

The Synergistic Effects of Mycorrhiza and Zeolite on Improving Soil Properties and Establishing *Capparis spinosa* L. under Arid Climate Conditions of Semnan Region

A. Sabet Kheirabadi ¹ H. Yeganeh*², F. Bahadori ³, H. Niknahad ²

1. Ph.D student of Rangeland Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

2. Associate Professor, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

3. Assistant Professor, Research Center of Agricultural and Natural Resources, Education and Extension Organization (AREEO), Semnan, Iran.

* Corresponded Author: yeganeh@gau.ac.ir

Received date: 21/11/2025

Accepted date: 11/07/2026



[10.22034/jdmal.2026.2078482.1519](https://doi.org/10.22034/jdmal.2026.2078482.1519)

Abstract

Arid and semi-arid regions of Iran face significant challenges in establishing vegetation due to soil salinity, lack of organic matter, and low water retention. *Capparis spinosa*, a native and drought-tolerant species, is considered suitable for land rehabilitation. This study examined the interaction between Zeolite, a mineral soil amendment, and arbuscular mycorrhizal fungi, a biological agent, on soil properties and the establishment of *Capparis spinosa* L. The experiment used a factorial design with three Zeolite levels (0, 150, and 300 g per planting pit), three mycorrhiza levels involving *Rhizophagus irregularis* and *Funneliformis mosseae*, and two plant ecotypes—Alborz and Yazd—with three replications. Soil physicochemical properties and plant growth indices were measured at the end of the growing season. Results showed that the combined application of mycorrhiza and Zeolite significantly enhanced most soil properties and growth indices of *C. spinosa*. Notably, soil organic carbon increased to 0.93%, up from 0.56% in the control, along with a 65% rise in organic matter when applying 300g Zeolite with *Funneliformis mosseae*. In this optimal treatment, the establishment rate reached 96%, compared to less than 50% in control. The Alborz ecotype demonstrated superior nutrient uptake and chlorophyll accumulation. In conclusion, the synergistic effect of mycorrhiza and Zeolite significantly improves soil quality and promotes *C. spinosa* growth under arid conditions. This integrated method offers a sustainable strategy to enhance seedling survival and restore vegetation in Iran's drylands.

Keywords: Arid ecosystems; Drought tolerance; Nutrient uptake; Soil physicochemical properties; Sustainable management.

How to cite this article

Sabet Kheirabadi, A., Yeganeh, H., Bahadori, F., and Niknahad, H. (2026). The Synergistic Effects of Mycorrhiza and Zeolite on Improving Soil Properties and Establishing *Capparis spinosa* L. under Arid and Semi-arid Climate Conditions of Semnan Region. *Desert Management*, 14(1), 107-26. DOI: [10.22034/jdmal.2026.2078482.1519](https://doi.org/10.22034/jdmal.2026.2078482.1519)



Extended Abstract

Introduction

Arid and semi-arid ecosystems are among the most environmentally constrained landscapes globally, where vegetation establishment is mainly limited by low soil organic matter, high salinity, poor nutrient availability, and reduced water retention. These combined constraints hinder seedling survival, weaken plant–soil feedback, and speed up land degradation. As a result, restoration efforts in drylands are increasingly focusing on combining stress-tolerant native species with soil amendments that improve soil functions and stimulate microbial activity. *Capparis spinosa* L., a perennial xerophyte shrub, features deep roots, high drought resilience, and moderate salinity tolerance, making it a promising candidate for ecological restoration in degraded drylands. Nevertheless, early establishment remains a significant challenge, especially under saline and nutrient-poor conditions where rhizosphere functionality is limited. Beyond soil-related challenges, intraspecific variability significantly influences restoration success. Ecotypes from different climatic regions may vary in physiological plasticity, nutrient uptake efficiency, and compatibility with soil symbionts. This study selected two ecotypes—Alborz (semi-arid, with somewhat higher precipitation) and Yazd (hyper-arid, saline-prone)—to evaluate how populations respond to soil amendment strategies. Analyzing ecotype $\times$ soil amendment interactions provide valuable insights into selecting suitable plant material for dryland restoration projects. Natural zeolite, known for its high cation exchange capacity, porous structure, and ability to retain soil moisture while alleviating salinity, is often used for soil improvement. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), especially *Funneliformis mosseae* and *Rhizophagus irregularis*, enhance nutrient uptake, carbon transfer, and soil structure by forming extensive hyphal networks. This study aimed to determine whether combining natural zeolite with AMF inoculation could improve soil properties, physiological performance, and establishment success of two *C. spinosa* ecotypes in arid field conditions.

Materials and Methods

The experiment took place during the 2024–2025 growing season at the Agricultural and Natural Resources Research Center in Semnan Province, Iran, which has an average annual rainfall of 120 mm, an average temperature of 22 °C, and an elevation of 1138 meters. The soil was classified as loamy sand, containing 23% clay, 45% silt, and 32% sand, with a pH of 7.43, electrical conductivity (EC) of 2.22 dS m⁻¹, organic carbon at 0.56%, and organic matter at 0.97%. The study employed a 3 $\times$ 3 $\times$ 2 factorial design in a randomized complete block setup with three replications. Treatments included three levels of zeolite (0, 150, and 300 g per planting pit), three types of AMF inoculation (none, *F. mosseae*, *R. irregularis*), and two ecotypes (Alborz and Yazd). Zeolite rates represented control, moderate, and high yet manageable field application levels. Two-year-old seedlings were planted in 30-cm-deep pits, with AMF inoculum applied at planting. Each treatment contained eight seedlings, totaling 432 plants. Soil samples from 0–15 cm depth were analyzed for pH and EC using saturated paste extracts, while organic carbon, organic matter, and total nitrogen were measured to determine the C/N ratio using the Walkley–Black, Kjeldahl, and other methods. Leaf chlorophyll (including a, b, and total) was quantified with the Arnon method (mg g⁻¹ DW). Crude protein, total phenolics, flavonoids, and alkaloids were assessed via Bradford, Folin–Ciocalteu, Zhishen, and Harborne methods. Data analysis was performed using SAS 9.1, with mean comparisons made through Duncan's multiple range test ($P \leq 0.05$).

Results and Discussion

The combined use of zeolite and AMF markedly enhanced soil quality and seedling establishment in dry conditions (Tables 2–5). Compared to the control, integrated treatments raised soil organic carbon, organic matter, and the C/N ratio, while decreasing EC and slightly lowering soil pH. These changes indicate improved nutrient retention and reduced salinity stress—key factors limiting plant growth in drylands. The greatest benefit was seen with 300 g zeolite and *F. mosseae*, where soil organic carbon rose from 0.56% to 0.93%, and organic matter increased by about 65%. This significant improvement underscores the potential of synergistic amendments in combating soil degradation in arid environments. The enhanced organic matter content is crucial for improving soil structure and water holding capacity. Likely, zeolite improved cation exchange and water retention, while AMF promoted carbon stabilization through hyphal growth and rhizosphere aggregation. These synergistic effects boost plant–soil feedback vital for restoration. Seedling establishment was highly responsive to treatment interactions, with a maximum rate of 96% in the Alborz

ecotype under 300 g zeolite + *F. mosseae*—almost double the control (<50%). This shows that improvements in soil structure, nutrients, and microbial symbiosis directly support early survival under arid stress. Physiologically, combined treatments increased chlorophyll content, reflecting enhanced photosynthesis. Higher phenolic and flavonoid levels indicate stronger antioxidative defenses and better metabolic resilience under salinity stress. Correlation analysis confirmed positive links between establishment rate and soil organic carbon and organic matter, and negative links with EC and pH. These results affirm that soil carbon buildup and salinity reduction are crucial for successful *C. spinosa* growth in arid zones. Ecotype differences were also evident; the Alborz ecotype responded better to soil amendments and mycorrhizal inoculation than the Yazd ecotype, especially in chlorophyll levels and establishment success. This differential response highlights the importance of matching plant genetic material with specific soil amendment strategies for optimal restoration outcomes. Further research could explore the genetic basis of these ecotype variations. This suggests that effective restoration depends not only on soil management but also on choosing ecotypes with greater symbiotic responsiveness and physiological flexibility. Understanding these complex interactions is key to developing robust and sustainable land management practices.

