minimizing the sum of the squares of the deviation between the predicted and actual direct runoff hydrographs. The values of the probability distribution functions parameters are optimized using Mathematica software and nonlinear programming method. Finally, the direct runoff hydrographs are calculated using the effective rainfall hydrographs and the corresponding unit hydrographs, and then compared with the observed direct runoff hydrographs. The performance criteria of mean square error, mean absolute error ,and correlation coefficient are used to examine the ability of the functions in the calibration and testing stages. The classical least squares method is also used to extract the unit hydrographs and its efficiency is compared with the results of the nonlinear optimization model.

Results and Discussion

In the calibration period, for the first event, the Root Mean Square Error (RMSE) and Mean Absolute Error (MAE) of the Gumbel (0.0048 and 0.0042) and Nakagami (0.0134 and 0.0095) functions are higher and their Correlation Coefficients (CC) (0.935 and 0.237, respectively) are also lower than those of the other functions. The lowest errors (0.0021 and 0.0016) and the highest correlation coefficient (0.978) are related to the lognormal distribution. The weakest distribution is the Nakagami distribution with RMSE equal to 0.0134, MAE equal to 0.0095, and CC equal to 0.237. In the case of the second event, the RMSE and MAE errors of the Gumbel (0.0110 and 0.0070) and Nakagami (0.0223 and 0.0293) functions are higher and their correlation coefficients (0.682 and -0.087) are also lower than the other functions. The lowest errors (0.0068 and 0.0056) and the highest correlation coefficient (0.874) are related to the lognormal distribution. The weakest distribution is the Nakagami distribution with RMSE of 0.0223, MAE of 0.0293, and CC of -0.087. In the case of the third event, the performance of all functions is satisfactory due to very low RMSE and MAE values and very high correlation coefficient. However, the errors of the gamma and lognormal functions are slightly higher than the others. Also, Weibull and normal

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)
https://doi.org/10.22067/jsw.2026.100040.1572

distributions show better performance than other distributions based on the values of performance criteria because these distributions show high ability in predicting the ascending and descending branches of the unit hydrograph.

In the test period, considering the average values of the performance functions of the distributions in each event, it can be said that the lognormal distributions (with average RMSE and MAE errors of 0.0134 and 0.01115 and average correlation coefficient of 0.823) and the normal distributions (with average RMSE and MAE errors of 0.0142 and 0.01275 and average correlation coefficient of 0.739) have higher potential in estimating the unit hydrographs of the basin, respectively. The errors of Pearson and Nakagami distributions in both events were higher than the other distributions. The least squares method also had better performance criteria values than all distributions in both events.

Conclusion

In general, according to the results obtained in the calibration and testing periods, it can be concluded that the lognormal distribution is the best distribution for estimating and calculating unit hydrographs (especially in estimating the ascending branch and peak time and discharge) in the Samian Basin. Also, the Pearson and Nakagami functions are among the weakest distributions in estimating the hydrographs of that basin. The least squares method, regardless of its shortcomings, is among the appropriate methods in estimating the unit hydrograph.

Keywords: Least squares, Mathematica software, Nonlinear optimization, Rainfall-runoff event, Unit hydrograph

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۴۰، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵، ص. ۳۲۳-۳۰۹

استخراج هیدروگراف واحد با استفاده از توابع چگالی احتمال (مطالعه موردی: حوضه آبریز سامیان)

سالار رضائی قاسم‌قشلاقی[۱]- مهسا حسنپور کاشانی[۱*]- محمدرضا نیک‌پور[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۷

چکیده

هدف از این تحقیق، برآورد مؤلفه‌های هیدروگراف‌های واحد حاصل از چند رویداد بارش-رواناب در حوضه آبریز سامیان واقع در استان اردبیل با استفاده از روش بهینه‌سازی غیرخطی همراه با کاربرد توابع توزیع احتمال می‌باشد. به‌منظور تعیین بهینه مقادیر پارامترهای توابع توزیع، از نرم‌افزار Mathematica و روش برنامه‌ریزی غیرخطی استفاده شد. در نهایت، هیدروگراف‌های رواناب مستقیم با استفاده از هیتوگراف‌های بارش مؤثر و هیدروگراف‌های واحد متناظر، محاسبه شده و با هیدروگراف‌های رواناب مستقیم مشاهده‌ای مقایسه شدند. از معیارهای عملکرد ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب همبستگی (CC) برای بررسی توانایی توابع احتمال استفاده شد. روش کلاسیک حداقل مربعات نیز برای استخراج هیدروگراف‌های واحد استفاده شده و کارآیی آن با نتایج مدل بهینه‌سازی غیرخطی مقایسه می‌شود. نتایج نشان داد که در دوره آزمون، با در نظر گرفتن مقادیر متوسط توابع عملکرد توزیع‌ها در هر رویداد، توزیع‌های لوگ نرمال (با متوسط خطای RMSE و MAE برابر ۰/۰۱۳۴ و ۰/۰۱۱۱۵ و متوسط CC برابر ۰/۸۲۳) و توزیع نرمال (با متوسط خطای RMSE و MAE برابر ۰/۰۱۴۲ و ۰/۰۱۲۷۵ و متوسط CC برابر ۰/۷۳۹) به‌ترتیب دارای پتانسیل بالا در تخمین هیدروگراف‌های واحد حوضه می‌باشند. خطاهای توزیع‌های پیرسون و ناکاگامی در هر دو رویداد بیشتر از بقیه توزیع‌ها بود. روش حداقل مربعات نیز مقادیر معیارهای عملکرد بهتری از همه توزیع‌ها در هر دو رویداد نشان داد. بطور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که توزیع لوگ نرمال بهترین توزیع برای برآورد هیدروگراف‌های واحد (به‌ویژه در برآورد شاخه بالارونده و زمان و دبی اوج) در حوضه آبریز سامیان می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی غیرخطی، حداقل مربعات، رویداد بارش-رواناب، نرم‌افزار Mathematica، هیدروگراف واحد

مقدمه

ایران با میانگین بارش سالانه حدود ۲۲۰ میلی‌متر از جمله کشورهای خشک دنیا محسوب می‌شود که سالانه مقدار زیادی از این بارش نیز از دسترس خارج می‌شود. از این‌رو، مطالعه فرآیند بارش-رواناب و پیش‌بینی رواناب جزو موارد ضروری در مطالعات و طرح‌های منابع و مهندسی آب می‌باشد. پیش‌بینی رواناب می‌تواند در مدیریت صحیح طرح‌های کشاورزی، بهره‌برداری از مخازن سدها، سیستم هشداردهنده سیل و کاهش خسارات ناشی از سیلاب حائز اهمیت باشد. بین پدیده بارش و رواناب رابطه غیرخطی حاکم بوده و خصوصیات فیزیوگرافی و اقلیمی حوضه آبریز نیز بر روی این رابطه بسیار تأثیرگذار است، از این‌رو، پیش‌بینی رواناب (سیلاب) یک مسأله پیچیده‌ای می‌باشد. لذا، انتخاب مدلی که بتواند با استفاده از عوامل تأثیرگذار، رواناب حاصل از بارندگی را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کند، امر مهمی به نظر می‌رسد.

هیدروگراف واحد یک نوع تابع تبدیل برای مدل‌سازی فرآیند بارش-رواناب است و می‌توان آن را به‌عنوان تابع پاسخ ضربه واحد یک

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

https://doi.org/10.22067/jsw.2026.100040.1572

سیستم خطی تعریف نمود. بررسی هیدروگراف واحد حوضه، امکان محاسبه دبی حداکثر سیلاب، حجم سیلاب، ذخیره حوضه، فرسایش خاک، انجام روندیابی رودخانه و مخزن، طراحی ابعاد سازه‌های آبی مانند سرریز سدها، کانال‌های فاضلاب‌رو، سازه‌های مهار سیلاب و نیز محاسبه میزان تأثیر ساماندهی و اصلاح آبراهه‌ها به‌منظور کنترل سیل روی پاسخ حوضه را فراهم می‌آورد (Mahdavi, 2002). کاربرد مهم هیدروگراف واحد، برآورد هیدروگراف رواناب مستقیم از هیتوگراف بارش مازاد است. محققان زیادی با استفاده از روابط پیچشی اقدام به تهیه هیدروگراف واحد می‌کنند. این روابط شامل روش تقریب‌های متوالی، حداقل مربعات و روش بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی می باشد. ایراد این روش‌ها این است که در آنها تعداد مجهولات مسأله برابر با تعداد مؤلفه‌های هیدروگراف واحد است که در صورت بزرگ بودن زمان پایه هیدروگراف، استفاده از این روش‌ها به‌دلیل افزایش تعداد مجهولات مساله (مؤلفه‌های هیدروگراف واحد) مشکل خواهد بود. بمنظور حل این مشکل، امروزه استفاده از توابع توزیع احتمالاتی در رابطه پیچشی به جای هیدروگراف واحد توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. توابع توزیع احتمالاتی ویژگی‌های مشترکی با هیدروگراف‌های واحد دارند از جمله اینکه سطح زیر منحنی در آنها برابر واحد بوده و نیز نوسانات و مؤلفه‌های آنها همواره مثبت می‌باشد. بنابراین، این روش هیچ‌گونه محدودیت کاربردی ندارد. مزیت روش مذکور این‌است که در آن تعداد مجهولات برابر تعداد پارامترهای توزیع احتمالاتی است و به تعداد نوسانات یا مؤلفه‌های هیدروگراف رواناب مستقیم بستگی ندارد (Bhattacharjiya, 2004). در این خصوص نیز مطالعات گسترده‌ای انجام یافته است.

اورتن (Overton, 1968) از روش حداقل مربعات برای تعیین هیدروگراف‌های واحد از رگبارهای مرکب در پنج حوضه استفاده نمود. نتایج نشان دادند که کارآیی این روش در چهار حوضه کوچک قابل قبول بوده ولی در حوضه پنجم، نوسانات زیادی در مؤلفه‌های هیدروگراف‌های واحد محاسبه شده نشان داد. دوگ و گاروی (Dooge & Garvey, 1970) چهار روش تحلیل هارمونیک، چندجمله‌ای میکسنر، حداقل مربعات و مدل‌های ناش را مقایسه کرده و نتیجه گرفتند که روش حداقل مربعات برای داده‌های بدون خطا بهترین و در حالتی که در داده‌ها خطا وجود دارد، بدترین روش است. پراساد و همکاران (Prasad *et al.*, 1999)، با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی، تئوری هیدروگراف واحد و تئوری نفوذ به برآورد بهینه میزان تلفات باران و هیدروگراف واحد حوضه‌های ویلزکریک و شوال کریک پرداختند و نتایج حاصل را با مدل برنامه‌ریزی غیرخطی مقایسه کردند. نتایج بیان‌گر توانایی بالای مدل خطی بود. باتاچارجیا (Bhattacharjiya, 2004)، با استفاده از برخی توابع توزیع احتمال مختلف نظیر توزیع گاما و توزیع لوگ نرمال در رابطه پیچشی بارش–رواناب در حوضه رودخانه پوتوماک شمالی مدل بهینه‌سازی غیرخطی را توسعه دادند و با استفاده از الگوریتم ژنتیک نیز پارامترهای بهینه توزیع‌ها را محاسبه نموده و نتایج را با مدل برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی کلاسیک مقایسه کردند. نتایج عملکرد خوب مدل‌های برنامه-ریزی خطی و غیرخطی کلاسیک را نسبت به توزیع‌ها نشان داد. با این‌حال، نتایج توزیع‌های گاما و لوگ نرمال قابل مقایسه با نتایج دو مدل مذکور بود که بدلیل کمتر بودن تعداد پارامترهای قابل محاسبه آن‌ها و تعداد محدودیت‌ها، توزیع گاما را برای برآورد سریع هیدروگراف واحد آن حوضه پیشنهاد نمودند. صادقی‌طبس و همکاران (Sadeghi Tabas *et al.*, 2014)، توانایی الگوریتم‌های هوشمند بهینه‌سازی ازدحام ذرات، تکامل تصادفی جوامع، ترکیب الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات و جهش ترکیبی قورباغه را در تهیه بهینه هیدروگراف واحد با استفاده از توابع توزیع احتمال گاما، لوگ نرمال و معکوس گاوس در حوضه آبریز کامه بررسی نمودند. با توجه به نتایج، تابع توزیع لوگ‌نرمال کارایی زیادی نسبت به بقیه توابع توزیع در شکل و دبی اوج هیدروگراف داشت. همچنین، الگوریتم‌های ازدحام ذرات و ژنتیک دقت بالاتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها در واسنجی توابع توزیع احتمال نشان دادند. قربانی و همکاران (Ghorbani *et al.*, 2017)، یک مدل بهینه‌سازی غیرخطی برای تبدیل هیدروگراف واحد به یک تابع احتمال توسعه دادند و پتانسیل شش تابع گامای دو پارامتری، گامبل دو پارامتری، نرمال و لوگ نرمال دو پارامتری، پیرسون سه پارامتری و ویبول دو پارامتری را در حوضه آبریز لیقوان در ایران بررسی کردند. پارامترهای توزیع احتمال با استفاده از روش بهینه‌سازی حداقل مربعات غیرخطی به دو روش تعیین شدند: (۱) بهینه‌سازی با برنامه‌نویسی در محیط متمتیکا و (۲) بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک. در نهایت، نتایج با نتایج به دست آمده با روش حداقل مربعات خطی کلاسیک مقایسه شدند. نتایج نشان‌دهنده قابلیت و عملکرد قابل مقایسه دو روش غیرخطی بود. توزیع گاما و پیرسون بهترین توزیع‌ها در حفظ مؤلفه‌های بالارونده و پایین-رونده هیدوگراف‌های واحد بودند. توزیع لوگ نرمال توانایی بالایی در پیش‌بینی جریان پیک و زمان پیک هیدروگراف واحد نشان داد. همچنین، روش بهینه‌سازی غیرخطی از روش حداقل مربعات خطی بهتر عمل نکرد اما قابل مقایسه بود. نقیبی و همکاران (Naghibi *et al.*, 2018)، توانایی توابع احتمالاتی گاما، بتا، کای اسکوئر و ویبول را برای استخراج هیدروگراف سیل در ایران با استفاده از ۱۴ رویداد بارش–رواناب بررسی نمودند. در نهایت، مشخص گردید که سه توزیع گاما، کای اسکوئر و ویبول در پیش‌بینی دبی اوج عملکرد رضایت‌بخشی داشتند. در تخمین زمان اوج نیز سه توزیع گاما، کای اسکوئر و بتا نتایج خوبی نشان دادند. بطور کلی، توزیع گاما نسبت به بقیه توابع عملکرد موفقیت‌آمیزی در استخراج هیدرروگراف سیل نشان داد. لی و کیدان (Li & Cidan, 2020)، به استخراج هیدروگراف واحد با استفاده از تابع احتمال گاما و بهینه‌سازی پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک در دو حوضه پرداختند و در نهایت با استفاده از روش تکرار کولینس

مؤلفه‌های هیدروگراف واحد را محاسبه کردند. نتایج حاصل، عملکرد و دقت بالای روش بکار برده شده را نشان داد.

با توجه به مطالعات بیان شده، می‌توان دریافت که مطالعات نسبتا کمی در رابطه با کاربرد توزیع‌های احتمالاتی برای برآورد هیدروگراف واحد صورت گرفته است. همچنین، نتایج رضایت‌بخشی از استفاده از این توابع در مطالعات انجام شده حاصل گردیده است. بنابراین، در این پژوهش نیز از توابع احتمالاتی آماری نظیر توزیع نرمال، لوگ نرمال و غیره در برآورد و تعیین هیدروگراف‌های واحد حوضه آبریز سامیان اردبیل استفاده می‌شود. در واقع، نوآوری پژوهش حاضر در به‌کارگیری توابع چگالی احتمال در چارچوب یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی برای استخراج هیدروگراف واحد و تعیین پارامترهای بهینه توابع توزیع، با استفاده از داده‌های بارش–رواناب حوضه آبریز سامیان است. در این روش، پارامترهای توابع توزیع با حل یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی تعیین شده و عملکرد توابع مختلف با روش کلاسیک حداقل مربعات مقایسه می‌شود.

با وجود مزایای روش پیشنهادی، پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی نیز همراه است. از جمله محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به محدود بودن تعداد رویدادهای بارش–رواناب با داده‌های تاریخی قابل اعتماد در حوضه مورد مطالعه و تأثیر خطاهای احتمالی اندازه‌گیری بارش و رواناب و جداسازی جریان پایه بر استخراج هیدروگراف واحد اشاره کرد. همچنین، نتایج حاصل از کاربرد توابع توزیع احتمال در این پژوهش به شرایط حوضه آبریز سامیان وابسته بوده و تعمیم آن به سایر حوضه‌ها نیازمند بررسی و ارزیابی بیشتر است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سامیان یکی از زیرحوضه‌های حوضه آبریز قره‌سو (دره‌رود) است که شامل مرکز استان اردبیل و شهرستان‌های مهم آن یعنی نمین، نیر و سرعین می‌باشد. خروجی این حوضه در شمال شرقی حوضه و در نزدیکی روستای سامیان است که ایستگاه هیدرومتری سامیان در آن‌جا واقع شده است. محدوده مطالعاتی در بالادست رودخانه قره‌سو قرار دارد که از غرب به دامنه‌های کوه سبلان و از شرق به ارتفاعات مشرف به استان گیلان محدود می‌شود. این منطقه از لحاظ طول و عرض جغرافیایی محدود به مختصات ۰″ ۵۵′ ۳۷° تا ۰″ ۰۰′ ۳۹° طول شرقی و ۰″ ۵۰′ ۴۷° تا ۰″ ۵۵′ ۴۸° عرض شمالی است. مساحت حوضه آبریز سامیان حدود ۴۰۰۴ کیلومتر مربع است و حداقل و حداکثر ارتفاع آن برابر با ۱۲۹۰ و ۴۷۹۰ متر از سطح دریا می‌باشد. (شکل ۱). رودخانه قره‌سو از شاخه‌های اصلی رود ارس می‌باشد که از ارتفاعات تالش سرچشمه گرفته و در مسیر خود با عبور از دشت اردبیل، آب‌های جاری این منطقه از جمله بالیخلی‌چای را جمع‌آوری نموده و همراه با دره‌رود به رود مرزی ارس و سپس به دریاچه خزر می‌ریزد. طول آبراهه اصلی این رودخانه برابر ۲۸۵ کیلومتر و با آبدهی سالانه ۵۵۴ میلیون متر مکعب در خروجی حوضه از پرآب‌ترین رودخانه استان اردبیل می‌باشد. طول آبراهه اصلی واقع در حوضه آبریز سامیان نیز حدود ۱۰۴ کیلومتر می‌باشد.

در این مطالعه داده‌های هیدرومتئورولوژی شامل دبی و بارش در مقیاس ساعتی مربوط به پنج رویداد بارش–رواناب از ایستگاه سامیان طی سال‌های ۱۳۷۴–۱۳۷۳ مورد استفاده قرار گرفتند که این داده‌ها از شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل اخذ شدند. سپس، هیتوگراف‌های بارش مازاد و هیدروگراف‌های رواناب مستقیم آن‌ها محاسبه گردید (شکل ۲). با توجه به شکل ۲، در شاخه پایین‌رونده همه هیدروگراف‌ها غیر از هیدروگراف مربوط به ۴ خرداد نوساناتی مشاهده می‌شود که می‌تواند به‌دلیل خطای اندازه‌گیری داده‌های بارش– رواناب آن رویدادها، خطای جداسازی جریان پایه، و یا یکنواخت نبودن بارش در مکان و زمان باشد.

روش حداقل مربعات

روش حداقل مربعات بر مبنای کمینه نمودن مجموع مربعات تفاضل‌های بین مقادیر هیدروگراف مشاهده شده و هیدروگراف محاسبه شده برای هر هیدروگراف واحد لحظه‌ای است. این روش اولین بار توسط اشنایدر (Snyder, 1955; Snyder, 1961) مورد استفاده قرار گرفته و از آن پس محققان متعددی از آن استفاده کردند (Ramaseshan *et al.*, 1973; Mays & Coles, 1980; Singh, 1982). با استفاده از روش اشنایدر می‌توان معادله پیچشی را به شکل ماتریسی نوشت:

$$[Q] = [I][h] \qquad (۱)$$

که در آن، ماتریس Q مؤلفه‌های هیدروگراف رواناب مستقیم (میلی‌متر بر ساعت)، I مؤلفه‌های هیتوگراف بارش مازاد (میلی‌متر) و h مؤلفه‌های هیدروگراف واحد (میلی‌متر بر ساعت بر میلی‌متر) می‌باشد. شکل گسترده معادله فوق را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_p \end{bmatrix}_{p\times 1} = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 & 0 & & \cdots & 0 \\ I_2 & I_1 & 0 & 0 & & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & I_{n-1} & \cdots & I_{m-1} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & I_m \end{bmatrix}_{p\times n} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \end{bmatrix}_{n\times 1} \qquad (۲)$$

که در آن، n تعداد مؤلفه‌های هیدروگراف واحد، m تعداد مؤلفه‌های بارش مازاد و p تعداد مؤلفه‌های هیدروگراف رواناب مستقیم است که رابطه $p=m+n-1$ بین آنها برقرار می‌باشد. با توجه به سیستم فوق، ملاحظه می‌شود که $m+n-1$ معادله برای محاسبه n مجهول وجود دارد. بنابراین، تعداد معادلات اضافی $m-1$ است. از روش حداقل مربعات

برای کاهش تعداد معادلات به n و حصول یک $[h]$ پایدار می‌توان استفاده کرد (Najafi, 2002). در نهایت، ماتریس $[h]$ بدست می‌آید:

$$[h] = \left[[I]^T[I]\right]^{-1}[I]^T[Q] \quad (۳)$$

مدل برنامه‌ریزی غیرخطی

در این پژوهش، از توابع چگالی احتمال برای استخراج هیدروگراف واحد استفاده می‌گردد. در این صورت، با وارد کردن معادلات توابع چگالی احتمال در معادله پیچشی (۱)، تابع هدف مساله، غیرخطی می‌شود و در نتیجه مسأله بهینه‌سازی به یک مساله غیرخطی تبدیل می‌گردد. تابع هدف (E) در اینجا نیز حداقل کردن جمع مربعات خطای بین هیدروگراف‌های رواناب مستقیم مشاهداتی و برآورد شده تعریف می‌شود:

$$E = \sum_{i=1}^{p} {e_i}^2 \quad (۴)$$

$$e_i = Q_i - \sum_{m=1}^{i\geq m} I_m h_{i-m+1} \qquad i = 1, 2, \cdots, p \quad (۵)$$

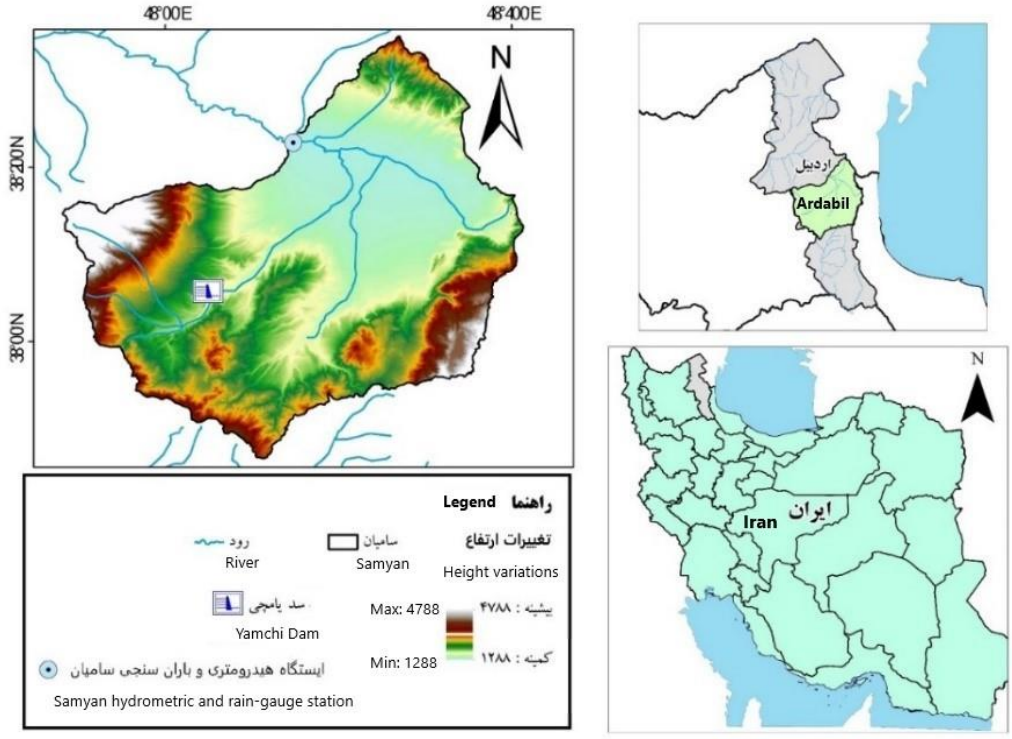
که در آن، e_i خطای بین i امین مؤلفه هیدروگراف‌های رواناب مستقیم مشاهداتی و برآورد شده، Q_i امین مؤلفه هیدروگراف‌های رواناب مستقیم مشاهداتی، I_m امین پالس بارش مازاد و $f(x) =$ h_{i-m+1} که $f(x)$ تابع توزیع احتمالی می‌باشد. برای تابع هدف دو محدودیت در نظر گرفته شد: (۱) مساحت زیر منحنی هیدروگراف واحد برابر واحد باشد، (۲) مؤلفه‌های هیدروگراف واحد مثبت باشند:

$$1-\Delta t \sum_{i=1}^{p-m+1} h_i = 0 \qquad i = 1,2,3,\ldots, p-m+1 \quad (۶)$$
$$h_i \geq 0$$

در این روش، تعداد مجهولات برابر تعداد پارامترهای توابع توزیع احتمالاتی مربوطه می‌باشد.

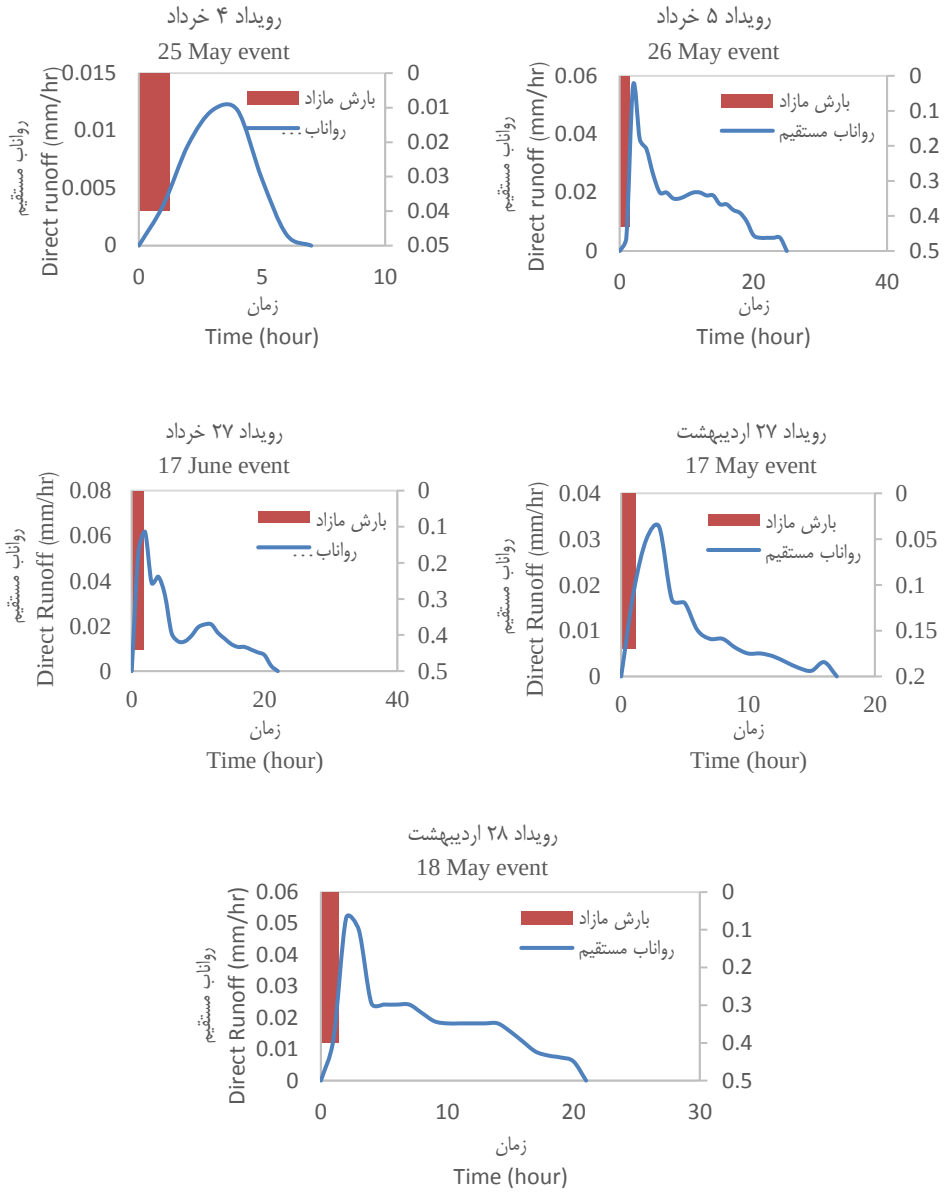
توابع توزیع احتمالاتی

به‌دلیل تشابهات متعدد توزیع‌های احتمالاتی با خصوصیات هیدروگراف واحد، استفاده از توابع توزیع احتمالاتی در توسعه هیدروگراف واحد حوضه گسترش زیادی پیدا کرده است. انتخاب توابع توزیع احتمال مورد استفاده در این پژوهش بر اساس مطالعات پیشین در زمینه کاربرد توابع توزیع احتمال در استخراج هیدروگراف واحد انجام شد. در جدول ۱، به معرفی توابع توزیع‌های احتمال بکار رفته در این تحقیق پرداخته شده است.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

Figure 1- Location of the study area



شکل ۲– رویدادهای بارش-رواناب سال آبی ۱۳۷۴-۱۳۷۳ حوضه آبریز سامیان

Figure 2– Rainfall-runoff events in 1994-1995 in the Samian Watershed

معیارهای ارزیابی مدل‌های تحقیق

جهت بررسی عملکرد هر یک روش‌های حداقل مربعات و توابع توزیع احتمال در تعیین هیدروگراف‌های واحد، علاوه بر مقایسه چشمی نمودارهای هیدروگراف‌های رواناب مستقیم محاسباتی و مشاهداتی، از سه معیار عملکرد زیر استفاده می‌گردد:

جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) (Rai *et al.*, 2010):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{e_i} - Q_{o_i}\right)^2}{n}} \quad (۷)$$

میانگین خطای مطلق (MAE) (Xia *et al.*, 1999):

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|Q_{e_i} - Q_{o_i}\right| \quad (۸)$$

ضریب همبستگی (CC) (Dawson et al., 2002):

$$CC=\sum_{i=1}^{n}\frac{[(Q_o)_i-(\overline{Q}_o)][(Q_e)_i-(\overline{Q}_e)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}[(Q_o)_i-(\overline{Q}_o)]^2\sum_{i=1}^{n}[(Q_e)_i-(\overline{Q}_e)]^2}} \quad (۹)$$

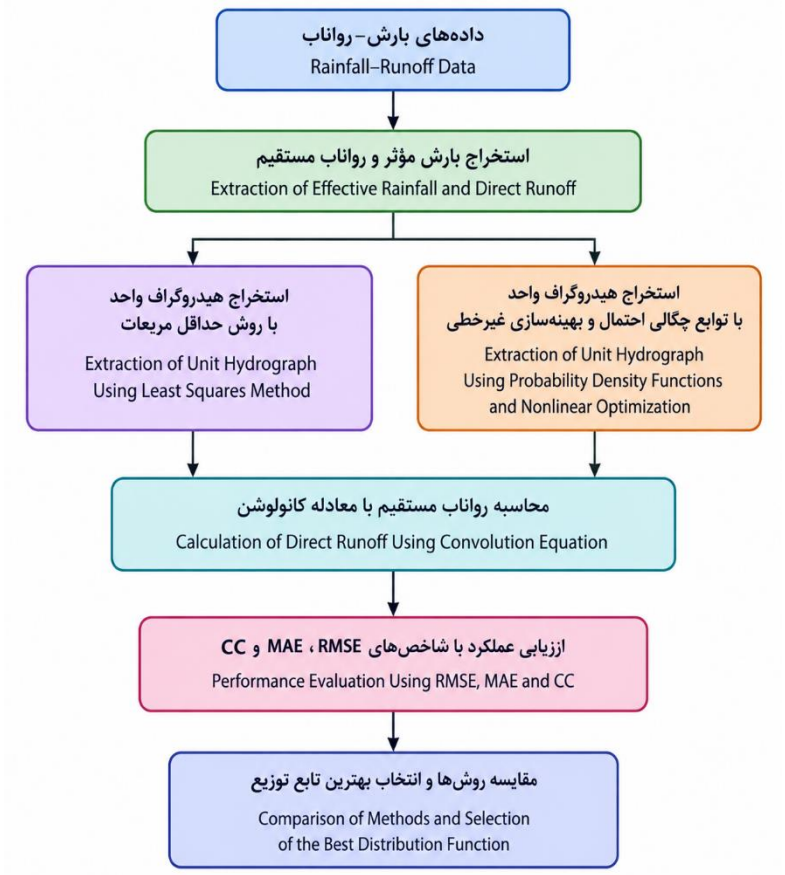
که در آنها Q_{o_i} و Q_{e_i} به‌ترتیب i امین مؤلفه هیدروگراف رواناب مستقیم مشاهداتی و محاسبه شده و n تعداد مؤلفه‌های هیدروگراف رواناب مستقیم است. مقادیر معیارهای RMSE و MAE بین صفر تا بی‌نهایت تغییر می‌کند که هر چقدر مقدار آنها به صفر نزدیک‌تر باشد، بیان‌گر اختلاف کمتر مقادیر دبی‌های محاسباتی از مشاهداتی و در نتیجه قابلیت زیاد مدل در تخمین مؤلفه‌های هیدروگراف رواناب مستقیم می‌باشد. معیار ضریب همبستگی میزان وابستگی مقادیر دبی-های مشاهداتی و محاسباتی را بیان می‌کند. مقدار آن بین منهای یک تا مثبت یک تغییر می‌کند که هر چقدر مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد بیان‌گر رابطه خطی مثبت و قوی بین دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی، و در نتیجه عملکرد بهتر مدل می‌باشد. مراحل انجام مطالعه حاضر به طور خلاصه در شکل ۳ ارائه شده است.

