Publisher: Soil Science Society of Iran

*Journal of Soil Research*

*(Soil and Water Sci.)*

https:// srjournal.areeo.ir/

# Effects of Pumice on Selected Soil Physical Properties and Peppermint Growth under Water-Deficit and Well-Watered Conditions

Monireh Moghbeli[a], Majid Danesh[a*], Mehdi Ghajar Sepanlou[a], and Seyed Mostafa Emadi[a]

[a] Department of Soil Science and Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

**Article Info**

**Article Type**
Research Article

**Received**
July 22, 2026
**Revised**
October 02, 2026
**Accepted**
October 12, 2026
**Published online**
November 16, 2026

**Keywords**
Mineral amendment
Water-holding capacity
Void ratio
Aggregate stability
Plant biomass

[*]**Corresponding author's email**
m.danesh@sanru.ac.ir

**Extended Abstract**

**Background and Objectives:** Water scarcity and soil physical degradation are among the major factors limiting plant growth and agricultural productivity, particularly in regions where water availability is limited and soil quality is declining. Soil texture and moisture conditions strongly influence water retention, pore characteristics, and the availability of water to plants. Pumice, as a porous mineral amendment, has the potential to improve soil physical properties, modify the pore system, enhance water-holding capacity, and consequently improve water availability to plants. Therefore, this study aimed to evaluate the effects of pumice application on selected soil physical properties and the growth of peppermint (*Mentha piperita* L.) under different soil moisture conditions and in soils with contrasting textures.

**Materials and Methods:** A greenhouse experiment was conducted as a split–split plot experiment based on a randomized complete block design (RCBD) with four replications. The experimental treatments included two irrigation levels based on optimum soil moisture (75% of the available water for plants) and water-deficit irrigation (50% of the available water for plants), two soil textures (clay loam and sandy loam), and three pumice application rates (0, 4, and 8 g $kg^{-1}$ soil). Irrigation treatments were imposed after complete establishment of the seedlings. Soil moisture conditions were controlled based on the available water content of each soil and maintained by monitoring the moisture status of the pots. At the end of the growing period, plant biomass (fresh and dry weight) and major soil physical properties, including bulk density, porosity, void ratio, water-holding capacity, plasticity index, and aggregate stability, were measured. The effects of irrigation level, soil texture, pumice application, and their interactions were evaluated statistically.

**Results:** Decreasing the available water from 75% to 50% resulted in a significant reduction in plant biomass and was associated with declines in selected soil physical properties. Compared with the 75% available-water condition, the void ratio decreased by 3.7% and 1.9% in the clay loam and sandy loam soils, respectively, while water-holding capacity decreased by 13% and 14%, respectively. In contrast, pumice application reduced bulk density and increased soil porosity, water-holding capacity, plasticity index, and aggregate stability. Application of 8 g pumice $kg^{-1}$ soil increased soil porosity by up to 8.4% and water-holding capacity by up to 24.2% compared with the control. Pumice application also increased fresh plant weight under water-deficit irrigation, indicating its potential to improve plant growth under limited water availability. The magnitude of the pumice effect varied with soil texture and moisture condition, highlighting the importance of considering the interaction between amendment application and soil characteristics.

**Conclusion:** Overall, pumice application, particularly in the clay loam soil, improved several soil physical properties and reduced the adverse effects

associated with limited soil water availability, thereby enhancing peppermint growth. These findings indicate that pumice may be a potentially effective mineral amendment for improving soil physical conditions, enhancing water retention, and supporting plant production under water-limited conditions. The observed responses also demonstrate that the effectiveness of pumice application depends on soil texture and moisture conditions, which should be considered when developing management strategies for improving soil physical quality and crop production under limited water availability.

**Cite this article**: Moghbeli, M., Danesh, M., Ghajar Sepanlou, M., Emadi, S.M., 2026. Effects of Pumice on Selected Soil Physical Properties and Peppermint Growth under Water-Deficit and Well-Watered Conditions. Research Article, *Journal of Soil Research*, 40 (3), pp 403-425.

**DOI**: https://doi.org/ 10.22092/ijsr.2026.373616.830

**Publisher:** Soil Science Society of Iran

Publisher: Soil Science Society of Iran

نشریه پژوهش‌های خاک

(علوم خاک و آب)

https:// srjournal.areeo.ir/

# اثر کاربرد پامیس بر برخی خصوصیات فیزیکی خاک و عملکرد گیاه نعناع فلفلی تحت شرایط کمبود آب و آبیاری مطلوب

منیره مقبلی[۱]، مجید دانش[۱*]، مهدی قاجار سپانلو[۱] و سید مصطفی عمادی[۱]

[۱] گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران.

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:** مقاله پژوهشی

**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۵/۰۴/۳۱
**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۵/۰۷/۱۰
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۵/۰۷/۲۰
**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۵/۰۸/۲۵