Conclusion and Implications

This study shows that combining natural zeolite with arbuscular mycorrhizal inoculation—particularly *Funneliformis mosseae*—significantly improves soil health and the successful establishment of *Capparis spinosa* in arid field conditions. The best treatment (300 g zeolite + *F. mosseae*) achieved 96% seedling establishment, nearly twice that of untreated controls. These results emphasize the synergistic effect of mineral amendments and biological partners in repairing degraded dryland soils. By enhancing soil carbon, nutrient levels, and microbial activity while reducing salinity stress, this bio-mineral method offers an affordable, scalable solution for large-scale dryland restoration and combating desertification. The practicality and cost-effectiveness of this approach make it highly relevant for regions facing severe land degradation. Its application can lead to improved ecosystem services and enhanced biodiversity. Additionally, the varying responses among ecotypes highlight the need to combine genetic resource selection with soil management practices to boost restoration success in climate-challenged environments. Future work should focus on long-term monitoring of restored sites to assess the sustainability and ecological impact of these integrated strategies.

Keywords: Arid ecosystems; Drought tolerance; Nutrient uptake; Soil physicochemical properties; Sustainable management.



Fig. 1 Field establishment of *Capparis spinosa* L. seedlings under arid climatic conditions in Semnan during the experimental period.

Table 1. Soil characteristics at the Semnan Agricultural and Natural Resources Research Center

Soil property	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	pH	EC-dS m ⁻¹	OC-%	OM-%	AP -mm year ⁻¹	MT- °C	St	A-m
Value	23	45	32	7.43	2.22	0.56	0.97	120	22	Loamy Sand	1138

OC: Organic Carbon, OM: Organic Matter, AP: Annual Precipitation, MT: Mean temperature, St: Soil texture, A: Altitude

Table 2. Average changes in specific soil properties across various levels of zeolite and mycorrhiza in two *Capparis spinosa* populations.

Population	Zeolite level-g hole ⁻¹	Mycorrhiza type	OC (%) ± SE	OM (%) ± SE	C/N ratio ± SE	EC (dS m ⁻¹) ± SE	pH ± SE
Alborz	0 (Control)	No mycorrhiza	0.56±0.02c	0.97±0.03c	9.8 ± 0.4c	2.22 ± 0.05a	7.43±0.02a
Alborz	150	<i>R. irregularis</i>	0.78±0.03b	1.35±0.04b	15.2 ± 0.6b	2.17 ± 0.04a	7.40±0.02a
Alborz	300	<i>F. mosseae</i>	0.93±0.03a	1.60±0.05a	23.9 ± 0.8a	2.05 ± 0.03b	7.38 ± 0.02a
Yazd	0 (Control)	No mycorrhiza	0.55±0.02c	0.95±0.03c	10.2 ± 0.5c	2.25 ± 0.05a	7.44 ± 0.02a
Yazd	150	<i>R. irregularis</i>	0.72±0.03b	1.28±0.04b	14.8 ± 0.6b	2.15 ± 0.04a	7.40 ± 0.02a
Yazd	300	<i>F. mosseae</i>	0.88±0.03a	1.52±0.05a	22.7 ± 0.7a	2.03 ± 0.03b	7.36 ± 0.02a

Values are mean ± standard error (SE). Different lowercase letters within each column indicate significant differences at the 5% level according to Duncan's multiple-range test.

Table 3. Plant establishment percentages across various treatments

Population	Treatment	Establishment (%) ± SE	Duncan letters
Alborz	Control	68 ± 2.1	C
Alborz	Zeolite 150 + <i>R. irregularis</i>	84 ± 1.8	B
Alborz	Zeolite 300 + <i>F. mosseae</i>	90 ± 1.6	Ab
Yazd	Control	65 ± 2.3	C
Yazd	Zeolite 150 + <i>R. irregularis</i>	78 ± 1.9	B
Yazd	Zeolite 300 + <i>F. mosseae</i>	85 ± 1.7	Ab

Values represent mean ± Standard error (SE). Treatments sharing the same lowercase letter within each column are not significantly different at $p \leq 0.05$ according to Duncan's multiple-range test.

Table 4. Average chlorophyll and metabolite levels in *Capparis spinosa* leaves

Population	Chlorophyll a (mg g ⁻¹ DW) ± SE	Chlorophyll b (mg g ⁻¹ DW) ± SE	Total chlorophyll (mg g ⁻¹ DW)	Total phenols (mg g ⁻¹ DW)	Total flavonoids (mg g ⁻¹ DW)
Alborz – Control	0.54 ± 0.04c	1.14 ± 0.07c	1.68 ± 0.09c	8.4 ± 0.5c	1.23 ± 0.08c
Alborz – 300 Z + <i>F. mosseae</i>	1.43 ± 0.06a	1.93 ± 0.10a	3.35 ± 0.13a	9.6 ± 4.2a	3.45 ± 0.16a
Yazd – Control	0.68 ± 0.05c	1.11 ± 0.06c	1.79 ± 0.08c	9.8 ± 0.4c	0.68 ± 0.05c
Yazd – 300 Z + <i>F. mosseae</i>	1.51 ± 0.05a	2.14 ± 0.09a	3.65 ± 0.12a	8.9 ± 3.9a	3.52 ± 0.14a

Similar letters within each column indicate no significant difference according to Duncan's multiple range test ($p \leq 0.05$). The significant increase in all biochemical traits under the 300 Z + *F. mosseae* treatment indicates stimulation of photosynthesis and accumulation of secondary metabolites in the presence of mycorrhizal fungi and zeolite.

Table 5. Correlation matrix showing the relationship between establishment rate and soil properties

Parameters	Establishment (%)	OC	OM	C/N	EC	pH
Establishment (%)	1.00	0.82 **	0.84 **	0.71 *	-0.68 *	-0.74 *
OC		1.00	0.93 **	0.78 *	-0.56 *	-0.61 *
OM			1.00	0.74 *	-0.59 *	-0.66 *
C/N				1.00	-0.48	-0.42
EC					1.00	0.83 **
pH						1.00

* and ** $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$ levels

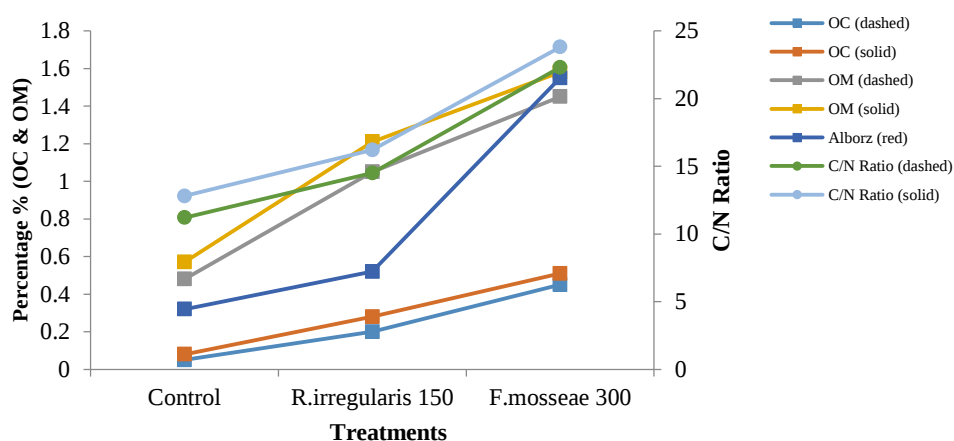


Fig 2. Changes in OC, OM, and C/N ratio across different zeolite and mycorrhiza treatment levels.