جدول ۱- توابع توزیع احتمالی بکار برده شده در این تحقیق

Table 1- Probability distribution functions used in this research

توزیع احتمالی Probability distribution	فرمول Formula	پارامترهای توزیع Distribution parameters
نرمال Normal (Rao *et al*., 2000)	$f(x)=\left(1/(\beta\sqrt{2\pi})\right)\exp\left[-(x-\alpha)^2/(2\beta^2)\right]$, $-\infty<x<+\infty$	$\alpha=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i=\overline{x}$ $\beta=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\alpha)^2}{n}}$
لوگ نرمال Log-Normal (Nadarajah, 2007)	$f(x)=\left(1/(x\beta\sqrt{2\pi})\right)\exp\left[-(\ln x-\alpha)^2/(2\beta^2)\right]$ $x>0$, $\beta>0$ $-\infty<\alpha<\infty$	$\alpha=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\ln x_i$ $\beta=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\ln x_i-\alpha)^2}{n}}$
گاما Gamma (Bhattacharjya, 2004)	$f(x)=\frac{x^{\beta-1}}{\alpha^{\beta}\Gamma(\beta)}\exp\left(-\frac{x}{\alpha}\right)$ $x>0$, $\beta>0$, $\alpha>0$	$\alpha\beta=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i$ $\alpha^2\beta^2+\beta\alpha^2=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i^2$
گامبل Gumbel (Gumbel, 1960)	$f(x)=\frac{1}{\beta}\exp\left[-\exp\left(+\frac{x-\alpha}{\beta}\right)+\frac{x-\alpha}{\beta}\right]$	$\alpha=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i-0.5772157\beta$ $\beta=0.7797\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2}{n}}$
پیرسون Pearson (Rao & Hamed, 2000)	$f(x)=\frac{1}{\beta\Gamma(\alpha)}\left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1}e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)}$, $x>\gamma$	$\alpha=\frac{4\left(\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2\right)^3}{n\left(\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^3\right)^2}$ $\gamma=\overline{x}-\alpha\beta$ $\beta=\sqrt{\frac{1}{n\alpha}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2}$
ویبول Weibull (Bhunya *et al*., 2007)	$f(x)=\frac{\beta x^{\beta-1}}{\alpha^{\beta}}\exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}\right]$ $x>0, \alpha>0, \beta>0$	$\alpha\Gamma\left(\frac{1}{\beta}+1\right)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i$ $\alpha^2\left[\Gamma\left(1+\frac{2}{\beta}\right)-\Gamma^2\left(1+\frac{1}{\beta}\right)\right]=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2$
ناکاگامی Nakagami (Rai *et al*., 2010)	$f(x)=\frac{2\alpha^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)\beta^{\alpha}}x^{2\alpha-1}\exp\left[-\frac{\alpha}{\beta}x^2\right]$ $x>0, \alpha\geq 0.5,$ $\beta>0$	$\alpha=\frac{E^2[x^2]}{\sigma[x^2]}$ $\beta=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x^2$

توجه: x متغیر تصادفی، $\overline{x}$ میانگین، x_i i امین متغیر تصادفی، n تعداد داده‌ها، α و β به‌ترتیب پارامترهای مکان و شکل، Γ تابع گاما، E امید ریاضی و σ انحراف معیار هستند.



شکل ۳- فلوچارت مراحل انجام مطالعه حاضر

Figure 3- Flowchart of the steps of conducting the present study

نتایج و بحث

همانطور که گفته شد، آمار و اطلاعات مربوط به پنج رویداد بارش – رواناب شامل اطلاعات کاغذهای باران‌نگار ثبات در ایستگاه‌های باران‌سنجی و لیمنوگراف مربوط به رواناب در ایستگاه هیدرومتری سامیان واقع در خروجی حوضه آبریز سامیان از سازمان آب منطقه‌ای استان اردبیل تهیه گردید. برای محاسبه هیتوگراف بارش مازاد با فواصل زمانی یک ساعته هر یک از رویدادهای بارش–رواناب مقدار شاخص نفوذ (φ) از هیتوگراف‌های بارش کسر شد. همچنین، مؤلفه‌های هیدروگراف‌های رواناب مستقیم با کسر کردن دبی پایه ثابت از مؤلفه-های هیدروگراف سیلاب (رواناب) حاصل شد. در این پژوهش، سعی شده است از بارش‌هایی که در فصل بهار اتفاق افتاده‌اند استفاده شود زیرا در این فصل پوشش گیاهی به‌طور کامل رشد نکرده است، و در نتیجه تأثیر کمتری بر روی میزان رواناب خواهد داشت. با این‌حال، به دلیل کوهستانی بودن منطقه، ذوب شدن برف‌ها در این فصل بر خصوصیات هیدروگراف‌ها و رواناب‌ها می‌تواند تأثیرگذار باشد.

واسنجی مدل برنامه‌ریزی غیرخطی در محیط *Mathematica*

جهت واسنجی و ارزیابی کارایی شش تابع چگالی احتمال (نرمال دو پارامتری، لوگ نرمال دو پارامتری، گامبل دو پارامتری، گامای دو پارامتری، ویبول دو پارامتری، پیرسون سه پارامتری و ناکاگامی دو پارامتری) در استخراج بهینه هیدروگراف‌های واحد، از پنج رویداد منتخب بارش–رواناب حوضه آبریز سامیان، ۶۰ درصد یا سه رویداد (رویداد ۲۷ اردیبهشت، ۲۸ اردیبهشت و ۴ خرداد) برای واسنجی مدل غیرخطی و ۴۰ درصد یا دو رویداد مابقی (رویداد ۵ و ۲۷ خرداد) برای آزمون آن در نظر گرفته شدند. مدل بهینه‌سازی غیرخطی در واقع یک مساله معکوس است که مقادیر بهینه پارامترهای توزیع احتمالاتی را بر اساس حداقل نمودن اختلاف بین هیدروگراف رواناب مستقیم مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده در دوره واسنجی برآورد می‌کند. مقادیر پارامترهای توزیع‌های احتمالاتی با استفاده از برنامه‌نویسی در نرم‌افزار *Mathematica* برای هر رویداد بدست آمد. در ادامه، هیدروگراف‌های واحد یک ساعته هر رگبار با روش حداقل مربعات نیز با برنامه‌نویسی در *Mathematica* بدست آمدند که در شکل ۴ هیدروگراف‌های واحد حاصل از هر دو روش نشان داده شده‌اند. پس از تعیین هیدروگراف‌های

واحد، با استفاده از رابطه پیچشی بارش–رواناب و با در اختیار داشتن هیتوگراف‌های بارش مازاد، هیدروگراف‌های رواناب مستقیم از طریق حاصل‌ضرب آن‌ها حاصل شدند (شکل ۵).

با توجه به اینکه هیدروگراف واحد مشاهده‌ای مستقلی در دسترس نیست، به‌منظور مقایسه هیدروگراف‌های واحد حاصل از توابع احتمالاتی، هیدروگراف واحد به‌دست‌آمده از روش حداقل مربعات به‌عنوان روش مقایسه‌ای در نظر گرفته شد. همانطور که گفته شد نوسانات و خطاهایی در شاخه پایین‌رونده هیدروگراف‌های رواناب مستقیم همه رویدادها (غیر از رویداد ۴ خرداد) وجود دارد که می‌تواند باعث افزایش خطای محاسباتی مدل‌ها گردد. شکل ۴ نشان می‌دهد که هیچکدام از توابع نوسانات انتهایی ندارند. در رویداد ۴ خرداد، همه توابع دبی پیک و زمان پیک را با دقت بالایی برآورد کردند. همچنین، عملکرد آنها در حفظ شکل هیدروگراف مشاهداتی (حداقل مربعات) تقریبا مشابه و قابل قبول بود. برای رویداد ۲۷ اردیبهشت، همه توابع (غیر از توزیع ناکاگامی) موفق به تخمین صحیح زمان پیک شدند ولی دبی پیک توزیع لوگ نرمال به مقدار مشاهداتی نزدیک‌تر است. همه توزیع‌ها شاخه بالارونده را به‌خوبی شبیه‌سازی نموده ولی در مورد شاخه پایین‌رونده همه توزیع‌ها غیر از توزیع نرمال، گامبل و ناکاگامی عملکرد موفق‌تری دارند. برای رویداد ۲۸ اردیبهشت، همه توزیع‌ها در تخمین زمان اوج و شاخه بالارونده هیدروگراف عملکرد نسبتا خوبی دارند. با این‌حال، فقط دبی پیک توزیع لوگ نرمال اختلاف کمتری از مقدار واقعی دارد. عملکرد همه توابع غیر از توزیع ناکاگامی در برآورد شاخه پایین‌رونده نسبتا مشابه و بدون نوسان می‌باشد. سطح زیر منحنی توزیع ناکاگامی بطور محسوسی کمتر از سایر توزیع‌ها در رویدادهای ۲۷ و ۲۸ اردیبهشت است که بیان‌گر عملکرد ضعیف این تابع در شبیه‌سازی هیدروگراف واحد است ولی از آنجایی‌که این توزیع در رویداد ۴ خرداد نتیجه رضایت بخشی داشته است، می‌توان عملکرد ضعیف آن را در دو رویداد دیگر به خطاهای اندازه‌گیری داده‌ها و حساس بودن این تابع به وجود خطاها ربط داد.

به‌منظور ارزیابی عملکرد هیدروگراف‌های واحد حاصل از روش‌های مختلف و کارآیی توابع احتمال، هیدروگراف‌های رواناب مستقیم محاسباتی با هیدروگراف‌های رواناب مستقیم مشاهده‌ای نیز مقایسه شدند. نتایج مشابهی را می‌توان از شکل ۵ در مورد عملکرد توزیع‌های آماری در تعیین هیدروگراف‌های رواناب مستقیم گرفت که از حاصل‌ضرب مقادیر بارش مازاد در هیدروگراف‌های واحد مربوطه بدست آمده‌اند. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌گردد، روش حداقل مربعات با دقت بسیار بالایی هیدروگراف رواناب مستقیم و در نتیجه هیدروگراف واحد را محاسبه کرده است. در کل می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که توزیع ناکاگامی و گامبل جزو ضعیف‌ترین توابع و توزیع لوگ نرمال جزو کارآمدترین توابع در شبیه‌سازی هیدروگراف‌های واحد می‌باشند. روش حداقل مربعات نیز با دقت بالایی قادر به برآورد هیدروگراف رواناب مستقیم بوده است.

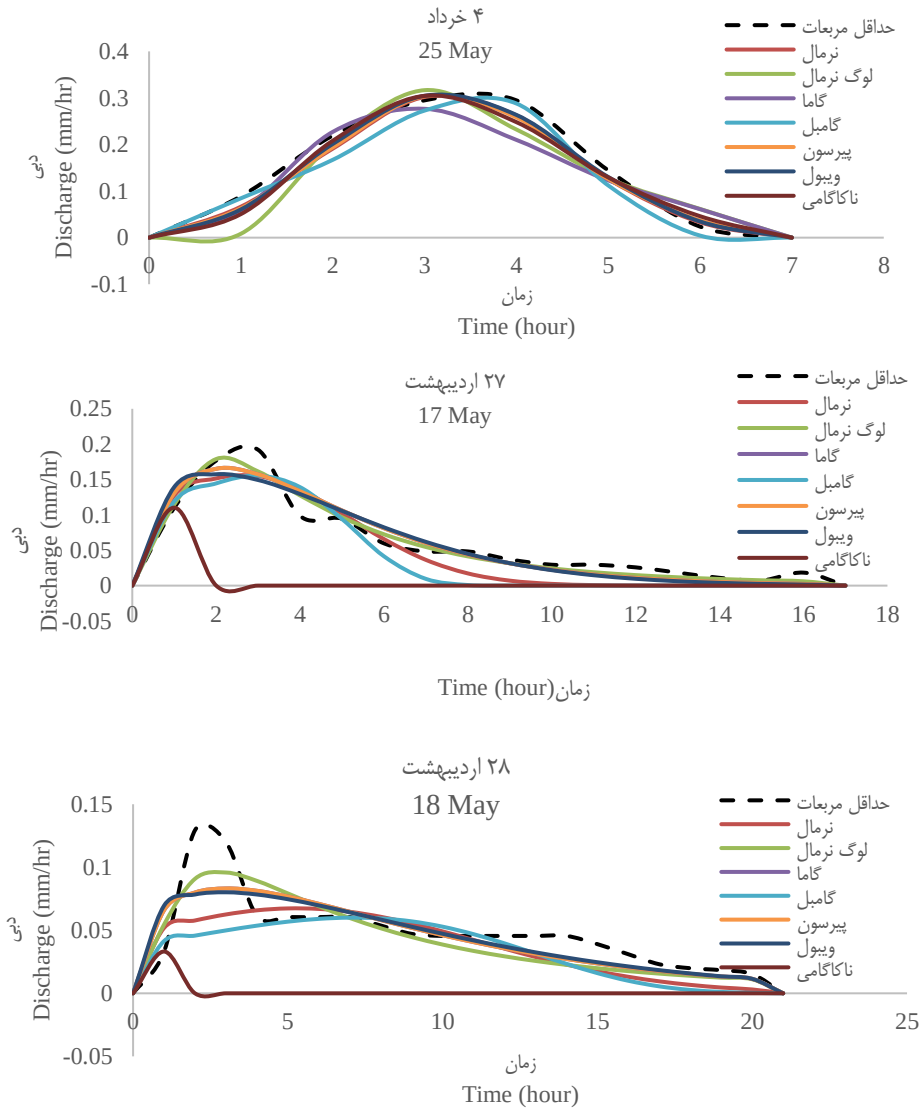
آزمون مدل برنامه‌ریزی غیرخطی در محیط *Mathematica*

بمنظور آزمون نمودن توزیع‌ها، مقادیر میانگین پارامترهای بدست آمده برای هر توزیع در سه رگبار (۲۷ و ۲۸ اردیبهشت و ۴ خرداد) در دوره واسنجی محاسبه شده و هیدروگراف‌های واحد یک ساعته دوره آزمون (۵ و ۲۷ خرداد) با استفاده از توابع توزیع و مقادیر معلوم پارامترها تعیین شدند (شکل ۶). سپس هیدروگراف‌های رواناب مستقیم با استفاده از معادله پیچشی برای رگبارهای دوره آزمون محاسبه گردیدند (شکل ۷).

همانطور که از این اشکال مشاهده می‌گردد، در هر دو رویداد هیچ یک از توزیع‌ها نوساناتی در شاخه‌های بالارونده و پایین‌رونده هیدروگراف نشان ندادند. نوسانات موجود در هیدروگراف‌های واحد مشاهداتی (حداقل مربعات) هر دو رویداد نیز همانطور که قبلا گفته شد، می‌تواند بدلیل خطای اندازه‌گیری داده‌های بارش–رواناب آن دو رویداد، خطای جداسازی جریان پایه و ... باشد. در رویداد ۵ خرداد، توزیع لوگ نرمال زمان پیک را با خطای کمتر برآورد نموده است. همه توزیع‌ها غیر از توزیع گاما شاخه بالا رونده هیدروگراف را با دقت قابل قبولی برآورد کردند. توزیع ویبول و نرمال عملکرد مناسبی در تخمین دبی اوج نشان دادند. در رویداد ۲۷ خرداد نیز توزیع لوگ نرمال زمان پیک را با خطای کمتر برآورد نموده است. همه توزیع‌ها غیر از توزیع گاما شاخه بالا رونده هیدروگراف را با دقت قابل قبولی برآورد کردند. توزیع ویبول عملکرد مناسبی در تخمین دبی اوج نشان دادند. قابل ذکر است که توزیع‌های پیرسون و ناکاگامی بدلیل عملکرد بسیار ضعیف در دوره آزمون (بدلیل مقادیر پارامترهای متفاوت آن‌ها در رویدادهای دوره واسنجی) از این نمودارها حذف شدند. نتایج مشابهی را می‌توان از شکل ۷ در مورد عملکرد توزیع‌ها در برآورد هیدروگراف‌های رواناب مستقیم (حاصل از حاصل‌ضرب مقادیر بارش مازاد در هیدروگراف‌های واحد) گرفت.

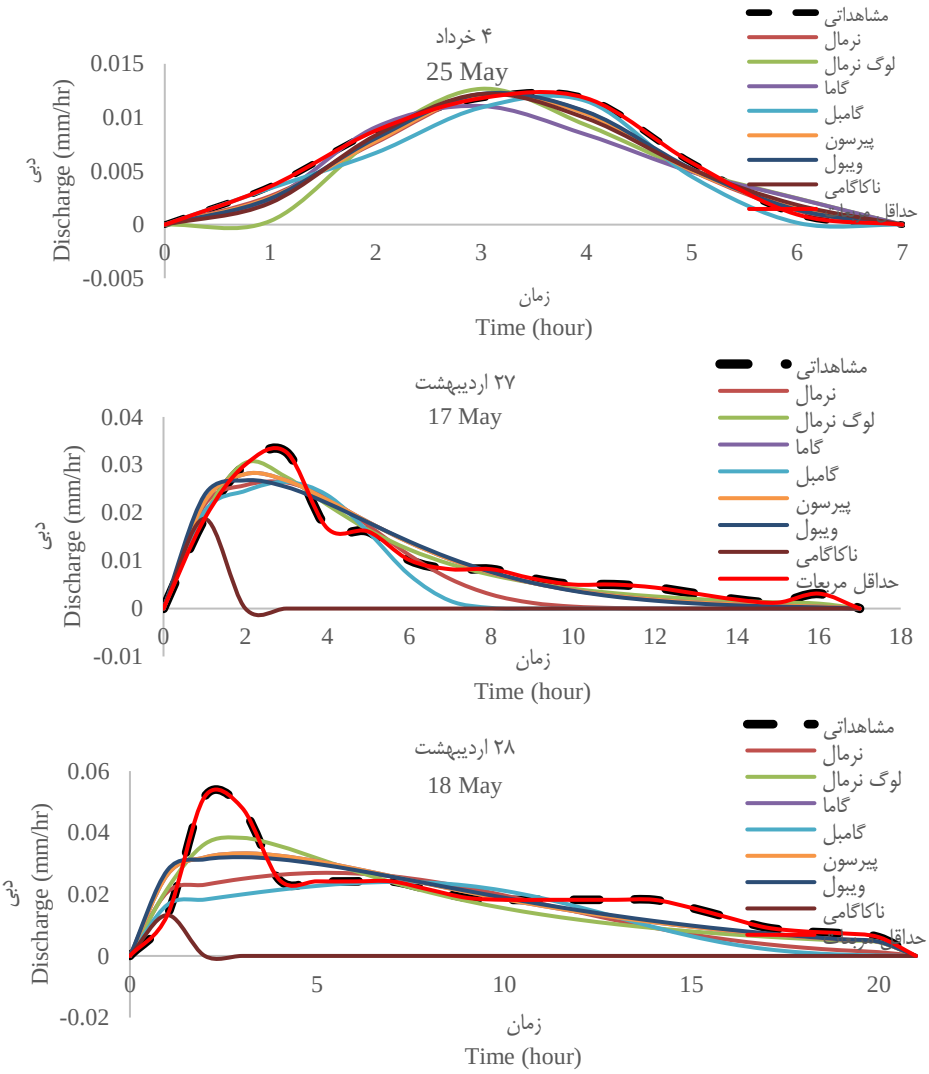
علاوه بر مقایسه چشمی نمودارهای هیدروگراف‌های رواناب مستقیم مشاهداتی و محاسباتی، عملکرد مدل‌ها با سه معیار عملکرد جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب همبستگی (CC) نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. در جدول ۲ مقادیر معیارهای عملکرد مدل‌ها نشان داده شده است. در رویداد ۵ خرداد، توزیع گاما با مقدار RMSE برابر ۰/۰۱۱۶، مقدار MAE برابر ۰/۰۰۸۶ کمترین خطا را در برآورد هیدروگراف رواناب مستقیم نشان می‌دهد. با این‌حال، توزیع لوگ نرمال بالاترین میزان ضریب همبستگی (۰/۸۳۰) را به خود اختصاص داده است که نشان می‌دهد شکل هیدروگراف را بیشتر از سایر توزیع‌ها از جمله توزیع گاما حفظ نموده است. لذا توزیع لوگ نرمال می‌تواند بعنوان بهترین توزیع با خطاهای نسبتا کم (۰/۰۱۳۳ و ۰/۰۱۱۱) در این رویداد انتخاب شود. در رویداد ۲۷ خرداد، توزیع لوگ نرمال با مقدار RMSE برابر ۰/۰۱۳۵، مقدار

MAE برابر ۰/۰۱۱۲ و ضریب همبستگی ۰/۸۱۶ بیشترین کارآیی را نشان می‌دهد. در این رویداد نیز ضریب همبستگی (۰/۴۵۵) توزیع گاما کم می‌باشد که توانایی کم آن را در حفظ شکل هیدروگراف بیان می‌کند. با در نظر گرفتن مقادیر متوسط توابع عملکرد توزیع‌ها در هر رویداد، می‌توان گفت که توزیع‌های لوگ نرمال و نرمال به‌ترتیب دارای پتانسیل بالاتر در تخمین هیدروگراف‌های واحد می‌باشند. همانطور که از جدول مشاهده می‌شود خطاهای توزیع‌های پیرسون و ناکاگامی در هر دو رویداد بیشتر از بقیه توزیع‌ها می‌باشد و بدین علت از نمودارها حذف گردیده‌اند. روش حداقل مربعات نیز دارای مقادیر معیارهای عملکرد بهتری از همه توزیع‌ها در هر دو رویداد است. بنابراین روش حداقل مربعات از جمله روش‌های مناسب در برآورد هیدروگراف واحد می‌باشد.



شکل ٤- هیدروگراف‌های واحد محاسبه شده از روش حداقل مربعات و توابع توزیع بهینه‌سازی شده با مدل برنامه‌ریزی غیرخطی در دوره واسنجی در حوضه آبریز سامیان

Figure 4- Unit hydrographs calculated using the least squares method and distribution functions optimized with the nonlinear programming model during the calibration period in the Samian Watershed

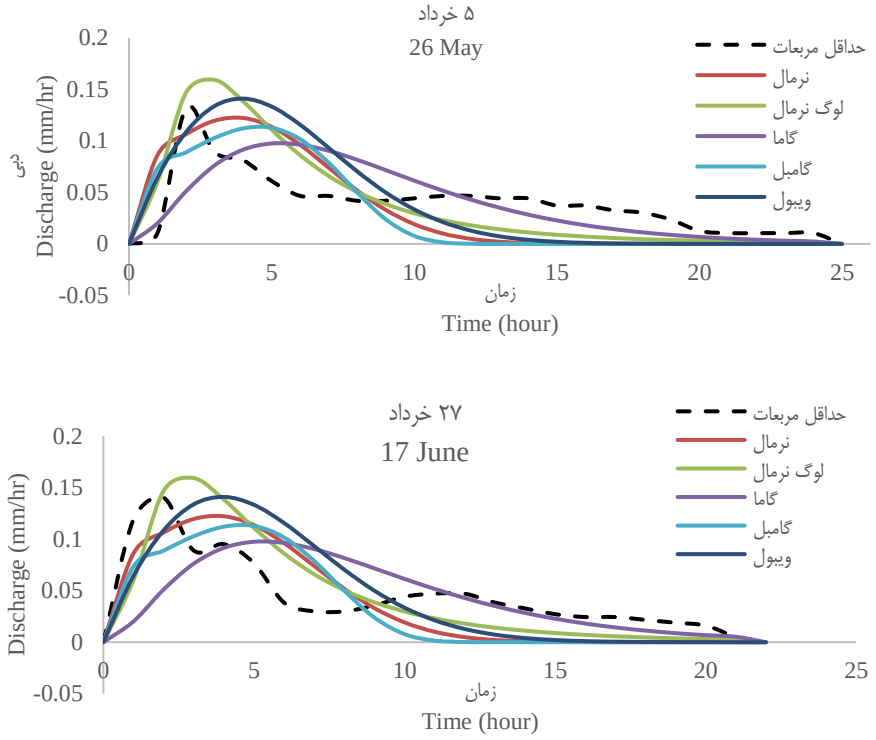


شکل ۵- هیدروگراف‌های رواناب مستقیم مشاهداتی و محاسباتی حاصل از روش حداقل مربعات و توابع توزیع بهینه‌سازی شده با مدل برنامه ریزی غیرخطی در حوضه آبریز سامیان در دوره واسنجی

Figure 5- Observational and computational direct runoff hydrographs obtained from the least squares method and distribution functions optimized with a nonlinear programming model in the Samian Watershed during the calibration period

با این‌حال، یکی دیگر از ایرادات روش حداقل مربعات این است که ممکن است مؤلفه‌های هیدروگراف واحد را بصورت منفی محاسبه نماید و این بدان علت است که در روش حداقل مربعات، هیدروگراف واحد تولید شده با استفاده از رابطه (۳) بدلیل بکارگیری ماتریس معکوس در آن رابطه، ممکن است با هیدروگراف رواناب مستقیم هماهنگی کامل نداشته باشد و برخی از اعداد منفی شوند. در این صورت می‌بایست با اصلاحاتی در عرض‌های هیدروگراف واحد آن را با هیدروگراف رواناب مستقیم هماهنگ کرد (Mir Bagheri, 1995).

بطور کلی، با توجه به نتایج حاصل در دوره واسنجی و آزمون می‌توان نتیجه گرفت که توزیع لوگ نرمال بهترین توزیع برای برآورد و محاسبه هیدروگراف‌های واحد (علی‌الخصوص در برآورد شاخه بالارونده و زمان و دبی اوج) در حوضه آبریز سامیان می‌باشد. همچنین، توابع پیرسون و ناکاگامی جزو ضعیف‌ترین توزیع‌ها در برآورد هیدروگراف‌های آن حوضه می‌باشند. در تحقیقات صورت گرفته توسط صادقی طبس و همکاران (Sadeghi Tabas *et al*., 2014)، باتاجارچیا (Bhattacharjia, 2004) و قربانی و همکاران (Ghorbani *et al.*, 2017) نیز توزیع لوگ نرمال عملکرد بهتری از خود نشان داده است.



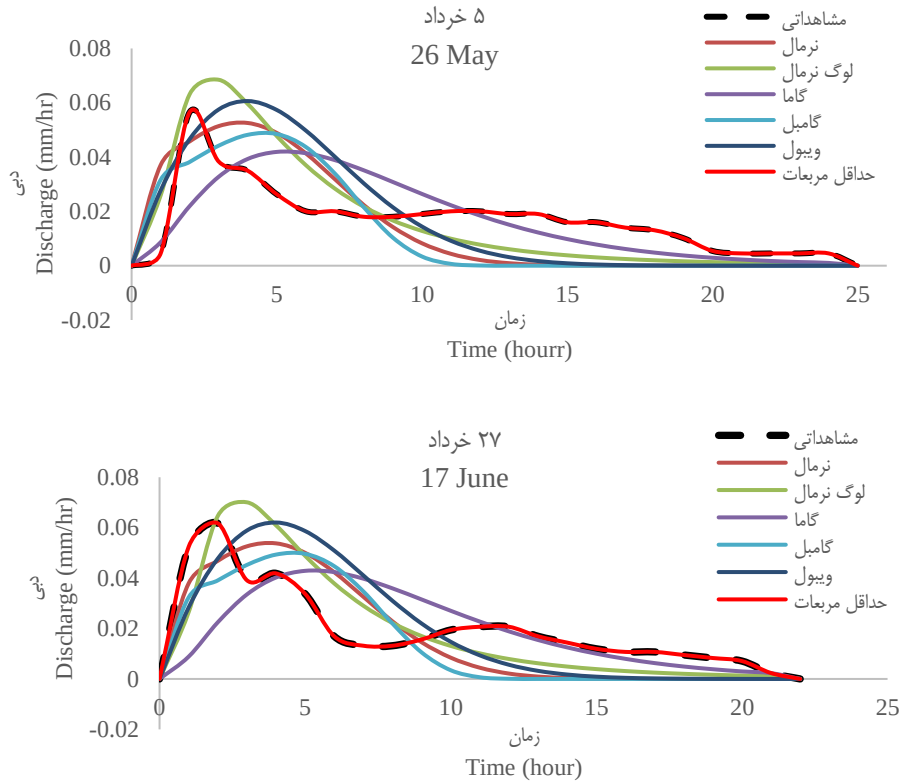
شکل ٦- هیدروگراف‌های واحد محاسبه شده از روش حداقل مربعات و توابع توزیع بهینه‌سازی شده با مدل برنامه‌ریزی غیرخطی در دوره آزمون در حوضه آبریز سامیان

Figure 6- Unit hydrographs calculated from the least squares method and distribution functions optimized with the nonlinear programming model during the test period in the Samian Watershed

جدول ۲- مقادیر معیارهای عملکرد روش حداقل مربعات و توزیع‌های احتمالاتی مدل برنامه‌ریزی غیرخطی در دوره آزمون در حوضه آبریز سامیان

Table 2- Values of performance criteria of the least squares method and probability distributions of the nonlinear programming model during the test period in the Samian Watershed

توزیع Distribution	CC		MAE		RMSE	
	۲۷ خرداد 17 June event	۵ خرداد 26 May event	۲۷ خرداد 17 June event	۵ خرداد 26 May event	۲۷ خرداد 17 June event	۵ خرداد 26 May event
گاما Gamma	0.455	0.670	0.0108	0.0086	0.0167	0.0116
گامبل Gumbel	0.716	0.649	0.0135	0.0134	0.0151	0.0150
لوگ نرمال Log-Normal	0.816	0.830	0.0112	0.0111	0.0135	0.0133
نرمال Normal	0.783	0.694	0.0125	0.0130	0.0136	0.0148
پیرسون Pearson	-0.236	-0.206	0.0210	0.0178	0.0260	0.0214
ویبول Weibul	0.710	0.719	0.0145	0.0137	0.0166	0.0158
ناکاگامی Nakagami	0.844	0.466	0.0237	0.0243	0.0350	0.0397
حداقل مربعات Least Square	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000



شکل ۷- مقایسه هیدروگراف‌های رواناب مستقیم مشاهداتی و محاسباتی حاصل از روش حداقل مربعات و توابع توزیع بهینه‌سازی شده با مدل برنامه‌ریزی غیرخطی در دوره آزمون در حوضه آبریز سامیان

Figure 7- Comparison of observational and computational direct runoff hydrographs obtained from the least squares method and optimized distribution functions with the nonlinear programming model during the test period in the Samian Watershed

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، توانایی مدل بهینه‌سازی غیرخطی به‌منظور برآورد هیدروگراف‌های واحد با استفاده از توابع توزیع احتمال مختلف بررسی شد. توابع توزیع بکار رفته عبارت بودند از: نرمال دو-پارامتری، لوگ نرمال دو-پارامتری، گامبل دو-پارامتری، گامای دو-پارامتری، پیرسون سه-پارامتری، ویبول دو-پارامتری و ناکاگامی دو پارامتری. مزیت اصلی این مدل و توابع این است که تعداد پارامترهای مجهولی برابر تعداد کم پارامترهای تابع توزیع بکار رفته می‌باشد. در این تحقیق، از داده‌های بارش-رواناب پنج رویداد در حوضه آبریز سامیان جهت ارزیابی کارآیی توزیع‌ها استفاده گردید. واسنجی و آزمون مدل بهینه‌سازی غیرخطی با استفاده از برنامه‌نویسی در محیط *Mathematica* انجام گردید. توزیع-های لوگ نرمال و نرمال به‌ترتیب برآورد خوبی از دبی پیک و زمان اوج و شاخه بالارونده هیدروگراف واحد در همه رویدادها بر اساس ارزیابی-های چشمی و آماری ارائه دادند. همه توزیع‌های آماری در برآورد شاخه-های پایین‌رونده هیدروگراف‌های واحد (غیر از رویداد ۴ خرداد) عملکرد ضعیفی به‌دلیل نوسانی بودن شاخه مذکور نشان دادند.

توزیع‌های پیرسون و ناکاگامی بدلیل اینکه در دوره واسنجی پارامترهای متفاوتی در سه رویداد آن دوره حاصل نمودند، لذا در مرحله آزمون که از میانگین آن پارامترها استفاده شده بود عملکرد ضعیفی نشان دادند. توزیع گاما در تخمین شاخه‌های بالا و پایین‌رونده و در کل در حفظ شکل هیدروگراف عملکرد ضعیفی نشان داد. توزیع ویبول عملکرد بهتری از توزیع گامبل ارائه نمود. روش کلاسیک حداقل مربعات نیز که برای محاسبه هیدروگراف‌های واحد حوضه سامیان بکار برده شد، در رویدادهایی که فقط دارای یک پالس بارش مازاد بودند، عملکرد بهتری نسبت به توابع توزیع و مدل بهینه‌سازی غیرخطی نشان داد.

برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود عملکرد سایر توزیع‌های آماری مانند توزیع‌های بتا و لجستیک در استخراج هیدروگراف واحد حوضه سامیان بررسی شود. همچنین، عملکرد توزیع‌های آماری در تعیین هیدروگراف واحد از رویدادهای مرکب بارش-رواناب و نیز از

رویدادهای بارش–رواناب مربوط به ماه‌های گرم سال که در آنها حوضه دارای ذخیره برفی نیستند، بررسی گردد. در نهایت، تحقیق مشابه در سایر حوضه‌های آبریز استان اردبیل انجام و یک مدل مناسب برای کل استان پیشنهاد گردد.

References

1. Bhattacharjya, R.K. (2004). Optimal design of unit hydrographs using probability distribution and genetic algorithms. *Sadhana*, *29*(5), 499-508. https://doi.org/10.1007/BF02703257
2. Bhunya, P.K., Berndtsson, R., Ojha, C.S.P., & Mishra, S.K. (2007). Suitability of gamma, chi-square, Weibull, and beta distributions as synthetic unit hydrographs. *Journal of Hydrology*, *334*, 28–38. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.022
3. Dawson, C.W., Harpham, C., Wilby, R.L., & Chen, Y. (2002). Evaluation of artificial neural network techniques for flow forecasting in the River Yangtze, China. *Journal of Hydrology and Earth System Siences*, *6*(4), 619-626. https://doi.org/10.5194/hess-6-619-2002
4. Dooge, J.C.I., & Garvey, B.J. (1970). Discussion of "Data error effects in unit hydrograph derivation by E.M. Laurenson and T. O'Donnell". *Journal of the Hydraulics Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineers*, *96*(HY9), 1888-1894. https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0002694
5. Ghorbani, M.A., Singh, V.P., Sivakumar, B., Kashani, M.H., Arvind Atre, A., & Asadi, H. (2017). Probability distribution functions for unit hydrographs with optimization using genetic algorithm. *Applied Water Science*, *7*, 663–676. https://doi.org/10.1007/s13201-015-0278-y
6. Gumbel, E.J. (1960). Multivariate Extremal Distributions. *Bulletin of the International Statistical Institute*, *39*(2), 471-475.
7. Li, H., & Cidan, Y. (2020). Application of Gamma functions to the determination of unit hydrographs. *Nonlinear Processes in Geophysics, Society of Civil Engineers*, *106*(HY1), 85-97, https://doi.org/10.5194/npg-2020-1
8. Mays, L.W., & Coles, L. (1980). Optimization of unit hydrograph determination. *Journal of the Hydraulics Divisions, Proceeding of the American Society of Civil Engineers*, *106*(HY1), 85-97. https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0005361
9. Nadarajah, S. (2007). Probability models for unit hydrograph derivation. *Journal of Hydrology*, *344*, 185–189. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.07.004
10. Naghibi, S.A., Vafakhah, M., Moghaddam Nia, A., & Eslamian, S. (2018). Evaluation of some probability distribution functions for derivation of unit hydrograph in the Bar Watershed, Iran. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, *8*(2), 134-147. https://doi.org/10.1504/IJHST.2018.090880
11. Najafi, M. (2002). *Hydrological Systems: Rainfall-Runoff Modeling*. Volume 1, University of Tehran. (In Persian)
12. Mahdavi, M. (2002). *Applied Hydrology*. Volume 1, University of Tehran. (In Persian)
13. Mir Bagheri, A. (1995). *Engineering Hydrology*. University of Shiraz. (In Persian)
14. Overton, D.E. (1968). A least-squares hydrograph analysis of complex storms on small agricultural watersheds. *Water Resources Research*, *4*(5), 955–963. https://doi.org/10.1029/WR004i005p00955
15. Prasad, T.D., Gupta, R., & Prakash, S. (1999). Determination of optimal loss rate parameters and unit hydrograph. *Journal of Hydrologic Engineering*, *4*(1), 83-87. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:1(83)
16. Rai, R.K., Sarkar, S., Upadhyay, A., & Singh, V.P. (2010). Efficacy of Nakagami-*m* distribution function for deriving unit hydrograph. *Journal of Water Resources Management*, *24*, 563-575. https://doi.org/10.1007/s11269-009-9459-5
17. Ramaseshan, S., Chaube, U.C., & Sharma, A.K. (1973). A discrete linear model for the hydrologic basin. *Proceedings of the First World Congress on Water Resources*, *4*, 367-376.
18. Rao, A.R., & Hamed, K.H. (2000). *Flood Frequency Analysis*. CRC Press, Boca Raton, FL.
19. Sadeghi Tabas, S., Akbarpour, A., & Pourreza Bilondi, M. (2014). Application of intelligent algorithms in providing optimal unit hydrograph using probability distribution functions. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *8*(2), 284-295. (In Persian)
20. Singh, V.P. (1982). Lag time for diverging overland flow. *Nordic Hydrology*, *13*, 39-48. https://doi.org/10.2166/nh.1982.0004
21. Snyder, W.M. (1955). Hydrograph analysis by the method of least squares. *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, *81*(793), 25.
22. Snyder, W.M. (1961). *Matrix operations in hydrograph computations*. Research paper no. 1, Tennesse Valley Authority, Knoxville, Tenn.
23. Xia, Y., Fabian, P., Stohl, A., & Winterhalter, M. (1999). Forest climatology: estimation of missing values for Bavaria, Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, *96*, 131-144. https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00056-8

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

Research Article
Vol. 40, No. 3, Fall. 2026, p. 325-345

Temporal Analysis of the Effects of Dust Events on Vegetation Health Using Remote Sensing in Khuzestan Province

S. Pourhashemi[1*], M. Firouzyazdi[1], M. Boroughani[1]
1- Research Center for Geoscience and Social Studies, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran
(*- Corresponding Author Email: s.pourhashemi@hsu.ac.ir)

Received: 20 June 2026
Revised: 29 July 2026
Accepted: 08 September 2026
Available Online: 08 September 2026

How to cite this article:
Pourhashemi, S., Firouzyazdi, M., & Boroughani, M. (2026). Temporal analysis of the effects of dust events on vegetation health using remote sensing in Khuzestan province. *Journal of Soil and Wather*, *40*(3), 325-345. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jsw.2026.99458.1558

Introduction

Dust is one of the most important environmental hazards in arid and semi-arid regions and can affect vegetation health through reducing incoming radiation, depositing particles on leaf surfaces, disrupting photosynthesis, and intensifying environmental stresses. Khuzestan Province is considered one of the major dust-affected regions in Iran due to its geographical location, proximity to domestic and transboundary dust sources, sensitive wetlands, extensive agricultural lands, recurrent droughts, and land-use changes. The reduction of wetland water levels, decline in soil moisture, improper water resource management, and human activities have also increased the vulnerability of this region. Since vegetation plays an important role in soil stabilization and the reduction of wind erosion, investigating the effects of dust events on vegetation conditions is of great importance for environmental and agricultural management. The aim of this study is to analyze the temporal effects of dust events on vegetation health in Khuzestan Province during the period 2001–2023 using remote sensing and atmospheric reanalysis data.

Materials and Methods

In this study, monthly data for the period 2001–2023 were used. To monitor dust intensity, dust aerosol optical depth at 550 nm obtained from the Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) dataset was employed. In addition, total AOD and the ratio of dust AOD to total AOD were calculated to examine the contribution of dust to the total aerosol burden over the region. Vegetation health was evaluated using two indices, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and EVI, derived from the Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) MOD13A2 product, version 6.1. NDVI was used as an indicator of vegetation greenness and density, while EVI was applied because of its lower sensitivity to atmospheric effects and vegetation saturation.

The 16-day NDVI and EVI data were converted to a monthly scale and synchronized with the AOD data. Then, monthly anomalies of AOD, NDVI, and Enhanced Vegetation Index (EVI) were calculated to remove the effect of the seasonal cycle. Severe dust events were identified using percentile-based statistical thresholds; the 75th percentile was calculated as 0.296, and the 90th percentile as 0.360. Months with AOD values equal to or greater than the 90th percentile were selected as severe dust events. Subsequently, the relationship between dust and vegetation indices was examined using Pearson correlation, linear regression, seasonal analysis, month-by-month analysis, lag-correlation analysis, and event-based analysis.

Results and Discussion

The results showed that dust AOD in Khuzestan Province experienced considerable temporal fluctuations during the study period. In total, 70 months were above the 75th percentile and 29 months were above the 90th percentile, indicating the occurrence of relatively severe and severe dust events. The relative synchronization between variations in dust AOD and total AOD showed that dust constitutes an important part of the aerosol burden

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)
https://doi.org/10.22067/jsw.2026.99458.1558

over the region.

The analysis of NDVI and EVI anomalies indicated that vegetation health changed noticeably during the study period, and both indices showed similar behavior in many periods. In the first step, the relationship between raw AOD and vegetation index anomalies was negative but weak; the correlation coefficient between raw AOD and NDVI anomaly was -0.144, while that between raw AOD and EVI anomaly was -0.132. This weak relationship is probably due to strong seasonal cycles and the simultaneous influence of climatic and agricultural factors.

After removing seasonal effects, the strength of the relationship increased. The correlation coefficients between AOD anomaly and NDVI and EVI anomalies were -0.307 and -0.281, respectively, and both relationships were statistically significant. This result indicates that abnormal increases in dust are generally associated with a relative decline in vegetation health. Seasonal analysis also showed that this relationship was stronger in spring; the correlations between AOD anomaly and NDVI and EVI during this season were -0.388 and -0.346, respectively. This may be related to active plant growth and the greater sensitivity of agricultural crops during this period.

Lag analysis showed that the effect of dust was not limited to the month of occurrence and continued for several months afterward. The strongest negative correlation was observed in the same month as the dust event; however, negative relationships remained at one-month, two-month, and three-month lags. In addition, event-based analysis showed that after severe dust events, the mean anomalies of NDVI and EVI decreased further in the following months. This may indicate the cumulative effect of dust, reduced photosynthetic capacity, decreased surface moisture, or the coincidence of dust events with climatic stresses.

Conclusion

The results of this study showed that there is a negative, significant, and complex relationship between dust events and vegetation health in Khuzestan Province. The use of AOD anomalies provided a more accurate representation of the effect of dust on vegetation compared with raw AOD values. The findings indicate that abnormal increases in dust, particularly in spring and in some sensitive months, are associated with relative decreases in NDVI and EVI. However, vegetation health is not affected by dust alone, and factors such as precipitation, temperature, soil moisture, irrigation, crop type, planting time, and agricultural management also play important roles. Therefore, for a more accurate interpretation of this relationship, the integration of remote sensing data with climatic, hydrological, and field data is recommended.

Keywords: Aerosol optical depth (AOD), Dust, Vegetation health

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۴۰، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵، ص. ۳۴۵-۳۲۵

تحلیل زمانی تأثیر رویدادهای گرد و غبار بر سلامت پوشش گیاهی با استفاده از سنجش از دور در استان خوزستان

سیما پورهاشمی[1*] - مینا فیروزیزدی[1] - مهدی بروغنی[1]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۷

چکیده

گردوغبار یکی از مهم‌ترین مخاطرات محیطی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که می‌تواند از طریق کاهش تابش ورودی، رسوب ذرات بر سطح برگ‌ها، اختلال در فرآیند فتوسنتز و تشدید تنش‌های محیطی، سلامت پوشش گیاهی را تحت تأثیر قرار دهد. در این پژوهش، اثر رخدادهای گرد و غبار بر سلامت پوشش گیاهی استان خوزستان طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ با استفاده از داده‌های سنجش از دور بررسی شد. برای پایش شدت گردوغبار از عمق نوری آئروسل (Aerosol Optical Depth; AOD) و برای ارزیابی وضعیت پوشش گیاهی از شاخص نرمال‌شده تفاضلی پوشش گیاهی (Normalized Difference Vegetation Index; NDVI) و شاخص بهبودیافته پوشش گیاهی (Enhanced Vegetation Index; EVI) استفاده شد. پس از همگام‌سازی داده‌های ماهانه، ناهنجاری‌های NDVI، EVI و AOD محاسبه شد و رخدادهای شدید گرد و غبار بر اساس صدک‌های ۷۵ و ۹۰ شناسایی شدند. نتایج نشان داد که رابطه بین AOD خام و ناهنجاری‌های NDVI و EVI منفی اما ضعیف بود، در حالی‌که پس از حذف اثرات فصلی، شدت این رابطه افزایش یافت. به‌طوری‌که ضریب همبستگی ناهنجاری AOD با ناهنجاری NDVI و EVI به‌ترتیب برابر ۰٫۳۰۷- و ۰٫۲۸۱- به‌دست آمد. تحلیل فصلی نیز نشان داد که این رابطه در فصل بهار قوی‌تر است. همچنین نتایج تحلیل تأخیری و رخدادمحور بیانگر آن بود که پس از رخدادهای شدید گرد و غبار، افت شاخص‌های پوشش گیاهی می‌تواند در ماه‌های بعد نیز ادامه یابد. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش غیرعادی گرد و غبار با کاهش نسبی سلامت پوشش گیاهی در خوزستان همراه است، اما تفسیر این رابطه باید با توجه به نقش سایر عوامل اقلیمی و زراعی مانند بارش، دما، رطوبت خاک، آبیاری و نوع کشت انجام شود.

واژه‌های کلیدی: خوزستان، شاخص‌های پوشش گیاهی، سنجش‌ازدور، عمق نوری آئروسل، MERRA-2

مقدمه

آئروسل‌ها ذرات جامد یا مایع معلق در جو هستند که از منابع طبیعی (مانند گرد و غبار، آتش‌سوزی‌ها و فوران‌های آتشفشانی) و انسانی (مانند احتراق سوخت‌های فسیلی و فعالیت‌های صنعتی) منشأ می‌گیرند (Ban-Weiss & Collins., 2015; Nabat *et al*., 2014; Tariq *et al*., 2021). این ذرات با تأثیر بر انتقال تابش، تشکیل ابر و بارش، کیفیت هوا و توازن انرژی زمین، نقش مهمی در سامانه اقلیم دارند (Haywood & Boucher, 2000; Tao *et al*., 2012; Wilson & Suh, 1997). به‌دلیل تغییرپذیری مکانی و زمانی بالا، پایش آئروسل‌ها نیازمند داده‌های سنجش‌ازدوری است (Tariq *et al*., 2022). یکی از شاخص‌های کلیدی در این زمینه، عمق نوری آئروسل (AOD[2]) است که به ارزیابی مقدار ذرات معلق در ستون جو می‌پردازد و همچنین میزان تضعیف تابش خورشیدی توسط ذرات را نشان می‌دهد؛ افزایش آن بیانگر کدورت جو و بار آئرسلی بیشتر است (Kaufman *et al*., 1997; Gupta *et al*., 2013; Alam *et al*., 2010; Tariq *et al*., 2022).

۱- مرکز پژوهشی مطالعات جغرافیایی و علوم اجتماعی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: s.pourhashemi@hsu.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/jsw.2026.99458.1558
2- Aerosol Optical Depth

همچنین ضریب انگستروم برای تشخیص اندازه ذرات به کار می‌رود که مقادیر پایین‌تر نشان‌دهنده غلبه ذرات درشت‌تر مانند گرد و غبار معدنی است (Bibi *et al.*, 2017; Tariq & ul-Haq, 2020; Tiwari *et al.*, 2016). طوفان‌های گرد و غبار از مهم‌ترین رخدادهای آئرسلی در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند که بر اثر جابه‌جایی ذرات خاک از اراضی بایر، تالاب‌های خشک و فعالیت‌های عمرانی ایجاد می‌شوند (Boroughani *et al.*, 2025). این رخدادها پیامدهای گسترده‌ای بر سلامت انسان، اکوسیستم‌ها، کشاورزی و حمل‌ونقل دارند (Filonchyk & Hurynovich, 2020; Omar *et al.*, 2022; Boroughani *et al.*, 2021, 2022; Middleton & Kang, 2017). در خاورمیانه، تشدید گرد و غبار تحت تأثیر شرایط اقلیمی خشک، کاهش بارش، خشکسالی، مدیریت نامناسب آب و تغییر کاربری اراضی است (Rezazadeh *et al.*, 2013; Boroughani *et al.*, 2025).

پوشش گیاهی با تثبیت خاک و کاهش سرعت باد، نقش بازدارنده در تولید گرد و غبار دارد؛ بنابراین تخریب آن ظرفیت تولید گرد و غبار را افزایش می‌دهد (Engelstaedter *et al.*, 2003; pourhashemi *et al.*, 2025; Fan *et al.*, 2014). پژوهش‌های متعددی رابطه میان گرد و غبار و عوامل محیطی را بررسی کرده‌اند. ژو و ژای (Zou & Zhai, 2004) کاهش پوشش گیاهی را در افزایش طوفان‌های گرد و غبار مؤثر دانستند. تان (Tan, 2016) اثر پوشش گیاهی را در مناطق خشک تا نیمه‌مرطوب متفاوت ارزیابی کرد. پارولاری و همکاران (Parolari *et al.*, 2016) نشان دادند که خشکی غیرمعمول و الگوهای سینوپتیکی خاص تولید گرد و غبار را در خاورمیانه تشدید می‌کنند. لی و همکاران (Li *et al.*, 2020) رابطه مثبت سرعت باد و رابطه منفی پوشش گیاهی با غلظت گرد و غبار را تأیید کردند. همچنین محققین دیگر (Wu *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2017; Bao *et al.*, 2021) اهمیت رطوبت خاک، بارش و باد را در کنترل گرد و غبار مورد تأکید قرار دادند. استان خوزستان در جنوب‌غرب ایران به‌دلیل همجواری با دشت‌های خشک، وجود تالاب‌های وسیع و فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی، منطقه‌ای حساس نسبت به گرد و غبار است (Daniali & Karimi, 2019; Dargahian *et al.*, 2023; Pourhashemi *et al.*, 2023; Masoumi & Moradhaseli, 2023). کاهش سطح آب تالاب‌ها، خشکسالی، طرح‌های انتقال آب و احداث سدها موجب تشدید تخریب محیطی و افزایش پتانسیل تولید گرد و غبار در این منطقه شده است (Adib, 2022; Beyranvand *et al.*, 2023). تالاب‌های شادگان و هورالعظیم که نقش مهمی در تثبیت رسوبات و کاهش گرد و غبار دارند، تحت تأثیر خشکسالی و آلودگی دچار تخریب اکولوژیک شده‌اند (Adib, 2022; Yousefi Kebria *et al.*, 2025; Khanfari *et al.*, 2024) نشان دادند که بخش‌های خشک شده تالاب شادگان به منابع فعال گرد و غبار تبدیل شده‌اند یوسفی کبریا و همکاران (Yousefi Kebria *et al.*, 2021) کاهش وسعت این تالاب را با افزایش انتشار گرد و غبار مرتبط دانستند. درگهیان و همکاران (Dargahian *et al.*, 2023) نیز با استفاده از سنجش‌ازدوری و مدل HYSPLIT، منابع گرد و غبار اثرگذار بر جنوب‌غرب ایران را شناسایی کردند.

در ایران نیز مطالعات متعددی ارتباط بین تغییرات پوشش گیاهی، شرایط سطح زمین و رخدادهای گردوغبار را بررسی کرده‌اند. بهرامی و همکاران (Behrami *et al.*, 2013) با مدل‌سازی مکانی–زمانی وقوع طوفان‌های گردوغبار در استان خوزستان، نقش عوامل اقلیمی و پوشش گیاهی را در شکل‌گیری این پدیده بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از داده‌های اقلیمی و شاخص NDVI استخراج‌شده از تصاویر MODIS نشان دادند که تغییرات پوشش گیاهی، به‌ویژه تخریب آن، می‌تواند فراوانی طوفان‌های گردوغبار با منشأ داخلی را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین مناطق دارای خاک‌های شور و قلیا به‌دلیل استعداد بالاتر در رهاسازی ذرات، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین کانون‌های تولید گردوغبار در جنوب استان خوزستان شناسایی شدند. بیات و همکاران (Bayat *et al.*, 2016) با استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI حاصل از تصاویر MODIS، تغییرات زمانی و مکانی پوشش گیاهی تالاب شادگان در استان خوزستان را ارزیابی کرده و نشان دادند که افزایش رخدادهای گردوغبار و تغییرات شرایط محیطی می‌تواند با کاهش وضعیت پوشش گیاهی این منطقه همراه باشد. جعفری (Jafari, 2020) نیز نقش تغییرات هیدرولوژیکی و کاهش منابع آب سطحی را در تغییر شرایط محیطی دشت خوزستان و افزایش زمینه‌های مساعد برای وقوع گردوغبار بررسی کرد. این مطالعات نشان می‌دهند که در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، تغییرات پوشش گیاهی و شرایط رطوبتی سطح زمین، علاوه بر تأثیر مستقیم بر سلامت اکوسیستم‌ها، می‌توانند بر استعداد مناطق برای تولید و انتشار گردوغبار اثرگذار باشند. علاوه بر اثر مستقیم گردوغبار، تغییرات شرایط هیدرولوژیکی و تنش‌های رطوبتی نیز از عوامل مهم کنترل‌کننده وضعیت پوشش گیاهی در این مناطق هستند. فیض‌اله‌پور (Feizollahpour, 2025) با استفاده از شاخص‌های طیفی سنجش‌ازدوری، تغییرات تنش رطوبتی و خشکسالی در محدوده تالاب شادگان را بررسی کرد و نشان داد که شاخص‌های مبتنی بر رطوبت و دما می‌توانند تغییرات شرایط محیطی این منطقه را آشکار کنند.

با وجود مطالعات انجام‌شده، بررسی همزمان تغییرات زمانی گرد و غبار و پاسخ سلامت پوشش گیاهی با استفاده از شاخص‌های NDVI[1]، EVI[2] (از مهم‌ترین شاخص‌های سنجش‌ازدوری برای ارزیابی سبزینگی، تراکم و سلامت پوشش گیاهی) و AOD نیازمند توجه بیشتر است. آئروسل‌ها می‌توانند از طریق تغییر در تابش ورودی و فرآیندهای

1- Normalized Difference Vegetation Index

2- Enhanced Vegetation Index

فتوسنتزی بر رشد گیاهی اثر بگذارند (Chakraborty *et al*., 2021). بنابراین، تحلیل ارتباط بین AOD گرد و غبار و شاخص‌های سلامت پوشش گیاهی برای درک سازوکارهای اثرگذاری رخدادهای گرد و غبار بر اکوسیستم‌های کشاورزی ضروری است. پژوهش حاضر با هدف تحلیل زمانی تأثیر رخدادهای گرد و غبار بر سلامت پوشش گیاهی استان خوزستان انجام شده است. در این مطالعه، از داده‌های سنجش‌ازدوری و بازتحلیل جوی برای استخراج سری زمانی Dust AOD در طول موج ۵۵۰ نانومتر و شاخص‌های NDVI و EVI طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ استفاده شد. با محاسبه ناهنجاری‌های پوشش گیاهی، تعیین آستانه‌های رخداد گرد و غبار و بررسی پاسخ تأخیری شاخص‌های گیاهی، رابطه بین شدت گرد و غبار و تغییرات سلامت پوشش گیاهی در استان خوزستان ارزیابی شد. نتایج این پژوهش می‌تواند به درک بهتر اثرات گرد و غبار بر اکوسیستم‌های کشاورزی و مدیریت پایدار منابع آب، تالاب‌ها و اراضی زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمک کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، استان خوزستان، در جنوب‌غرب ایران، است. این استان به‌دلیل موقعیت جغرافیایی (عرض جغرافیایی ۲۹٫۵ تا ۳۲٫۵ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷٫۵ تا ۵۰٫۵ درجه شرقی)، همجواری با عراق و خلیج فارس، اقلیم گرم و خشک تا نیمه‌خشک، و قرارگیری در مسیر انتقال توده‌های گرد و غبار داخلی و فرامرزی، یکی از مناطق حساس ایران نسبت به رخدادهای گرد و غبار محسوب می‌شود (Daniali & Karimi, 2019; Dargahian *et al*., 2023; Masoumi & Moradhaseli, 2023). خوزستان از نظر کشاورزی و منابع آبی اهمیت زیادی دارد و بخش قابل‌توجهی از اراضی آن تحت کشت محصولات زراعی قرار دارد. تغییرات منابع آب، خشکسالی‌های متوالی، کاهش رطوبت خاک و افت پوشش گیاهی می‌توانند پایداری اراضی کشاورزی را کاهش داده و زمینه افزایش فرسایش بادی و تولید گرد و غبار را فراهم کنند (Mohammadi *et al*., 2024; Beyranvand *et al*., 2023). همچنین تالاب‌های شادگان و هورالعظیم از مهم‌ترین اکوسیستم‌های آبی استان هستند که نقش مهمی در تثبیت رسوبات، تعدیل شرایط اقلیمی و کاهش گرد و غبار دارند. با این حال، کاهش ورودی آب، خشکسالی، احداث سدها، فعالیت‌های نفتی و تغییر کاربری اراضی موجب خشک‌شدن بخش‌هایی از این تالاب‌ها و افزایش پتانسیل تولید گرد و غبار شده است (Adib, 2022; Khanfari *et al*., 2024; Yousefi Kebria *et al*., 2025). بنابراین، خوزستان به‌عنوان یک منطقه مناسب برای بررسی اثر رخدادهای گرد و غبار بر سلامت پوشش گیاهی انتخاب شد.

از نظر اقلیمی، استان خوزستان دارای اقلیم گرم و خشک تا نیمه‌خشک است. شرایط اقلیمی این استان تحت تأثیر موقعیت جغرافیایی، مجاورت با مناطق خشک و بیابانی، و تغییرات فصلی سامانه‌های جوی قرار دارد. میانگین بلندمدت پارامترهای اقلیمی استان شامل دما، بارش، سرعت باد و رطوبت نسبی در جدول ۱ ارائه شده است.

داده‌های مورد استفاده

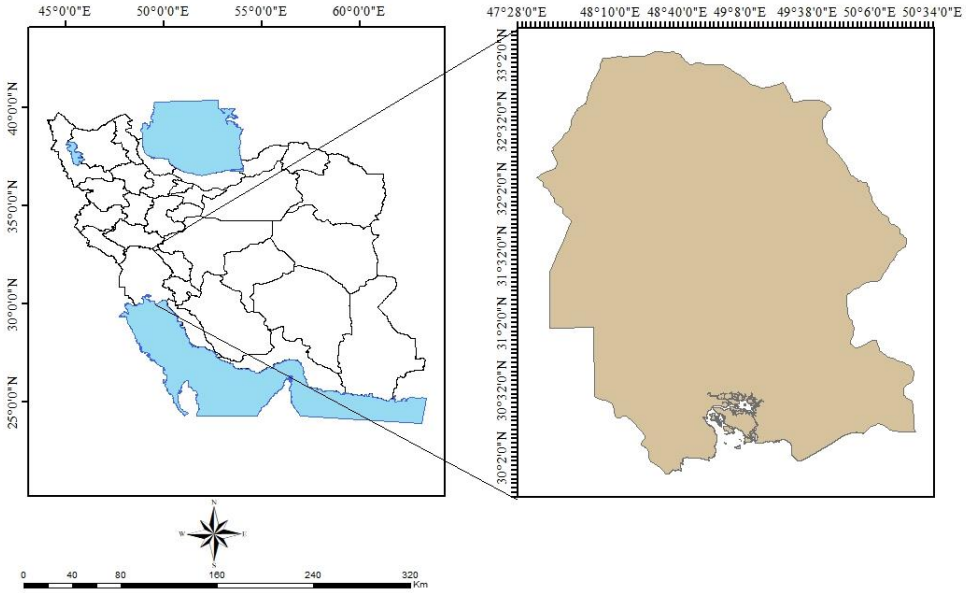
در این پژوهش برای بررسی رابطه میان رخدادهای گرد و غبار و سلامت پوشش گیاهی استان خوزستان، از داده‌های سنجش‌ازدوری و بازتحلیل جوی در مقیاس ماهانه و بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ (شامل ۲۷۶ مشاهده) استفاده شد. پس از استخراج، داده‌ها از نظر بازه زمانی، مقیاس و مقادیر غیرعادی بررسی و همگام‌سازی گردیدند. برای پایش گرد و غبار، از مجموعه داده‌های MERRA-2 Aerosol Reanalysis (Randles *et al*., 2017; Buchard *et al*., 2017) بهره گرفته شد. شاخص اصلی شدت گرد و غبار، عمق نوری آئروسل در طول موج ۵۵۰ نانومتر (AOD 550 nm) بود که میزان تضعیف تابش خورشیدی توسط ذرات را نشان می‌دهد. همچنین AOD Total 550 nm برای برآورد بار کلی آئروسل‌ها و نسبت AOD به AOD Total برای تعیین سهم گرد و غبار از کل بار آئرسلی منطقه مورد استفاده قرار گرفت. ارزیابی سلامت پوشش گیاهی با استفاده از شاخص‌های NDVI و EVI از محصول MODIS MOD13A2 نسخه ۶٫۱ انجام شد. این محصول با تفکیک مکانی یک کیلومتر و زمانی ۱۶ روزه، وضعیت سبزینگی و تراکم گیاهی را پوشش می‌دهد. NDVI به‌عنوان شاخص اصلی سبزینگی و EVI به‌دلیل حساسیت کمتر به اشباع پوشش گیاهی و اثرات جوی، به‌عنوان شاخص مکمل مورد استفاده قرار گرفتند. داده‌های NDVI و EVI برای همگونی با داده‌های AOD، به مقیاس ماهانه تبدیل شدند. پس از تهیه سری‌های زمانی ماهانه برای متغیرهای AOD 550 nm، AOD Total 550 nm، نسبت AOD به AOD Total، NDVI و EVI، ناهنجاری‌های ماهانه این شاخص‌ها محاسبه گردید. هدف از این کار، حذف اثر چرخه فصلی و تمرکز بر تغییرات غیرعادی گرد و غبار و پوشش گیاهی بود. این رویکرد امکان بررسی دقیق‌تر ارتباط بین افزایش غیرعادی گرد و غبار و افت غیرعادی سلامت پوشش گیاهی در استان خوزستان را فراهم آورد.

عمق نوری آئروسل (Aerosol Optical Depth; AOD) یکی از مهم‌ترین شاخص‌های سنجش‌ازدوری برای ارزیابی مقدار ذرات معلق آئروسل در ستون جو است. این شاخص بیانگر میزان تضعیف تابش خورشیدی عبوری از جو در اثر جذب و پراکندگی توسط ذرات آئروسل است؛ بنابراین افزایش مقدار AOD نشان‌دهنده افزایش بار آئروسلی و کاهش شفافیت جو است. از آنجاکه رخدادهای گردوغبار موجب افزایش

غلظت ذرات معدنی معلق در جو می‌شوند، تغییراتAOD می‌تواند به‌عنوان نمایه‌ای مناسب برای شناسایی شدت و پراکنش زمانی-مکانی طوفان‌های گردوغبار مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به غالب بودن ذرات درشت معدنی در رخدادهای گردوغبار مناطق خشک و نیمه‌خشک، افزایش AOD در این مناطق معمولاً با افزایش غلظت ذرات گردوغبار و کاهش کیفیت هوا همراه است.

پیش‌پردازش و روش تحلیل داده‌ها

پس از تهیه داده‌های AOD، NDVI و EVI، ابتدا سازگاری زمانی و مکانی آن‌ها برای دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ بررسی و داده‌های ۱۶ روزه NDVI و EVI به مقیاس ماهانه تبدیل شدند تا با داده‌های AOD قابل مقایسه باشند. با توجه به تفاوت تفکیک مکانی داده‌های مورد استفاده، فرآیند یکسان‌سازی مکانی پیش از تحلیل انجام شد. داده‌های AODحاصل از پایگاه MERRA-2 دارای ساختار شبکه‌ای با تفکیک مکانی درشت‌تر بوده و پس از استخراج محدوده استان خوزستان، سلول‌های شبکه‌ای واقع در محدوده مطالعه انتخاب و میانگین ماهانه آن‌ها به‌عنوان مقدار نماینده AOD استان محاسبه شد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و محدوده استان خوزستان

Figure 1- Location of the study area in Iran and the Khuzestan province

جدول ۱- میانگین بلندمدت پارامترهای اقلیمی استان خوزستان

Table 1- Long-term average of climatic parameters for Khuzestan Province

پارامتر اقلیمی Parameter	میانگین سالانه Average
دمای متوسط هوا (°C) Average air temperature	25
بارش سالانه (mm) Annual precipitation	220
سرعت متوسط باد (m/s) Average wind speed	3
رطوبت نسبی (%) Relative humidity	45

منبع: داده‌های اقلیمی بلندمدت ایستگاه‌های هواشناسی استان خوزستان (اداره کل هواشناسی استان خوزستان).