**واژه‌های کلیدی**
اصلاح‌کننده معدنی
ظرفیت نگهداشت آب
نسبت پوکی
پایداری خاکدانه
زیست‌توده گیاهی

***ایمیل نویسنده مسئول**
m.danesh@sanru.ac.ir

**چکیده**

به‌منظور بررسی اثر کاربرد پامیس بر بهبود خصوصیات فیزیکی خاک و رشد گیاه نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) تحت شرایط مختلف رطوبتی، آزمایشی گلخانه‌ای به‌صورت اسپلیت–اسپلیت پلات بر پایهٔ طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل دو سطح آبیاری بر اساس رطوبت بهینه (۷۵ درصد آب قابل دسترس) و تنش کم‌آبیاری (۵۰ درصد آب قابل دسترس)، دو نوع بافت خاک (لوم رسی و لوم شنی) و سه سطح کاربرد پامیس (۰، ۴ و ۸ گرم در کیلوگرم خاک) بودند. تیمارهای آبیاری پس از استقرار کامل گیاهچه‌ها اعمال شدند. در پایان دوره رشد، زیست‌توده گیاه (وزن‌تر و خشک) و مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل جرم مخصوص، تخلخل، نسبت پوکی، ظرفیت نگهداشت آب، شاخص خمیری و پایداری خاکدانه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد افزایش تنش رطوبتی از ۲۵ به ۵۰ درصد تخلیهٔ آب قابل استفاده، موجب کاهش معنی‌دار زیست‌توده گیاه و افت کیفیت فیزیکی خاک شد؛ به‌طوری‌که نسبت پوکی در خاک لوم رسی و لوم شنی به‌ترتیب ۳/۷ و ۱/۹ درصد و ظرفیت نگهداشت آب به‌ترتیب ۱۳ و ۱۴ درصد کاهش یافت. در مقابل، کاربرد پامیس موجب کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش تخلخل، ظرفیت نگهداشت آب، شاخص خمیری و پایداری خاکدانه شد؛ به‌طوری‌که کاربرد ۸ گرم پامیس در کیلوگرم خاک نسبت به شاهد، تخلخل خاک را تا ۸/۴ درصد و ظرفیت نگهداشت آب را تا ۲۴/۲ درصد افزایش داد. همچنین، این تیمار موجب افزایش وزن‌تر گیاه در شرایط تنش رطوبتی شد. در مجموع، کاربرد پامیس، به‌ویژه در خاک لوم رسی، با بهبود برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک، توانست اثرات منفی کمبود آب را کاهش داده و رشد نعناع فلفلی را به‌طور مؤثری بهبود بخشد.

**استناد:** مقبلی، م.، دانش، م.، قاجار سپانلو، م.، عمادی، س.م.، ۱۴۰۵. اثر کاربرد پامیس بر برخی خصوصیات فیزیکی خاک و عملکرد گیاه نعناع فلفلی در شرایط تنش و عدم تنش رطوبتی. مقاله پژوهشی، *نشریه پژوهش‌های خاک*، (۳) ۴۰، ص ۴۰۳–۴۲۵.

**DOI**: https://doi.org/ 10.22092/ijsr.2026.373616.830

## مقدمه

تأمین آب کافی برای تولید پایدار محصولات کشاورزی یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن حاضر محسوب می‌شود. افزایش دما، تغییر الگوی بارندگی، افزایش تبخیر و تعرق و وقوع دوره‌های طولانی‌تر خشکی در بسیاری از مناطق جهان، موجب کاهش دسترسی گیاهان به آب و افزایش خطر کاهش تولید محصولات کشاورزی شده است. پیش‌بینی‌های اقلیمی نشان می‌دهند که در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، محدودیت آب به یکی از عوامل اصلی کاهش بهره‌وری کشاورزی تبدیل خواهد شد. تنش خشکی و محدودیت کم‌آبیاری یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی محدودکننده رشد گیاهان است که از طریق کاهش پتانسیل آب خاک و محدود کردن جذب آب توسط ریشه، مجموعه‌ای از تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی را در گیاه ایجاد می‌کند؛ بنابراین، توسعهٔ راهکارهای مدیریتی برای افزایش ذخیره آب خاک، بهبود کارایی مصرف آب و کاهش اثرات منفی تنش خشکی بر گیاهان، از اولویت‌های مهم تحقیقات کشاورزی پایدار به شمار می‌رود (Seleiman et al., 2021; Zandalinas et al., 2021). کاهش وضعیت آبی گیاه موجب بسته شدن روزنه‌ها، کاهش هدایت دی‌اکسیدکربن، محدود شدن فتوسنتز، کاهش تولید مواد فتوسنتزی و اختلال در رشد سلولی می‌شود. علاوه بر این، کمبود آب می‌تواند باعث افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و ایجاد تنش اکسیداتیو شود که در نهایت کاهش رشد اندام‌های هوایی، کاهش تجمع ماده خشک و افت عملکرد گیاه را به دنبال دارد (Mittler et al., 2022).

گیاهان از طریق مکانیسم‌هایی مانند تنظیم اسمزی، تغییر معماری و ساختار ریشه، افزایش کارایی مصرف آب و فعال‌سازی سیستم‌های دفاعی قادر به سازگاری نسبی با شرایط خشکی هستند. با این وجود، تداوم تنش می‌تواند ظرفیت سازگاری گیاه را بسیار محدود کند (Zandalinas et al., 2018; Zandalinas et al., 2022). آثار محدودیت رطوبتی و تنش‌خشکی بر گیاه تنها به میزان آب ورودی به سیستم بستگی ندارد، بلکه به ویژگی‌های مختلف ذاتی و بیرونی خاک[1] در ذخیره، نگهداری و انتقال آب نیز وابسته است. خاک به‌عنوان مخزن اصلی آب در سامانه کشاورزی، نقش تعیین‌کننده‌ای در تأمین آب مورد نیاز گیاه دارد. خصوصیات فیزیکی خاک شامل بافت، ساختمان، جرم مخصوص ظاهری، تخلخل، توزیع اندازه ذرات- منافذ و غیره، تعیین‌کننده مقدار آب ذخیره‌شده و میزان آب قابل استفاده گیاه هستند. در این میان، توزیع مناسب منافذ خاک اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا منافذ درشت (ماکروپورز) موجب زهکشی و تهویه خاک، در حالی‌که منافذ ریز (مایکروپورز) مسئول نگهداری آب قابل دسترس برای گیاه هستند. هرگونه تغییر نامطلوب در ساختار منافذ می‌تواند موجب کاهش ذخیره آب یا محدودیت تهویه ریشه شده و در نهایت رشد گیاه را تحت تأثیر قرار دهد (Leuther et al., 2021).