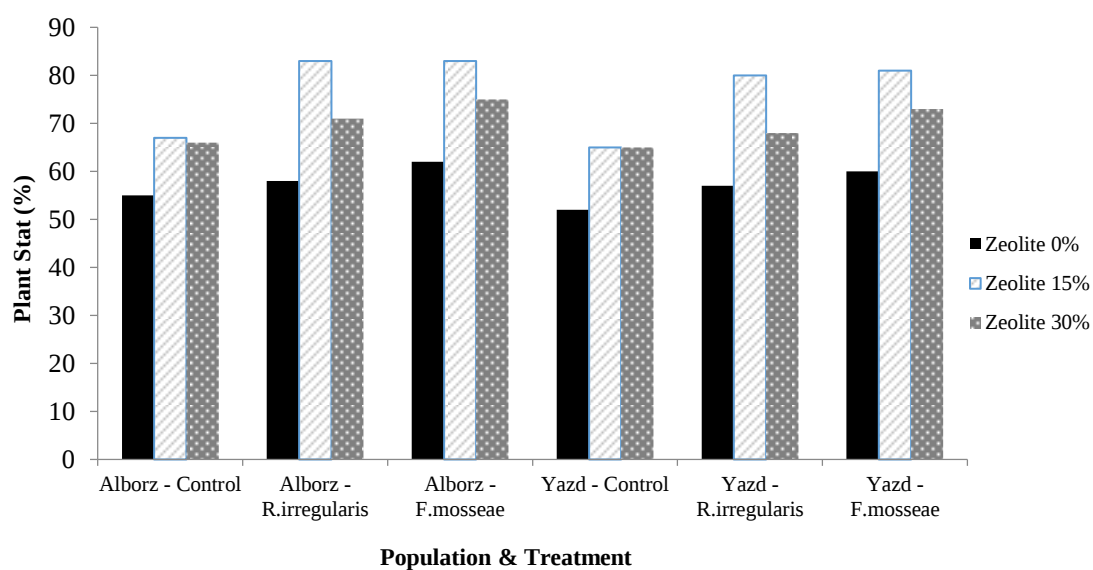
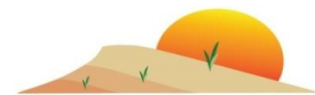


Fig 3. Impact of varying zeolite levels and mycorrhizal treatments on the seedling establishment (%) of *Capparis spinosa* L.



تأثیر هم‌افزایی مایکوریزا و زئولیت بر بهبود ویژگی‌های خاک و استقرار گیاه کبر در شرایط اقلیمی خشک منطقه سمنان

علی ثابت خیرآبادی^۱، حسن یگانه^{۲*}، فرزانه بهادری^۳، حمید نیکنهاد^۲

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی مرتع دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۲. دانشیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

۳. دانشیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان، سمنان، ایران.

*نویسنده مسئول: yeganeh@gau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۰



[10.22034/jdmal.2026.2078482.1519](https://doi.org/10.22034/jdmal.2026.2078482.1519)

چکیده

مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران با چالش‌های جدی در استقرار پوشش گیاهی به‌دلیل شوری، کمبود مواد آلی و ظرفیت نگهداری پایین رطوبت مواجه هستند. گیاه کبر (*Capparis spinosa* L)، گونه‌ای بومی و مقاوم به خشکی، مناسب برای احیای اراضی است. در پژوهش حاضر، تأثیر هم‌افزایی اصلاحگر معدنی زئولیت و عامل زیستی مایکوریزا بر بهبود ویژگی‌های خاک و استقرار گیاه کبر بررسی شد. آزمایش در قالب طرح فاکتوریل با سه سطح زئولیت صفر، ۱۵۰ و ۳۰۰g در گودال، سه سطح قارچ مایکوریزا *Funneliformis mosseae* و *Rhizophagus irregularis* و شاهد و دو جمعیت گیاهی البرز و یزد با سه تکرار انجام شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و شاخص‌های رشد گیاه در پایان فصل رشد اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که تأثیر ترکیبی مایکوریزا و زئولیت بر بیشتر ویژگی‌های خاک و شاخص‌های رشد گیاه کبر به‌صورت معنی‌داری مثبت بود. بیشترین بهبودی در کربن آلی خاک افزایش تا ۹۳٪ نسبت به شاهد ۵۶٪ و همچنین افزایش ۶۵٪ ماده آلی خاک در تیمار هم‌زمان زئولیت ۳۰۰g به همراه قارچ مایکوریزا *Funneliformis mosseae* مشاهده شد و درصد استقرار نهال‌ها به ۹۶٪ رسید، در حالیکه در تیمار شاهد کمتر از ۵۰٪ بود. اکوتیپ البرز پاسخ بهتری در جذب عناصر و افزایش کلروفیل نشان داد. درواقع برهم‌کنش هم‌افزایی قارچ مایکوریزا و زئولیت موجب بهتر شدن چشمگیر کیفیت خاک و ارتقای شاخص‌های رشد کبر در شرایط خشک شد و به‌عنوان روشی مناسب برای افزایش زنده‌مانی نهال‌ها و احیای پوشش گیاهی در شرایط خشک ایران است.

واژگان کلیدی: اکوسیستم‌های خشک، تحمل به خشکی، جذب مواد مغذی، ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی خاک، مدیریت پایدار

استناد به این مقاله

ثابت خیرآبادی، علی، یگانه، حسن، بهادری، فرزانه و نیکنهاد، حمید. (۱۴۰۴). تأثیر هم‌افزایی مایکوریزا و زئولیت بر بهبود ویژگی‌های خاک و استقرار گیاه کبر در شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک منطقه سمنان. مدیریت بیابان، ۱۳(۴)، ۴۵-۶۰. DOI: [10.22034/jdmal.2026.2078482.1519](https://doi.org/10.22034/jdmal.2026.2078482.1519)



■ مقدمه

یکی از مهمترین عوامل محدود کننده رشد گیاهان در مناطق خشک و نیمه خشک کمبود آب است (۴). در مناطق خشک از یک طرف کمبود بارش، پراکنش نامناسب فصلی و تبخیر و تعرق زیاد و از طرف دیگر هزینه‌های زیاد تأمین آب، سبب از بین رفتن نهال‌ها به‌ویژه در دوره‌ی حساس استقرار نهال می‌شود. این شرایط موجب کاهش بقاء نهال‌ها، کند شدن فرایندهای بازسازی طبیعی و تشدید تخریب سرزمین و بیابان‌زایی می‌شود.

از این‌رو، برای افزایش موفقیت طرح‌های جنگلکاری، باید نخست با روش‌های مناسب از آب موجود در طبیعت استفاده بهینه کرد و نیز تبخیر و تعرق را به حداقل رساند و در گام بعدی با استفاده از گونه‌های بردبار، موفقیت جنگلکاری را به حداکثر رساند (۱۲، ۱۰). گیاه کبر (*Capparis spinosa* L) درختچه چندساله بومی مناطق خشک و نیمه‌خشک است که به‌واسطه برخورداری از سیستم ریشه‌ای عمیق، تحمل زیاد به تنش‌های خشکی و شوری و سازگاری با شرایط نامساعد محیطی، گزینه‌ای مناسب برای برنامه‌های احیای پوشش گیاهی و حفاظت خاک محسوب می‌شود. با این حال، استقرار موفق نهال‌های این گونه در شرایط مزرعه‌ای، به‌ویژه در مراحل اولیه رشد، به‌دلیل محدودیت‌های فیزیکی و شیمیایی خاک اغلب با مشکلاتی همراه است. این گیاه به عنوان یک گیاه مهم دارویی مطرح بوده و جوانه‌های گل، برگ‌های تازه، ریشه و میوه کبر برای مصارف غذایی و دارویی مصرف می‌شوند (۱۳). در این پژوهش، دو جمعیت یا اکوتیپ متفاوت گیاه کبر شامل اکوتیپ البرز و اکوتیپ یزد انتخاب شدند که از نظر منشأ اقلیمی، شرایط رویشگاه و سابقه سازگاری با تنش‌های محیطی، دارای تفاوت‌های مشخصی هستند. اکوتیپ البرز منشأ گرفته از مناطق با بارندگی به‌نسبت بیشتر و شرایط اقلیمی ملایم‌تر است و در مقابل، اکوتیپ یزد متعلق به اقلیم‌های خشک و شور با تنش‌های شدیدتر محیطی است. انتخاب این دو اکوتیپ با هدف بررسی تفاوت‌های پاسخ ژنتیک-بوم‌شناختی به تیمارهای زیستی و معدنی و نیز ارزیابی پتانسیل سازگاری آن‌ها در شرایط خشک منطقه سمنان انجام شد. این مقایسه امکان تحلیل دقیق‌تر تعامل بین ویژگی‌های ذاتی جمعیت‌های گیاهی و کاربرد هم‌زمان