جدول ۲- مشخصات داده‌های مورد استفاده در پژوهش

Table 2- Specifications of the data used in the study

داده / Data	منبع Source	متغیر مورد استفاده Variable used	تفکیک مکانی Spatial resolution	تفکیک زمانی Temporal resolution	دوره زمانی Time period	لینک دسترسی Access link
عمق نوری آئروسل Optical Aerosol (AOD) Depth	MERRA-2 (NASA)	عمق نوری آئروسل Aerosol Optical Depth	۰٫۶۲۵° × ۰٫۵° 0.5° × 0.625°	ماهانه Monthly	۲۰۰۱– ۲۰۲۳ 2001–2023	https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/
شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	MODIS MOD13A2 V6.1	شاخص نرمال شده پوشش گیاهیNDVI	۱ کیلومتر 1 km	۱۶ روزه (تبدیل به ماهانه) 16 day–converted) (monthly to	۲۰۰۱– ۲۰۲۳ 2001–2023	https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13a2v061/
شاخص بهبودیافته پوشش گیاهی Enhanced Vegetation Index (EVI)	MODIS MOD13A2 V6.1	شاخص بهبودیافته پوشش گیاهی EVI	۱ کیلومتر 1 km	۱۶ روزه (تبدیل به ماهانه) 16 day–converted) (monthly to	۲۰۰۱– ۲۰۲۳ 2001–2023	https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13a2v061/

در مقابل، داده‌های NDVI و EVI حاصل از MODIS دارای تفکیک مکانی ۱ کیلومتر بوده و پس از برش محدوده استان، میانگین مقادیر پیکسل‌های واقع در محدوده مطالعه برای هر ماه استخراج گردید. بنابراین، اگرچه تفکیک مکانی اولیه داده‌های جوی و پوشش گیاهی یکسان نبود، تمامی متغیرها پس از میانگین‌گیری مکانی به سری‌های زمانی ماهانه در مقیاس استان تبدیل شدند و سپس روابط بین تغییرات AOD و شاخص‌های پوشش گیاهی بررسی شد.

پس از یکسان‌سازی زمانی و مکانی، میانگین مقادیر هر متغیر در محدوده استان خوزستان برای ایجاد سری‌های زمانی ماهانه استخراج گردید. برای حذف اثر چرخه فصلی و تمرکز بر تغییرات غیرعادی، ناهنجاری ماهانه شاخص‌های NDVI، EVI و AOD محاسبه شد. ناهنجاری از اختلاف مقدار هر ماه با میانگین بلندمدت همان ماه به دست آمد؛ مقادیر منفی نشان‌دهنده افت پوشش گیاهی و مقادیر مثبت نشان‌دهنده بهبود آن است. همچنین ناهنجاری AOD برای نشان‌دادن انحراف شدت گرد و غبار از وضعیت معمول ماهانه محاسبه شد. برای شناسایی رخدادهای شدید گرد و غبار، از آستانه‌های آماری مبتنی بر صدک‌های AOD استفاده شد. صدک ۷۵ و ۹۰ به‌ترتیب آستانه رخدادهای نسبتاً شدید و شدید در نظر گرفته شدند و ماه‌های دارای AOD بالاتر از صدک ۹۰ به‌عنوان ماه‌های رخداد شدید انتخاب گردیدند. سپس پاسخ شاخص‌های گیاهی در ماه وقوع و ماه‌های پس از آن بررسی شد. تحلیل‌های آماری در چند سطح انجام گرفت. ابتدا همبستگی پیرسون بین مقادیر خام AOD و ناهنجاری‌های NDVI و EVI برای ارزیابی رابطه اولیه محاسبه شد. سپس همبستگی بین ناهنجاری AOD و ناهنجاری‌های گیاهی برای سنجش رابطه پس از حذف اثرات فصلی بررسی گردید و سطح معناداری آن گزارش شد. رگرسیون خطی برای تعیین جهت و شدت رابطه و ترسیم نمودارهای پراکنش به کار رفت. با توجه به تفاوت حساسیت گیاهان در فصل‌های مختلف، تحلیل فصلی و ماه‌به‌ماه نیز انجام شد.همبستگی ناهنجاری AOD با شاخص‌های گیاهی برای کل سال، فصل بهار، دوره آوریل تا سپتامبر و مه تا سپتامبر محاسبه گردید تا تفاوت حساسیت در دوره‌های مختلف مشخص شود. تحلیل ماه‌به‌ماه به‌عنوان تحلیل تکمیلی و به دلیل محدودیت نمونه در هر ماه، برای شناسایی ماه‌های با رابطه قوی‌تر انجام شد. از آنجا که اثر گرد و غبار ممکن است تأخیری باشد، تحلیل همبستگی تأخیری برای فواصل صفر تا سه ماه پس از رخداد انجام شد تا ماندگاری اثر و زمان پاسخ گیاهان ارزیابی گردد. در نهایت، تحلیل رخدادمحور شامل محاسبه میانگین ناهنجاری NDVI و EVI در ماه وقوع رخداد و سه ماه پس از آن برای ماه‌های با AOD بالاتر از صدک ۹۰ انجام شد تا مشخص شود آیا کاهش پوشش گیاهی پس از طوفان‌های شدید ادامه دارد یا خیر. این چارچوب چندمرحله‌ای شامل همگام‌سازی داده‌ها، محاسبه ناهنجاری‌ها، تعیین آستانه‌ها، تحلیل‌های همبستگی (خام و مبتنی بر ناهنجاری)، رگرسیون، تحلیل فصلی، ماهانه و تأخیری، امکان بررسی دقیق‌تر رابطه پیچیده میان گرد و غبار و سلامت پوشش گیاهی استان خوزستان را فراهم آورد.

شاخص‌ها و معادلات مورد استفاده

در این پژوهش برای ارزیابی وضعیت پوشش گیاهی از دو شاخص NDVI و EVI استفاده شد. شاخص NDVI یکی از رایج‌ترین شاخص‌های سنجش‌ازدوری برای بررسی سبزینگی، تراکم و سلامت عمومی پوشش گیاهی است و بر اساس اختلاف بازتاب طیفی در باند مادون قرمز نزدیک و قرمز محاسبه می‌شود. این شاخص به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود (Rouse *et al.*, 1974):

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red} \quad (۱)$$

که در آن NIR بازتاب باند مادون قرمز نزدیک و Red بازتاب باند قرمز است. مقادیر بالاتر NDVI معمولاً نشان‌دهنده پوشش گیاهی سالم‌تر و متراکم‌تر است، در حالی‌که مقادیر پایین‌تر بیانگر کاهش سبزینگی، تنش گیاهی یا اراضی فاقد پوشش گیاهی است (Xue & Su, 2017; Zhang *et al.*, 2017).

شاخص EVI نیز به‌منظور کاهش اثرات پس‌زمینه خاک و برخی اثرات جوی و همچنین بهبود حساسیت نسبت به تغییرات پوشش گیاهی استفاده شد. این شاخص نسبت به NDVI در برخی شرایط، به‌ویژه در مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم یا شرایط جوی متغیر، عملکرد پایدارتری دارد. شاخص پوشش گیاهی بهبودیافته (EVI) علاوه بر NDVI در این پژوهش استفاده شد، زیرا در مناطق خشک و نیمه‌خشک که پوشش گیاهی پراکنده بوده و بازتاب پس‌زمینه خاک می‌تواند بر پاسخ طیفی گیاه اثرگذار باشد، حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات جزئی پوشش گیاهی دارد. برخلاف NDVI که در شرایط تراکم بالای پوشش گیاهی و یا در مناطقی با تأثیر قابل توجه بازتاب خاک ممکن است دچار اشباع یا کاهش حساسیت شود، EVI با اعمال ضرایب اصلاح‌کننده اثرات پس‌زمینه خاک و شرایط جوی، توانایی بهتری در آشکارسازی تغییرات پوشش گیاهی در اکوسیستم‌های کم‌تراکم دارد (Huete *et al.*, 2002). این ویژگی برای استان خوزستان اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا بخش زیادی از منطقه مورد مطالعه شامل اراضی خشک، دشت‌های کم‌پوشش، اراضی کشاورزی تحت تنش آبی و مناطق تحت تأثیر کانون‌های گردوغبار است که در آن‌ها تغییرات جزئی وضعیت پوشش گیاهی می‌تواند تحت تأثیر شرایط خاک و رطوبت سطحی قرار گیرد. مطالعات انجام‌شده در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران نیز نشان داده‌اند که شاخص‌های MODIS از جمله EVI و NDVI قابلیت مناسبی برای پایش تغییرات پوشش گیاهی و شرایط خشکسالی دارند و عملکرد آن‌ها به نوع پوشش، شرایط اقلیمی و ویژگی‌های منطقه وابسته است (Jafari *et al.*, 2017; Shahabfar & Eitzinger, 2011).

EVI به‌صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Huete *et al.*, 2002):

$$EVI = G \times \frac{NIR-Red}{NIR+C_1\times Red-C_2\times Blue+L} \quad (۲)$$

در این رابطه، NIR، Red و Blue به‌ترتیب بازتاب باندهای مادون قرمز نزدیک، قرمز و آبی هستند. ضرایب G، C1، C2 و L ضرایب تصحیحی هستند که در محاسبه استاندارد EVI معمولاً به‌ترتیب برابر ۲٫۵، ۶، ۷٫۵ و ۱ در نظر گرفته می‌شوند (Huete *et al.*, 2002).

برای بررسی تغییرات غیرعادی سلامت پوشش گیاهی، ناهنجاری‌های ماهانه NDVI و EVI محاسبه شد. ناهنجاری هر شاخص از اختلاف مقدار ماهانه آن با میانگین بلندمدت همان ماه به دست آمد. این روش باعث حذف اثر چرخه فصلی و تمرکز بر تغییرات غیرعادی پوشش گیاهی می‌شود. رابطه (۳) کلی ناهنجاری به‌صورت زیر است (Vicente-Serrano *et al.*, 2010):

$$Anomaly_{X(i,m)} = X_{i,m} - \overline{X}_m \quad (۳)$$

که در آن X_i,m مقدار شاخص پوشش گیاهی در سال i و ماه m، و Mean(X_m) میانگین بلندمدت همان ماه در کل دوره مطالعه است. مقدار منفی ناهنجاری نشان‌دهنده افت نسبی سلامت پوشش گیاهی نسبت به شرایط معمول همان ماه، و مقدار مثبت آن نشان‌دهنده بهبود نسبی پوشش گیاهی است.

برای پایش گردوغبار، از مؤلفه عمق نوری آئروسل گردوغبار (Dust Aerosol Optical Depth; Dust AOD) در طول موج ۵۵۰ نانومتر استفاده شد. این متغیر یکی از محصولات بازتحلیل MERRA-2 است که سهم آئروسل‌های گردوغباری از بار کل آئروسل جو را نشان می‌دهد (Randles *et al.*, 2017). AOD یا عمق نوری آئروسل، میزان تضعیف تابش خورشیدی توسط ذرات معلق در ستون جو را نشان می‌دهد و شاخصی بدون واحد است. در این مطالعه، Dust AOD در طول موج ۵۵۰ نانومتر به‌عنوان شاخص اصلی شدت گرد و غبار استفاده شد. همچنین Total AOD 550 nm برای بررسی بار کلی آئروسل‌ها و نسبت Dust AOD به Total AOD برای تعیین سهم گرد و غبار از کل بار آئروسلی به کار رفت (Levy *et al.*, 2007).

برای شناسایی رخدادهای شدید گرد و غبار، از آستانه‌های آماری مبتنی بر توزیع Dust AOD استفاده شد. در این پژوهش، صدک ۷۵ به‌عنوان آستانه رخدادهای نسبتاً شدید و صدک ۹۰ به‌عنوان آستانه رخدادهای شدید گرد و غبار در نظر گرفته شد. مقدار صدک ۷۵ برابر ۰٫۲۹۶ و مقدار صدک ۹۰ برابر ۰٫۳۶۰ محاسبه شد. بنابراین، ماه‌هایی که مقدار Dust AOD آن‌ها برابر یا بیشتر از صدک ۹۰ بود، به‌عنوان رخدادهای شدید گرد و غبار در تحلیل پاسخ تأخیری پوشش گیاهی استفاده شدند.

برای بررسی ارتباط بین گرد و غبار و پوشش گیاهی، ضریب همبستگی پیرسون بین Dust AOD و ناهنجاری‌های DVI و EVI محاسبه شد. این ضریب جهت و شدت رابطه خطی بین دو متغیر را نشان می‌دهد و مقدار آن بین ۱- تا ۱+ قرار دارد. مقدار منفی نشان‌دهنده رابطه معکوس و مقدار مثبت نشان‌دهنده رابطه مستقیم بین

دو متغیر است. رابطه ضریب همبستگی پیرسون (معادله ۴) به‌صورت زیر تعریف می‌شود (Pearson ET ALO., 1895; Zar *et al.*, 2010):

$$r = \frac{\Sigma(X_i-\overline{X})(Y_i-\overline{Y})}{\sqrt{\Sigma(X_i-\overline{X})^2 \times \Sigma(Y_i-\overline{Y})^2}} \quad (۴)$$

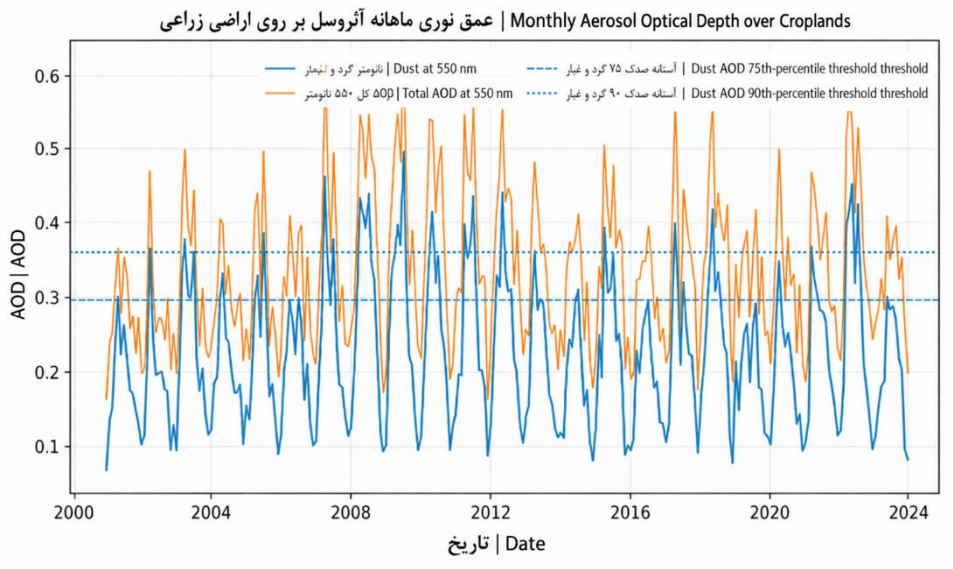
در این رابطه، Xi مقادیرDust AOD، Yi مقادیر ناهنجاری شاخص پوشش گیاهی، $\bar{X}$ میانگین Dust AOD و $\bar{Y}$ میانگین ناهنجاری پوشش گیاهی است. علاوه بر همبستگی، از رگرسیون خطی نیز برای بررسی روند کلی رابطه بین Dust AOD و ناهنجاری NDVI استفاده شد (Su *et al.*, 2012; Gong *et al.*, 2024).

در نهایت، برای ارزیابی اثر تأخیری رخدادهای شـــدید گرد و غبار بر سلامت پوشش گیاهی، میانگین ناهنجاری‌های NDVI و EVI در ماه وقوع رخداد شـــدید، یک ماه پس از رخداد و دو ماه پس از رخداد محاسبه شد. این تحلیل امکان بررسی این موضوع را فراهم کرد که آیا اثر گرد و غبار بر پوشـــش گیاهی بلافاصـــله ظاهر می‌شـــود یا در ماه‌های بعدی شدت بیشتری پیدا می‌کند.

نتایج

تغییرات زمانی AOD گرد و غبار

بررسی سری زمانی ماهانه AOD 550 nm طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ نشان داد که شدت گرد و غبار در استان خوزستان دارای نوسانات زمانی قابل توجهی است. مقادیر AOD گرد و غبار در طول دوره مطالعه الگوی یکنواختی نداشت و در برخی ماه‌ها افزایش‌های آشکاری در بار گرد و غبار مشاهده شد. این نوسانات می‌تواند ناشی از تغییرات شرایط اقلیمی، خشکسالی، کاهش رطوبت سطحی، تغییرات پوشش گیاهی، فعالیت منابع داخلی و انتقال توده‌های گرد و غبار از منابع فرامرزی باشد. برای جداسازی ماه‌های دارای گرد و غبار شدید، آستانه‌های آماری بر اساس توزیع AOD محاسبه شد. مقدار صدک ۷۵ برابر ۰٫۲۹۶ و مقدار صدک ۹۰ برابر ۰٫۳۶۰ به‌دست آمد. بر این اساس، ماه‌هایی با مقدار AOD برابر یا بیشتر از ۰٫۲۹۶ به‌عنوان ماه‌های دارای گرد و غبار نسبتاً شدید و ماه‌هایی با مقدار برابر یا بیشتر از ۰٫۳۶۰ به‌عنوان رخدادهای شدید گرد و غبار در نظر گرفته شدند. در مجموع، ۷۰ ماه بالاتر از صدک ۷۵ و ۲۹ ماه بالاتر از صدک ۹۰ قرار گرفتند. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در بسیاری از دوره‌ها تغییرات AOD با تغییرات AOD Total همراستا بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که گرد و غبار سهم مهمی از تغییرات بار آئروسلی منطقه را تشکیل می‌دهد. با این حال، از آنجاکه AOD Total شامل سایر انواع آئروسل‌ها مانند ذرات ناشی از آلودگی، احتراق و منابع انسانی نیز می‌شود، در تحلیل‌های اصلی از AOD به‌عنوان شاخص اختصاصی‌تر برای شدت گرد و غبار استفاده شد.



شکل ۲- تغییرات ماهانه AOD گرد و غبار و AOD کل در استان خوزستان طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳

Figure 2- Monthly changes in dust AOD and total AOD in Khuzestan Province during the period 2001 to 2023

مطابق شکل ۲، مقدار AOD گرد و غبار در طول دوره مطالعه نوسانات ماهانه قابل توجهی دارد و در برخی دوره‌ها از آستانه‌های صدک ۷۵ و ۹۰ عبور کرده است. عبور از صدک ۹۰ به‌عنوان رخداد شدید گرد و غبار در نظر گرفته شد و مبنای تحلیل پاسخ تأخیری پوشش گیاهی قرار گرفت. هم‌زمانی نسبی تغییرات AOD گرد و غبار و AOD کل نیز نشان می‌دهد که گرد و غبار سهم مهمی از بار آئروسلی منطقه

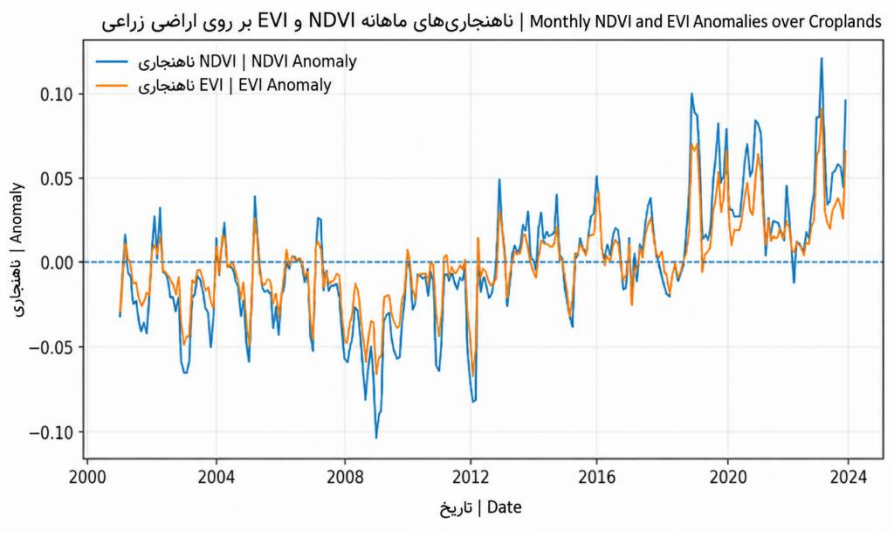
را تشکیل می‌دهد.

تغییرات ناهنجاری‌های NDVI و EVI

بررسی ناهنجاری‌های ماهانه NDVI و EVI در دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ نشان داد که سلامت پوشش گیاهی خوزستان دارای تغییرات زمانی مشخصی است؛ به‌طوری‌که مقادیر مثبت و منفی ناهنجاری به‌ترتیب بیانگر بهبود و افت نسبی وضعیت گیاهی هستند. مطابق شکل ۳، هر دو شاخص در بسیاری از دوره‌ها رفتار هم‌جهت نشان دادند که گواهی بر توانایی آن‌ها در بازتاب تغییرات عمومی پوشش گیاهی است. با این حال، تفاوت در حساسیت آن‌ها به تراکم گیاهی، پس‌زمینه خاک و شرایط جوی موجب شد شدت نوسانات این دو شاخص کاملاً یکسان نباشد. ناهنجاری‌های منفی قابل‌توجه نیز نشان‌دهنده تأثیر عواملی نظیر تنش خشکی، افت رطوبت خاک و رخدادهای گرد و غبار بر سلامت پوشش گیاهی بود. از نظر تفکیک مکانی، داده‌های مورد استفاده دارای مقیاس‌های مکانی متفاوتی بودند. داده‌های AOD به‌صورت شبکه‌ای تهیه شده و پس از استخراج محدوده استان خوزستان، مقادیر سلول های واقع در محدوده مورد مطالعه برای هر ماه میانگین‌گیری شد تا یک سری زمانی ماهانه نماینده کل استان ایجاد شود. داده‌های NDVI و EVI حاصل از محصول MODIS MOD13A2 با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر × ۱ کیلومتر نیز پس از اعمال محدوده استان، به‌صورت مشابه میانگین‌گیری فضایی شدند. بنابراین، اگرچه تفکیک مکانی اولیه داده‌های AOD و شاخص‌های پوشش گیاهی یکسان نبود، با تبدیل هر دو مجموعه داده به مقادیر میانگین منطقه‌ای، امکان مقایسه زمانی و تحلیل ارتباط بین گردوغبار و وضعیت پوشش گیاهی در مقیاس استان فراهم شد.

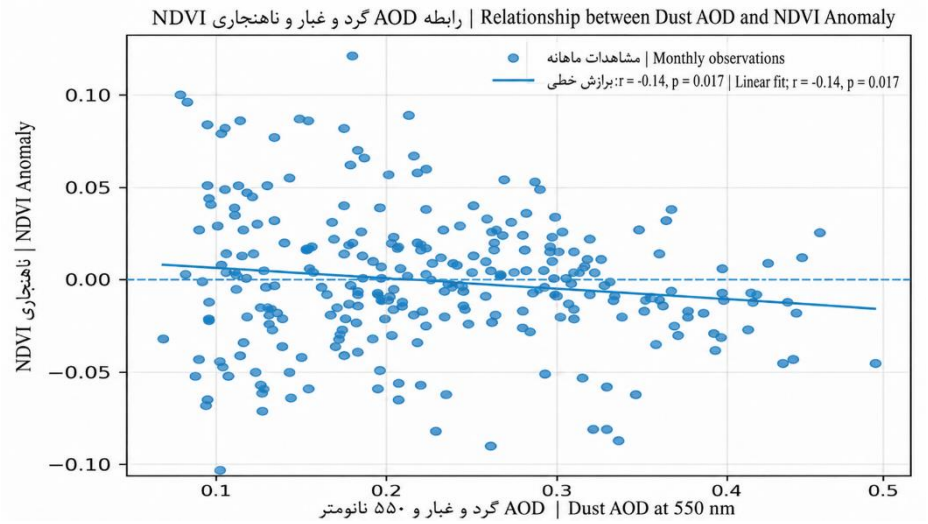
رابطه بین AOD خام و ناهنجاری‌های پوشش گیاهی

در مرحله نخست، رابطه بین مقادیر خام AOD و ناهنجاری‌های NDVI و EVI در مقیاس ماهانه بررسی شد. نتایج حاکی از وجود رابطه‌ای منفی اما ضعیف بود (ضریب همبستگی ۰٫۱۴۴- برای NDVI و ۰٫۱۳۲- برای EVI) که با وجود معناداری آماری (به‌ترتیب ۰٫۰۱۶۹ و ۰٫۰۲۸۷)، شدت پایینی داشت. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، اگرچه خط برازش شیب منفی دارد، اما پراکندگی زیاد نقاط نشان‌دهنده عدم ثبات رابطه است. این ضعف در همبستگی را می‌توان به وجود چرخه‌های فصلی قوی در داده‌های AOD و تفاوت زمانی میان دوره‌های افزایش گرد و غبار و مراحل رشد فعال پوشش گیاهی نسبت داد. بنابراین، در گام بعدی، با محاسبه ناهنجاری AOD، رابطه آن با شاخص‌های پوشش گیاهی مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۳- تغییرات ماهانه ناهنجاری NDVI و EVI در استان خوزستان طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳

Figure 3- Monthly changes in NDVI and EVI anomalies in Khuzestan Province during the period 2001 to 2023

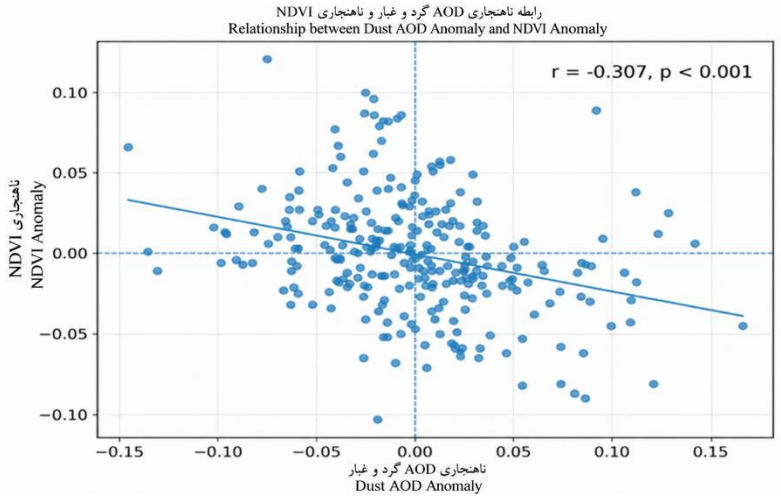


شکل ٤- رابطه بین AOD گرد و غبار در طول موج ۵۵۰ نانومتر و ناهنجاری NDVI در مقیاس ماهانه

Figure 4- Relationship between dust AOD at 550 nm and NDVI anomaly on a monthly scale

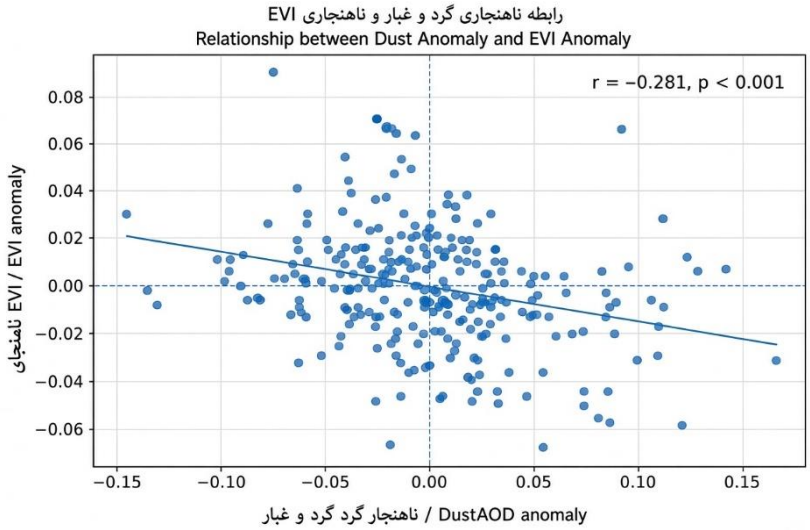
رابطه بین ناهنجاری AOD و ناهنجاری‌های پوشش گیاهی

پس از محاسبه ناهنجاری ماهانه AOD، بررسی رابطه بین افزایش غیرعادی گرد و غبار و افت غیرعادی شاخص‌های پوشش گیاهی نشان داد که حذف اثرات فصلی موجب افزایش قابل‌توجه شدت همبستگی می‌شود. ضریب همبستگی ناهنجاری AOD با ناهنجاری NDVI و EVI به‌ترتیب برابر ۰٫۳۰۷- و ۰٫۲۸۱- بود که هر دو از نظر آماری در سطح کمتر از ۰٫۰۰۱ معنادار بودند (شکل‌های ۵ و ۶). شیب منفی خطوط برازش در این شکل‌ها بیانگر کاهش نسبی شاخص‌های گیاهی با افزایش غیرعادی گرد و غبار است. این یافته تأیید می‌کند که ناهنجاری AOD شاخص مناسب‌تری نسبت به مقادیر خام برای ارزیابی اثرات گرد و غبار بر پوشش گیاهی در مقیاس ماهانه است. همچنین، نسبت AOD به AOD Total نیز رابطه منفی معناداری با ناهنجاری‌های پوشش گیاهی نشان داد (همبستگی ۰٫۱۷۳- برای NDVI و ۰٫۱۴۹- برای EVI با مقادیر احتمال ۰٫۰۰۳۹ و ۰٫۰۱۳۳). اگرچه این نتیجه نشان می‌دهد افزایش سهم گرد و غبار در کل بار آئرسلی با افت سلامت گیاهی همراه است، اما شدت این رابطه کمتر از ناهنجاری مطلق AOD بود.



شکل ٥- رابطه بین ناهنجاری AOD گرد و غبار و ناهنجاری NDVI در مقیاس ماهانه

Figure 5- Relationship between dust AOD anomaly and NDVI anomaly on a monthly scale



شکل ٦- رابطه بین ناهنجاری AOD گرد و غبار و ناهنجاری EVI در مقیاس ماهانه

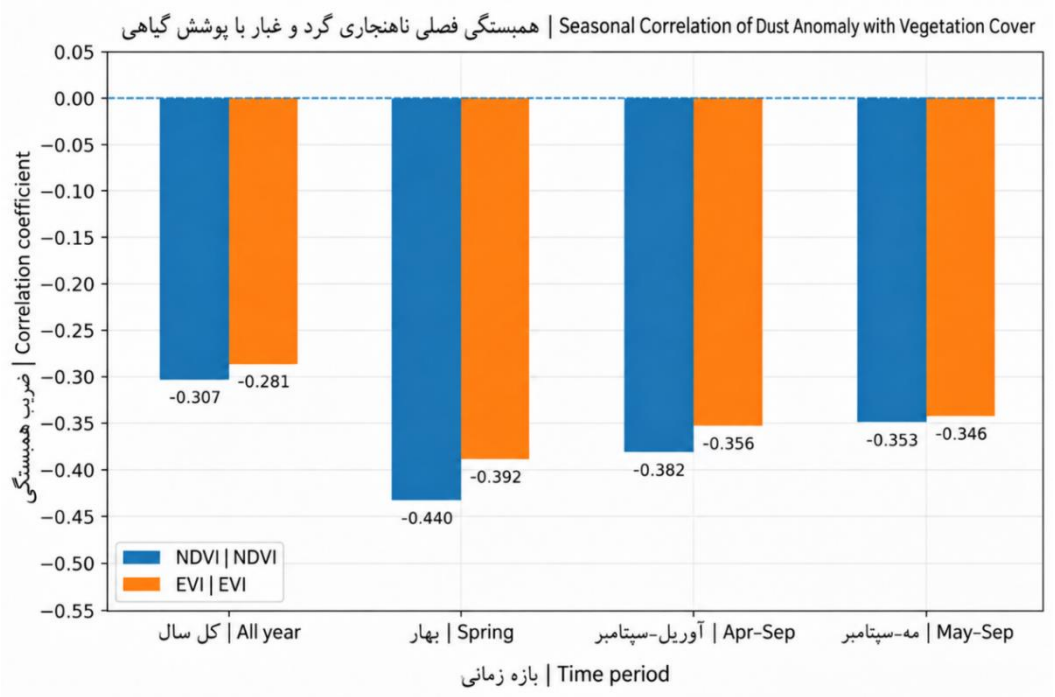
Figure 6- Relationship between dust AOD anomaly and EVI anomaly on a monthly scale

تحلیل زمانی در مقیاس‌های مختلف رابطه گرد و غبار و پوشش گیاهی

برای بررسی اثر تغییرات فصلی، رابطه بین ناهنجاری AOD و ناهنجاری‌های NDVI و EVI در بازه‌های زمانی مختلف محاسبه شد. نتایج نشان داد که شدت رابطه بین گرد و غبار و پوشش گیاهی در تمام ماه‌های سال یکسان نیست و در برخی فصل‌ها رابطه منفی آشکارتری مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۷، در فصل بهار، یعنی ماه‌های مارس تا مه، ضریب همبستگی ناهنجاری AOD با ناهنجاری NDVI برابر ۰,۳۸۸- و با ناهنجاری EVI برابر ۰,۳۴۶- به‌دست آمد. مقدار احتمال این روابط به‌ترتیب برابر ۰,۰۰۱۰ و ۰,۰۰۳۶ بود. این نتیجه نشان داد که در فصل بهار، افزایش غیرعادی گرد و غبار ارتباط قوی‌تری با افت شاخص‌های پوشش گیاهی دارد. این موضوع می‌تواند به فعال بودن پوشش گیاهی و حساسیت بیشتر محصولات کشاورزی در این بازه زمانی مربوط باشد. در بازه آوریل تا سپتامبر نیز ضریب همبستگی ناهنجاری AOD با ناهنجاری NDVI برابر ۰,۲۹۶- و با ناهنجاری EVIبرابر ۰,۲۷۵- محاسبه شد. مقدار احتمال این روابط به‌ترتیب برابر ۰,۰۰۰۴ و ۰,۰۰۱۱ بود. همچنین در بازه مه تا سپتامبر، ضرایب همبستگی برای NDVI و EVI به‌ترتیب برابر ۰,۲۶۷- و ۰,۲۶۱- به دست آمدند. نتایج دادند که در دوره‌های گرم‌تر و گردوغبارخیزتر سال نیز رابطه منفی بین گرد و غبار و سلامت پوشش گیاهی حفظ می‌شود، اما شدت آن نسبت به فصل بهار کمتر است.