در سال‌های اخیر، استفاده از اصلاح‌کننده‌های خاک با هدف بهبود خصوصیات فیزیکی-شیمیایی و هیدرولیکی خاک به‌عنوان یک راهبرد مؤثر برای کاهش اثرات کم‌آبی مورد توجه قرار گرفته است. اصلاح‌کننده‌های دارای ساختار متخلخل و پر-منفذ[2] می‌توانند با ایجاد تغییر در ساختمان خاک، افزایش فضای خلل و فرج مؤثر، کاهش تراکم خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب، شرایط مناسب‌تری برای توسعه ریشه فراهم کنند. افزایش ذخیره آب در ناحیه ریشه و کاهش سرعت از دست رفتن رطوبت می‌تواند مدت زمان دسترسی گیاه به آب را افزایش داده و تا حد زیادی آثار محدودیت کم‌آبیاری و تنش خشکی را کاهش دهد و به عبارتی مقاومت گیاه را نسبت به این تنش و بحران مهم، افزایش دهد (Blanchy et al., 2023; Pollacco et al., 2024). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که بهبود دهنده‌ها و اصلاح‌کننده‌های متخلخل می‌توانند با تغییر ساختار فیزیکی-مکانیکی خاک، کاهش جرم مخصوص ظاهری، افزایش فضای خلل و فرج مؤثر و نیز تعدیل یا اصلاح منحنی نگهداشت آب، شرایط مناسب‌تری برای ذخیره و انتقال آب در ناحیه ریشه فراهم کنند. به‌عنوان مثال، Trakal و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که افزودن مواد اصلاحی متخلخل موجب کاهش جرم مخصوص ظاهری، افزایش تخلخل و بهبود مقدار آب قابل استفاده گیاه در خاک‌های حساس به خشکی گردیده است. این تغییرات عمدتاً ناشی از ایجاد منافذ جدید و اصلاح توزیع اندازه منافذ خاک است[3](PoSD) که تعادل مناسب‌تری بین نگهداری آب و تهویه خاک ایجاد می‌کند. همچنین، Bagnall و همکاران (۲۰۲۲) بیان داشته‌اند که میزان آب قابل استفاده گیاه تنها به مقدار آب کل خاک وابسته نیست، بلکه به ویژگی‌های ذاتی خاک، به‌ویژه بافت، ساختمان خاک و وضعیت منافذ، وابستگی زیادی دارد؛ بنابراین، کارایی اصلاح‌کننده‌های خاکی مانند پامیس نیز باید در ارتباط با ویژگی‌های اولیه و ذاتی خاک و همچنین شرایط مدیریتی ارزیابی شود (Seyedsadr et al., 2022).

پامیس (Pumice) یک مادهٔ آتشفشانی سبک و متخلخل است که به دلیل ساختار شیشه‌ای، وزن مخصوص پایین، سطح ویژهٔ بالا و شبکهٔ پیچیده‌ای از منافذ داخلی، قابلیت بالایی برای اصلاح ویژگی‌های مختلف خاک دارد (Pollacco et al., 2024). برخلاف بسیاری از مواد اصلاحی که عمدتاً از طریق افزایش مواد

[1] Intrinsic-Extrinsic Properties
[2] Poriferous
[3] Pore Size Distribution

آلی یا فعالیت زیستی بر خاک اثر می‌گذارند، پامیس عمدتاً از طریق تغییر ساختار فیزیکی–مکانیکی–هیدرولیکی خاک و اصلاح سیستم منافذ عمل می‌کند. افزودن ذرات این مادهٔ بهبوددهنده می‌تواند موجب افزایش تخلخل کل، کاهش جرم مخصوص ظاهری، بهبود تهویه و افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک شود. همچنین، وجود هم‌زمان منافذ ریز و درشت در پامیس قادر است بخشی از آب را ذخیره کرده و در شرایط کاهش رطوبت، به‌تدریج در اختیار محیط ریشه قرار دهد (Kang et al., 2022; Pollacco et al., 2024). در این زمینه، Kong و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که ویژگی‌های مشهود فیزیکی پامیس، به‌ویژه تخلخل و توزیع اندازه منافذ، نقش مهمی در تغییر سهم آب متحرک و غیرمتحرک خاک و نیز بهبود رفتار نگهداری آب دارد. همچنین، Pollacco و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کردند که خاک‌های دارای پامیس به دلیل وجود سامانه دوگانهٔ منافذ[1]، رفتارهای فیزیکی، هیدرولیکی و مکانیکی متفاوتی نسبت به خاک‌های فاقد پامیس دارند و حضور این ماده می‌تواند بر فرآیندهای جریان آب در محیط غیر اشباع[2]، توزیع آب بین منافذ ماتریکسی و ماکروپورها و هدایت هیدرولیکی خاک تأثیر بگذارد. با این حال، میزان تأثیر پامیس بر خصوصیات خاک به ویژگی‌های اولیهٔ خاک، به‌ویژه بافت خاک، مقدار مصرف و شرایط مدیریت آبیاری نیز وابسته است. همچنین Malekian و همکاران (۲۰۱۲) طی آزمایش گلخانه‌ای سطوح بسیار اندک پامیس شامل ۱/۲، ۲/۴ و ۳/۶ $g\ kg^{-1}$ خاک را مورد مطالعه قرار دادند که معادل ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد وزنی بوده است. بر اساس نتایج مطالعهٔ مذکور (Malekian و همکاران (۲۰۱۲))، مشخص شد که این مقادیر اندک پامیس توانسته بسیاری از ویژگی‌های مورد مطالعهٔ خاک همچون ظرفیت نگهداشت آب خاک، تخلخل مؤثر و بسیاری از خصوصیات فیزیکی دیگر خاک را به‌طور بارز و معنی‌داری بهبود داده و غالب شاخص‌های رشد و عملکرد گیاه ذرت را نیز به‌طور معنی‌دار تقویت کنند. همچنین Sahin و Anapali (۲۰۰۶) نشان دادند که افزودن پامیس به خاک در مقادیر اندک، می‌تواند سبب تغییر معنی‌دار در بهبود و اصلاح چگالی ظاهری، تخلخل و توزیع اندازهٔ منافذ شود که این آثار و اصلاحات را به ویژگی‌های ذاتی و بنیادین پامیس، از جمله تخلخل بالا و چگالی ظاهری پایین و غیره، نسبت دادند.