قارچ‌های مایکوریزا و زئولیت را فراهم می‌سازد و می‌تواند نقش تعیین‌کننده انتخاب منبع ژنتیکی مناسب را در موفقیت برنامه‌های احیای پوشش گیاهی در مناطق خشک نشان دهد. در سال‌های اخیر، کاربرد اصلاح‌کننده‌های زیستی و معدنی خاک به‌منظور کاهش تنش‌های غیرزیستی در اکوسیستم‌های خشک مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. قارچ‌های مایکوریزایی یکی از میکروارگانیسم‌های محیط ریشه محسوب می‌شوند. اثرات این قارچ‌ها از طریق ایجاد تغییرات روی برخی از خصوصیات ریشه و جذب عناصر غذایی در گیاهان میزبان در شرایط تنش خشکی اعمال می‌شود (۱۶). زئولیت طبیعی با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، بهبود نگهداشت رطوبت و کاهش اثرات منفی شوری، موجب ارتقای ویژگی‌های فیزیکیوشیمیایی خاک در مناطق خشک می‌شود. از سوی دیگر، زئولیت‌ها با داشتن قابلیت تبادل کاتیونی بالا و همچنین امکان جذب انتخابی کاتیونهای مفید مانند آمونیوم و آزاد سازی کنترل شده آنها میتوانند اثرگذاری کودهای شیمیایی را بیشتر کرده و ضمن افزایش کارایی کودها، باعث مصرف بهینه کودهای شیمیایی نیز شوند (۱۴). با وجود گزارش اثرهای مثبت هر یک از این عوامل به‌صورت جداگانه، اطلاعات محدودی درباره اثرات توأم آن‌ها بر ویژگی‌های خاک و استقرار نهال کبر در شرایط اقلیمی خشک ایران وجود دارد. بر این پایه، هدف پژوهش حاضر تعیین تأثیر توأمان تلقیح مایکوریزای آربوسکولار و کاربرد زئولیت بر ویژگی‌های فیزیکیوشیمیایی خاک، برخی شاخص‌های فیزیولوژیک منتخب و درصد استقرار دو اکوتیپ گیاه کبر در شرایط اقلیمی خشک منطقه سمنان بود.

■ مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۴ در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان اجرا شد. منطقه مورد بررسی با ارتفاع ۱۱۳۸m از سطح دریا دارای اقلیم خشک و میانگین بارندگی سالانه ۱۲۰mm و دمای میانگین سالانه ۲۲°C آن بر اساس داده‌های بلندمدت ۳۰ ساله (۱۳۷۱-۱۴۰۰) ایستگاه هواشناسی سمنان محاسبه شده است. نوع خاک

پیش از اجرای طرح، لومی شنی با ویژگی‌های اولیه شامل: رس ۲۳٪، سیلت ۴۵٪، شن ۳۲٪، pH ۷/۴۳، EC ۲/۲۲ ds/m، OC ۰/۵۶٪ و OM ۰/۹۷٪ گزارش شد (جدول ۱).

آزمایش به صورت فاکتوریل $3 \times 3 \times 2$ بر اساس طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. که عوامل آزمایش عبارت بودند از:

سطوح مصرف زئولیت شامل صفر، ۱۵۰ و ۳۰۰g به ازای هر گودال کاشت بوده است. این سطوح‌ها بر اساس دامنه‌های مصرف رایج در بررسی‌های میدانی مناطق خشک و نیمه‌خشک، ملاحظات اجرایی در شرایط مزرعه، و با هدف پوشش دامنه کاربردی مناسب برای بررسی روند پاسخ گیاه به مصرف زئولیت انتخاب شدند. این دامنه شامل تیمار شاهد (صفر)، سطح میانی، و سطح زیاد ولی از نظر عملی قابل اجرا بود و امکان ارزیابی اثرهای افزایشی زئولیت بر ویژگی‌های خاک و استقرار نهال‌ها را بدون ایجاد محدودیت‌های فیزیکی در خاک یا تحمیل هزینه‌های غیرواقع‌بینانه فراهم می‌کند. قابل ذکر است در پژوهش حاضر زئولیت طبیعی با خلوص کمتر از ۸۵٪ از شرکت کیمیای سنگسر استفاده شد.

تلقیح قارچ‌های میکوریزای آربوسکولار با استفاده از قارچ‌های *Funneliformis mosseae* و *Rhizophagus irregularis* برای اجرای تیمار از شرکت زیست‌فناور توران تهیه شد و شامل بستر حامل حاوی اسپورها، قطعه ریشه‌های کلونیزه شده و هیف‌های خارج‌ریشه‌ای قارچ‌ها بود. تلقیح میکوریزا همزمان با کاشت نهال‌ها انجام شد؛ به طوری که در زمان کشت، ۳۰g تلقیح برای هر چاله کشت در کف چاله قرار داده شد تا تماس مستقیم با سیستم ریشه‌ای نهال‌های دوساله *Capparis spinosa* برقرار شود. در تیمار شاهد، هیچ‌گونه تلقیح میکوریزا اعمال نشد.

جمعیت گیاهی در دو اکوتیپ: البرز و یزد؛ و نهال‌های دو ساله با منشأ بذری به تعداد ۴۳۲ اصله استفاده شد. طرح مزرعه بر اساس الگوی تعیین شده در سه تکرار و با موقعیت‌های تصادفی معتبر اجرا شد تا تأثیر فضایی کمینه شود.

طرح آزمایش به صورت فاکتوریل $3 \times 3 \times 2$ در قالب

بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD) با سه تکرار اجرا شد. در مجموع ۱۸ ترکیب تیماری مورد ارزیابی قرار گرفت. هر واحد آزمایشی شامل ۸ نهال بود که در مجموع ۴۳۲ گیاه در این مطالعه استفاده شد. آرایش کاشت شامل فاصله ۱m بین نهال‌ها و ۱/۵m بین ردیف‌ها در بسترهای مستطیلی به ابعاد $1/5m \times 2/5$ بود که بر اساس دستورالعمل‌های اجرایی رایج کشت گیاه کبر در مناطق خشک و تجربه میدانی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی انتخاب شد. گودال‌های کاشت نیز تا عمق ۳۰cm، به عنوان عمق مؤثر برای استقرار اولیه ریشه، حفر شدند و تیمار زئولیت و قارچ در زمان کاشت اعمال شد.

آزمایش از شهریور ۱۴۰۲ آغاز و تا مهر ۱۴۰۳ ادامه یافت. این بازه زمانی بر اساس چرخه رویشی گیاه *Capparis spinosa* در اقلیم خشک منطقه و تقویم زراعی رایج برای استقرار نهال در مناطق گرم و خشک انتخاب شد تا امکان ارزیابی کامل فرایند استقرار نهال‌ها و اثر تیمارهای اصلاحی خاک در طول یک فصل رشد کامل فراهم شود. تلقیح قارچ میکوریزا همزمان با کاشت و آبیاری انجام شد و نمونه‌برداری از خاک و گیاهان در پایان فصل رشد، در مهر ماه سال شمسی ۱۴۰۳ انجام شد (شکل ۱). شاخص‌های فیزیولوژیک گیاه و ویژگی‌های خاک پس از تثبیت رشد نهال‌ها اندازه‌گیری گردیدند. در پایان فصل رشد، در ابتدا درصد استقرار نهال‌ها به نسبت تعداد نهال‌های زنده در پایان فصل به کل نهال‌های کاشته شده در هر تیمار محاسبه شد و در ادامه از هر تیمار نمونه خاک از عمق صفر تا ۱۵cm برداشت شد و پارامترهایی شامل واکنش خاک و هدایت الکتریکی با استفاده از عصاره اشباع خاک اندازه‌گیری شدند. ماده آلی و OC خاک به روش والکی-بلک تعیین گردید (۱۵) و مقدار نیتروژن کل به روش کجلدال به دست آمد (۵). شاخص‌های گیاهی شامل کلروفیل *a*، کلروفیل *b* و کلروفیل کل بر اساس روش آرنون اندازه‌گیری شده و نتایج بر حسب میلی‌گرم در گرم وزن خشک برگ گزارش شد (۱۱). مقدار پروتئین خام به روش بردفورد با استفاده از معرف کوماسی بلو و در طول موج ۵۹۵nm تعیین شد (۱۷). فنل کل با استفاده از روش فولین-سیوکالتو و در طول موج ۷۶۵nm اندازه‌گیری

سطح احتمال ۵٪ انجام گرفت. همبستگی بین ویژگی‌های خاک و درصد استقرار گیاه با استفاده از آزمون پیرسون محاسبه شد و نمودارهای توصیفی با نرم‌افزار Excel 2023 ترسیم شد.