تحلیل ماه‌به‌ماه رابطه گرد و غبار و پوشش گیاهی

برای بررسی دقیق‌تر تغییرات درون‌سالانه، همبستگی بین ناهنجاری AOD و ناهنجاری‌های NDVI و EVI به‌صورت ماه‌به‌ماه محاسبه شد. نتایج نشان داد که شدت رابطه بین گردوغبار و پوشش گیاهی در طول سال ثابت نبوده و در برخی ماه‌ها، همبستگی منفی قوی‌تری نسبت به میانگین کل دوره مشاهده شده است. مطابق شکل ۸، در ماه فوریه ضریب همبستگی ناهنجاری AOD با ناهنجاری NDVI برابر ۰,۶۱۵- و با ناهنجاری EVI برابر ۰,۵۵۳- بود. در ماه مارس، این ضرایب به‌ترتیب برابر ۰,۴۵۵- و ۰,۴۴۵- محاسبه شدند. در ماه آوریل نیز همبستگی ناهنجاری AOD باNDVI برابر ۰,۵۰۶- و با EVI برابر ۰,۴۱۹- بود. در ماه مه، ضرایب همبستگی برای NDVI و EVI به‌ترتیب برابر ۰,۵۰۱- و ۰,۴۳۳- به‌دست آمدند. همچنین در ماه جولای، همبستگی با NDVI برابر ۰,۵۲۶- و با EVI برابر ۰,۵۳۹- بود. این نتایج نشان می‌دهد که اثر گرد و غبار بر پوشش گیاهی در تمام ماه‌ها یکسان نیست و در برخی ماه‌های خاص، به‌ویژه ماه‌هایی که با رشد فعال گیاه یا افزایش شدت گرد و غبار همزمان هستند، رابطه منفی آشکارتری مشاهده می‌شود. با این حال، از آنجاکه در تحلیل ماه‌به‌ماه تعداد مشاهدات برای هر ماه محدودتر است، نتایج این بخش باید به‌عنوان تحلیل تکمیلی تفسیر شوند. علاوه بر تحلیل ماه‌به‌ماه، بررسی همبستگی‌های تأخیری نیز نکات قابل توجهی درباره زمان پاسخ پوشش گیاهی به رخدادهای گردوغبار نشان داد. یکی از یافته‌های قابل توجه این پژوهش، مشاهده همبستگی مثبت بین ناهنجاری گردوغبار و شاخص‌های پوشش گیاهی در ماه اول (ژانویه) است. این رفتار ظاهراً برخلاف انتظار اولیه است، زیرا افزایش گردوغبار معمولاً با کاهش سلامت پوشش گیاهی همراه می‌شود. با این حال، این همبستگی مثبت می‌تواند ناشی از اثر هم‌زمانی برخی عوامل محیطی باشد.



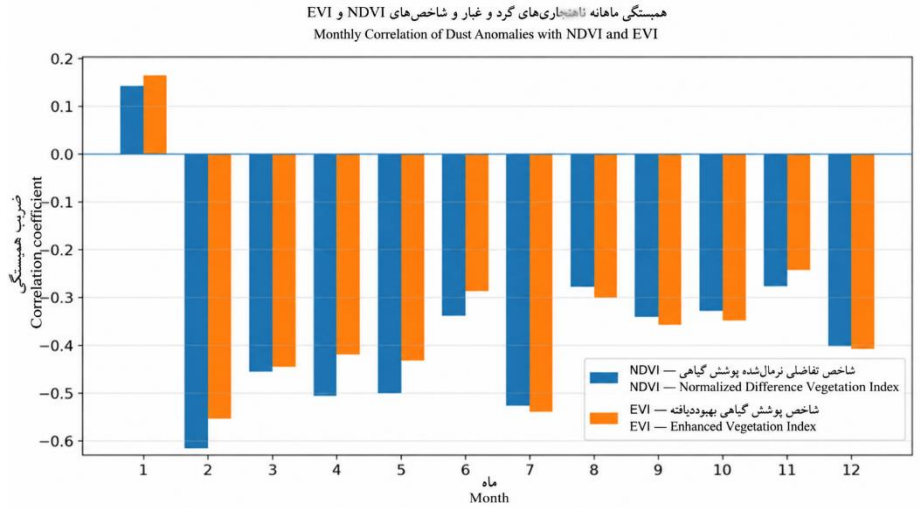
شکل ۷- مقایسه ضریب همبستگی ناهنجاری AOD گرد و غبار با ناهنجاری‌های NDVI و EVI در بازه‌های زمانی مختلف

Figure 7- Comparison of the correlation coefficient of dust AOD anomaly with NDVI and EVI anomalies in different time intervals

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، رخدادهای گردوغبار اغلب در دوره‌هایی با شرایط جوی ناپایدار، افزایش رطوبت نسبی یا تغییرات فصلی همراه هستند که ممکن است به‌طور موقت شرایط رشد گیاه را بهبود دهند. همچنین، گردوغبار تنها عامل کنترل‌کننده تغییرات پوشش گیاهی نیست و عواملی مانند بارش، رطوبت خاک، دمای هوا و چرخه رشد گیاهان می‌توانند بر پاسخ کوتاه‌مدت شاخص‌های پوشش گیاهی اثرگذار باشند. بنابراین، همبستگی مثبت در تأخیر یک‌ماهه می‌تواند نشان‌دهنده اثر غالب عوامل محیطی همراه با رخداد گردوغبار در برخی دوره‌ها باشد، نه لزوماً اثر تقویت‌کننده گردوغبار بر پوشش گیاهی. تفاوت در شدت پاسخ NDVI و EVI نیز از دیگر نتایج قابل توجه پژوهش است. در برخی ماه‌ها، مقدار همبستگی EVI با ناهنجاری AODبیشتر ازNDVI بود. این موضوع می‌تواند به حساسیت متفاوت این دو شاخص نسبت به ساختار پوشش گیاهی مرتبط باشد. EVI به دلیل استفاده از ضرایب اصلاح‌کننده اثرات پس‌زمینه خاک و شرایط جوی، در مناطق دارای پوشش گیاهی پراکنده و مناطق خشک می‌تواند حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات جزئی پوشش گیاهی داشته باشد. در مقابل، NDVI در مناطق کم‌پوشش ممکن است تحت تأثیر بیشتر بازتاب خاک قرار گیرد و تغییرات جزئی پوشش گیاهی را با حساسیت کمتری نشان دهد. بنابراین، پاسخ قوی‌تر EVI در برخی دوره‌ها می تواند ناشی از قابلیت بالاتر این شاخص در ثبت تغییرات کوتاه‌مدت و جزئی پوشش گیاهی باشد.

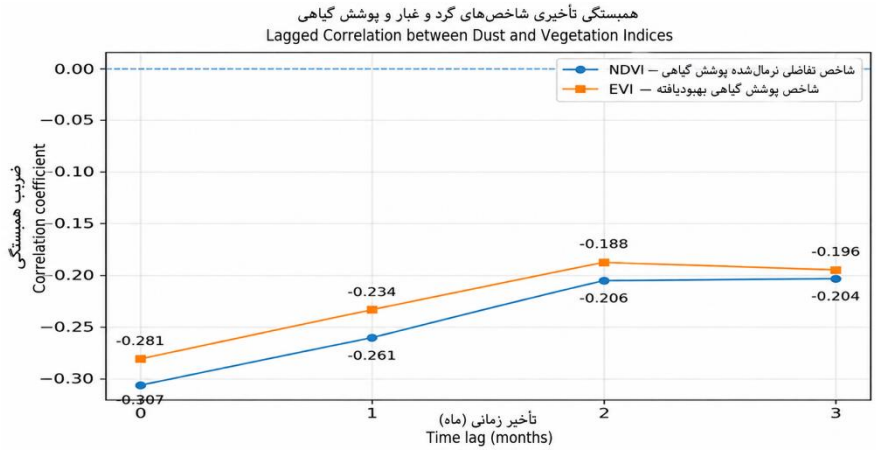
تحلیل همبستگی تأخیری

برای بررسی ماندگاری اثر گرد و غبار بر پوشش گیاهی، رابطه بین ناهنجاری AOD و ناهنجاری‌های NDVI و EVI در تأخیرهای زمانی صفر تا سه ماه بررسی شد. نتایج نشان داد که رابطه منفی بین گردوغبار و پوشش گیاهی تنها محدود به ماه وقوع افزایش گردوغبار نیست و در ماه‌های بعد نیز ادامه دارد. این تداوم اثر می‌تواند ناشی از ماندگاری پیامدهای فیزیولوژیک رسوب ذرات گردوغبار بر سطح برگ، کاهش فتوسنتز، محدود شدن تبادل گازی و همچنین تشدید هم‌زمان تنش آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک باشد. در شرایط اقلیمی خوزستان، به‌دلیل محدودیت منابع آب و حساسیت بالای اکوسیستم‌های منطقه، بازیابی پوشش گیاهی پس از رخدادهای شدید گردوغبار ممکن است با تأخیر زمانی همراه شود (Engelstaedter *et al.*, 2003; Middleton & Kang, 2017). مطابق شکل ۹، بیشترین شدت رابطه در همان ماه مشاهده شد؛ به‌طوری‌که ضریب همبستگی ناهنجاری AOD با ناهنجاری NDVI برابر ۰٫۳۰۷- و با ناهنجاری EVI برابر ۰٫۲۸۱- بود. در تأخیر یک‌ماهه، این ضرایب به‌ترتیب به ۰٫۲۶۱- و ۰٫۲۳۴- کاهش یافتند.



شکل ۸- تغییرات ماهانه ضریب همبستگی بین ناهنجاری AOD گرد و غبار و ناهنجاری‌های NDVI و EVI

Figure 8- Monthly changes in the correlation coefficient between dust AOD anomaly and NDVI and EVI anomalies



شکل ۹- همبستگی تأخیری بین ناهنجاری AOD گرد و غبار و ناهنجاری‌های NDVI و EVI در تأخیرهای صفر تا سه‌ماهه

Figure 9- Lag correlation between dust AOD anomaly and NDVI and EVI anomalies at lags of zero to three months

در تأخیر دوماهه، همبستگی با NDVI برابر ۰٫۲۰۶- و با EVI برابر ۰٫۱۸۸- محاسبه شد. همچنین در تأخیر سه‌ماهه، ضرایب همبستگی برای NDVI وEVI به‌ترتیب برابر ۰٫۲۰۴- و ۰٫۱۹۶- بودند. این الگو نشان داد که اثر منفی گرد و غبار بر پوشش گیاهی در همان ماه آشکارتر است، اما بخشی از این رابطه تا چند ماه بعد نیز باقی می‌ماند. کاهش تدریجی ضرایب همبستگی در تأخیرهای زمانی بعدی می‌تواند نشان‌دهنده کاهش اثر مستقیم گرد و غبار و افزایش نقش سایر عوامل محیطی و زراعی در کنترل تغییرات پوشش گیاهی باشد.

پاسخ پوشش گیاهی به رخدادهای شدید گرد و غبار

برای بررسی رفتار پوشش گیاهی پس از رخدادهای شدید، ماه‌هایی که مقدار AOD آنها برابر یا بیشتر از صدک ۹۰ بود به‌عنوان رخدادهای شدید گرد و غبار انتخاب شدند. مقدار صدک ۹۰ برابر ۰٫۳۶۰ بود و بر این اساس، ۲۹ ماه از کل دوره مطالعه به‌عنوان ماه‌های دارای رخداد شدید گرد و غبار شناسایی شدند. نتایج نشان داد که میانگین ناهنجاری NDVIدر ماه وقوع رخداد شدید برابر ۰٫۰۱۱۷- بود. این مقدار در یک ماه پس از رخداد به ۰٫۰۱۳۷- و در دو ماه پس از رخداد به ۰٫۰۱۴۶- رسید. همچنین میانگین ناهنجاریEVI در ماه وقوع رخداد شدید برابر ۰٫۰۰۶۷- بود و در تأخیرهای یک‌ماهه و دوماهه به‌ترتیب به ۰٫۰۰۸۱- و ۰٫۰۰۹۲- کاهش یافت. این الگو در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج تحلیل رخدادمحور نشان می‌دهد که پس از رخدادهای شدید گرد و غبار، افت شاخص‌های پوشش گیاهی نه‌تنها در همان ماه مشاهده می‌شود، بلکه در ماه‌های بعد نیز ادامه می‌یابد. این رفتار می‌تواند بیانگر اثر تجمعی گرد و غبار، کاهش تدریجی توان فتوسنتزی گیاه، کاهش

رطوبت سطحی یا همزمانی رخدادهای گرد و غبار با شرایط تنش‌زای اقلیمی باشد.

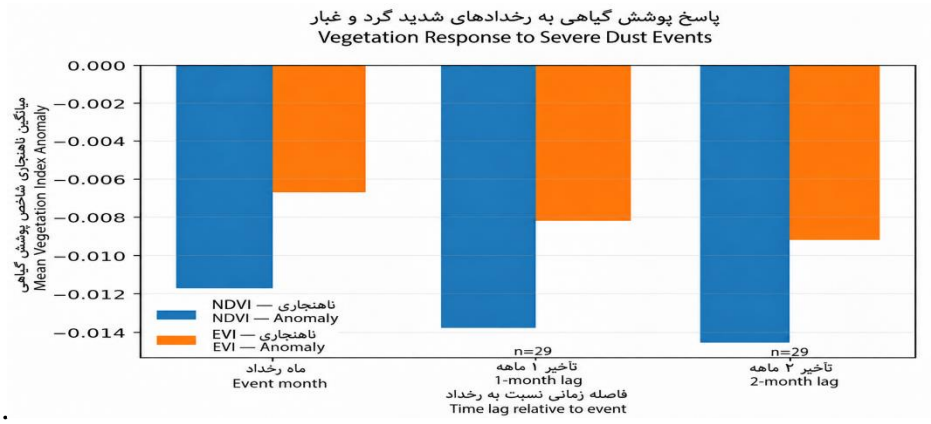
تغییرات سالانه AOD و ناهنجاری‌های پوشش گیاهی

برای بررسی الگوی بلندمدت تغییرات گرد و غبار و سلامت پوشش گیاهی، میانگین سالانه AOD و ناهنجاری‌های سالانهNDVI و EVI محاسبه شد. نتایج نشان داد که شدت گرد و غبار و وضعیت پوشش گیاهی در مقیاس سالانه دارای نوسانات قابل توجهی بوده و در برخی سال‌ها افزایش AOD با کاهش ناهنجاری‌های پوشش گیاهی همراه شده است. مطابق شکل ۱۱، تغییرات سالانهAOD و ناهنجاری‌های NDVIو EVI کاملاً یکنواخت نیستند. در برخی سال‌ها افزایش بار گرد و غبار با افت نسبی پوشش گیاهی همزمان شده است، اما در برخی سال‌های دیگر، تغییرات پوشش گیاهی مستقل از تغییرات AOD ظاهر شده است. در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵، کاهش همزمان AOD و ناهنجاری‌های منفی پوشش گیاهی نشان می‌دهد که تغییرات سلامت پوشش گیاهی در این دوره تنها تحت کنترل گردوغبار نبوده است. کاهش بار گردوغبار الزاماً به معنای بهبود فوری شرایط پوشش گیاهی نیست، زیرا پاسخ پوشش گیاهی به تغییرات محیطی می‌تواند تحت تأثیر عوامل محدودکننده دیگری مانند کمبود بارش، کاهش رطوبت خاک، تنش آبی، تغییرات منابع آب و شرایط مدیریتی اراضی قرار گیرد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند خوزستان، محدودیت منابع آب و شرایط خشکی سطح زمین می‌تواند یکی از عوامل مؤثر در کاهش شاخص‌های پوشش گیاهی حتی در دوره‌هایی با کاهش شدت گردوغبار باشد. همچنین، اثرات تأخیری تنش‌های محیطی و زمان پاسخ اکوسیستم گیاهی ممکن است باعث شود تغییرات پوشش گیاهی همزمان با تغییرات AOD رخ ندهد. عدم تطابق کامل بین تغییرات سالانهAOD و ناهنجاری‌های پوشش گیاهی نشان می‌دهد که تغییرات بلندمدت پوشش گیاهی حاصل برهم‌کنش چندین عامل محیطی و انسانی است. در مقیاس سالانه، عواملی مانند بارش، رطوبت خاک، دسترسی به منابع آب، الگوی کشت، زمان کاشت و برداشت و مدیریت زراعی می‌توانند بر پاسخ پوشش گیاهی اثرگذار باشند. بنابراین، اگرچه افزایش AOD در برخی سال‌ها با کاهش شاخص‌های گیاهی همراه بوده است، تفسیر اثر گردوغبار بر پوشش گیاهی باید با در نظر گرفتن همزمان عوامل اقلیمی، هیدرولوژیک و مدیریتی انجام شود.

مقایسه استانداردشده تغییرات گرد و غبار و پوشش گیاهی

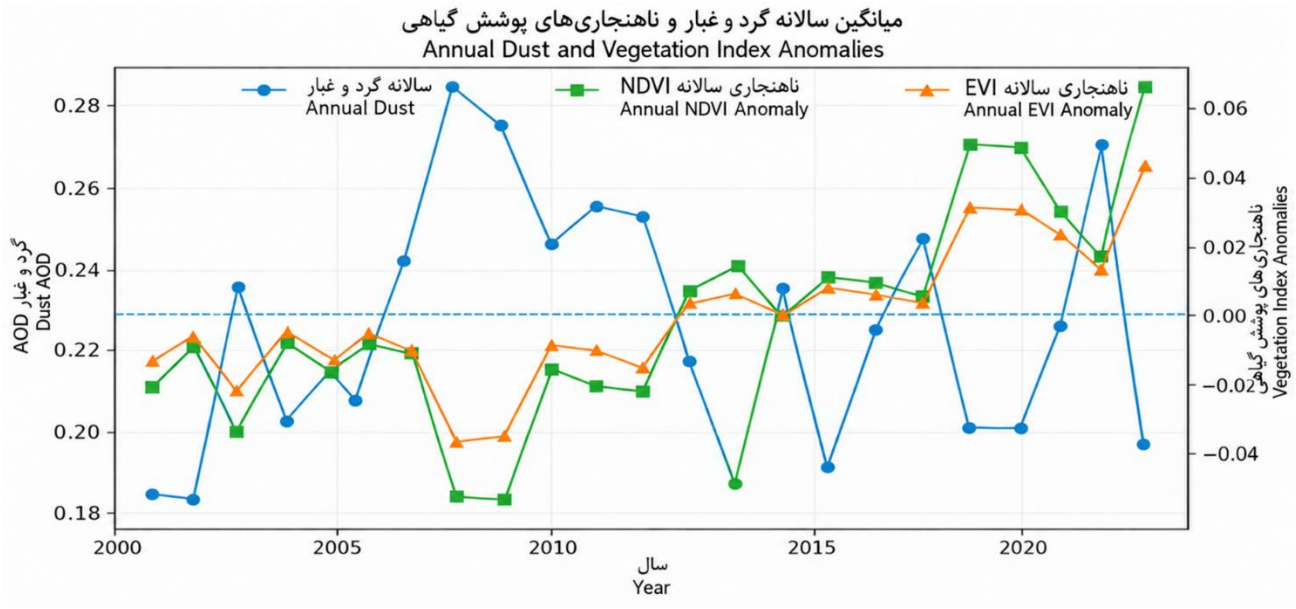
برای مقایسه بهتر نوسانات AOD، NDVI و EVI در یک مقیاس مشترک، سری‌های زمانی این متغیرها استانداردسازی شدند. شکل ۱۲ تغییرات استانداردشده AOD و ناهنجاری‌های استانداردشدهNDVI و EVIرا نشان می‌دهد. این مقایسه کمک می‌کند دوره‌هایی که افزایش نسبی گرد و غبار با کاهش نسبی شاخص‌های پوشش گیاهی همراه بوده است، بهتر شناسایی شوند.

نتایج این بخش نشان داد که در برخی دوره‌ها، افزایش استانداردشده AOD با افت همزمان یا تأخیری شاخص‌های NDVI و EVI همراه بوده است. با این حال، در تمام دوره‌ها چنین الگوی ثابتی مشاهده نمی‌شود. این موضوع بار دیگر نشان می‌دهد که گرد و غبار یکی از عوامل مؤثر بر سلامت پوشش گیاهی است، اما تنها عامل کنترل‌کننده تغییرات آن نیست.



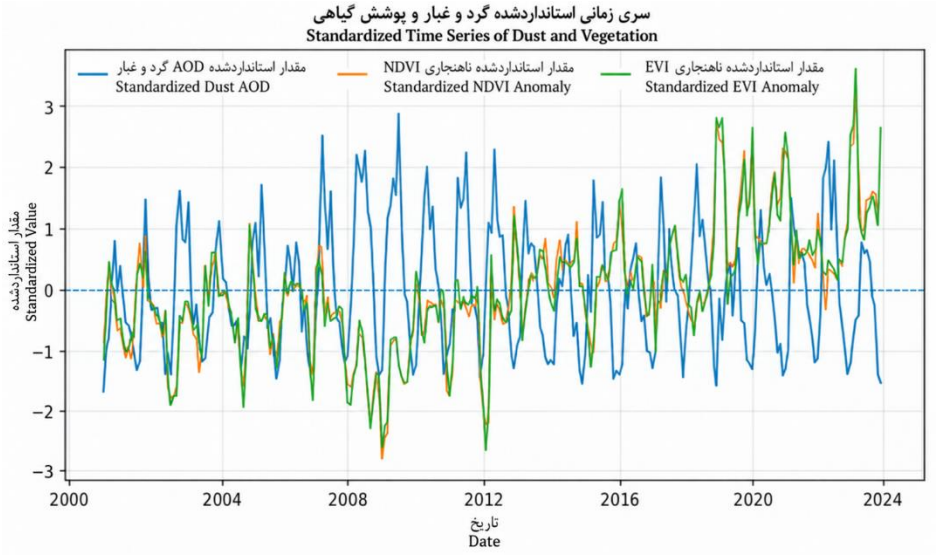
شکل ۱۰- میانگین ناهنجاری NDVI و EVI در ماه وقوع رخدادهای شدید گرد و غبار و در تأخیرهای یک‌ماهه و دوماهه پس از رخداد

Figure 10- Average NDVI and EVI anomalies in the month of occurrence of severe dust events and at one-month and two-month lags after the event



شکل ۱۱- تغییرات سالانه AOD و ناهنجاری‌های سالانه NDVI و EVI در استان خوزستان طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳

Figure 11- Annual changes in AOD and annual anomalies in NDVI and EVI in Khuzestan Province during the period 2001 to 2023



شکل ۱۲- سری زمانی استانداردشده AOD و ناهنجاری‌های استانداردشده NDVI و EVI برای مقایسه تغییرات نسبی سه متغیر در یک مقیاس مشترک

Figure 12- Standardized AOD time series and standardized NDVI and EVI anomalies to compare relative changes of three variables on a common scale

نتایج و بحث

یافته‌های این پژوهش نشان داد که رابطه میان رخدادهای گرد و غبار و سلامت پوشش گیاهی در استان خوزستان، رابطه‌ای منفی، معنادار و پیچیده است. تحلیل اولیه مبتنی بر مقادیر خام AOD و ناهنجاری‌های شاخص‌های گیاهی (NDVI و EVI) همبستگی ضعیفی را نشان داد (۰,۱۴۴- و ۰,۱۳۲-) که این ضعف را می‌توان به وجود چرخه‌های فصلی قوی در هر دو متغیر و تأثیر همزمان عوامل محیطی متعدد (مانند بارش، دما و مدیریت آبیاری) نسبت داد. با این حال، پس از حذف اثرات فصلی از طریق محاسبه ناهنجاری‌های ماهانه، شدت همبستگی به‌طور چشمگیری افزایش یافت. ضریب همبستگی ناهنجاری AOD با ناهنجاری NDVI و EVI به‌ترتیب برابر ۰,۳۰۷-

و ۰٫۲۸۱- به‌دست آمد که هر دو از نظر آماری معنادار بودند. این نتیجه تأیید می‌کند که انحراف شدت گرد و غبار از شرایط نرمال ماهانه، عامل تعیین‌کننده‌تری در کاهش سلامت گیاه است تا مقادیر مطلق آئروسل‌ها و با مطالعات پیشین که بر اهمیت تمایز قائل شدن بین تغییرات فصلی و شوک‌های محیطی تأکید دارند، همسو است. افزایش شدت رابطه پس از حذف چرخه‌های فصلی نشان می‌دهد که اثر گردوغبار بیشتر به صورت یک تنش غیرعادی و ناگهانی بر پوشش گیاهی ظاهر می‌شود تا یک عامل ثابت محیطی. این یافته با مطالعاتی که نشان داده‌اند شاخص‌های گیاهی در مناطق خشک، تحت تأثیر هم‌زمان شرایط اقلیمی و رخدادهای حدی مانند طوفان‌های گردوغبار قرار می‌گیرند، همخوانی دارد (Fan *et al*., 2014; Kim *et al*., 2017; Wu *et al*., 2022). در چنین شرایطی، مقادیر خام شاخص‌های پوشش گیاهی و آئروسل‌ها ممکن است تحت تأثیر چرخه‌های طبیعی سالانه قرار گرفته و شدت واقعی ارتباط میان گردوغبار و سلامت گیاه را پنهان کنند. همچنین، تحلیل نسبت AOD به AOD Total نشان داد که افزایش سهم گرد و غبار در کل بار آئرسلی با افت شاخص‌های گیاهی همراه است، اگرچه شدت این رابطه کمتر از ناهنجاری مطلق AOD بود که بیانگر تأثیر مستقیم‌تر «شدت غیرعادی» گرد و غبار بر گیاهان در منطقه مورد مطالعه است. تحلیل‌های زمانی نشان داد که اثر گرد و غبار بر پوشش گیاهی یکنواخت نیست و به زمان وقوع رخداد بستگی دارد. بیشترین همبستگی منفی در فصل بهار مشاهده شد (همبستگی ناهنجاری AOD با NDVI برابر ۰٫۳۸۸-) که این یافته با شرایط اقلیمی خوزستان همخوانی دارد، زیرا بهار همزمان با دوره رشد فعال محصولات زراعی و حساسیت بالای گیاهان به تنش‌های محیطی است. در این دوره، پوشش گیاهی به‌دلیل فعالیت متابولیک بالا، آسیب‌پذیری بیشتری در برابر رسوب ذرات و کاهش تابش خورشیدی نشان می‌دهد. این الگو با نتایج مطالعات انجام‌شده در مناطق خشک و نیمه‌خشک که نشان داده‌اند حساسیت پوشش گیاهی به تنش‌های محیطی در دوره رشد فعال افزایش می‌یابد، مطابقت دارد (Fan *et al*., 2014; Tan, 2016). تحلیل ماه‌به‌ماه نیز تأیید کرد که ماه‌های فوریه، آوریل، مه و جولای دارای همبستگی‌های منفی قابل‌توجهی هستند که گویای تشدید اثرات گرد و غبار در زمان‌هایی است که با کاهش رطوبت خاک یا افزایش دما همزمان می‌شوند. یکی از جنبه‌های مهم این پژوهش، بررسی اثرات تأخیری گرد و غبار بود. نتایج تحلیل‌های همبستگی تأخیری و رخدادمحور نشان داد که کاهش سلامت پوشش گیاهی تنها محدود به ماه وقوع طوفان گرد و غبار نیست و تا سه ماه پس از رخداد نیز ادامه می‌یابد. در ماه‌های دارای رخدادهای شدید (AOD > صدک ۹۰)، میانگین ناهنجاری NDVI و EVI منفی شد و این روند کاهشی در ماه‌های بعد نیز تداوم یافت. این تأخیر می‌تواند ناشی از مکانیسم‌های فیزیولوژیک مانند مسدود شدن روزنه‌های برگ، کاهش فتوسنتز، تغییر در تعادل آب و خاک و همچنین تأثیرات تجمعی تنش‌های محیطی باشد. با این حال، کاهش تدریجی ضریب همبستگی در تأخیرهای طولانی‌تر نشان می‌دهد که با گذشت زمان، عوامل مدیریتی (مانند آبیاری) و اقلیمی دیگر (مانند بارش) بر وضعیت گیاه غلبه می‌یابند و همچنین تأثیرات تجمعی تنش‌های محیطی باشد (Engelstaedter *et al*., 2003; Middleton & Kang, 2017). مشابه این رفتار در مطالعات مربوط به اثر تنش‌های محیطی بر پوشش گیاهی نیز گزارش شده است؛ به‌طوری‌که پاسخ اکوسیستم‌ها به تنش‌های جوی معمولاً فوری نبوده و می‌تواند با تأخیر زمانی ظاهر شود (Kim et *al*., 2017; Wu *et al*., 2022). ماندگاری اثر گردوغبار پس از رخداد، احتمالاً به تجمع ذرات روی سطح برگ، کاهش ظرفیت فتوسنتزی و استمرار شرایط نامساعد محیطی وابسته است. با این حال، کاهش اثر در ماه‌های بعد نشان می‌دهد که اکوسیستم‌ها توان بازیابی نسبی داشته و عوامل محدودکننده دیگری مانند بارش و مدیریت منابع آب در ادامه دوره رشد نقش تعیین‌کننده پیدا می‌کنند. یافته‌های این مطالعه در چارچوب شرایط خاص اکولوژیک خوزستان قابل تفسیر است. خوزستان به‌دلیل همجواری با منابع گرد و غبار داخلی و فرامرزی، خشکسالی‌های متوالی و تخریب تالاب‌های شادگان و هورالعظیم، مستعد تشدید این پدیده است. کاهش پوشش گیاهی و رطوبت خاک نه‌تنها ظرفیت تولید گرد و غبار را افزایش می‌دهد، بلکه آسیب‌پذیری اکوسیستم‌های زراعی را نیز بیشتر می‌کند. این نتایج با پژوهش‌های پیشین که بر نقش تالاب‌های خشک‌شده به‌عنوان منابع گرد و غبار و تأثیر منفی آن بر محیط زیست تأکید داشته‌اند، همسو است (Dargahian *et al*., 2023; Khanfari *et al*., 2024; Yousefi Kebria *et al*., 2025). همچنین، رابطه منفی مشاهده‌شده بین آئروسل‌ها و شاخص‌های گیاهی، با یافته‌های سایر مناطق خشک جهان مطابقت دارد. با وجود معنادار بودن روابط آماری، باید توجه داشت که همبستگی به‌تنهایی دلیلی بر علیت قطعی نیست، زیرا سلامت پوشش گیاهی تابعی از عوامل پیچیده‌ای از جمله مدیریت زراعی، نوع محصول و وضعیت آبیاری است. عدم دسترسی به داده‌های دقیق زمینی با تفکیک بالا و مدل‌سازی همزمان تمام متغیرهای اثرگذار، از محدودیت‌های این پژوهش بود. برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود متغیرهای اقلیمی و زراعی (بارش، دما، رطوبت خاک، نوع کشت و مدیریت آبیاری) در مدل‌های رگرسیون چندمتغیره گنجانده شوند تا سهم مستقل گرد و غبار تفکیک گردد و از داده‌های سنجش‌ازدوری با تفکیک مکانی بالاتر برای ارزیابی محصولات خاص استفاده شود. نتایج این پژوهش با مطالعات انجام‌شده در سایر مناطق خشک جهان که رابطه منفی بین افزایش بار آئروسل و کاهش شاخص‌های پوشش گیاهی را گزارش کرده‌اند، هم‌راستا است (Fan *et al*., 2014; Kim *et al*., 2017; Bao *et al*., 2021). با این حال، شدت این ارتباط به شرایط منطقه‌ای وابسته است و عواملی مانند نوع پوشش گیاهی، میزان خشکی منطقه، منابع تولید گردوغبار و مدیریت آب می‌توانند بر میزان

آسیب‌پذیری اکوسیستم اثرگذار باشند. بنابراین، نتایج خوزستان باید در چارچوب شرایط خاص این منطقه، شامل وجود تالاب‌های آسیب‌دیده، منابع داخلی گردوغبار و وابستگی بالای کشاورزی به منابع آبی تفسیر شود. در مجموع، این پژوهش نشان داد که رخدادهای شدید گرد و غبار، به‌ویژه در فصل بهار و با اثرات تأخیری، منجر به افت معنادار سلامت پوشش گیاهی در استان خوزستان می‌شوند. اگرچه گرد و غبار تنها عامل تغییرات پوشش گیاهی نیست، اما به‌عنوان یک تنش محیطی مهم، نقش قابل‌توجهی در کاهش عملکرد اکوسیستم‌های کشاورزی ایفا می‌کند. بنابراین، مدیریت پایدار منابع آب، احیای تالاب‌ها و کنترل منابع گرد و غبار، نه‌تنها برای بهبود کیفیت هوا، بلکه برای حفظ امنیت غذایی و پایداری اکوسیستم‌های استان خوزستان ضروری است.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی رابطه بین رخدادهای گردوغبار و تغییرات سلامت پوشش گیاهی در استان خوزستان طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ انجام شد. نتایج نشان داد که پس از حذف اثرات فصلی، افزایش ناهنجاری AOD با کاهش معنادار شاخص‌های NDVI وEVI همراه است که بیانگر اثر منفی رخدادهای غیرعادی گردوغبار بر وضعیت پوشش گیاهی منطقه است. همچنین، شدت این رابطه در دوره‌های زمانی مختلف یکسان نبود و بیشترین اثر منفی در فصل بهار، همزمان با دوره رشد فعال پوشش گیاهی، مشاهده شد.