باید توجه داشت که اثرگذاری اصلاح‌کننده‌های متخلخل در خاک‌های مختلف یکسان نخواهد بود. در خاک‌های سبک با ظرفیت پایین نگهداری آب، افزایش ذخیره رطوبت می‌تواند مهم‌ترین اثر اصلاح‌کننده باشد، در حالی‌که در خاک‌های سنگین، بهبود ساختمان خاک، افزایش منافذ مؤثر و کاهش محدودیت‌های تهویه اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ بنابراین، بررسی اثر متقابل نوع خاک، سطح کاربرد پامیس و میزان تأمین آب برای تعیین کارایی این ماده در شرایط واقعی، امری ضروری می‌نماید (Kong et al., 2022; Pollacco et al., 2024). با وجود اهمیت استفاده از اصلاح‌کننده‌های خاک برای مدیریت تنش خشکی، اطلاعات موجود دربارهٔ نقش پامیس در بهبود همزمان خصوصیات فیزیکی خاک و عملکرد گیاهان دارویی، به‌ویژه نعناع فلفلی، هنوز تا حد زیادی محدود است. بیشتر مطالعات گذشته بر اثر اصلاح‌کننده‌های متخلخل بر خاک یا پاسخ گیاه به تنش خشکی به‌صورت جداگانه تمرکز داشته‌اند، در حالی‌که تعامل بین "ویژگی‌های خاک، میزان کاربرد پامیس و رژیم آبیاری" می‌تواند عامل تعیین‌کننده‌ای در موفقیت این فناوری باشد. لذا، بررسی این روابط می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای توسعه روش‌های مدیریت آب و خاک تحت شرایط کم‌آبی فراهم آورد. بر این اساس، هدف پژوهش حاضر بررسی اثر سطوح مختلف کاربرد پامیس تحت رژیم‌های مختلف آبیاری بر برخی خصوصیات فیزیکی خاک و رشد گیاه نعناع فلفلی بوده است. فرضیهٔ اصلی پژوهش بر این مبنا استوار بوده که افزودن پامیس با بهبود ساختار و خصوصیات فیزیکی–هیدرولیکی خاک، افزایش تخلخل و افزایش ظرفیت نگهداری آب، می‌تواند شرایط مناسب‌تری برای توسعهٔ ریشه فراهم کرده و اثرات منفی محدودیت آب را بر رشد گیاه را تا حد زیادی کاهش دهد.

## مواد و روش‌ها

### طرح آزمایشی، نمونه‌برداری و آماده‌سازی خاک

به‌منظور ارزیابی اثر کاربرد پامیس بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شاخص‌های کیفیت خاک و همچنین رشد گیاه نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) تحت شرایط مختلف تأمین آب، آزمایشی گلخانه‌ای در گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری انجام گردید. آزمایش به‌صورت گلدانی و در قالب طرح اسپلیت–اسپلیت پلات بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD)[3] با چهار تکرار اجرا گردید. تیمارهای آزمایشی شامل بافت خاک، سطوح کاربرد پامیس و رژیم آبیاری بودند. ترکیب این عوامل منجر به ایجاد ۱۲ تیمار آزمایشی شد که هر تیمار در چهار تکرار اجرا گردید؛ بنابراین، در مجموع ۴۸ واحد آزمایشی (گلدان) مورد بررسی قرار گرفت.

نمونه‌برداری از لایهٔ سطحی (عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری) دو نوع خاک با بافت متفاوت شامل لوم شنی و لوم رسی، واقع در اراضی

[1] Dual-porosity system
[2] Vadose zone
[3] Randomized Complete Block Design

کشاورزی تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری انجام گردید. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، بقایای گیاهی، سنگ‌ریزه‌ها و سایر مواد درشت از خاک جدا شد و تا رسیدن به وزن ثابت در دمای محیط آزمایشگاه (۲۵ ± ۲ درجه سانتی‌گراد) نگهداری شدند. سپس، خرد شده و برای تعیین برخی خصوصیات اولیه، آماده‌سازی محیط کشت (استفاده از خاک الک‌شده جهت همگونی و اختلاط بهتر با پامیس الک‌شده) و اجرای آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. برای هر نوع خاک، پس از اختلاط کامل، نمونه‌های مرکب تهیه شد و ویژگی‌های خاک اولیه پیش از اعمال تیمارها اندازه‌گیری گردید (جدول ۱). خصوصیات اندازه‌گیری‌شدهٔ نمونه‌ها شامل اجزای بافت خاک (نمونهٔ عبوری از الک شمارهٔ ۱۰)[۱]، جرم مخصوص ظاهری (نمونه خاک دست‌نخورده با استفاده از نمونه‌بردار استوانه‌ای)، جرم مخصوص حقیقی (نمونهٔ عبوری از الک شمارهٔ ۱۰)، تخلخل کل (محاسبه‌شده بر اساس روابط جرم مخصوص ظاهری و حقیقی)، نسبت پوکی (محاسبه‌شده بر اساس رابطهٔ تخلخل کل)، ظرفیت نگهداری آب (نمونهٔ عبوری از الک شمارهٔ ۱۰)، شاخص خمیری (نمونهٔ عبوری از الک شمارهٔ ۴۰)[۲] و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها (نمونهٔ آماده‌شده با عبور از الک ۸ میلی‌متر) بوده است (جدول ۱) که روش اندازه‌گیری هر یک از این ویژگی‌ها در تطابق کامل با روش‌های ارائه شدهٔ استاندارد بوده است (Soil Survey Staff, 2014) و همچنین در بخش مربوط به اندازه‌گیری خصوصیات خاک (خاک‌های تحت اثر تیمارها) نیز به تفصیل به آن پرداخته شده است.

**جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی خاک‌های مورد استفاده در انجام آزمایش.**

**Table 1. Selected physical properties of the soils used in the experiment**

| روش اندازه‌گیری<br>Measurement methods | خاک (۲)<br>Soil 2 | خاک (۱)<br>Soil 1 | واحد<br>Unit | پارامتر<br>Parameter |
|---|---|---|---|---|
| روش هیدرومتری<br>Bouyoucos hydrometer method | لوم رسی<br>Clay Loam | لوم شنی<br>Sandy Loam | - | بافت خاک<br>Texture |
| روش هیدرومتری<br>BHM | 38 | 14 | % | رس<br>Clay |
| روش هیدرومتری<br>BHM | 42 | 28 | % | سیلت<br>Silt |
| روش هیدرومتری<br>BHM | 20 | 58 | % | شن<br>Sand |
| روش سیلندر<br>Undisturbed core sampling method | 1.27 | 1.68 | gr/cm3 | جرم مخصوص ظاهری<br>Bulk Density |
| روش پیکنومتر<br>Pycnometer method | 2.12 | 2.51 | gr/cm3 | جرم مخصوص حقیقی<br>Particle Density |
| محاسبه از جرم مخصوص ظاهری و حقیقی<br>Calculation based on BD&PD | 0.4 | 0.33 | % | تخلخل<br>Porosity |
| محاسبه از تخلخل<br>based on total porosity | 0.66 | 0.49 | % | نسبت پوکی<br>Void ratio |
| روش کاساگراند<br>Casagrande cup method | 7.15 | 5.46 | % | شاخص خمیری<br>Placticity Index |
| روش الک کردن<br>Sieving method | الک‌خشک DS / الک‌تر WS | الک‌خشک DS / الک‌تر WS | mm | پایداری خاکدانه<br>Aggregate Stability |
| | 1.073 / 2.216 | 2.962 / 1.35 | | میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها MWD |
| | 1.06 / 2.117 | 3.08 / 1.35 | | میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها GMD |

انتخاب دو نوع بافت خاک با هدف بررسی کارایی پامیس در شرایط فیزیکی متفاوت انجام گشت. خاک لوم شنی به دلیل درصد بیشتر ذرات شن، ظرفیت نگهداری آب پایین‌تر و زهکش سریع‌تر دارد، در حالی‌که خاک لوم رسی به دلیل مقدار بیشتر ذرات رس، ظرفیت نگهداری آب بالاتر، اما احتمال تراکم بیشتر و تهویه محدودتری دارد؛ بنابراین، استفاده از این دو خاک امکان بررسی اثر متقابل نوع خاک، کاربرد پامیس و رژیم‌های

[۱] الک ۲ میلیمتری

[۲] الک ۴۲۵ میکرومتری

آبیاری و نیز ارزیابی کارایی این اصلاح‌کنندهٔ معدنی را در شرایط فیزیکی متضاد فراهم می‌آورد.

## تیمارهای پژوهش

پامیس مورد استفاده در این پژوهش، ماده‌ای معدنی آتشفشانی متخلخل با منشأ سنگ‌های آذرین بوده است که از یک شرکت فرآوری مواد معدنی در استان آذربایجان شرقی، تهیه گردید. این ماده از ذخایر آتشفشانی منطقهٔ سهند استخراج شده بود. پیش از استفاده، ناخالصی‌های موجود شامل بقایای آلی و ذرات درشت آن حذف شدند. سپس پامیس در دمای محیط (۲۵ ± ۲ درجه سانتی‌گراد) هواخشک شده و پس از خرد کردن ملایم، از الک دو میلی‌متری عبور داده شد تا اندازه ذرات آن با خاک مورد استفاده یکنواخت گردد (همگون و آمادهٔ مخلوط‌شدن با خاک عبوری از الک دو میلی‌متری برای آماده سازی خاک گلدان‌ها). بر اساس طرح آزمایشی، پامیس در سه سطح مختلف شامل صفر (شاهد)، ۴ و ۸ گرم بر کیلوگرم خاک خشک به محیط کشت اضافه شد. با توجه به استفاده از ۷ کیلوگرم خاک خشک در هر گلدان، مقدار پامیس مصرفی در تیمارهای ۴ و ۸ گرم بر کیلوگرم، به‌ترتیب ۲۸ و ۵۶ گرم برای هر گلدان بوده است (به‌ترتیب معادل ۰/۴ و ۰/۸ درصد وزنی). مقدار مورد نیاز پامیس با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم توزین و پیش از کاشت، به‌صورت تدریجی و کاملاً یکنواخت با کل حجم خاک هر گلدان مخلوط شد تا اصلاح‌کننده در سراسر محیط ریشه توزیع یکنواخت داشته باشد.

رژیم‌های آبیاری بر اساس مقدار رطوبت قابل استفاده و در دسترس (AW) در خاک تنظیم شدند و مشتمل بر دو سطح: آبیاری برای رطوبت بهینه (وجود ۷۵ درصد آب قابل استفاده و دسترس: ۷۵٪ AW) و تنش کم‌آبیاری (وجود ۵۰ درصد آب قابل استفاده و دسترس گیاه: ۵۰٪ AW) بوده‌اند. برای تعیین این سطوح، ابتدا ظرفیت زراعی (FC) و نقطهٔ پژمردگی دائم (PWP) هر یک از دو خاک تعیین شده و مقدار آب قابل استفاده (AW) از اختلاف رطوبت خاک در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم محاسبه گردید. در تیمار آبیاری بهینه (۷۵٪ AW)، آبیاری زمانی انجام می‌شد که ۷۵ درصد آب قابل استفاده خاک در دسترس گیاه بود؛ لذا حدود ۲۵ درصد آب قابل استفادهٔ خاک، کاهش یافته و تخلیه شده بود. در تیمار تنش کم‌آبیاری (۵۰٪ AW) نیز آبیاری پس از باقیماندن ۵۰ درصد آب قابل استفاده خاک انجام می‌شد و در نتیجه، حدود ۵۰ درصد رطوبت قابل استفاده توسط گیاه کاهش یافته و تخلیه شده بود. برای اعمال دقیق تیمارهای آبیاری، وزن هر گلدان در ظرفیت زراعی و همچنین وزن متناظر با سطوح ۷۵ و ۵۰ درصد آب قابل استفاده و در–دسترس گیاه (معادل ۲۵ و ۵۰ درصد کاهش و تخلیهٔ آب قابل استفاده) برای هر دو نوع خاک محاسبه و به‌عنوان وزن مبنا ثبت شد (جدول ۲). تیمارهای آبیاری چهارده روز پس از انتقال نشاءها، زمانی که گیاهان استقرار کامل یافته، دارای چهار الی شش برگ حقیقی بوده و رشد رویشی یکنواختی داشتند، آغاز گردید.