■ نتایج و بحث

بر اساس واکاوی‌های انجام‌شده، مشخص شد که افزودن زئولیت و تلقیح قارچ مایکوریزا تأثیر معنی‌داری بر ویژگی‌های خاک داشته‌است. در این میان، زئولیت به‌عنوان یک بهبوددهنده معدنی خاک، در ترکیب با قارچ‌های مایکوریزا آربسکولار، نقش مؤثری در اصلاح ویژگی‌های شیمیایی خاک و ارتقای کارایی زیستی ریزوسفر ایفا کرد.

گردید (۹). فلاونوئید کل بر اساس روش ژیشین و با استفاده از واکنش آلومینیوم کلرید در طول موج ۴۱۵nm تعیین شد (۴) و مقدار آلکالوئید کل نیز بر اساس روش هاربورن و بر پایه جذب نوری در طول موج ۵۴۰nm اندازه‌گیری شد (۴). این شاخص‌ها به‌منظور تبیین سازوکارهای فیزیولوژیک و متابولیک مؤثر در استقرار نهال‌ها و بررسی پاسخ گیاه *Capparis spinosa* به اصلاحگرهای زیستی و معدنی اندازه‌گیری شدند و به‌عنوان شاخص‌های مکمل در کنار ویژگی‌های خاک و درصد استقرار مورد استفاده قرار گرفتند. تمامی سنجش‌ها بر حسب میلی‌گرم ماده در هر گرم وزن خشک برگ گزارش شدند. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 تجزیه و تحلیل شدند و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چنددامنه‌ای دانکن در

جدول ۱. ویژگی‌های خاک مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان

ارتفاع (m)	دمای متوسط سالیانه (°C)	بارندگی سالیانه (mm)	بافت خاک	% ماده آلی	% کربن آلی	dS-EC m ⁻¹	pH	% ماسه	% سیلت	% رس	ویژگی خاک
۱۱۳۸	۲۲	۱۲۰	لومی شنی	۰/۹۷	۰/۵۶	۲/۲۲	۷/۴۳	۳۲	۴۵	۲۳	مقدار



شکل ۱. استقرار نهال‌های گیاه کبر در شرایط اقلیمی خشک سمنان طی دوره آزمایش

جدول ۲. میانگین تغییرات برخی ویژگی‌های خاک در اثر سطوح مختلف زئولیت و قارچ مایکوریزا در دو جمعیت کبر

جمعیت	زئولیت گرم/گودال	قارچ مایکوریزا	(%) کربن آلی	(%) ماده آلی	C/N	EC (dS m ⁻¹)	pH
البرز	۰ (شاهد)	بدون قارچ (شاهد)	۰/۰۲±۰/۵۶c	۰/۹۷±۰/۰۳c	۹/۸±۰/۴c	۲/۲۲±۰/۰۵a	۷/۴۳±۰/۰۲a
البرز	۱۵۰	<i>R. irregularis</i>	۰/۷۸±۰/۰۳b	۱/۳۵±۰/۰۴b	۱۵/۲±۰/۶b	۲/۱۷±۰/۰۴a	۷/۴۳±۰/۰۲a
البرز	۳۰۰	<i>F. mosseae</i>	۰/۹۳±۰/۰۳a	۱/۶±۰/۰۵a	۲۳/۹±۰/۸a	۲/۰۵±۰/۰۳b	۷/۳۸±۰/۰۲a
یزد	۰ (شاهد)	بدون قارچ (شاهد)	۰/۵۵±۰/۰۲c	۰/۹۵±۰/۰۳c	۱۰/۲±۰/۵c	۲/۲۵±۰/۰۵a	۷/۴۴±۰/۰۲a
یزد	۱۵۰	<i>R. irregularis</i>	۰/۷۲±۰/۰۳b	۱/۲۸±۰/۰۴b	۱۴/۸±۰/۶b	۲/۱۵±۰/۰۴a	۷/۴۳±۰/۰۲a
یزد	۳۰۰	<i>F. mosseae</i>	۰/۸۸±۰/۰۳a	۱/۵۲±۰/۰۵a	۲۲/۷±۰/۷a	۲/۰۳±۰/۰۳b	۷/۳۶±۰/۰۲a

توضیح: مقادیر داخل جدول میانگین ± خطای استاندارد (SE) هستند. اعداد با حروف کوچک انگلیسی نشان می‌دهند که میانگین‌های دارای حروف متفاوت در هر ستون در سطح احتمال ۵٪ بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌دار دارند.

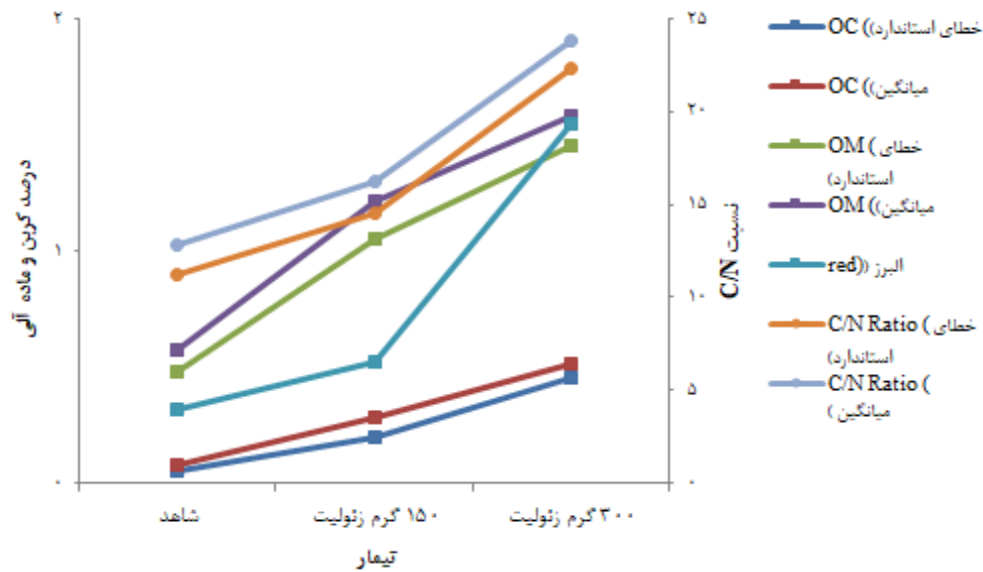
مواد غذایی است.

زئولیت به عنوان جاذب یونی، Na^+ و Cl^- را جذب و از نوسان‌های شدید اسمزی جلوگیری کرده است؛ در حالی که قارچ میکوریزا با افزایش کارایی جذب عناصر پرمصرف به ویژه K و Ca، نسبت Na/K را در ریزوسفر متعادل نگه داشته است. نتیجه مشابه در پژوهش (۳) گزارش شده است که هر دو کاهش قابل توجه هدایت الکتریکی را در تیمارهای مصرف مواد جاذب معدنی مانند زئولیت و ورمیکولیت ثبت کردند.