تحلیل‌های تأخیری نشان داد که اثر گردوغبار تنها محدود به زمان وقوع رخداد نیست و می‌تواند تا چند ماه پس از آن بر وضعیت پوشش گیاهی باقی بماند. نتایج رخدادمحور نیز تأیید کرد که رخدادهای شدید گردوغبار موجب کاهش شاخص‌های گیاهی در ماه‌های پس از وقوع می‌شوند. مقایسه NDVI و EVI نشان داد که هر دو شاخص توانایی آشکارسازی اثرات گردوغبار را دارند، اگرچه در برخی دوره‌ها EVI حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات پوشش گیاهی نشان داد.

در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که گردوغبار به‌عنوان یکی از تنش‌های محیطی مهم در استان خوزستان، در کنار عوامل اقلیمی و مدیریتی، نقش مؤثری در تغییر وضعیت پوشش گیاهی دارد. توجه به مدیریت منابع آب، احیای تالاب‌های آسیب‌دیده و کنترل کانون‌های تولید گردوغبار می‌تواند در کاهش پیامدهای این پدیده و حفظ پایداری اکوسیستم‌های منطقه مؤثر باشد.

References

1. Bayat, R., Jafari, S., Ghermecheshmeh, B., & Charkhabi, A. (2016). Studying the effect of dust on vegetation changes: Case study of Shadegan Wetland, Khuzestan. *Remote Sensing and Geographic Information System in Natural Resources, 7*(2), 17–32. https://doi.org/10.1038/s41598-025-96935-2
2. Behrami, H.-A., Jalali, M., & Darvishi Bolurani, A. (2013). Spatiotemporal modeling of dust storm occurrence in Khuzestan Province. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS, 5*(2), 95–114.
3. Jafari, S. (2020). Investigating the effects of dam construction and changes in the hydrological regime of the Karun River on soil salinity and dust occurrence in the Khuzestan Plain. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering, 43*(1), 157–172.
4. Feizollahpour, M. (2025). Monitoring moisture stress and drought based on correlation analysis between moisture-, vegetation-, and temperature-based spectral indices in Shadegan Wetland. *Hydrogeomorphology, 12*(45), 1–19.
5. Adib, A. (2022). Effects of the Karkheh Dam construction on haze generation due to geomorphological changes in the Khuzestan Province, Southwest Iran. *Water Supply, 22*(2), 2338–2350. https://doi.org/10.2166.ws.2021.376
6. Alam, K., Iqbal, M.J., Blaschke, T., Qureshi, S., & Khan, G. (2010). Monitoring spatio-temporal variations in aerosols and aerosol-cloud interactions over Pakistan using MODIS data. *Advances in Space Research, 46*, 1162–1176. https://doi.org/10.1016.j.asr.2010.06.025
7. Ban-Weiss, G.A., & Collins, W.D. (2015). Aerosols: Role in radiative transfer. In G. R. North, J. Pyle, & F. Zhang (Eds.), Encyclopedia of Atmospheric Sciences (2nd ed.). Elsevier. https://doi.org/10.1016.B978-0-12-382225-3.00053-0
8. Bao, C., Yong, M., Bi, L., Gao, H., Li, J., Bao, Y., & Gomboludev, P. (2021). Impacts of underlying surface on the dusty weather in central Inner Mongolian Steppe, China. *Earth and Space Science, 8*, e2021EA001672. https://doi.org/10.1029.2021EA001672
9. Beyranvand, A., Azizi, G., Alizadeh, O., & Darvishi Boloorani, A. (2023). Dust in Western Iran: The emergence of new sources in response to shrinking water bodies. *Scientific Reports, 13*, 16158. https://doi.org/10.1038.s41598-023-2173-3
10. Bibi, S., Alam, K., Chishtie, F., & Bibi, H. (2017). Characterization of absorbing aerosol types using ground and satellite-based observations over an urban environment. *Atmospheric Environment, 150*, 126–135. https://doi.org/10.1016.j.atmosenv.2016.11.052
11. Boroughani, M., Naemi, M., Pourhashemi, S., Asadi, M.A.Z., Al-Hemoud, A., & Al-Qadeeri, G. (2025). Linking dust source susceptibility mapping and land use change in middle East. *Atmospheric Pollution Research*, 102774. https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.102774
12. Boroughani, M., Zandi, R., Pourhashemi, S., Gholami, H., & Kaskaoutis, D.G. (2025). Linking sand dust storms

hotspots and land use over Iran. *Atmospheric Pollution Research*, *16*(2), 102380. https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102380
13. Boroughani, M., Pourhashemi, S., Gholami, H., & Kaskaoutis, D.G. (2021). Predicting of dust storm source by combining remote sensing, statistic-based predictive models and game theory in the Sistan watershed, southwestern Asia. *Journal of Arid Land*, *13*(11), 1103-1121. https://doi.org/10.1007/s40333-021-0023-3
14. Buchard, V., Randles, C.A., da Silva, A.M., Darmenov, A., Colarco, P.R., Govindaraju, R., Ferrare, R., Hair, J., Beyersdorf, A.J., Ziemba, L.D., & Yu, H. (2017). The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part II: Evaluation and case studies. *Journal of Climate*, *30*(17), 6851–6872. https://doi.org/10.1175.JCLI-D-16-0613.1
15. Chakraborty, T.C., Lee, X., Lawrence, D.M., & Bisht, G. (2021). Strong local evaporative cooling over land due to atmospheric aerosols. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, *13*, e2021MS002491. https://doi.org/10.1029.2021MS002491
16. Daniali, M., & Karimi, N. (2019). Spatiotemporal analysis of dust patterns over Mesopotamia and their impact on Khuzestan province, Iran. *Natural Hazards*, *97*, 27–48. https://doi.org/10.1007.s11069-019-03641-0
17. Dargahian, F., Mousivand, Y., Razavizadeh, S., & Lotfinasabasl, S. (2023). Identifying dust sources affecting southwestern Iran (Khuzestan Province) using remote sensing techniques and the HYSPLIT model. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, *51*(5), 565–583. https://doi.org/10.1007.s12524-022-01648-y
18. Engelstaedter, S., Kohfeld, K.E., Tegen, I., & Harrison, S.P. (2003). Controls of dust emissions by vegetation and topographic depressions: An evaluation using dust storm frequency data. *Geophysical Research Letters*, *30*(6), 1294. https://doi.org/10.1029.2002GL016471
19. Fan, B., Guo, L., Li, N., Chen, J., Lin, H., Zhang, X., Shen, M., Rao, Y., Wang, C., & Ma, L. (2014). Earlier vegetation green-up has reduced spring dust storms. *Scientific Reports*, *4*, 6749. https://doi.org/10.1038.srep06749
20. Filonchyk, M., & Hurynovich, V. (2020). Spatial distribution and temporal variation of atmospheric pollution in the South Gobi Desert, China, during 2016–2019. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*, 26579–26593. https://doi.org/10.1007.s11356-020-09000-y
21. Gong, H., Li, Y., Zhang, J., Zhang, B., & Wang, X. (2024). A new filter feature selection algorithm for classification task by ensembling Pearson correlation coefficient and mutual information. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *131*, 107865. https://doi.org/10.1016.j.engappai.2024.107865
22. Gupta, P., Khan, M.N., da Silva, A., & Patadia, F. (2013). MODIS aerosol optical depth observations over urban areas in Pakistan: Quantity and quality of the data for air quality monitoring. *Atmospheric Pollution Research*, *4*, 43–52. https://doi.org/10.5094.APR.2013.005
23. Haywood, J., & Boucher, O. (2000). Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. *Reviews of Geophysics*, *38*, 513–543. https://doi.org/10.1029.1999RG000078
24. Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., & Ferreira, L.G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, *83*, 195–213. https://doi.org/10.1016.S0034-4257(02)00096-2
25. Jafari, R., Bashari, H., & Tarkesh, M. (2017). Discriminating and monitoring rangeland condition classes with MODIS NDVI and EVI indices in Iranian arid and semi-arid lands. *Arid Land Research and Management*, *31*(1), 94–110. https://doi.org/10.1080/15324982.2016.1224955
26. Kaufman, Y.J., Tanré, D., Remer, L.A., Vermote, E.F., Chu, A., & Holben, B.N. (1997). Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. *Journal of Geophysical Research*: *Atmospheres*, *102*, 17051–17067. https://doi.org/10.1029.96JD03988
27. Khan, R., Kumar, K.R., Zhao, T., Ullah, W., & de Leeuw, G. (2021). Interdecadal changes in aerosol optical depth over Pakistan based on the MERRA-2 reanalysis data during 1980–2018. *Remote Sensing*, *13*(4), 822. https://doi.org/10.3390.rs13040822
28. Khanfari, V., Mohammad Asgari, H., & Dadollahi-Sohrab, A. (2024). Forecasting wetland transformation to dust source by employing CA-Markov model and remote sensing: A case study of Shadegan International Wetland. *Wetlands*, *44*, 96. https://doi.org/10.1007.s13157-024-01856-x
29. Kim, D., Chin, M., Remer, L.A., Diehl, T., Bian, H., Yu, H., Brown, M.E., & Stockwell, W.R. (2017). Role of surface wind and vegetation cover in multi-decadal variations of dust emission in the Sahara and Sahel. *Atmospheric Environment*, *148*, 282–296. https://doi.org/10.1016.j.atmosenv.2016.10.051
30. Levy, R.C., Remer, L.A., Mattoo, S., Vermote, E.F., & Kaufman, Y.J. (2007). Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *112*, D13211. https://doi.org/10.1029/2006JD007811
31. Li, J., Okin, G.S., Alvarez, L.J., & Epstein, H.E. (2020). Impacts of meteorology and vegetation on surface dust concentrations in Middle Eastern countries. *Science of the Total Environment*, *712*, 136597. https://doi.org/10.1016.j.scitotenv.2020.136597
32. Masoumi, A., & Moradhaseli, R. (2023). Spatio-temporal classification of dust source activities affecting the Khuzestan region, based on CALIPSO-CALIOP data and atmospheric models. *Atmospheric Research*, *287*, 106702.

https://doi.org/10.1016.j.atmosres.2023.106702
33. Middleton, N., & Kang, U. (2017). Sand and dust storms: Impact mitigation. *Sustainability*, *9*(6), 1053. https://doi.org/10.3390.su9061053
34. Mohammadi, Z., Rahimi, D., Najafi, M., & Zakerinejad, R. (2024). The effect of environmental degradation and climate on dust in Khuzestan Province, Iran. *Research Square* [Preprint]. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3345799/v1
35. Nabat, P., Somot, S., Mallet, M., Sanchez-Lorenzo, A., & Wild, M. (2014). Contribution of anthropogenic sulfate aerosols to the changing Euro-Mediterranean climate since 1980. *Geophysical Research Letters*, *41*, 5605–5611. https://doi.org/10.1002.2014GL060798
36. Omar, A.H., Tackett, J., & Al-Dousari, A. (2022). CALIPSO observations of sand and dust storms and comparisons of source types near Kuwait City. *Atmosphere*, *13*, 1946. https://doi.org/10.3390.atmos13121946
37. Parolari, A.J., Li, D., Bou-Zeid, E., Katul, G.G., & Assouline, S. (2016). Climate, not conflict, explains extreme Middle East dust storm. *Environmental Research Letters*, *11*, 114013. https://doi.org/10.1088.1748-9326.11.11.114013
38. Pearson, K. (1895). Notes on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, *58*, 240–242. https://doi.org/10.1098/rspl.1895.0041
39. Pourhashemi, S., Asadi, M.A.Z., & Boroughani, M. (2025). Multi-hazard susceptibility mapping in the Salt Lake watershed. *Environmental Challenges*, *18*,101079. https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101079
40. Pourhashemi, S., Asadi, M.A.Z., Boroughani, M., & Azadi, H. (2023). Mapping of dust source susceptibility by remote sensing and machine learning techniques (case study: Iran-Iraq border). *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(10), 27965-27979. https://doi.org/10.1007/s11356-022-23982-x
41. Randles, C.A., da Silva, A.M., Buchard, V., Darmenov, A., Colarco, P.R., Aquila, V., Bian, H., Nowottnick, E.P., Pan, X., Smirnov, A., Yu, H., & Govindaraju, R. (2017). The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part I: System description and data assimilation evaluation. *Journal of Climate*, *30*(17), 6823–6850. https://doi.org/10.1175.JCLI-D-16-0609.1
42. Rezazadeh, M., Irannejad, P., & Shao, Y. (2013). Climatology of the middle east dust events. *Aeolian Research*, *10*, 103–109. https://doi.org/10.1016.j.aeolia.2013.04.001
43. Shahabfar, A., & Eitzinger, J. (2011). Agricultural drought monitoring in semi-arid and arid areas using MODIS data. *Journal of Agricultural Science*, *149*, 403–414. https://doi.org/10.1017/S0021859610001309
44. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., & Deering, D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, NASA SP-351, 309–317. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740022614/downloads/19740022614.pdf
45. Su, X., Yan, X., & Tsai, C.-L. (2012). Linear regression. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, *4*, 275–294. https://doi.org/10.1002.wics.1198
46. Tan, M. (2016). Exploring the relationship between vegetation and dust-storm intensity (DSI) in China. *Journal of Geographical Sciences*, *26*(4), 387–396. https://doi.org/10.1007.s11442-016-1275-2
47. Tao, W.-K., Chen, J.-P., Li, Z., Wang, C., & Zhang, C. (2012). Impact of aerosols on convective clouds and precipitation. *Reviews of Geophysics*, *50*, RG2001. https://doi.org/10.1029.2011RG000369
48. Tariq, S., & Ul-Haq, Z. (2020). Investigating the aerosol optical depth and Ångström exponent and their relationships with meteorological parameters over Lahore in Pakistan. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A*: *Physical Sciences*, *90*, 861–867. https://doi.org/10.1007.s40010-018-0575-6
49. Tariq, S., Nawaz, H., Ul-Haq, Z., & Mehmood, U. (2021). Investigating the relationship of aerosols with enhanced vegetation index and meteorological parameters over Pakistan. *Atmospheric Pollution Research*, *12*, 101080. https://doi.org/10.1016.j.apr.2021.101080
50. Tariq, S., Qayyum, F., Ul-Haq, Z., & Mehmood, U. (2022). Long-term spatiotemporal trends in aerosol optical depth and its relationship with enhanced vegetation index and meteorological parameters over South Asia. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*, 30638–30655. https://doi.org/10.1007.s11356-021-17887-4
51. Tiwari, S., Tiwari, S., Hopke, P.K., Attri, S.D., Soni, V.K., & Singh, A.K. (2016). Variability in optical properties of atmospheric aerosols and their frequency distribution over a mega city 'New Delhi', India. *Environmental Science and Pollution Research*, *23*, 8781–8793. https://doi.org/10.1007.s11356-016-6060-3
52. Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., & López-Moreno, J.I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, *23*(7), 1696–1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1
53. Wilson, W.E., & Suh, H.H. (1997). Fine particles and coarse particles: Concentration relationships relevant to epidemiologic studies. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *47*, 1238–1249. https://doi.org/10.1080.10473289.1997.10464074
54. Wu, C., Lin, Z., Shao, Y., Liu, X., & Li, Y. (2022). Drivers of recent decline in dust activity over East Asia. *Nature Communications*, *13*, 7105. https://doi.org/10.1038.s41467-022-34823-3
55. Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications.

Journal of Sensors, *2017*, 1353691. https://doi.org/10.1155.2017.1353691
56. Yousefi Kebria, A., Nadi, M., Afaridegan, E., & Sun, Z. (2025). Wetland shrinking and dust pollution in Khuzestan Iran: Insights from Sentinel-5 and MODIS satellites. *Scientific Reports*, *15*, 13886. https://doi.org/10.1038.s41598-025-96935-2
57. Zar, J.H. (2010). *Biostatistical Analysis*. 5th Edition, Prentice-Hall/Pearson, Upper Saddle River, xiii, 944 p.
58. Zeydan, Ö., Tariq, S., Qayyum, F., Mehmood, U., & Ul-Haq, Z. (2023). Investigating the long-term trends in aerosol optical depth and its association with meteorological parameters and enhanced vegetation index over Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*, 20337–20356. https://doi.org/10.1007.s11356-022-23553-0
59. Zhang, Y., Song, C., Band, L.E., Sun, G., & Li, J. (2017). Reanalysis of global terrestrial vegetation trends from MODIS products: Browning or greening? *Remote Sensing of Environment*, *191*, 145–155. https://doi.org/10.1016.j.rse.2016.12.018
60. Zou, X.K., & Zhai, P.M. (2004). Relationship between vegetation coverage and spring dust storms over northern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *109*, D03104. https://doi.org.10/1029.2003JD003913

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

Research Article
Vol. 40, No. 3, Fall. 2026, p. 347-363

Analysis of Social Resilience to Drought Using LPCIEA Index (Case Study: Mohammadabad and Majdabad Villages, Marvdasht County, Fars Province)

P. Ebrahimi[1*], S.M. Soleimanpour[2]

1- Watershed Management Research Department, Hamadan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Hamadan, Iran
(*- Corresponding Author Email: p.ebrahimi@areeo.ac.ir)
2- Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

Received: 28 June 2026
Revised: 07 September 2026
Accepted: 08 September 2026
Available Online: 08 September 2026

How to cite this article:
Ebrahimi, P., & Soleimanpour, S.M. (2026). Analysis of social resilience to drought using LPCIEA index (Case study: Mohammadabad and Majdabad Villages, Marvdasht County, Fars province). *Journal of Soil and Wather*, *40*(3), 347-363. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jsw.2026.99602.1562

Introduction

Drought can be considered one of the most significant hazards for sustainable living in rural areas of Iran, many regions of which are characterized by arid and semi-arid climates. During the last decades, drought occurrence has led to a decrease in the provision of ecosystem services and negative socio-economic consequences. Moreover, pressure on surface and underground water has been rising, especially in the agriculture-focused Fars Province. Despite numerous drought assessment studies performed in Iran, the use of composite indexes that would integrate both social and environmental aspects of drought resilience on the basis of objective and available data is relatively rare. Indeed, earlier studies had used narrow criteria sets or questionnaire-based approaches to estimate social resilience, without developing a replicable data-driven approach. However, such a development is needed due to the multi-dimensional nature of the concept, which encompasses several factors like land use dynamics, population trends, agricultural diversity, irrigation systems, education, and employment age structure. Therefore, development of a composite index to analyze all those factors is required for effective decision-making in this field. In this paper, the analysis of social resilience to drought on the basis of the LPCIEA composite index is conducted in two rural settlements – Mohammadabad and Majdabad – of Marvdasht County, Fars Province, over a 24-year period (2000-2024).

Materials and Methods

LPCIEA composite index includes six criteria: Land use (L), Population (P), Crop diversity (C), Irrigation level (I), Education (E), and Employment age (A). Data on these criteria were collected from various sources: Landsat ETM (2000) and Sentinel-2 (2024) imagery for land use classification and Normalized difference vegetation index (NDVI) calculation; census statistics and village level data for population and education; and field survey for irrigation level and crop diversity. Image pre-processing, including atmospheric and geometric correction, was carried out in Environment for Visualizing Images (ENVI) 5.6, while maps of land uses were created on the basis of Support Vector Machines (SVM) classification with accuracy from 86% to 91% and Kappa index from 0.82 to 0.89. Crop diversity was estimated on the basis of Shannon-Wiener index. All variables were standardized using the Min-Max method to 0-1 scale. Weights for each criterion and sub-indicator were objective and estimated by means of Principal Component Analysis (PCA), which accounted for 76.4% of total variance using five principal components. Resilience score (R) for each village was calculated as a linear weighted combination of six standardized criteria. Multiple regression analysis (ENTER method) was used to determine contributions of each criterion to total resilience. Model validation was carried out using Durbin-Watson statistic

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)
https://doi.org/10.22067/jsw.2026.99602.1562

and tests for multicollinearity (VIF and Tolerance), while spatial maps of resilience were generated for 2000 and 2024.

Results and Discussion

Over the period of 24 years, 12 states of resilience were identified for the two villages and six criteria. Six of them were red ("very low resilience"), three were yellow ("moderate but declining") and only three states were green ("favorable"), which indicates the dominance of critical states and a long-term erosive trend. The regression model had excellent goodness-of-fit, with multiple correlation coefficient (R) of 0.995 and adjusted R^2 0.98, while Durbin-Watson statistic of 1.892 indicates the absence of autocorrelation. Out of six criteria, "Crop diversity" (C) had the greatest positive and statistically significant effect on resilience with the beta coefficient of 0.785 ($p < 0.01$), contributing to 96% of explained variance. On the contrary, "Education" (E) had the lowest effect ($\beta = 0.095$, $p = 0.63$), which indicates that despite the considerable increase in literacy rates, it had little influence on drought resilience in compared with agricultural diversification and irrigation. Other criteria in order of importance were Population ($\beta = 0.465$), Employment age ($\beta = 0.430$), Land use ($\beta = 0.380$), and Irrigation ($\beta = 0.250$). The derived regression equation is as follows: $R = 1.450 + 0.090L + 0.220P + 0.185C + 0.110I + 0.040E + 0.145A$. According to temporal analysis, Majdabad village showed considerable population growth (resilience score from 46 to 77), Mohammadabad village showed moderate growth (44 to 50), while both villages suffered from a severe decrease in crop diversity (from 42 to 7 points) and irrigation level (from 36 to 16 points), which is a consequence of water shortage. On the other hand, the education score increased substantially (from 8 to 41-46 points), but did not lead to the corresponding increase in resilience because of the priority of production-related factors.

Conclusion

It is evident that drought resilience in the analyzed villages is mostly determined by crop diversification and availability of water resources, rather than demographic and educational factors. Majdabad village, which has greater population (8,970 people) and greater pressure on resources, needs urgent adaptive measures, followed by Mohammadabad. The dominance of red-status resilience states (6 of 12) indicates critical a threshold, and immediate policy measures are needed. Therefore, the following recommendations can be made on the basis of this research. It is necessary to focus the supportive policies on increasing crop diversity, promotion of crops with low water demand and diversification of the agricultural portfolio. Equally important is active participation of local communities in decision-making bodies – like strategic planning, priority setting and budget allocation, which will promote social cohesiveness and joint actions. Different villages showed different adaptive capacities under similar climatic conditions, therefore, a differentiated rather than general strategy is needed. The index LPCIEA, which provides objective weighting based on PCA and uses replicable satellite and census data, is a useful instrument for periodic resilience monitoring. Future research should expand this approach to other regions and incorporate climate projection scenarios into it.

Acknowledgement

This work is derived from part of the results of an independent research subproject entitled "Analysis of Social Resilience to Drought Using a Composite Index (Case Study: Fars Province)", with code 0-66-29-012-010495 and approved by the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. The authors of this article would like to acknowledge the cooperation and support of that research institute and the support of the Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center.

Keywords: Composite index, Drought, Fars, Social resilience

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۴۰، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵، ص. ۳۶۳-۳۴۷

تحلیل تاب‌آوری اجتماعی در برابر خشک‌سالی با استفاده از شاخص LPCIEA (مطالعه موردی: روستاهای محمدآباد و مجدآباد شهرستان مرودشت استان فارس)

پیام ابراهیمی[۱*]- سید مسعود سلیمان‌پور[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۷

چکیده

خشک سالی در مناطق کشاورزی یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی مؤثر بر پایداری جوامع روستایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران است. پیامدهای آن در قالب کاهش خدمات اکوسیستم، اختلال در معیشت و افزایش فشار بر منابع آب، به‌ویژه در استان فارس قابل مشاهده است. با وجود پژوهش‌های متعدد در زمینهٔ ارزیابی خشک‌سالی، کاربرد شاخص‌های ترکیبی که بتوانند هم‌زمان ابعاد انسانی و محیطی تاب‌آوری را با استفاده از داده‌های عینی و در دسترس تحلیل کنند، در ایران محدود بوده است. هدف پژوهش حاضر، تحلیل تاب‌آوری اجتماعی در برابر خشک‌سالی با بهره‌گیری از شاخص ترکیبی LPCIEA در دو روستای محمدآباد و مجدآباد (شهرستان مرودشت، استان فارس) در بازهٔ زمانی ۱۳۷۹ تا ۱۴۰۳ است. شش معیار کاربری اراضی، جمعیت، تنوع محصولات زراعی، سطح آبیاری، تحصیلات و سن اشتغال با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و سنتینل، آمار رسمی و پیمایش میدانی کمّی‌سازی شدند. وزن‌دهی معیارها با تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و مدل‌سازی با رگرسیون چندگانه انجام گرفت. یافته‌ها نشان داد از مجموع ۱۲ وضعیت تاب‌آوری ثبت‌شده، ۶ وضعیت در طبقه‌ی قرمز (بسیار پایین)، ۳ وضعیت زرد (متوسط رو به کاهش) و ۳ وضعیت سبز (مطلوب) قرار گرفته‌اند که بیانگر غلبهٔ شرایط بحرانی در منطقه است. بر اساس ضرایب رگرسیونی، معیار «تنوع محصولات زراعی» با ضریب بتای ۰/۷۸۵ بیشترین تأثیر مثبت و معنی‌دار را بر تاب‌آوری داشته است ($p<0/01$) در حالی‌که معیار «تحصیلات» با ضریب ۰/۰۹۵ کمترین اثر را نشان داده است. ضریب همبستگی چندگانه (R=۰/۹۹۵) و آمارهٔ دوربین-واتسون (۱/۸۹۲) حاکی از برازش قوی و عدم خودهمبستگی مدل است. نتایج بیانگر آن است که روستای مجدآباد به‌دلیل جمعیت بیشتر و فشار افزون‌تر بر منابع، در اولویت نخست اقدامات سازگاری و بهبود تاب‌آوری قرار دارد. بر این اساس، پیشنهاد می شود سیاست‌های حمایتی با هدف افزایش تنوع کشت، توسعهٔ محصولات کم‌آب‌بر و مشارکت فعال جوامع محلی در نهادهای تصمیم‌گیری تدوین شوند. اقدامات پیشنهادی نشان داد ظرفیت سازگاری متفاوتی با خشک‌سالی نسبت به روستای مجاور در شرایط آب و هوایی مشابه نیاز است.

واژه‌های کلیدی: استان فارس، تاب‌آوری اجتماعی، خشک‌سالی، شاخص ترکیبی

مقدمه

خشک‌سالی‌های اخیر خدمات اکوسیستم را به‌شدت کاهش داده و پیامدهای متنوعی مانند مهاجرت، خسارت به محصولات کشاورزی و اختلال در تأمین معیشت به همراه داشته است. پایش دوره‌ای این پدیده با سنجه‌هایی مانند بارندگی، دما، حجم و کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی امکان‌پذیر است (Afrin *et al.*, 2024; Bahta *et al.*, 2016) و شاخص‌های اقتصادی-اجتماعی نیز از طریق پرسش‌نامه ابعاد بحران را نشان می‌دهند. در ایران مطالعات با رویکرد یک جانبه گرایانه مانند آب یا کشاورزی انجام می شود و اثرات پنهان مهاجرت و انسان در ارتباط با محیط کشاورزی کمتر توجه شده است. بسیاری از مطالعات داخلی معیارهای محدود یا بسیار پیچیده را استفاده

۱- واحد تحقیقات آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: p.ebrahimi@areeo.ac.ir)
۲- بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
https://doi.org/10.22067/jsw.2026.99602.1562

کرده و نتایج را به‌صورت اعداد یا جداول کیفی طبقه‌بندی کرده‌اند. افزون بر این، دسترسی محدود به داده‌ها، هزینه و زمان‌بر بودن گردآوری اطلاعات دقیق، انتخاب یک شاخص کارآمد را دشوار می سازد. بررسی‌ها نشان می‌دهند که سطح تحصیلات، سن، تنوع محصولات زراعی و سطح آبیاری از معیارهای پرتکرار در تحلیل آثار خشک‌سالی هستند (Bera & Dutta, 2024; Brock *et al*., 2003; Kotzee & Reyers, 2016; Mavhura *et al*., 2021; Sabut & Mishra, 2026; Soleimanpour, 2024).

یکی از مفاهیم کلیدی در مواجهه با خشک‌سالی، «تاب‌آوری» است که ظرفیت بازگشت از شرایط نامطلوب، پایداری و ترمیم را دربر می‌گیرد (Bera & Dutta, 2024; Dale *et al*., 2016). در سطح جوامع محلی، تاب‌آوری اجتماعی به‌معنای توانایی جذب تنش‌های موقت یا دائمی بدون از دست رفتن کارکردهای اساسی و انطباق با شرایط در حال تغییر است. ارزیابی این تاب‌آوری از طریق پرسش‌نامه‌های طراحی‌شده یا با بهره‌گیری از شاخص‌هایی که بازتابی از خصوصیات انسانی و محیطی هستند انجام می شود (Li *et al*., 2026; Mavhura *et al*., 2021). چنین شاخص‌هایی امکان کمی سازی تأثیر تغییر اقلیم بر جوامع محلی را فراهم می‌کنند. از این رو، انتخاب یک شاخص ترکیبی متناسب با شرایط منطقه، مبتنی بر داده‌های در دسترس، سادگی در کاربرد و براساس تجربیات جهانی، ضرورتی برای مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز با هدف کاهش آثار خشک‌سالی در مزارع کشاورزی به شمار می‌رود.

پیشینه پژوهش‌های انجام شده نشان دهنده آن است که سن و تحصیلات از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پایداری نظام‌های زراعی و تاب‌آوری هستند (Hassanshahi *et al*., 2015; Naumann *et al*., 2018; Sass *et al*., 2024). همچنین، بررسی اثرات سناریوهای اقلیمی در دشت مرودشت نشان داد که الگوی کشت به سمت محصولات با حساسیت کمتر به کم‌آبی و عملکرد قابل قبول تغییر یافته و کارایی مصرف آب حدود ۱۰ درصد در هر ۲۰ سال افزایش یافته است. با وجود آن که سطح زیر کشت کاهش یافته است، اما افزایش راندمان آبیاری به پایداری تاب‌آوری انجامید (Afshartabar *et al*., 2023). رابطه معنادار میان دسترسی به منابع آب و خشک‌سالی نیز تأیید شده و گسترش چاه‌های غیرمجاز ضمن جذب جمعیت، فشار بر منابع طبیعی را تشدید کرده است (Khoshnazar *et al*., 2023). پژوهش (Khatir, Rezaei-Moghaddam, & Zamani, 2017) نیز پیوند معنی‌دار میان مهاجرت و درک خشک‌سالی را مستند ساخته است.

در زمینه مداخلات نهادی (Falah mehrgerdi & Hanaee, 2020)، نقش دولت را عامل اصلی بهبود تاب‌آوری و کاهش خطرپذیری بلایا معرفی کرده‌اند. سایر پژوهش‌ها (Bathaiy *et al*., 2021; Ghorbani *et al*., 2025; Wassie *et al*., 2023) نیز تقویت سرمایه‌های معیشتی از سوی دولت را مهم‌ترین رکن تاب‌آوری در برابر تغییر اقلیم برشمرده‌اند. یافته‌های (Bahta *et al*., 2016) نشان داد توانمندسازی زنان خرده‌مالک روستایی در برابر خشک‌سالی با استفاده از شاخص توانمندسازی کشاورزی، شامل معیارهایی چون سن اشتغال، سطح اراضی، حجم آب آبیاری، درآمد و عضویت در تعاونی‌ها امکان‌پذیر است.

ادبیات پژوهش تأیید می‌کند که با وقوع خشک‌سالی تعارضات اجتماعی افزایش یافته، اقتصاد خانوار تضعیف می‌شود و زنجیره تأمین غذا به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه که استرس خشک سالی با فشار اقتصادی ترکیب می شود، آسیب می‌بینند. کاهش تاب‌آوری در جوامع روستایی مناطق خشک و نیمه‌خشک پیامدهای اجتماعی–اقتصادی گسترده‌ای دارد. از این رو، تحلیل تاب‌آوری در مقیاس کشاورزان از طریق یک شاخص ترکیبی، شناسایی جوامع پایدار و تقویت جوامع شکننده را میسر می‌سازد و انتخاب حوزه‌های آبخیز آسیب‌پذیر را برای اولویت‌بندی اقدامات اجرائی تسهیل می‌کند. بر اساس شواهد موجود، معیارهایی مانند تغییرات جمعیت، تنوع محصولات، پوشش و کاربری اراضی، دسترسی به منابع آب، سطح آبیاری، سن و تحصیلات ارتباط معناداری با خشک سالی و تاب‌آوری دارند و افراد در گروه‌های سنی مختلف واکنش‌های متفاوتی نشان می دهند. به‌کارگیری چنین معیارهایی در قالب یک شاخص ترکیبی، امکان بازنمایی دقیق اثرات بحران‌ها و اتخاذ تصمیم‌های آگاهانه را فراهم می‌سازد. با توجه به این ضرورت، پژوهش حاضر به تحلیل تاب‌آوری اجتماعی در برابر خشک سالی با استفاده از شاخص ترکیبی LPCIEA در روستاهای محمدآباد و مجدآباد شهرستان مرودشت استان فارس می‌پردازد. شاخص LPCIEA مزایایی همچون سادگی کاربرد، قابلیت تطبیق با ویژگی‌های هر کشور، استفاده از داده‌های در دسترس و سرعت ارزیابی دارد. نقطه قوت آن، بهبود دقت با افزایش قدرت تفکیک مکانی تصاویر ماهواره‌ای است و اطلاعات آماری آن در اغلب کشورها به صورت دوره‌ای گردآوری می شود؛ همچنین تصاویر رایگان لندست و سنتینل پشتوانه آن هستند. با این حال، نیاز به آشنایی با پردازش تصاویر ماهواره‌ای و انجام عملیات میدانی برای کنترل نقاط زمینی از محدودیت‌های این شاخص به شمار می‌رود.