**جدول ۲- وزن گلدان در ظرفیت زراعی، آستانهٔ آبیاری و مقدار آب مورد نیاز در دو رژیم رطوبتی و دو بافت خاک.**

**Table 2. Pot weights at field capacity, irrigation thresholds, and required water amounts under two soil moisture regimes in the two soil textures.**

| بافت خاک Texture | وزن گلدان در ظرفیت زراعی Pot weights at FC | آستانهٔ ۷۵٪ آب قابل‌دسترس (رطوبت بهینه) (g) 75%AW irrigation thresholds | آب مورد نیاز (g) Required water | آستانهٔ ۵۰٪ آب قابل دسترس (تنش‌کم‌آبیاری) (g) 50%AW irrigation thresholds | آب مورد نیاز (g) Required water |
|---|---|---|---|---|---|
| لوم شنی (SandyLoam) | 9790 | 9540 | 250 | 9292 | 498 |
| لوم رسی (ClayLoam) | 9870 | 9597 | 273 | 9325 | 545 |

به‌منظور روشن‌تر شدن نحوهٔ اعمال رژیم‌های آبیاری، در طول دورهٔ آزمایش، رطوبت خاک با استفاده از روش وزنی و از طریق توزین روزانه و منظم گلدان‌ها کنترل و مدیریت گردید. هرگاه وزن گلدان به مقدار متناظر با کاهش رطوبت قابل استفادهٔ گیاه و سطح تخلیهٔ تعیین‌شده می‌رسید (با رسیدن وزن آن‌ها به آستانهٔ تعیین‌شده در جدول ۲)، مقدار آب مورد نیاز بر اساس اختلاف وزن گلدان تا وزن متناظر با ظرفیت زراعی محاسبه و به آرامی به هر گلدان اضافه می‌شد تا سطح رطوبتی مورد نظر هر تیمار در طول دورهٔ رشد تقریباً به‌طور یکنواخت برای هر دو تیمار آبیاری (رطوبت بهینه و محدودیت کم‌آبیاری) حفظ گردد (جدول ۲).

## کشت گلدانی، رشد گیاه و مدیریت رطوبت

پس از آماده‌سازی مخلوط خاک–پامیس مطابق تیمارهای آزمایشی، مقدار ۷ کیلوگرم خاک خشک از هر واحد آزمایشی به‌صورت یکنواخت در گلدان‌ها ریخته شد. به‌منظور ایجاد شرایط فیزیکی مشابه در تمامی واحدهای آزمایشی، خاک بدون اعمال فشار اضافی در گلدان‌ها قرار داده شد تا تراکم اولیه خاک بین گلدان‌ها تا حد امکان یکنواخت باشد. سپس در هر گلدان پنج نشاء یکنواخت نعناع فلفلی با اندازهٔ مشابه کشت شد. پس از انتقال نشاءها، تمامی گلدان‌ها به‌مدت ۱۴ روز تحت شرایط رطوبتی یکسان نگهداری شدند تا گیاهان استقرار یافته و رشد رویشی یکنواختی ایجاد شود. در زمان شروع تیمارهای آبیاری، گیاهان دارای ۴ تا ۶ برگ حقیقی بوده و شرایط رشدی مشابهی داشتند. پس از این مرحله (استقرار گیاهان پس از ۲ هفته) تیمارهای آزمایشی و سطوح مختلف آبیاری مطابق شیوهٔ بیان‌شده، اعمال گردید. رطوبت خاک گلدان‌ها در طول دوره رشد با استفاده از روش وزنی کنترل شد. وزن گلدان‌ها با ترازوی دیجیتال با دقت مناسب (۰/۰۱ گرم) اندازه‌گیری و ثبت گردید. در طول دوره آزمایش، تمامی گلدان‌ها در شرایط یکنواخت گلخانه‌ای از نظر دما، نور، تهویه و مدیریت زراعی نگهداری شدند. به‌منظور کاهش خطاهای اثرات مکانی، محل قرارگیری گلدان‌ها در گلخانه در طول دوره رشد به‌صورت دوره‌ای جابه‌جا شدند.

## اندازه‌گیری‌ها

### زیست‌تودهٔ گیاهی

در پایان دورهٔ رشد (حدود ۴۵ روز پس از مستقرشدن نشاءهای چندبرگی) و در زمان برداشت، اندام هوایی گیاهان نعناع فلفلی از سطح خاک برداشت شد. نمونه‌های گیاهی بلافاصله پس از برداشت به آزمایشگاه منتقل شده و برای حذف ذرات خاک و بقایای احتمالی، با آب مقطر شست‌وشو داده شدند. سپس رطوبت سطحی نمونه‌ها با استفاده از کاغذ جاذب گرفته شد و وزن تر اندام هوایی با استفاده از ترازوی دیجیتال آزمایشگاهی با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. پس از تعیین وزن تر، نمونه‌های گیاهی در پاکت‌های کاغذی قرار داده شده و در آون با دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت (تقریباً ۷۲ ساعت) خشک شدند. پس از سرد شدن نمونه‌ها در دسیکاتور، وزن خشک اندام هوایی با استفاده از ترازوی دقیق اندازه‌گیری شد. وزن تر و وزن خشک اندام هوایی به‌ترتیب به‌عنوان شاخص‌های رشد رویشی و تجمع زیست‌توده گیاه (شاخص‌های عملکرد گیاه) مورد استفاده قرار گرفتند.