واکنش خاک (pH) در پاسخ به افزایش سطح زئولیت و تلقیح قارچ‌های میکوریزا در هر دو جمعیت کاهش جزئی اما معنی‌داری نشان داد. مقدار pH در تیمار شاهد (۷/۴۳) بیانگر شرایط قلیایی خفیف خاک بود، در حالی که کاربرد هم‌زمان ۳۰۰g زئولیت و *Funneliformis mosseae* موجب کاهش pH خاک به حدود ۷/۱-۷/۱۱ شد. شدت این کاهش در جمعیت البرز اندکی بیشتر بود و در این تیمار افتی در حدود ۴-۵٪ نسبت به شاهد ثبت گردید. قارچ میکوریزا با افزایش فعالیت تنفسی ریشه‌ها و ترشح اسیدهای آلی مانند مالیک و سیتریک در ریزوسفر باعث آزادسازی Ca^{2+} و Mg^{2+} از کانی‌های خاک شده و در نتیجه کاهش ملایم pH را رقم زده است. زئولیت نیز با تبادل کاتیونی خود، یون H^+ را در محلول خاک تعدیل نموده و محیط نسبتاً پایدارتر و سازگار با رشد ریشه را فراهم کرده است. کاهش هم‌زمان EC و pH در تیمارهای قارچ میکوریزا × زئولیت، نشان‌دهنده تأثیر هم‌افزای زیستی-معدنی بر بهبود واکنش و هدایت الکتریکی خاک است. این تغییرها، محیط خاک را از نظر یونی و اسیدی-قلیایی برای ریشه‌ی *Capparis spinosa* مطلوب‌تر کرده، که در ادامه موجب افزایش جذب عناصر غذایی، افزایش شاخص‌های رشد نظیر RWC، ارتفاع گیاه، وزن خشک اندام هوایی، و در پایان افزایش درصد استقرار تا ۹۶٪ در جمعیت البرز شده است (جدول ۳ و شکل ۳).

در هر دو جمعیت با افزایش سطح زئولیت و تلقیح *Funneliformis mosseae* کربن آلی و نسبت C/N به‌طور معنی‌داری افزایش یافتند (جدول ۲) که این نتایج با گزارش (۷) در خصوص افزایش ماده آلی در گیاهان بر اثر استفاده از قارچ میکوریزا هم‌خوانی دارد. در اکوتیپ البرز اثر هم‌افزای دو عامل بود که با ساختار ریشه‌ای توسعه‌یافته‌تر این اکوتیپ مرتبط است. افزایش نسبت C/N از ۹/۸ به ۲۳/۹ در اثر هم‌افزایی ۳۰۰g زئولیت + *Funneliformis mosseae* نشانگر بهبود پایداری مواد آلی و کاهش سرعت معدنی‌شدن آنها است (شکل ۲). مجموع این تغییرها بیانگر ترسیب مؤثرتر کربن آلی در خاک تحت تیمارهای هم‌افزای زئولیت و تلقیح میکوریزایی است که می‌تواند در بهبود پایداری خاک‌های مناطق خشک نقش کلیدی داشته باشد. از طرفی بررسی شاخص‌های فیزیولوژیک گیاه چون کلروفیل، پروتئین، ترکیبات ثانویه در تحلیل داده‌های برگ نشان داد که ترکیب قارچ میکوریزا و زئولیت موجب افزایش چشمگیر در کلروفیل کل و متابولیت‌های ثانویه در گیاه *Capparis spinosa* شد.

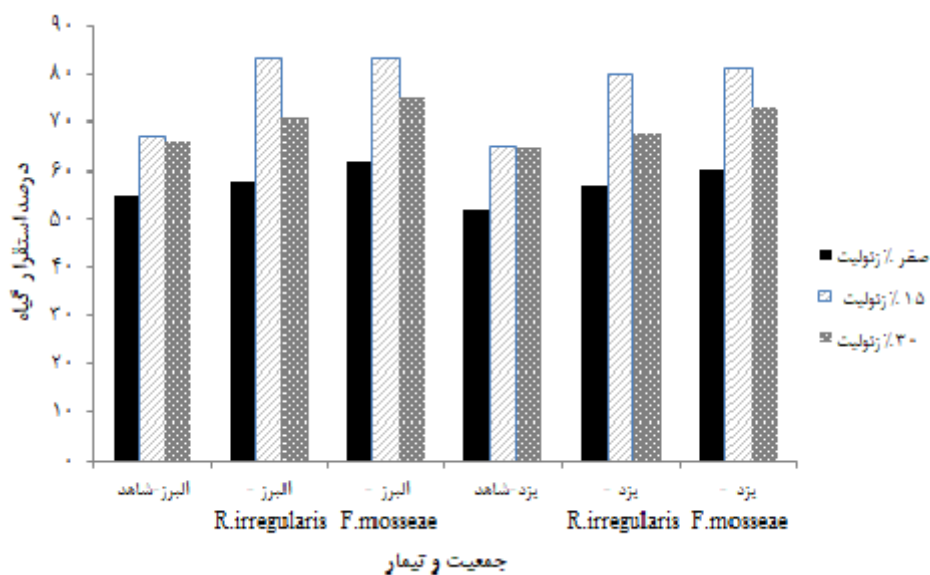
بر اساس داده‌های موجود پس از اعمال تیمارها، روند هدایت الکتریکی خاک EC در هر دو جمعیت البرز و یزد کاهش معنی‌داری را نشان داد که بیانگر بهبود وضعیت شیمیایی خاک در اثر به‌کارگیری هم‌زمان قارچ میکوریزا و زئولیت است. در تیمار شاهد، مقدار EC حدود $2/2 \text{ dS m}^{-1}$ اندازه‌گیری شد، که نشانگر شوری میانگین خاک منطقه بود. با افزایش سطح زئولیت تا ۳۰۰g در چاله، به‌ویژه در ترکیب با گونه *Funneliformis mosseae*، مقدار EC تا حدود dSm^{-1} کاهش یافت و تأثیر بیشتری در جمعیت البرز مشاهده شد، که می‌تواند ناشی از ظرفیت بیشتر شبکه هیف‌های قارچ میکوریزایی برای جذب انتخابی کاتیون‌ها و تثبیت یون‌های Na^+ در تخلخل‌های زئولیت باشد. از طرفی کاهش EC نشان‌دهنده کاهش غلظت نمک‌های محلول در خاک و بهبود شرایط جذب آب و



شکل ۲. روند تغییرات OC، OM و نسبت C/N در سطوح مختلف زئولیت و مایکوریزا

جدول ۳. درصد استقرار گیاه در تیمارهای مختلف

حروف دانکن	درصد استقرار	تیمار	جمعیت
c	$\pm 68 \ 2/1$	شاهد	البرز
b	$\pm 84 \ 1/8$	زئولیت ۱۵۰ + <i>R. irregularis</i>	البرز
ab	$\pm 90 \ 1/6$	زئولیت ۳۰۰ + <i>F. mosseae</i>	البرز
c	$\pm 65 \ 2/3$	شاهد	یزد
b	$\pm 78 \ 1/9$	زئولیت ۱۵۰ + <i>R. irregularis</i>	یزد
ab	$\pm 85 \ 1/7$	زئولیت ۳۰۰ + <i>F. mosseae</i>	یزد



شکل ۳. درصد استقرار گیاه در تیمارهای مختلف

جدول ۴. میانگین کلروفیل و ترکیبات متابولیتی در برگ گیاه کبر

جمعیت / تیمار	فلاونوئید کل (mg g ⁻¹ DW)	فنل کل (mg g ⁻¹ DW)	کلروفیل کل (mg g ⁻¹ DW)	b کلروفیل (mg g ⁻¹ DW)	a کلروفیل (mg g ⁻¹ DW)
البرز - شاهد	۱/۲۳ ± ۰/۰۸C	۸/۴ ± ۰/۵C	۱/۶۸ ± ۰/۰۹C	۱/۱۴ ± ۰/۰۷C	۰/۵۴ ± ۰/۰۴C
<i>F. mosseae</i> البرز - ۳۰۰ زئولیت +	۳/۴۵ ± ۰/۱۶a	۹/۶ ± ۴/۲a	۳/۳۵ ± ۰/۱۳a	۱/۹۳ ± ۰/۱a	۱/۴۳ ± ۰/۰۶a
یزد - شاهد	۰/۶۸ ± ۰/۰۵C	۹/۸ ± ۰/۴a	۱/۷۹ ± ۰/۰۸C	۱/۱۱ ± ۰/۰۶C	۰/۶۸ ± ۰/۰۶C
<i>F. mosseae</i> یزد - ۳۰۰ زئولیت +	۳/۵۲ ± ۰/۱۴a	۸/۹ ± ۳/۹b	۳/۶۵ ± ۰/۱۲a	۲/۱۴ ± ۰/۰۹a	۱/۵۱ ± ۰/۰۵a

حروف مشابه در ستون‌های هر متغیر نشانگر عدم تفاوت معنی‌دار در آزمون دانکن ($p \leq 0.05$) هستند. افزایش معنی‌دار تمام شاخص‌های بیوشیمیایی در تیمار $300\text{ Z} + F. mosseae$ ، $300\text{ Z} + F. mosseae$ و $300\text{ Z} + F. mosseae$ بیانگر تحریک فتوسنتز و تجمع ترکیبات ثانویه در حضور قارچ میکوریزا و زئولیت است.