مواد و روش‌ها

معرفی مناطق موردمطالعه

روستاهای محمدآباد و مجدآباد، در شهرستان مرودشت استان فارس و در حوزه آبخیز سد درودزن واقع شده‌اند. این دو روستا، بین طول‌های جغرافیایی ۵۲ درجه و ۰۵ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۵۰ دقیقه و عرض‌های جغرافیایی ۲۹ درجه و ۲۹ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۴۹ دقیقه قرار دارند (شکل ۱). میانگین بارندگی در حوزه آبخیز سد درودزن ۲۵۳

میلی‌متر و حجم مخزن سد ۹۹۳ میلیون متر مکعب است. سد درودزن آب مورد نیاز ۱۱۲۰۰۰ هکتار زمین کشاورزی را تأمین می‌کند و برای شرب نیز استفاده می‌شود. شیراز و مرودشت هم از آب آشامیدنی آن و مزارع کامفیروز و مرودشت نیز از این آب استفاده می‌کنند. منبع درآمد دو روستای موردمطالعه، کشاورزی و دامداری است که در آن کشاورزی در اولویت اول و پس از آن دامداری قرار دارد. عمده کالاهای کشاورزی شامل گندم، جو، شبدر و برنج است. علاوه بر کشاورزی و دامداری، تعدادی از خانوارها از طریق مشاغل دولتی، کارگاه‌های خصوصی و مشاغل معیشتی خانواده‌های خود را اداره می‌کنند (Soleimanpour, 2024). اطلاعات جمعیتی و کاربری اراضی دو روستای مجدآباد و محمدآباد از جداول آماری و سالنامه‌های آماری استخراج گردیده است. روستای مجدآباد دارای ۲۳۸۵ خانوار و ۸۴۱۰ نفر جمعیت (۴۲۸۷ مرد و ۴۱۲۳ زن) بوده و مساحت کل اراضی آن ۱۵۵ کیلومتر مربع است که پهنه‌های کاربری به‌ترتیب شامل ۹۶، ۳۴، ۲۳ و ۱ کیلومتر مربع برای کشاورزی، باغ، مرتع و مسکونی می‌باشد. روستای محمدآباد نیز مشتمل بر ۲۸۹۱ خانوار و ۹۵۱۵ نفر جمعیت (۴۹۱۸ مرد و ۴۵۹۷ زن) بوده و مساحت کل اراضی آن ۳۳۸ کیلومتر مربع است که طبقات کاربری آن به‌همین ترتیب شامل ۱۶۸، ۱۰۵، ۶۳ و ۱ کیلومتر مربع برای کشاورزی، مرتع، باغ و مسکونی می‌شود. انتخاب روستاهای محمدآباد و مجدآباد بر مبنای یک رویکرد مقایسه‌ای هدفمند انجام شد. این دو روستا به‌دلیل فاصله مکانی بسیار کم از یکدیگر انتخاب شدند تا ناهمگنی ناشی از تفاوت‌های محیطی و اقلیمی تا حد امکان کاهش یابد. نزدیکی مکانی روستاها، امکان کنترل نسبی عوامل زمینه‌ای نظیر شرایط زمین شناسی، دما و سایر ویژگی‌های اقلیمی و محیطی را در مقایسه میان دو واحد مورد مطالعه فراهم می‌کند. در مقابل، تفاوت در منبع اصلی تأمین آب مورد استفاده در دو روستا به‌عنوان عامل متمایزکننده اصلی در طراحی مطالعه در نظر گرفته شد تا نقش تفاوت در دسترسی به منابع آب در تبیین تفاوت های تاب‌آوری اجتماعی بررسی شود. ازاین‌رو، انتخاب مناطق مورد مطالعه بر مبنای ایجاد همگنی نسبی در شرایط محیطی و تفاوت هدفمند در وضعیت دسترسی به منابع آب صورت گرفت. هر دو روستا در حوزه آبخیز سد درودزن واقع شده‌اند و از این نظر در یک زمینه هیدرولوژیکی مشترک قرار دارند. با وجود تشابه نسبی در شرایط محیطی، تفاوت‌های موجود میان دو روستا در ویژگی‌های جمعیتی، اجتماعی و کشاورزی نیز در ارزیابی تاب‌آوری مورد توجه قرار گرفت. متغیرهایی از جمله جمعیت، تنوع محصولات، وضعیت آبیاری، سن و تحصیلات در چارچوب شاخص LPCIEA لحاظ شدند تا ابعاد مختلف ظرفیت اجتماعی و اقتصادی جوامع مورد مطالعه در ارزیابی تاب‌آوری منعکس شود. با توجه به ماهیت مطالعه موردی، انتخاب این دو روستا با هدف نمایندگی آماری روستاهای شهرستان مرودشت انجام نشده است؛ بنابراین، یافته‌های حاصل باید در چارچوب شرایط اجتماعی، اقتصادی، کشاورزی و محیطی روستاهای مورد مطالعه تفسیر شوند.

روش پژوهش

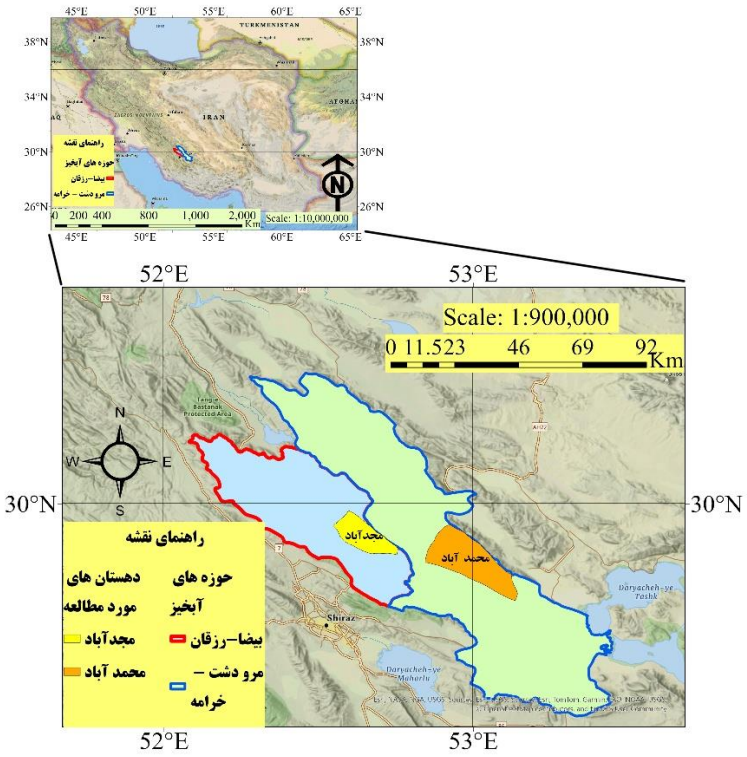
چارچوب روش‌شناختی و فرآیند پژوهش

پژوهش حاضر به‌لحاظ هدف، کاربردی و از منظر روش، توصیفی-تحلیلی با رویکرد ترکیبی (کمّی-کیفی) است. مسیر اجرای تحقیق در پنج گام اصلی طراحی شد: (۱) شناسایی و انتخاب معیارهای مؤثر بر تاب‌آوری اجتماعی در برابر خشک‌سالی بر مبنای مرور نظام‌مند پیشینه و تطبیق با شرایط بومی؛ (۲) عملیاتی‌سازی شاخص ترکیبی LPCIEA و تعریف متغیرهای تشکیل‌دهنده آن؛ (۳) گردآوری داده‌ها از تصاویر ماهواره‌ای، آمار رسمی و پیمایش میدانی؛ (۴) محاسبه شاخص ترکیبی با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و ترکیب خطی وزنی؛ و (۵) اعتبارسنجی نتایج از طریق پرسش‌نامه ادراک ذهنی و کارگاه‌های مشارکتی. واحد تحلیل، خانوار روستایی در دو روستای هدف و بازه زمانی مطالعه، دوره ده‌ساله ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۳ می‌باشد.

معرفی و مبانی شاخص ترکیبی LPCIEA

شاخص LPCIEA یک ابزار ارزیابی چندمعیاره است که به‌طور خاص برای سنجش تاب‌آوری اجتماعی جوامع روستایی در برابر خشک سالی طراحی شده است. نام این شاخص از سرنام پنج مؤلفه اصلی آن گرفته شده است: معیشت[1](L)، جمعیت[2](P)، ظرفیت نهادی[3](C)، آبیاری و زیر ساخت[4](I)، محیط‌زیست[5] (E) و کشاورزی[6] (A). هر یک از این مؤلفه‌ها بازتاب‌دهنده بُعدی از ظرفیت سازگاری جامعه محلی است و بر اساس چارچوب نظری تاب‌آوری اجتماعی-اکولوژیک، درهم‌تنیدگی عوامل انسانی و محیطی را در مواجهه با تنش خشک سالی به تصویر می‌کشد. مبنای نظری انتخاب مؤلفه‌ها، تحلیل محتوای مقالات علمی معتبر بین‌المللی و داخلی بود که در آن‌ها متغیرهای مرتبط با تاب‌آوری خشک‌سالی به‌صورت نظام‌مند استخراج و با شرایط اقلیمی و اجتماعی-اقتصادی منطقه مورد مطالعه تطبیق داده شدند. مزیت این شاخص نسبت به شاخص‌های عمومی تاب‌آوری، تمرکز هم‌زمان بر داده‌های عینی (تصاویر ماهواره‌ای و آمار رسمی) و داده‌های ادراکی (پرسش‌نامه)، قابلیت تفکیک مکانی در سطح روستا و امکان به‌روزرسانی دوره‌ای آن با کمترین هزینه است.

1- Livelihood
2- Population
3- Capacity
4- Irrigation & Infrastructure
5- Environment
6- Agriculture



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی روستاهای موردمطالعه

Figure 1- Geographical location of the studied villages

متغیرهای تشکیل‌دهنده شاخص و منابع داده

در ادامه، متغیرهای هر یک از شش مؤلفه شاخص LPCIEA به همراه منابع گردآوری داده‌ها تشریح می‌شود:

۱) مؤلفه معیشت (L): این مؤلفه ظرفیت اقتصادی خانوارها را برای جذب شوک خشکسالی می‌سنجد. چهار متغیر این مؤلفه عبارت‌اند از: درآمد سالانه خانوار (میلیون ریال)، هزینه سالانه خانوار (میلیون ریال)، تنوع منابع درآمدی (تعداد منابع درآمدی خانوار، شامل زراعت، باغداری، دامداری، صنایع‌دستی، مشاغل خدماتی و یارانه‌ها)، و مالکیت اراضی کشاورزی (هکتار). داده‌های این بخش از طریق پرسش‌نامه خانوار و مصاحبه با ۲۱۷ سرپرست خانوار گردآوری شد. حجم نمونه با فرمول کوکران و سطح اطمینان ۹۵ درصد تعیین و نمونه‌گیری به روش طبقه‌ای تصادفی با انتساب متناسب انجام شد.

۲) مؤلفه جمعیت (P): این مؤلفه پویایی جمعیتی و ساختار سنی نیروی کار را به‌عنوان شاخصی از سرمایه انسانی منعکس می‌کند. متغیرهای آن شامل: نرخ رشد جمعیت (در صد)، نسبت جمعیت فعال (۱۵ تا ۶۴ سال) به کل جمعیت (در صد)، و میانگین سن سرپرست خانوار (سال) است. داده‌ها از سرشماری عمومی نفوس و مسکن ۱۳۹۵ و اطلاعات به‌روزشده دهیاری‌ها استخراج شد.

۳) مؤلفه ظرفیت نهادی (C): این مؤلفه دسترسی به دانش، شبکه‌های اجتماعی و حمایت نهادی را می‌سنجد. متغیرهای آن: سطح تحصیلات خانوار (سال‌های آموزش رسمی)، عضویت در تشکل‌های تعاونی و تولیدی (متغیر دوحالتی: ۱ برای عضو و ۰ برای غیرعضو)، و دسترسی به خدمات ترویج کشاورزی (تعداد تماس با مروج در سال). منبع داده‌ها پرسش‌نامه و آمار مدیریت جهاد کشاورزی شهرستان است.

۴) مؤلفه آبیاری و زیرساخت (I): این مؤلفه ظرفیت تولید کشاورزی وابسته به منابع آب و میزان توسعه فعالیت‌های کشاورزی آبی در جوامع روستایی مورد مطالعه را منعکس می‌کند. در این پژوهش، مؤلفه آبیاری و زیرساخت با استفاده از متغیر «سطح زیرکشت محصولات آبی (هکتار)» عملیاتی شد. منطق انتخاب این متغیر بر این اساس استوار است که دسترسی و قابلیت تأمین آب برای فعالیت‌های کشاورزی، از عوامل مؤثر بر استمرار و توسعه کشت آبی محسوب می شود؛ ازاین‌رو، سطح زیرکشت محصولات آبی می‌تواند به‌عنوان یک شاخص کمی و قابل مشاهده از میزان توسعه فعالیت کشاورزی وابسته به آب و ظرفیت بهره‌برداری از منابع آب در سطح روستا مورد استفاده قرار گیرد. بر این اساس، مقدار بیشتر این شاخص بیانگر گستره بیشتر فعالیت کشاورزی آبی و ظرفیت بالاتر تولید وابسته به

منابع آب در سطح روستا است.

۵) مؤلفه محیط‌زیست (E): این مؤلفه سلامت اکوسیستم و تنوع تولیدی را از دیدگاه محیطی ارزیابی می‌کند. متغیرهای آن: شاخص پوشش گیاهی NDVI، نرخ تغییرات کاربری اراضی (در صد تغییر هر طبقه نسبت به دوره قبل)، سطح زیر کشت دیم (هکتار)، و شاخص تنوع محصولات زراعی (شاخص شانون-وینر). داده‌های این بخش از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و ۹ و سنتینل ۲ استخراج و در نرم‌افزار ENVI 5.6 پردازش شد.

۶) مؤلفه کشاورزی (A): این مؤلفه ظرفیت نیروی انسانی فعال در بخش کشاورزی و نقش آن در تداوم فعالیت‌های تولیدی جوامع روستایی را منعکس می‌کند. با توجه به نقش اساسی فعالیت‌های کشاورزی در ساختار معیشتی روستاهای مورد مطالعه، ویژگی‌های نیروی انسانی شاغل در این بخش می‌تواند بر توان حفظ و استمرار فعالیت‌های تولیدی در شرایط بروز خشکسالی اثرگذار باشد. در این پژوهش، «سن اشتغال» به‌عنوان تنها متغیر این مؤلفه در نظر گرفته شد. این متغیر بیانگر وضعیت سنی نیروی انسانی فعال در فعالیت‌های اقتصادی و کشاورزی بوده و از آن برای انعکاس ویژگی جمعیتی نیروی کار مرتبط با فعالیت‌های کشاورزی استفاده شد.

پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای و استخراج متغیرهای طیفی

برای محاسبه NDVI و تهیه نقشه‌های کاربری اراضی، ۲۴ تصویر ماهواره‌ای مربوط به ماه‌های خرداد و تیر (اوج رشد رویشی) در چهار مقطع زمانی ۱۳۹۳، ۱۳۹۶، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۲ از سامانه EarthExplorer سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) دریافت شد. تصحیح اتمسفری به روش FLAASH در ENVI 5.6 با پارامترهای مدل گرمسیری و ضریب دید ۴۰ کیلومتر انجام و تصحیح هندسی با استفاده از ۴۵ نقطه کنترل زمینی (GCP) مستخرج از تصاویر سنتینل-۲ با RMSE کمتر از ۰٫۵ پیکسل صورت پذیرفت. شاخص NDVIاز رابطه (۱) محاسبه شد:

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red} \quad (۱)$$

که در آن NIR بازتاب باند مادون قرمز نزدیک و Red بازتاب باند قرمز است. مقادیر NDVI برای هر پیکسل در محدوده اراضی زراعی محاسبه و میانگین آن به‌عنوان متغیر سلامت پوشش گیاهی در نظر گرفته شد.

طبقه‌بندی کاربری اراضی و آشکارسازی تغییرات

نقشه‌های کاربری اراضی برای چهار مقطع با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) و کرنل تابع پایه شعاعی (RBF) تولید شد. پارامترهای C و گاما از طریق جستجوی شبکه‌ای[1] با اعتبارسنجی متقابل پنج‌تایی به‌ترتیب ۱۰۰ و ۰/۰۱ بهینه‌سازی شدند. طبقات کاربری شامل جنگل و باغ، اراضی کشاورزی، مرتع و سنگلاخی و مناطق مسکونی تعریف گردید. ۳۵۰ نمونه تعلیمی (پلی‌گون‌های ۳×۳ پیکسل) از عملیات میدانی با GPS تفکیکی (مدلGarmin 64s) و تفسیر چشمی Google Earth Pro جمع‌آوری شد. ارزیابی صحت با ۱۵۰ نمونه مستقل، صحت کلی ۸۶ تا ۹۱ درصد و ضریب کاپای ۰٫۸۲ تا ۰٫۸۹ را نشان داد. نرخ تغییرات هر طبقه کاربری با روش مقایسه پس از طبقه‌بندی[2] و با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$\Delta C_k = \frac{C_{k,t}-C_{k,t-1}}{C_{k,t-1}} \times 100 \quad (۲)$$

که $C_{k,t}$ مساحت طبقه k در زمان t و $C_{k,t-1}$ مساحت همان طبقه در دوره قبل است (شکل‌های ۲ و ۳).

محاسبه شاخص تنوع محصولات زراعی

تنوع محصولات زراعی با شاخص شانون-وینر (H) از رابطه (۳) به‌دست آمد:

$$H = -\sum_{i=1}^{S} p_i \ln(p_i) \quad (۳)$$

که در آن S تعداد کل محصولات زراعی و p_i نسبت سطح زیر کشت محصول i به کل سطح زیر کشت است. مقادیر بالاتر H نشان‌دهنده تنوع بیشتر و در نتیجه تاب‌آوری بالقوه بالاتر است.

استانداردسازی متغیرها (نرمال‌سازی)

از آنجاکه متغیرها واحدهای اندازه‌گیری متفاوتی دارند، تمامی مقادیر با روش نرمال‌سازی حداقل-حداکثر[3] به بازه ۰ تا ۱ تبدیل شدند. برای متغیرهایی که با تاب‌آوری رابطه مثبت دارند (مانند راندمان آبیاری، تنوع درآمدی)، NDVI از رابطه (۴) استفاده شد:

$$X' = \frac{X-X_{min}}{X_{max}-X_{min}} \quad (۴)$$

و برای متغیرهایی که رابطه منفی با تاب‌آوری دارند (مانند نرخ رشد منفی جمعیت یا افزایش سطح اراضی بایر)، از رابطه (۵) بهره گرفته شد:

$$X' = \frac{X_{max}-X}{X_{max}-X_{min}} \quad (۵)$$

در این روابط، X مقدار اولیه متغیر، X_{min} و X_{max} به‌ترتیب کمینه و بیشینه آن در میان تمام واحدهای نمونه هستند. این تبدیل باعث می‌شود کلیه متغیرها بدون بعد شده و مقیاس مشترکی برای ترکیب بیابند.

1- Grid Search
2- Post-Classification Comparison
3- Min-Max

وزن‌دهی به مؤلفه‌ها و متغیرها با تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

برای پرهیز از قضاوت ذهنی در تخصیص وزن، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) به‌عنوان یک روش عینی و داده‌محور استفاده شد. ابتدا کفایت نمونه‌گیری با آزمون KMO (مقدار ۰٫۷۳) و آزمون کرویت بارتلت (معناداری ۰٫۰۰۰۱) تأیید گردید. سپس ماتریس همبستگی متغیرهای ۱۵گانه تشکیل و مؤلفه‌های اصلی با مقدار ویژه[1] بالاتر از ۱ استخراج شدند. پنج مؤلفه اول روی هم ۷۶٫۴ درصد واریانس کل را تبیین کردند. وزن هر مؤلفه (W_c) از رابطه (۶) بر اساس سهم واریانس تبیین‌شده توسط آن مؤلفه محاسبه شد:

$$W_c = \frac{\lambda_c}{\sum_{c=1}^{5} \lambda_c} \quad (۶)$$

که در آن λ_c مقدار ویژه مؤلفه c است. وزن‌های محاسبه شده به این ترتیب بودند: معیشت ۰٫۲۶، جمعیت ۰٫۱۸، ظرفیت نهادی ۰٫۲۰، آبیاری و زیرساخت ۰٫۲۱، و محیط‌زیست و کشاورزی ۰٫۱۵. در سطح پایین‌تر، وزن هر متغیر درون یک مؤلفه (w_i) از بار عاملی[2] آن متغیر بر روی مؤلفه مربوطه، پس از چرخش واریماکس و نرمال‌سازی مجموع بارها به ۱، مطابق رابطه (۷) تعیین شد:

$$w_i = \frac{|L_{i,c}|}{\sum_{i=1}^{m} |L_{i,c}|} \quad (۷)$$

که $L_{i,c}$ بار عاملی متغیر i روی مؤلفه c و m تعداد متغیرهای آن مؤلفه است.

محاسبه شاخص ترکیبی تاب‌آوری

پس از استانداردسازی متغیرها و تعیین وزن‌ها، امتیاز هر مؤلفه (S_c) برای یک روستا از طریق ترکیب خطی وزنی متغیرهای درون آن با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شد:

$$S_c = \sum_{i=1}^{m} w_i \cdot X_i' \quad (۸)$$

که X_i' مقدار نرمال‌شده متغیر i و w_i وزن آن است. در نهایت، شاخص نهایی تاب‌آوری (R) برای هر روستا از رابطه (۹) به‌دست آمد:

$$R = \sum_{c=1}^{5} W_c \cdot S_c \quad (۹)$$

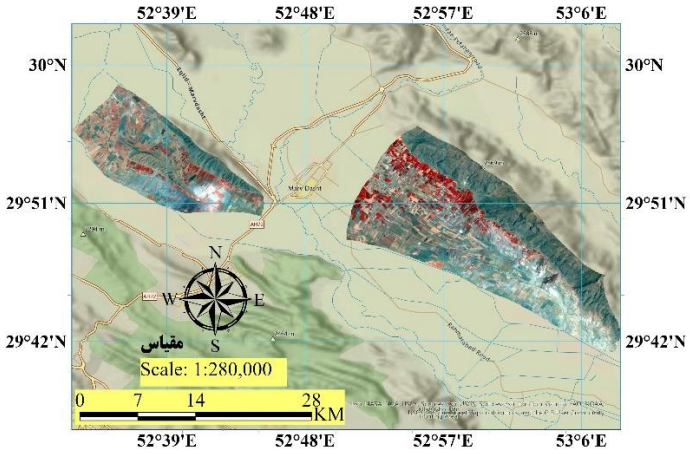
مقدار R در بازه ۰ تا ۱ قرار دارد؛ مقادیر بالاتر نشان‌دهنده تاب‌آوری بیشتر و مقادیر نزدیک به صفر حاکی از آسیب‌پذیری بالا است.

تحلیل فضایی الگوهای تاب‌آوری

برای شناسایی خوشه‌های فضایی تاب‌آوری، از شاخص گتیس–ارد[3] که یک آماره موضعی برای تشخیص نقاط داغ و سرد است، استفاده شد. این شاخص برای هر واحد مکانی به صورت Z-score استانداردشده (رابطه ۱۰) محاسبه می‌شود:

$$G_i^* = \frac{\sum_j w_{ij} R_j - \bar{R} \sum_j w_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_j w_{ij}^2 - (\sum_j w_{ij})^2}{n-1}}} \quad (۱۰)$$

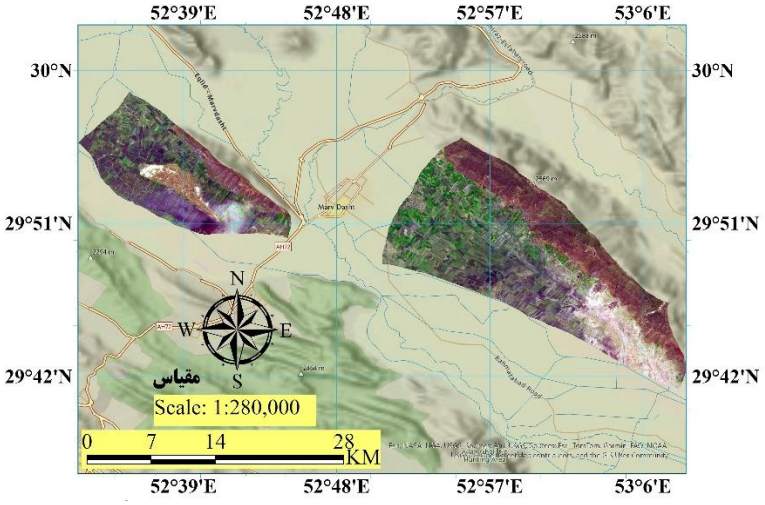
که در آن R_j مقدار شاخص در روستای همسایه j، w_{ij} وزن فضایی (معکوس فاصله)، $\bar{R}$ میانگین کلی شاخص، S انحراف معیار و n تعداد کل روستاها است. مقادیر Z-score مثبت و معنادار نشان‌دهنده خوشه‌های تاب‌آوری بالا (نقاط داغ) است. همچنین از شاخص موران عمومی[4]، برای سنجش خودهمبستگی فضایی کلی استفاده شد.



شکل ۲- ترکیب رنگی تصاویر ماهواره‌ای لندست مربوط به سال ۱۳۷۹ در روستاهای محمدآباد و مجدآباد مرودشت استان فارس

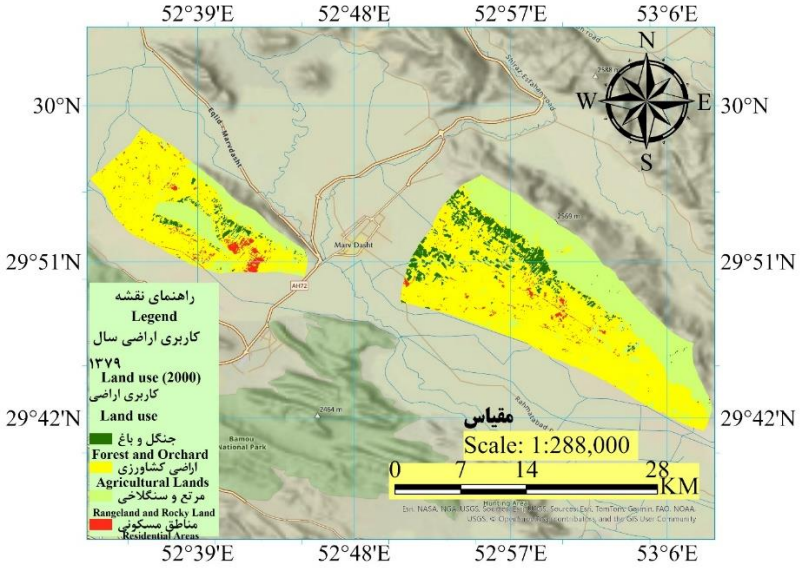
Figure 2- Color combination of Landsat satellite images from 2000 in the villages of Mohammadabad and Majdabad, Marvdasht, Fars Province

1- Eigenvalue
2- Factor Loading
3- Getis-Ord Gi*
4- Moran's I



شکل ۳- ترکیب رنگی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل مربوط به سال ۱۴۰۳ در روستاهای محمدآباد و مجدآباد مرودشت استان فارس

Figure 3- Color combination of Sentinel satellite images from 2024 in the villages of Mohammadabad and Majdabad, Marvdasht, Fars Province



شکل ٤- نقشه کاربری اراضی سال ۱۳۷۹ در روستاهای محمدآباد و مجدآباد مرودشت استان فارس

Figure 4- Land use map in 2000 in the villages of Mohammadabad and Majdabad, Marvdasht, Fars Province

نتایج حاصل از نرم‌افزار ENVI نشان می‌دهد صحت کلی تصاویر از میزان ضریب کاپا بیشتر می‌باشد و بیانگر آن است که تصاویر ماهواره‌ای با دقت قابل قبولی قادر به تهیه نقشه‌های کاربری اراضی می‌باشد. معمولاً مقادیر حاصل از صحت کلی بیشتر از مقدار واقعی به‌دست می‌آید؛ این در حالی است که مقادیر ضریب کاپا میزان دقت را نسبت به یک طبقه‌بندی تصادفی محاسبه می‌کند. ضریب کاپا و صحت کلی، با کل طبقه‌بندی ارتباط دارند و اطلاعاتی در مورد توزیع مکانی کلاس‌ها بیان نمی‌کند. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل‌ها نشان می‌دهد در مجموع دقت نتایج حاصل از تصاویر سنتینل نسبت به تصاویر لندست بالاتر است. نقشه کاربری اراضی سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳ در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

تحلیل روند تغییرات تاب‌آوری در طول زمان

برای ارزیابی پویایی شاخص، مقادیر R در چهار مقطع ۱۳۹۳، ۱۳۹۶، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۲ محاسبه و روند آن با آزمون من-کندال

ا صلاح شده[1] (MMK) و تخمین‌گر شیب Sen تحلیل شد. آماره Z آزمون MMK معناداری روند را نشان می‌دهد و شیب Sen با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{R_j - R_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad (۱۱)$$

که در آن R_j و R_i مقادیر شاخص در زمان‌های j و i هستند. شیب مثبت نشان‌دهنده روند افزایشی تاب‌آوری و شیب منفی بیانگر کاهش تاب‌آوری در طول دوره مطالعه است.

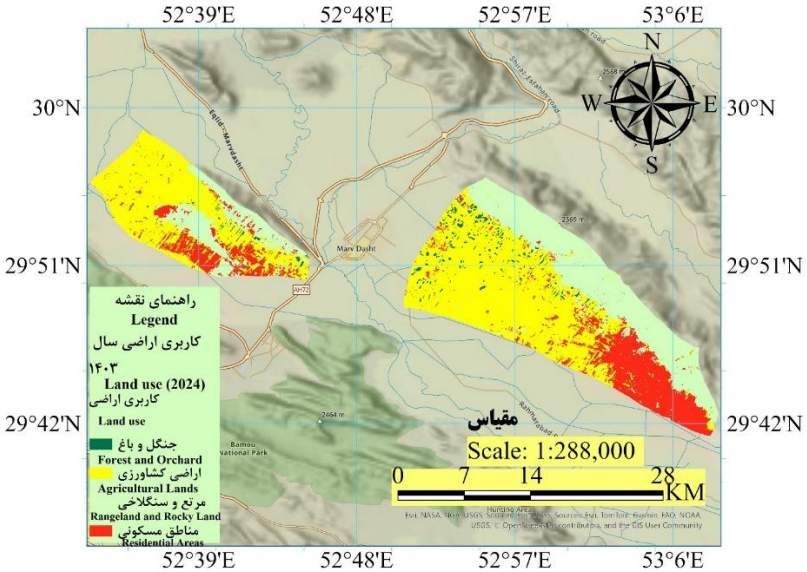
اعتبارسنجی نتایج

اعتبار سنجی به دو روش کمّی و کیفی انجام شد. در بخش کمّی، همبستگی میان امتیاز شاخص LPCIEA و نمره ادراک ذهنی تاب‌آوری (حاصل از مقیاس لیکرت در پرسش‌نامه) با استفاده از ضریب همبستگی اسپیرمن محاسبه گردید. مقدار ۰/۷۴ با سطح معناداری کمتر از ۰/۰۱، نشان‌دهنده تطابق قوی نتایج شاخص با درک ساکنان است. در بخش کیفی، سه کارگاه مشارکتی با دهیاران، اعضای شوراها و کشاورزان پیشرو تشکیل و نتایج برای مثلث‌سازی دیدگاه‌ها و تأیید تفسیرهای بومی به بحث گذاشته شد.

نتایج و بحث

اطلاعات مربوط به هر یک شاخص‌های ترکیبی LPCIEA، با ضریب وزنی برابر اندازه‌گیری شدند. اطلاعات سال ۱۳۷۹ در روستای مجدآباد نشان می‌دهد اراضی کشاورزی، مرتعی و مسکونی روند منفی دارند و در حال کاهش ا ست. ارا ضی ک شاورزی به‌دلیل کاهش منابع آبی، اراضی مرتعی به‌دلیل روند قهقرایی مراتع و مناطق مسکونی به‌دلیل مهاجرت و خالی از سکنه شدن روند کاهشی را نشان می‌دهد. مناطق مسکونی خالی از سکنه یا زیر ۲۵ خانوار با استفاده از آمار مرکز آمار ایران مطابقت داده شد و پلی‌گون آن حذف شد.

مقادیر تاب‌آوری معیار کاربری اراضی (L) در سال ۱۳۷۹ نشان می‌دهد بیشترین و کمترین میزان تاب‌آوری، به‌ترتیب در روستاهای مجدآباد و محمدآباد مشاهده شد. کمترین میزان تاب‌آوری اراضی عدد ۶۵ و بیشترین آن عدد ۷۰ را نشان داد. در این بخش، تفاضل ۵ امتیازی م شاهده شده ا ست. در سال ۱۴۰۳ معیار کاربری ارا ضی در مجدآباد و محمدآباد، ۵۳ بوده که نشان می‌دهد کاربری اراضی دچار تغییر قابل توجهی پس از خ شک سالی شده ا ست. معیار جمعیت (P) ساکن در روستا نشان می‌دهد سال ۱۳۷۹ روستاهای مجدآباد و محمدآباد، در سطحی نزدیک به یکدیگر، به‌ترتیب با ۴۶ و ۴۴ امتیاز در ده های اول و دوم قرار دار ند. در انت‌های سال ارز یابی (۱۴۰۳) بیشترین تاب‌آوری مربوط به روستای مجدآباد (۷۷) و روستای محمدآباد با اختلاف ۲۷ امتیازی (۵۰)، در رده دوم قرار گرفته است.