## خصوصیات خاک (پس از اعمال تیمارها و انجام آزمایش)

پس از پایان دورهٔ رشد گیاه و فرآیند برداشت اندام هوایی، خاک موجود در هر گلدان به‌آرامی خارج شده و پس از جداسازی ریشه‌ها و بقایای گیاهی، نمونه‌های خاک برای انجام آزمون‌های آزمایشگاهی آماده شدند. نمونه‌های خاک در شرایط دمای محیط آزمایشگاه هوا–خشک شده و بر اساس پروتکل استاندارد آزمایشگاه خاکشناسی (Soil Survey Staff, 2014)، برای تعیین برخی خصوصیات فیزیکی شامل بافت، جرم مخصوص ظاهری و حقیقی، تخلخل کل، نسبت پوکی، شاخص خمیری، رطوبت باقی‌مانده و پایداری خاکدانه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. بدین ترتیب مقادیر اجزای بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتری[1] ارائه شده توسط Bouyoucos (۱۹۶۲) تعیین گردید. در این روش، درصد ذرات شن، سیلت و رس پس از پراکنده‌سازی نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شده و کلاس بافت خاک با استفاده از مثلث بافت خاک تعیین گشت.

جرم مخصوص ظاهری خاک (ρb) با استفاده از روش سیلندر نمونه‌برداری[2] اندازه‌گیری شد. در این روش، نمونه‌های خاک با حجم مشخص پس از خشک شدن در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت، وزن شده و جرم مخصوص ظاهری با استفاده از رابطهٔ (۱) محاسبه گردید:

رابطهٔ (۱)

$$\rho b = Ms / Vt$$

که در آن؛ρb، جرم مخصوص ظاهری خاک ($g\ cm^{-3}$)؛ Ms، جرم خاک خشک (g)؛ Vt، حجم کل نمونهٔ خاک ($cm^3$) است. جرم مخصوص حقیقی خاک بر مبنای روش پیکنومتر (Klute, 1986) و رابطهٔ (۲) اندازه‌گیری شد:

رابطهٔ (۲)

$$\rho s = Ms / Vs$$

که در آن؛ ρs، جرم مخصوص حقیقی خاک ($g\ cm^{-3}$)؛ Ms، جرم خاک خشک (g)؛ Vs، حجم ذرات جامد خاک ($cm^3$) است.

تخلخل کل بر اساس رابطهٔ مقادیر جرم مخصوص ظاهری و حقیقی و مطابق رابطهٔ (۳) محاسبه گردید (Danielson and Sutherland, 1986):

رابطهٔ (۳)

$$n = 1 - (\rho b / \rho s)$$

همچنین، نسبت پوکی خاک نیز از رابطهٔ مقابل (رابطهٔ ۴) محاسبه گردید:

[1] Hydrometer method

[2] Core method

رابطهٔ (۴) $e = n / (1 - n)$، که در آن؛ e، نسبت پوکی خاک و n، تخلخل کل خاک است.

شاخص خمیری خاک (PI) از اختلاف بین حد روانی (LL)و حد خمیری (PL) تعیین شد. حد روانی و حد خمیری با استفاده از روش کاساگرانده اندازه‌گیری و مقدار شاخص خمیری از رابطهٔ (۵) محاسبه گردید:

رابطهٔ (۵)

$$PI = LL - PL$$

که در آن؛ PI شاخص خمیری بر حسب درصد؛ LL حد روانی بر حسب درصد؛ و PL حد خمیری بر حسب درصد است. رطوبت باقی‌ماندهٔ خاک پس از هواخشک شدن نمونه‌ها و عبور از الک ۲ میلی‌متری، به روش وزنی بر اساس روش توصیه شده توسط Klute (۱۹۸۶) تعیین گردید. بدین منظور، نمونه‌های خاک ابتدا وزن، سپس به مدت ۲۴ ساعت در کورهٔ الکتریکی با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک و پس از رسیدن به وزن ثابت مجدداً وزن شدند. مقدار رطوبت بر اساس رابطهٔ (۶) محاسبه گردید:

رابطهٔ (۶)

$$\theta m = (Mw / Ms) \times 100$$

که در آن؛ θm رطوبت باقی‌ماندهٔ خاک بر حسب درصد؛ Mwوزن آب موجود در نمونه (g) و Msوزن خاک خشک (g) است. پایداری خاکدانه‌ها نیز پس از برداشت گیاه با استفاده از روش الک تر تعیین شد. برای این منظور، نمونه‌های خاک پس از عبور از الک ۸ میلی‌متری، در مجموعه‌ای از الک‌ها قرار داده شده و پس از انجام فرآیند الک تر، خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک و وزن شدند. سپس میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD) بر اساس روابط (۷) و (۸) ارائه شده توسط Kemper و Rosenau (۱۹۸۶) محاسبه شدند:

رابطهٔ (۷)

$$MWD = \Sigma(Xi \times Wi)$$

که MWD میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (mm)؛ Xi قطر متوسط خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک (mm) و Wi نسبت وزن خاکدانه‌های هر الک به وزن کل نمونه است.

رابطهٔ (۸)

$$GMD = \exp [\Sigma(Wi \times \ln Xi) / \Sigma Wi]$$

که در آن؛ GMD میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (mm)؛ Xi قطر متوسط خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک (mm) و Wi نسبت وزن خاکدانه‌های هر الک به وزن کل نمونه، است.