پژوهش حاضر همخوانی دارد (۶). علاوه بر این، در گزارشی نشان داده شد استفاده از قارچ میکوریز به همراه اصلاح کننده خاک (زئولیت) ضمن مصرف بهینه کودهای شیمیایی فسفر در مزارع، می‌تواند موجب بهبود صفات فیزیولوژیکی و زراعی در گیاه ذرت شود (۷)، که با نتایج به‌دست آمده در پژوهش حاضر مطابقت دارد. در مجموع، نتایج پژوهش حاضر با بدنه جهانی بررسی‌های اخیر هم‌راستا بود و نشان می‌دهد که ترکیب زئولیت و قارچ‌های میکوریزا می‌تواند راهکاری مؤثر برای بهبود کیفیت خاک و افزایش استقرار گیاهان بیابانی باشد.

مشاهده افزایش ماده آلی و نسبت C/N در خاک در اثر ترکیب اثر هم‌افزایی، بیانگر تقویت چرخه‌ی کربن و کاهش تلفات مواد مغذی است. افزایش ۹۶٪ استقرار نهال‌ها نسبت به شاهد نه تنها شاخص موفقیت آزمایش بلکه شاخصی کاربردی برای توسعه کشت گیاه کبر در استان‌های خشک ایران محسوب می‌شود. این ترکیب قابلیت دارد در طرح‌های بیابان‌زدایی و احیای پوشش خرداقلیم‌های آسیب‌دیده، به‌ویژه در اراضی با EC به‌نسبت زیاد که تنش شوری خفیف وجود دارد مورد استفاده قرارگیرد، بطور کلی می‌توان گفت تیمار اثر هم‌افزایی 300 g زئولیت + *F. mosseae* در هر دو جمعیت، برترین عملکرد را از نظر ماده آلی، C/N و استقرار نهال نشان داد. افزایش شاخص‌های فیزیولوژیک بیانگر سازگاری بهبودیافته گیاه تحت اثر قارچ میکوریزا و خاک‌های زئولیتی است، که می‌توان گفت تفسیر کاربردی این یافته‌ها بر ضرورت توسعه سامانه‌های همزیستی اصلاح کننده‌های زیستی-معدنی برای بازسازی خاک‌های خشک تأکید دارد.

در تیمار $300\text{ Z} +$ قارچ میکوریزا *F. mosseae*، میانگین کلروفیل کل در جمعیت البرز مشاهده شد، به گونه‌ای که این شاخص از ۱/۶۸ به ۳/۳۵ mg g^{-1} افزایش یافت، که این نتیجه با گزارش افزایش راندمان فتوسنتز در گونه‌های گیاهی بر اثر مصرف میکوریزا همخوانی دارد (۲). همچنین افزایش محتوای فنل و فلاونوئید به‌عنوان یکی از مکانیسم‌های دفاعی در پاسخ به تنش اقلیم خشک تفسیر می‌شود (۸). به‌کارگیری ترکیب بهینه زئولیت و قارچ میکوریزا با بهبود تغذیه نیتروژن و فسفر، منجر به افزایش ترکیبات آنتی‌اکسیدانی شد (جدول ۴).

همچنین براساس داده‌های مورد ارزیابی، میانگین درصد استقرار بین تیمارها از ۵۰٪ در شاهد به ۹۶٪ در تیمار 300 g زئولیت + *F. mosseae* افزایش یافت. این افزایش با وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین استقرار و ماده آلی برابر ۰/۸۴ مشاهده شد که نقش ترکیب زیستی-معدنی در ایجاد ریزاقلیم پایدار در اطراف ریشه را برجسته می‌سازد (جدول ۵). از سویی دیگر، با افزایش ظرفیت نگهداری آب در زئولیت حدود ۴-۵ برابر وزن خشک خود و افزایش توده‌ی هیف‌های قارچ میکوریزایی، موجب مساعدتر شدن محیط کاشت برای استقلال نهال‌ها شد.

بررسی‌های پیشین نیز نتیجه مشابه تأثیر هم‌افزایی قارچ میکوریزا و زئولیت بر بهبود ویژگی‌های خاک و افزایش استقرار گیاهان مناطق خشک گزارش کردند. به‌عنوان نمونه، در بررسی گیاهان زراعی نظیر ذرت افزایش ماده آلی خاک را گزارش کردند (۷) که با نتایج پژوهش حاضر هم‌راستاست. همچنین، در بررسی گیاه سسبانی در تنش خشکی افزایش N گیاه را در اثر کاربرد قارچ میکوریزا مشاهده شد که از نظر روند کلی با یافته‌های

جدول ۵. ماتریس همبستگی بین شاخص‌های استقرار و ویژگی‌های خاک

پارامتر	استقرار	OC	OM	C/N	EC	pH
استقرار	۱	**۰/۸۲	**۰/۸۴	*۰/۷۱	*۰/۶۸-	*۰/۷۴-
OC		۱	**۰/۹۳	*۰/۷۸	*۰/۵۶-	*۰/۶۱-
OM			۱	*۰/۷۴	*۰/۵۹-	*۰/۶۶-
C/N				۱	۰/۴۸-	۰/۴۲-
EC					۱	**۰/۸۳
pH						۱

* و ** به ترتیب معنی‌داری در سطح $p \leq 0.05$ و $p \leq 0.01$ را نشان می‌دهند.

■ نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر به‌روشنی نشان داد که ترکیب زئولیت $300g$ در گودال کاشت و قارچ مایکوریزا *Funneliformis mosseae* تأثیر هم‌افزایی معنی‌داری بر بهبود ویژگی‌های خاک، ارتقای برخی شاخص‌های فیزیولوژیک منتخب از جمله کلروفیل و ترکیبات فنلی و افزایش استقرار نهال گیاه کبیر در شرایط خشک سمنان دارد. بدین‌گونه که افزایش ماده آلی خاک از 0.56% به 0.93% ، ارتقای نسبت C/N از حدود ۱۰ به 24% ، و افزایش درصد استقرار نهال از حدود ۵۰ به 96% حاصل شد؛ نتایجی که نشان‌دهنده بهبود فرایندهای فیزیوشیمیایی خاک و افزایش توان سازگاری گیاه در برابر تنش خشکی و شوری خفیف است. افزایش غلظت کلروفیل تا $3/35mgg^{-1}DW$ وزن خشک برگ و فنل کل تا $9/8mgg^{-1}DW$ در اثر هم‌افزایی زئولیت و مایکوریزا، نشان‌دهنده بهبود ظرفیت فتوسنتزی و تقویت پاسخ‌های دفاعی گیاه به و حاکی از ارتقای وضعیت فیزیولوژیک آن در شرایط تنش خشکی است. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که ترکیب بهینه‌ی زئولیت و قارچ مایکوریزا، در صورت انتخاب گونه قارچی سازگار با گیاه میزبان، قابلیت بهره‌برداری در طرح‌های توسعه کشت گیاهان کم‌آب‌بر را دارد. این مدیریت ترکیبی ضمن افزایش نرخ زنده‌مانی نهال‌ها، به‌دلیل بهبود ظرفیت نگه‌داری رطوبت و تثبیت مواد آلی خاک، می‌تواند در برنامه‌های بیابان‌زدایی، احیای پوشش گیاهی در استان‌های خشک مانند سمنان، یزد و کرمان و سامانه‌های تولید پایدار غیرآبیاری به‌کار گرفته شود و

از طرفی هزینه اندک زئولیت طبیعی و آسان‌بودن تکثیر قارچ مایکوریزا بر ارزش اقتصادی این روش می‌افزاید. لذا در کشت‌های جدید گیاهان در شرایط بیابانی، استفاده از تلقیح همزمان قارچ مایکوریزا *F.mosseae* و حداقل $300g$ زئولیت در چال‌کود هر نهال در زمان کاشت و هنگام مرطوب‌بودن گودال توصیه می‌شود.