شکل ۵- نقشه کاربری اراضی سال ۱۴۰۳ در روستاهای محمدآباد و مجدآباد مرودشت استان فارس

Figure 5- Land use map for the year 2024 in the villages of Mohammadabad and Majdabad, Marvdasht, Fars Province

تنوع محصولات تولیدی (C) نشان می‌دهد روستاهای مجدآباد و محمدآباد هر دو با امتیاز ۴۲ در یک جایگاه قرار دارند. در سال ۱۴۰۳، امتیاز این دو روستا به ۷ رسیده است و با کاهش ۳۵ امتیاز، شاهد کاهش تاب‌آوری در تنوع محصولات تولیدی آن‌ها بوده‌ایم که اثر خ شک سالی را به‌و ضوح نمایان کرده ا ست. بالاترین میزان تاب‌آوری سال ۱۳۷۹ در معیار تحصیلات (E) هر دو روستا امتیاز را به خود

1- Modified Mann-Kendall

اختصـاص دادند؛ اما این معیار در سـال ۱۴۰۵، به امتیازهای ۴۱ و ۳۸ رسـید که افزایش قابل توجهی را نشـان می‌دهد. این امتیازها، بهبود تاب‌آوری در معیار تحصیلات دو روستا را نشان داد. معیار سطح آبیاری (I)، در سـال ۱۳۷۹ اعداد ۳۶ و ۳۴ را برای روسـتاهای موردمطالعه نشـان داد. در سـال ۱۴۰۳، این امتیارها به ۱۶ کاهش یافته اسـت که کاهش تاب‌آوری معیار آبیاری را نشـان می‌دهند. در معیار سـن (A) افراد به‌کار گرفته شده در سال ۱۳۷۹، هر دو روستا در امتیاز ۱۶ برابر بودند؛ اما در سـال ۱۴۰۳، با امتیازهای ۶۸، شـاهد بیش از ۵۰ امتیاز بوده‌ایم که نشان از افزایش تاب‌آوری در معیار سن در این دو روستا دارد. به‌طور کلی تاب‌آوری در سـال ۱۳۷۹ در محدوده ۳۵ تا ۳۶ امتیاز و در سال ۱۴۰۳ در محدوده ۳۸ قرار دارد. به‌عبارت دیگر، دو روستای موردمطالعه با بهبود تاب‌آوری مواجه هسـتند. مقادیر این امتیازها در جدول ۱ ارائه شده است.

نقشه‌های مربوط به تاب‌آوری روستاهای موردمطالعه در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳ در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است.

مقادیر ضرایب همبستگی معیارهای موردمطالعه در جدول ۲ ارائه شـده اسـت. معیار "تنوع محصـولات" بیشـترین همبسـتگی مثبت و معنی‌دار را با شاخص تاب‌آوری در سطح ۰/۰۱ نشان داد (۰/۸۵۲). در مقابل، معیار "تحصیلات" کمترین همبستگی را با تاب‌آوری دارا بود (۰/۱۴۵) که از لحاظ آماری معنی‌دار نبوده و تأثیر ناچیز آن را تأیید می‌کند.

بررسـی متغیرها به روش ENTER انجام شـده اسـت. آماره دوربین- واتسـون در جدول ۳، عدم خودهمبسـتگی مانده‌ها را تأیید می‌کند (مقدار ۱/۸۹۲). ضریب همبستگی چندگانه (R) برابر با ۰/۹۹۵ بوده که نشان از برازش عالی مدل دارد.

جدول ۴، ضرایب رگرسیونی استاندارد و غیراستاندارد را نشان می‌دهد. بیشـترین ضـریب بتا متعلق به معیار "تنوع محصـولات" با ۰/۷۸۵ اسـت که نشـان‌دهنده بیشـترین تأثیر مسـتقیم این معیار بر تاب‌آوری می‌باشد. پس از آن به‌ترتیب معیارهای "جمعیت" (۰/۴۶۵)، "سـن اشـتغال" (۰/۴۳۰)، "کاربری اراضـی" (۰/۳۸۰) و "آبیاری" (۰/۲۵۰) قرار دارند. کمترین ضریب بتا مربوط به معیار "تحصیلات" (۰/۰۹۵) است که این مقدار، تأثیر ناچیز آن را در مدل نشان می‌دهد.

براسـاس ضـرایب و تحلیل‌های انجام شـده معادله رگرسـیونی تاب‌آوری به‌شـرح رابطه زیر، تعریف شـد که شـاخص R بالاترین هم خطی را از ۶ معیار ایجاد کرده اسـت. این معادله، میزان اثرگذاری هر متغیر را بر شاخص تاب‌آوری خشک‌سالی، مشخص کرده است:

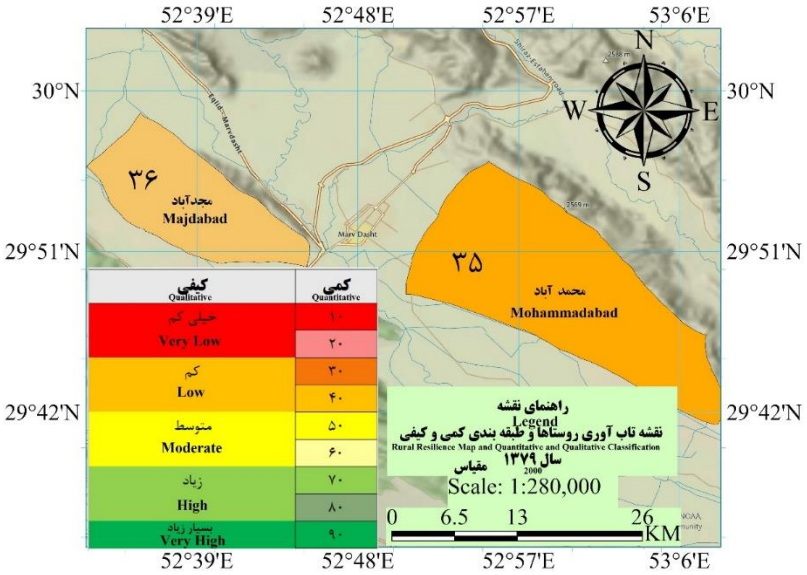
(۱۲)

$$R=۱/۴۵۰(\ ۰/۰۹L+\ ۰,۲۲۰P\ +\ ۰,۱۸۵C\ +\ ۰,۱۱۰I\ +\ ۰,۰۴۰E\ +\ ۰,۱۴۵A)$$

جدول ۱- مقادیر تاب‌آوری سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳

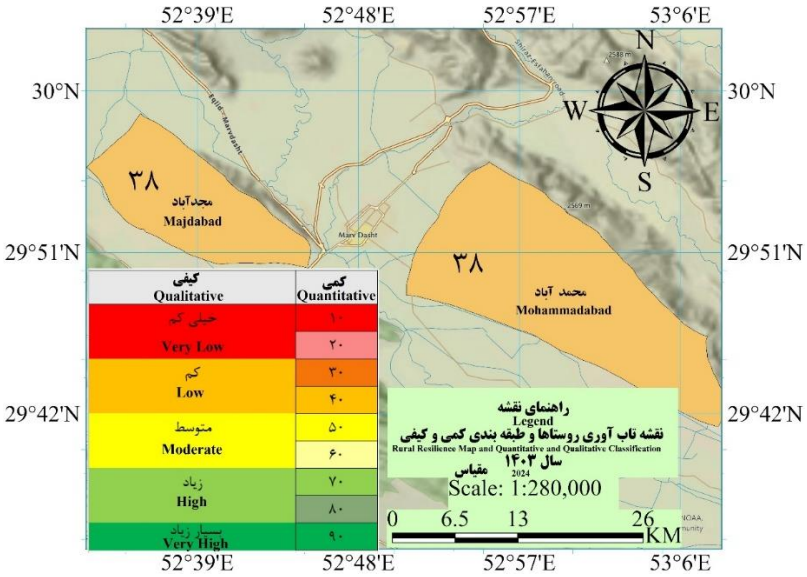
Table 1- Resilience values for the years 2000 and 2024

محمدآباد Mohammadabad	مجدآباد Majdabad	مقادیر تاب‌آوری Resilience Values
65	70	L
44	46	P
42	42	C
8	8	E
34	36	I
16	16	A
35	36	2000
53	53	L
50	77	P
7	7	C
38	41	E
16	16	I
68	68	A
38	38	2024



شکل ٦- نقشه تاب‌آوری در روستاهای مجدآباد و محمدآباد در سال ۱۳۷۹

Figure 6- Resilience map in the villages of Majdabad and Mohammadabad in 2000



شکل ۷- نقشه تاب‌آوری در روستاهای مجدآباد و محمدآباد در سال ۱۴۰۳

Figure 7- Resilience map in the villages of Majdabad and Mohammadabad in 2024

جدول ۲- مقادیر ضرایب همبستگی معیارهای موردمطالعه در روستاهای مجدآباد و محمدآباد

Table 2- Correlation coefficient values of the studied criteria in the villages of Majdabad and Mohammadabad

متغیرها/ برازش آماری Variable /Statistic	کاربری اراضی Land use	جمعیت Population	تنوع محصولات Product diversity	آبیاری Irrigation	تحصیلات Education	سن اشتغال Employment age	تاب‌آوری Resilience
کاربری اراضی Land Use							
پیرسون Pearson	1	-0.18	0.25	0.31	-0.17	0.22	0.29
Sig. (2-tailed)		0.62	0.48	0.39	0.63	0.54	0.41
N	10	10	10	10	10	10	10
جمعیت Population							
پیرسون Pearson	-0.18	1	-0.07	-0.890**	0.970**	-0.810**	0.41
Sig. (2-tailed)	0.62		0.84	0	0	0.005	0.24
N	10	10	10	10	10	10	10
تنوع محصولات Product Diversity							
پیرسون Pearson	0.25	-0.07	1	0.21	-0.15	0.23	0.852**
Sig. (2-tailed)	0.48	0.84		0.56	0.68	0.52	0
N	10	10	10	10	10	10	10
آبیاری Irrigation							
پیرسون Pearson	0.31	-0.890**	0.21	1	-0.870**	0.925**	0.15
Sig. (2-tailed)	0.39	0	0.56		0.001	0	0.68
N	10	10	10	10	10	10	10
تحصیلات Education							
پیرسون Pearson	-0.17	0.970**	-0.15	-0.870**	1	-0.760**	0.145
Sig. (2-tailed)	0.63	0	0.68	0.001		0.008	0.68
N	10	10	10	10	10	10	10
سن اشتغال Employment Age							
پیرسون Pearson	0.22	-0.810**	0.23	0.925**	-0.760**	1	0.33
Sig. (2-tailed)	0.54	0.005	0.52	0	0.008		0.35
N	10	10	10	10	10	10	10
تاب‌آوری Resilience							
پیرسون Pearson	0.29	0.41	0.852**	0.15	0.145	0.33	1
Sig. (2-tailed)	0.41	0.24	0	0.68	0.68	0.35	
N	10	10	10	10	10	10	10

*: معنی‌داری در سطح ۰/۰۵

*Significance at the 0.05 level

**: معنی‌داری در ۰/۰۱

**Significance at the 0.01 level

جدول ۳- بررسی آماره دوربین- واتسون در روستاهای مجدآباد و محمدآباد

Table 3- Study of Durbin-Watson statistics in the villages of Majdabad and Mohammadabad

همبستگی R (Correlation)	مربعات خطا R Square	R تعدیل شده Adjusted R Square	انحراف از معیار Std. Deviation	دوربین- واتسون Durbin-Watson
0.995	0.99	0.98	0.35	1.892

جدول ٤- مقادیر ضرایب رگرسیون استاندارد در روستاهای مجدآباد و محمدآباد

Table 4- Values of standard regression coefficients in the villages of Majdabad and Mohammadabad

مدل Model	ضرایب استاندارد نشده Unstandardized coefficients		ضرایب استاندارد شده Standardized coefficients	t	Sig. significance	هم راستایی Collinearity	
	بتا β	انحراف معیار Std. error	بتا β			خورند Tolerance	VIF Variance inflation factor
ضریب ثابت Constant	1.45	3.2	-	0.453	0.65	-	-
کاربری اراضی Land use	0.09	0.048	0.38	1.875	0.155	0.67	1.49
جمعیت Population	0.22	0.09	0.465	2.444	0.105	0.02	50.5
تنوع محصولات Product diversity	0.185	0.012	0.785	15.415	0	0.55	1.82
آبیاری Irrigation	0.11	0.09	0.25	1.222	0.3	0.045	22.22
تحصیلات Education	0.04	0.08	0.095	0.5	0.63	0.02	50
سن اشتغال Employment age	0.145	0.045	0.43	3.222	0.05	0.085	11.76

نتیجه‌گیری

شاخص تاب‌آوری استفاده‌شده در این پژوهش، ۶ معیار را در قالب یک شاخص ترکیبی به کار گرفت و نشان داد که هر معیار، ضریب متفاوتی در معادله نهایی تاب‌آوری دارد، اما مقدار تاب‌آوری بالاترین هم خطی را از ۶ معیار ارائه می‌دهد. بر اساس نتایج مدل رگرسیونی و تحلیل هم‌خطی (جدول‌های ۳ و ۴)، معیار تنوع محصولات کشاورزی (سطح محصولات زراعی) با ضریب بتای ۰/۷۸۵ و سهم ۷۳ درصدی در تبیین واریانس، بیش‌ترین تأثیر را بر شاخص تاب‌آوری داشته است. در مقابل، معیار تحصیلات با ضریب بتای ۰/۰۹۵ و سهم بسیار ناچیز در بُعد نهایی، کم‌ترین تأثیر را نشان داده است. سایر معیارها شامل جمعیت، سن اشتغال، کاربری اراضی و آبیاری به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی اهمیت قرار دارند. نتایج نشان داد در روستاهایی که گروه‌های سنی جوان آن مهاجرت نکرده و در منطقه حضور دارند، میزان سازگاری با شرایط موجود و تاب‌آوری به خشکسالی افزایش یافته است. همچنین روستاهایی که در آن محصولات کشاورزی تنوع بیشتری دارد، معیشت افراد ساکن در شرایط خشکسالی پایدارتر است. بازه زمانی ۲۴ ساله در این پژوهش نشان داد ساختار جمعیت، فشار بر منابع را نسبت به تاب‌آوری ترجیح می‌دهد؛ به‌عبارت دیگر، افزایش تعداد افراد، نشان‌دهنده مهاجرت از برون به درون است و این موضوع با توجه به جمعیت بالای مجدآباد (۸۹۷۰ نفر) در مساحت محدودتر، ضرورت توجه به تنوع‌بخشی محصولات را دوچندان می کند. جوامع روستایی با سطح تحصیلات بالاتر، گرچه تاب‌آوری بیشتری از خود نشان دادند، اما تأثیر این معیار در مقایسه با تنوع محصولات و مدیریت آبیاری ناچیز است. نتایج نشان می‌دهد اگرچه شبکه آبیاری ابزار پاسخگوی خوبی برای تاب‌آوری در خشکسالی است، اما حجم آب‌دهی در سال‌های خشک بسیار محدود است و همین مسأله انسجام اجتماعی جوامع را برای مقابله با کم‌آبی کاهش می‌دهد. روستاهایی که تنوع محصول و انسجام اجتماعی بالاتری دارند، نسبت به تغییرات آب و هوا سازگاری بیشتری نشان دادند.

روستاهایی که از منابع آب سطحی استفاده می‌کردند با حفر چاه غیرمجاز یا کف شکنی چاه‌ها، آب بیشتری استخراج کردند که باعث افزایش تنوع سایر محصولات و گرایش به محصولات کم‌آب‌بر شده است. بررسی سطوح آبیاری نشان داد مساحت سطوح آبیاری دو روستای موردمطالعه کاهش یافته است. سطح تحصیلات جوامع محلی ساکن افزایش داشته است. این عامل، نشان‌دهنده پذیرش مهاجران و نرخ زاد و ولد است، اما تأثیر آن بر تاب‌آوری در مقایسه با تنوع محصولات ناچیز بوده است. نتایج تاب‌آوری نشان داد روستای محمدآباد، کمترین میزان تاب‌آوری را در سال ۱۳۷۹ داشته است. روستاهای مجدآباد و محمدآباد، تاب‌آوری مشابهی دارند، اما مقادیر آن در طول زمان کاهش یا افزایش یافته و طبقه کیفی تغییری نداشته است. این مسأله نشان‌دهنده روند بطئی تغییرات است. بر اساس تغییرات تاب‌آوری در این دو روستا و شش معیار، مجموعاً ۱۲ وضعیت ثبت شد که از این تعداد، ۶ وضعیت قرمز (تاب‌آوری بسیار پایین)، ۳ وضعیت زرد (تاب‌آوری متوسط رو به کاهش) و ۳ وضعیت سبز (تاب‌آوری مطلوب) به‌دست آمد. این توزیع نشان‌دهنده غلبه وضعیت‌های بحرانی و روند نزولی تشدید خشک‌سالی در منطقه است. در نتیجه، اولویت اقدامات برای سازگاری با خشک‌سالی و بهبود تاب‌آوری، به‌ترتیب با روستای مجدآباد (به‌دلیل جمعیت بیشتر و فشار بالاتر بر منابع) و سپس محمدآباد است. نتایج تحلیل رگرسیونی نشان داد که تنوع محصولات زراعی و جمعیت به‌ترتیب بیشترین وزن را در مدل دارند، در حالی‌که تحصیلات و آبیاری کمترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند. در سطح معنی‌داری ۵ درصد، تنوع محصولات زراعی رابطه مثبت و معنی‌داری با تاب‌آوری ایجاد کرده است. همچنین در سطح معنی‌داری ۰/۰۱، جمعیت با تحصیلات رابطه مثبت و با سطح آبیاری و اشتغال به‌کار رابطه منفی نشان داده است. آماره دوربین- واتسون (۱/۸۹۲) نشان‌دهنده عدم خودهمبستگی و اعتبار ضرایب برآورد شده است. ضریب همبستگی چندگانه ۰/۹۹۵ نیز صحت بالای معیارهای به‌کارگیری‌شده را تأیید می‌کند. ارزیابی شاخص نشان داد متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته مؤثر هستند و این تأثیر در سطح اطمینان ۹۵ در صد معنی‌دار است. استفاده از یک شاخص واحد برای تاب‌آوری، به‌ویژه در بخش کشاورزی، دشوار است؛ اما هر پژوهش بر اساس اهداف خود به ارزیابی تاب‌آوری می‌پردازد. در این پژوهش، جامعه کشاورزان مورد بررسی قرار گرفته است؛ بنابراین نتایج ارائه‌شده در قالب شاخص LPCIEA منطبق بر پژوهش‌های سازمان‌یافته جزئی است. در معیار سن اشتغال، ترکیب زنان و مردان شاغل در نظر گرفته شده که با جامعه توانمند دارای شغل مطابقت دارد. پژوهش حاضر از سه معیار سطح اراضی کشاورزی، سطح آبیاری و سن اشتغال بهره گرفته و اعتمادپذیری شاخص را اثبات کرده است. نتایج این پژوهش با یافته های (Norouzi, Abbaspour, & Ahmadi, 2020) در زمینه انتخاب معیارها و شاخص مناسب تحلیل تاب‌آوری، هم‌خوانی دارد. تفاوت این پژوهش با تحقیقات مشابه در آن است که تصمیم‌گیری چندمعیاره و تکنیک تحلیل سلسله مراتبی، دو روش مبتنی بر پرسش و تصمیم هستند، در حالی‌که وزن معیارهای شاخص LPCIEA بر اساس بازخورد داده‌های ثبت‌شده از خصوصیات منطقه است و پرسش‌گری و تصمیم سازی در آن دخالت ندارد. این عامل باعث افزایش دقت و تکرارپذیری شاخص و تمایز آن در مقایسه با پژوهش‌های مشابه شده است.

با وجود استفاده همزمان از داده‌های سنجش‌ازدور، آمار رسمی و داده های پیمایش خانوار، نتایج پژوهش با برخی منابع بالقوه عدم‌قطعیت همراه است. داده‌های پیمایشی، علی‌رغم پوشش ۲۱۷ سرپرست خانوار معادل ۶۵ درصد کل خانوارهای مورد مطالعه، ممکن است تحت تأثیر خطاهای پاسخ‌دهی، خطای یادآوری و تفاوت در ادراک پاسخ‌دهندگان از برخی متغیر های اجتماعی قرار گیرند. همچنین، استخراج برخی متغیرهای محیطی از تصاویر ماهواره‌ای با عدم‌قطعیت ناشی از تفکیک مکانی تصاویر، شرایط تصویربرداری و خطاهای طبقه‌بندی همراه است. نتایج طبقه‌بندی کاربری اراضی نشان داد که دقت تصاویر سنتینل در مجموع بیشتر از تصاویر لندست بوده است؛ ازاین‌رو، تفاوت در کیفیت و تفکیک مکانی داده های سنجش‌ازدور نیز می‌تواند بر برآورد برخی معیارهای محیطی اثرگذار باشد. به‌منظور کاهش اثر این منابع عدم‌قطعیت، در این پژوهش از رویکرد مثلث‌سازی داده‌ها و اعتبارسنجی چندمنبعی استفاده شد. شاخص LPCIEA بر مبنای ترکیب داده های عینی حاصل از سنجش‌ازدور و آمار رسمی با داده‌های پیمایش خانوار محاسبه شد و سپس نتایج با ادراک ساکنان و دیدگاه ذی‌نفعان محلی اعتبار سنجی گردید. همبستگی اسپیرمن بین امتیاز شاخص و ارزیابی ادراکی تاب‌آوری برابر با ۰/۷۴ و در سطح کمتر از ۰/۰۱ معنی‌دار بود و سه کارگاه مشارکتی با دهیاران، اعضای شوراها و کشاورزان پیشرو نیز برای بررسی و تفسیر نتایج برگزار شد. این فرآیندها موجب افزایش قابلیت اتکای نتایج می‌شوند، اما نمی‌توانند عدم‌قطعیت ناشی از ماهیت داده ها و محدودیت مقیاس مطالعه را به‌طور کامل حذف کنند. محدودیت دیگر پژوهش، تمرکز مطالعه بر دو روستای منتخب است. ازاین‌رو، نتایج به‌عنوان شواهد موردی از تفاوت‌های تاب‌آوری اجتماعی در جوامع مورد مطالعه تفسیر می شوند و تعمیم مستقیم آنها به سایر روستاها، به‌ویژه مناطقی با شرایط متفاوت اقلیمی، اقتصادی، کشاورزی و اجتماعی، نیازمند احتیاط است. ارزیابی شاخص LPCIEA در تعداد بیشتری از روستاها و در دامنه متنوع‌تری از شرایط محیطی و اجتماعی می‌تواند در مطالعات آینده به آزمون تعمیم‌پذیری و کاهش عدم‌قطعیت فضایی نتایج کمک کند. نکته حائز اهمیت آن است که تمایل به پذیرش جبران‌خسارت توسط نهادهای مردمی و دولتی، نقش مهمی در بهبود تاب‌آوری دارد. اولویت‌بندی اقدامات ممکن است بر اساس منابع مالی در دسترس تغییر کند؛ اما رسیدن به نتیجه مطلوب از

طریق افزایش سازگاری و بهبود تاب‌آوری، یک مسیر پیچیده و پویا است. هماهنگی میان دستگاه‌های اجرایی با هدف ایجاد هم‌آهنگی در سیاست‌های راهبردی و اجرایی، تعیین اولویت‌ها، برنامه‌ها و نحوه تخصیص اعتبارات، اجرایی‌سازی پیشنهادها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. متشکل شدن مردم محلی با هدف ترغیب و تشویق همکاری میان آن‌ها و حضور در نهادهای تصمیم‌گیری (مانند تعیین سیاست‌های راهبردی و اجرایی، اولویت‌ها، برنامه‌ها و نحوه اعتبارات) از مهم‌ترین روش‌های ارتقا تاب‌آوری در مواجه با خشکسالی است. جوامع محلی که با منابع طبیعی و ژنتیکی ارتباط مستقیم و غیرمستقیم دارند، باید در مقام شریک اجتماعی و بازوی اجرایی در هر منطقه قرار گیرند و در سند توسعه راهبردی مواجه با خشکسالی به آن‌ها توجه ویژه‌ای شود. با توجه به این‌که "تنوع محصولات زراعی" به‌عنوان مهم‌ترین عامل تاب‌آوری شناسایی شده است، سیاست‌های حمایتی باید بر افزایش تنوع کشت، توسعه کشت‌های کم‌آب‌بر و متنوع‌سازی محصولات کشاورزی متمرکز شوند تا ضمن کاهش وابستگی به یک محصول خاص، ریسک ناشی از خشک‌سالی مدیریت شود.

سپاسگزاری

این اثر برگرفته از بخشی از نتایج زیرپروژه تحقیقاتی مستقل با عنوان "تحلیل تاب‌آوری اجتماعی در برابر خشکسالی با استفاده از شاخص ترکیبی (مطالعه موردی: استان فارس)"، با کد ۰۱۰۴۹۵-۰۱۲-۲۹-۶۶-۰ و مصوب در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری می‌باشد. نویسندگان این مقاله بر خود فرض می‌دانند از همکاری و پشتیبانی آن پژوهشکده و حمایت‌های مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع‌طبیعی استان فارس سپاسگزاری و قدردانی کنند.

References

1. Afrin, R., Sultana, R., & Alam, M. S. (2024). A Comprehensive analysis of drought vulnerability in the Barind region of Bangladesh: A socio-ecological systems approach. *Ecological indicators*, 160, 111863. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111863
2. Afshartabar, R., Mortazavi, S. A., & Khalilian, S. (2023). Assessing the effects of climate change on crop production in Marvdasht County. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 17(1), 42–55. Retrieved from https://idj.iaid.ir/article_168109.html
3. Bahta, Y., Jordaan, A., & Muyambo, F. (2016). Communal farmers' perception of drought in South Africa: Policy implication for drought risk reduction. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 20, 39–50. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.10.007
4. Bathaiy, S. S., Chizari, M., Sadighi, H., & Alambeigi, A. (2021). Social media and farmer's resilience to drought as an environmental disaster: A moderation effect. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 59, 102209. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102209
5. Bera, D., & Dutta, D. (2024). A Comprehensive Evaluation of Agricultural Drought Vulnerability Using Fuzzy-AHP- Based Composite Index Integrating Sensitivity and Adaptive Capacity. *Hydrological Processes*, 38(11), e15331. https://doi.org/10.1002/hyp.15331
6. Brock, M. A., Nielsen, D. L., Shiel, R. J., Green, J. D., & Langley, J. D. (2003). Drought and aquatic community resilience: the role of eggs and seeds in sediments of temporary wetlands. *Freshwater Biology*, 48(7), 1207–1218. https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2003.01083.x
7. Dale, A. P., Vella, K., Potts, R., Voyce, B., Stevenson, B., Cottrell, A., . . . Pert, P. (2016). Applying social resilience concepts and indicators to support climate adaptation in tropical North Queensland, Australia. *In Climate Adaptation Governance in Cities and Regions* (pp. 21–44). https://doi.org/10.1002/9781118451694.ch2
8. Falah mehrgerdi, n., & Hanaee, T. (2020). Assessing the resilience of the urban neighborhood in the face of natural hazards (Case Study of Mashhad Ab-o- Bargh District). *Geography and Development*, 18(59), 227–246. 10.22111/gdij.2020.5473
9. Ghorbani, M., Bagheri Fahraji, R., Khalighi-Sigaroodi, S., & Rahimi, M. (2025). Social network structures and drought resilience: a case study of Iranian pastoralists in the Nodoushan watershed. *Environmental Hazards*, 1–28. https://doi.org/10.1080/17477891.2025.2564101
10. Hassanshahi, H., Iravani, H., Daneshvar Ameri, Z., & Kalantari, K. (2015). Measure and comparison of economic, social and ecological sustainability of farming systems in the Marvdasht plain. *Desert*, 20(2), 231–239. https://doi.org/10.22059/jdesert.2015.56485
11. Khatir, A., Rezaei-Moghaddam, K., & Zamani, G.-H. (2017). Factors affecting the migration of rural youth, members and non-members of agricultural cooperatives in Marvdasht city. *Iranian Agricultural Extension and Education Journal*, 12(2), 19–35. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20081758.1395.12.2.2.5
12. Khoshnazar, A., Perez, G. C., & Sajjad, M. (2023). Characterizing spatial–temporal drought risk heterogeneities: a hazard, vulnerability and resilience-based modeling. *Journal of Hydrology*, 619, 129321. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129321
13. Kotzee, I., & Reyers, B. (2016). Piloting a social-ecological index for measuring flood resilience: A composite

index approach. *Ecological indicators*, 60, 45–53. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.06.018
14. Li, T., Zhang, R., & Tan, S. (2026). Enhancing climate resilience of pastoral communities through informal institutions: evidence from Inner Mongolia. *Climate and Development*, 18(1), 44–57. https://doi.org/10.1080/17565529.2025.2500454
15. Mavhura, E., Manyangadze, T., & Aryal, K. R. (2021). A composite inherent resilience index for Zimbabwe: An adaptation of the disaster resilience of place model. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 57, 102152. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102152
16. Naumann, G., Carrão, H., & Barbosa, P. (2018). Indicators of social vulnerability to drought. Drought: Science and policy, 111–125. https://doi.org/10.1002/9781119017073.ch6
17. Norouzi, V., Abbaspour, M., & Ahmadi, A. (2020). Presenting a resilience assessment model in comprehensive management of a resilient metropolis. *Geography and Regional Planning*, 10(38), 1029–1055. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22286462.1399.10.38.26.1
18. Sabut, A., & Mishra, A. (2026). A Century of Drought Research (1900–2023): Scientific Developments, Methodological Innovations, and Emerging Frontiers. *Water Resources Research*, 62(1), e2025WR041987. https://doi.org/10.1029/2025WR041987
19. Sass, K. S., Konak, A., de Macedo, M. B., Benso, M. R., Shrimpton, E., Balta-Ozkan, N., . . . da Silva, P. G. C. (2024). Enhancing drought resilience and vulnerability assessment in small farms: A global expert survey on multidimensional indicators. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 110, 104616. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104616
20. Soleimanpour, S. M., & Ebrahimi, P. (2024). Analysis of Social Resilience to Drought Using a Composite Index (Case Study: Fars Province). https://fipak.areeo.ac.ir/site/catalogue/18883770
21. Wassie, S. B., Mengistu, D. A., & Birlie, A. B. (2023). Agricultural livelihood resilience in the face of recurring droughts: Empirical evidence from northeast Ethiopia. *Heliyon*, 9(6). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16422

Contents

Mechanisms of Mycorrhizal Dependency: Analysis of the Physiological, and Molecular Processes Involved in the Establishment of Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis 245
H. Nadian Ghomsheh

Determining the Nutritional Status of Canola (*Brassica napus*) in Different Climates of Iran before the Flowering Stage 275
F. Nourgholipour, M.S. Tadayon, M. Pasandideh, M.A. Khodshenas

Thiol-Based Foliar Application Mitigates Oxidative Damage and Reduces Cadmium and Lead Accumulation in Wheat Grown in Contaminated Calcareous Soil 293
Z. Gheshlaghi, S.S. Hashemiaval

Unit Hydrograph Extraction Using Probability Density Functions (Case Study: Samian Watershed) 309
S. Rezaei Ghasem Gheshlaghi, M. Hasanpour Kashani, M.R. Nikpour

Temporal Analysis of the Effects of Dust Events on Vegetation Health Using Remote Sensing in Khuzestan Province 325
S. Pourhashemi, M. Firouzyazdi, M. Boroughani

Analysis of Social Resilience to Drought Using LPCIEA Index (Case Study: Mohammadabad and Majdabad Villages, Marvdasht County, Fars Province) 347
P. Ebrahimi, S.M. Soleimanpour

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 40 No. 3 Fall. 2026

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

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

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

Editorial Board:

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

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

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

P.O. Box: 91775- 1163

Fax: +98 51 8787430

E-Mail: jswa3@um.ac.ir

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

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

Ferdowsi University of Mashhad

Vol. 40 No. 3

2026

Journal of Water and Soil

(Agricultural Science and Technology)

ISSN:2008-4757

Contents

Mechanisms of Mycorrhizal Dependency: Analysis of the Physiological, and Molecular Processes Involved in the Establishment of Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis 245
H. Nadian Ghomsheh

Determining the Nutritional Status of Canola (*Brassica napus*) in Different Climates of Iran before the Flowering Stage 275
F. Nourgholipour, M.S. Tadayon, M. Pasandideh, M.A. Khodshenas

Thiol-Based Foliar Application Mitigates Oxidative Damage and Reduces Cadmium and Lead Accumulation in Wheat Grown in Contaminated Calcareous Soil 293
Z. Gheshlaghi, S.S. Hashemiaval

Unit Hydrograph Extraction Using Probability Density Functions (Case Study: Samian Watershed) 309
S. Rezaei Ghasem Gheshlaghi, M. Hasanpour Kashani, M.R. Nikpour

Temporal Analysis of the Effects of Dust Events on Vegetation Health Using Remote Sensing in Khuzestan Province 325
S. Pourhashemi, M. Firouzyazdi, M. Boroughani

Analysis of Social Resilience to Drought Using LPCIEA Index (Case Study: Mohammadabad and Majdabad Villages, Marvdasht County, Fars Province) 347
P. Ebrahimi, S.M. Soleimanpour