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که تیمارهای ترکیبی زئولیت و مایکوریزا (تیمارهای تلقیح‌شده) از نظر حفظ رطوبت خاک و بهبود شاخص‌های استقرار گیاه، عملکرد به‌مراتب مطلوب‌تری نسبت به تیمار شاهد داشتند. این برتری در افزایش معنی‌دار درصد استقرار نهال‌ها مشهود بود. به‌گونه‌ای که در تیمارهای حاوی زئولیت، به دلیل ساختار متخلخل و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا، مقادیر ماده آلی و کربن آلی خاک به‌طور موثری حفظ شده و هم‌زمان هدایت الکتریکی (EC_e) خاک در سطح مطلوب‌تری تثبیت شد که نتیجه آن ایجاد شرایط مناسب‌تر برای رشد ریشه بود. هم‌راستایی این نتایج با همبستگی مثبت بین درصد استقرار با کربن آلی و ماده آلی خاک، و همبستگی منفی آن با EC و pH ، نشان می‌دهد که هم‌افزایی (Synergy) بین زئولیت و قارچ‌های مایکوریزا تنها یک اثر فیزیکی ساده نیست، بلکه از طریق ایجاد یک ریزمحیط پایدارتر (Rhizosphere) عمل می‌کند. بنابراین، کارایی تیمارهای ترکیبی در پژوهش حاضر، مستقیماً با بهبود شرایط رطوبتی و کاهش تنش‌های محیطی مرتبط بوده که در نهایت به افزایش درصد استقرار و شاخص‌های فیزیولوژیک *Capparis spinosa* منجر شده است.

■ **قدردانی**

اجرای این پژوهش صمیمانه قدردانی می‌شود. نگارندگان همچنین از همراهی فنی آزمایشگاه علوم خاک و گیاه دانشکده کشاورزی دانشگاه سمنان در انجام اندازه‌گیری‌های شیمیایی و بیوشیمیایی سپاسگزاری می‌نمایند.

از حمایت‌های مالی و علمی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و همکاری‌های ارزشمند مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان در

■ **References**

1. Abuzaid, A. S., & El-Husseiny, A. M. (2022). Modeling crop suitability under micro irrigation using a hybrid AHP-GIS approach. *Arabian Journal of Geosciences*, 15, 12–17. doi/10.1007/s12517-022-10486-8
2. Aghababaei, F., & Raiesi, F. (2011). The Influence of Mycorrhizal Symbiosis on Chlorophyll, Photosyntetise and Water Use Efficiency in Four Almond Genotypes in Chahar Mahal va Bakhtiary. *Journal of Water and Soil Science*, 15(56), 91–101. doi:20.1001.1.24763594.1390.15.56.7.7. [In Persian]
3. Ahmadi Azar, F., Hasanloo, T., Imani, A., & Feyzi Asl, V. (2015). Water stress and mineral zeolite application on growth and some physiological characteristics of Mallow (*Malva sylvestris*). *The Journal of Plant Research*, 28(3), 459–474. doi: 20.1001.1.23832592.1394.28.3.1.0. [In Persian]
4. Calis, L., Kuruuzum, A., & Ruedi, R. (1999). 1H-Indole-3 acetone nitrile glycosides from *Capparis spinosa* fruits. *Phytochemistry*, 50(7), 1205–1208. doi:10.1016/S0031-9422(98)00669-4
5. Emami A. 1997. Methods of Plant Analysis (Volume I). *Soil and Water Research Institute*, Publication Bulletin No. 982. Tehran, Iran. pp 128. [In Persian]
6. Faghani, E., Goudarzi, M., & Safarnjad, A. (2015). Effects of Mycorrhizal Symbiosism on some physiological characters of *Sesbania aculeata* against water deficient stress. *Applied Crop Filed Research*, 28(106), 37–44. doi:10.22092/AJ.2015.105674. [In Persian]
7. Farhadi, D., Asghari, H. R., Amarian, M. R., & Abbaspour, A. (2016). Effect of Zeolite and mycorrhiza on some morphological characteristics and yield of maize at different levels of soil phosphorus. *Journal of Soil Biology*, 4 (1), 39-52. doi:10.22092/sbj.2016.106757 [In Persian]
8. Firouzeh, R., Khavarinejad, R. A., Najafi, F., & Saadatmand, S. (2018). Effects of gibberellin on contents of photosynthetic pigments, proline, phenol and flavonoid in savory plants (*Satureja hortensis* L.) under salt stress. *The Journal of Plant Research*, 31(4), 894–908. doi: 20.1001.1.23832592.1397.31.4.12.4 [In Persian]
9. Hajimehdipoor, H., Khanavi, M., Shekarchi, M., Abedi, Z., & Pirali Hamedani, M. (2009). Investigation of the Best Method for Extraction of Phenolic Compounds from *Echinaceae purpurea* L. (Moench). *The Journal of Medicinal Plants*, 8(4), 145–152. doi: 20.1001.1.2717204.2009.8.32.17.4 . [In Persian]
10. Khadem, A., Ramrodi, M., Galavi, M., & Roosta, M. (2011). The Effect of Drought Stress and Different Rates of Animal Manure with Super Absorbent Polymer on Grain Yield and Yield Components of Corn (*Zea mays* L.). *Iranian Journal of Field Crop Science*, 42(1), 115-123. doi: 20.1001.1.20084811.1390.42.1.12.8 . [In Persian]
11. Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350-382. doi:10.1016/0076-6879 (87)48036-1
12. Mahdavi, A. (2010). Non-wood Products of Zagros Forests and Rangelands, Ilam. Ilam University Press, 174p. [In Persian]
13. Mobser Samad, M., & Radmanesh, Z. (2023). The necessity of developing the cultivation of the medicinal plant Caper (*Capparis*) in the country. The first national conference on green space development strategies in desert cities (Qom, IRAN). <https://civilica.com/doc/2097450/> [In Persian]
14. Mohammadi, M., Molavi, H., Liaghat, A., & Parsinejad, M. (2013). Effects of Zeolite Application on Yield and Water Use Efficiency of Grain Corn. *Journal of Water Research in Agriculture*, 27(1), 57-67. doi:10.22092/jwra.2013.128812. [In Persian]
15. Soil and Water Reaserch Iinstitute. (2013). Methods of Analysis of Soil, Water, and Plant Samples (Publication No. 467). Tehran, IRAN: Agriculture Reaserch, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO). [In Persian]

16. Tadayyon, A., & Soltanian, M. (2016). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on root colonization and phosphorus uptake of linseed (*Linum usitatissimum* L.) under drought stress conditions. *Journal of Plant Process and Function*, 5(15), 147–156. doi: 20.1001.1.23222727.1395.5.15.7.0 [In Persian]
17. Walling, S. G., & Harley, C. W. (2004). Locus Ceruleus Activation Initiates Delayed Synaptic Potentiation of Perforant Path Input to the Dentate Gyrus in Awake Rats: A Novel β -Adrenergic- and Protein Synthesis-Dependent Mammalian Plasticity Mechanism. *Journal of Neuroscience*: 24(3):598-604. doi:10.1523/JNEUROSCI.4426-03.2004