## آنالیز داده‌ها

داده‌های حاصل از اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی خاک و زیست‌تودهٔ گیاهی پس از بررسی پیش‌فرض‌های لازم برای انجام تحلیل آماری، شامل بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها و همگنی واریانس خطاها، مورد تجزیه و تحلیل واقع شدند. تجزیهٔ واریانس داده‌ها بر اساس مدل آماری طرح اسپلیت–اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد. در این مدل، اثرات اصلی بافت خاک، سطوح کاربرد پامیس و سطوح رطوبتی قابل استفادهٔ گیاه (آب قابل دسترس در خاک)، همچنین اثرات متقابل بین تیمارهای آزمایشی بررسی گردید. در صورت معنی‌دار بودن اثر تیمارها، مقایسهٔ میانگین‌ها با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. تمامی تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۳ انجام گرفت. همچنین، برای سازمان‌دهی داده‌ها، انجام محاسبات اولیه و تهیهٔ نمودارهای مورد نیاز از نرم‌افزارهای Microsoft Excel و SPSS استفاده شد.

## نتایج

نتایج تجزیهٔ واریانس اثر سطوح مختلف آبیاری، بافت خاک و پامیس و برهم‌کنش آن‌ها بر خصوصیات منتخب فیزیکی–مکانیکی خاک و عملکرد گیاه نعناع فلفلی در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، عوامل اصلی آزمایش شامل آبیاری، بافت خاک و کاربرد پامیس بر بخش قابل توجهی از صفات مورد بررسی، اثر معنی‌داری در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد داشتند، اگرچه میزان و نوع پاسخ صفات مختلف به این عوامل یکسان نبود. بافت خاک بیشترین تأثیر را بر بیشتر خصوصیات فیزیکی مورد بررسی خاک و نیز صفات رشدی گیاه نشان داد که البته می‌توان دلیل آن‌را به تفاوت انرژی نگاه‌داشت آب در خاک بر اساس نوع بافت مرتبط دانست، در حالی که تنش حاصل از کمبود آب (محدودیت کم‌آبیاری) نیز موجب تغییر معنی‌دار بسیاری از ویژگی‌های خاک و عملکرد گیاه گردید که بر اساس جداول مربوطه به آن پرداخته می‌شود. همچنین، کاربرد پامیس اثر معنی‌داری بر بخش عمده‌ای از صفات اندازه‌گیری‌شده، به‌ویژه ویژگی‌های فیزیکی خاک و زیست‌توده گیاه، داشت. از سوی دیگر، معنی‌دار بودن برخی برهم‌کنش‌های دوگانه و سه‌گانه بین عوامل آزمایشی نشان داد که پاسخ گیاه و ویژگی‌های فیزیکی خاک به کاربرد پامیس تا حد زیادی تحت تأثیر شرایط رطوبتی و بافت خاک قرار دارد. علاوه بر این، نتایج مربوط به پایداری خاکدانه‌ها نیز نشان داد که بافت خاک اثر غالب بر شاخص‌های MWD و GMDدر شرایط الک خشک و تر داشته است، در حالی که اثر

متقابل عوامل آزمایشی تنها بر برخی از این شاخص‌ها نیز معنی‌دار بوده است که در قسمت‌های مربوطه به آن پرداخته خواهد شد.

**جدول ۳- تجزیهٔ واریانس اثر کاربرد تیمارها بر برخی خصوصیات خاک مورد مطالعه و عملکرد گیاه نعناع فلفلی.**

**Table 3. Analysis of variance (MSs) for selected soil properties and peppermint yield.**

| منابع تغییرات Source of variation | درجهٔ آزادی Df | وزن تر FreshWeight | وزن خشک DryWeight | چگالی ظاهری Bulk Density | چگالی حقیقی Particle Density | تخلخل Porosity | نسبت پوکی Void ratio | ظرفیت نگاهداشت اب Water Holding Capacity | شاخص خمیری Placticity Index |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| تکرار Replication (R) | 3 | 6.6ns | 0.02ns | $2.778 \times 10^{-6}$ns | $2.222 \times 10^{-5}$ns | $5.556 \times 10^{-6}$ns | 0.00002ns | 0.476ns | 0.0045ns |
| آبیاری Irrigation (I) | 1 | 9228.5** | 192.12** | $2.700 \times 10^{-3}$** | $4.083 \times 10^{-4}$** | $4.083 \times 10^{-4}$** | 0.00350** | 104.843** | 0.9075** |
| خطا Error (a) | 3 | 19.4ns | 0.02ns | $5.556 \times 10^{-6}$ns | $8.333 \times 10^{-6}$ns | $2.778 \times 10^{-6}$ns | 0.00001ns | 0.262ns | 0.0010ns |
| بافت خاک Soil texture (S) | 1 | 35695.3** | 2805.26** | 1.85653** | 1.63541** | 0.06453** | 0.47800** | 820.053** | 13.9968** |
| آبیاری*بافت I × S | 1 | 1313.4** | 0.07ns | $2.083 \times 10^{-4}$ns | $5.333 \times 10^{-4}$** | $7.500 \times 10^{-5}$* | 0.00152** | 2.823* | 0.4370** |
| خطا Error (b) | 6 | 8.3ns | 0.04ns | $5.417 \times 10^{-5}$ns | $3.750 \times 10^{-5}$ns | $9.722 \times 10^{-6}$ns | 0.00002ns | 0.276ns | 0.0031ns |
| پامیس Pumice (P) | 2 | 1878.0** | 19.86** | $7.790 \times 10^{-3}$** | $2.708 \times 10^{-5}$ns | $1.506 \times 10^{-3}$** | 0.01323** | 52.318** | 0.1625** |
| آبیاری*پامیس I × P | 2 | 20.7ns | 0.22* | $8.125 \times 10^{-5}$ns | $2.708 \times 10^{-5}$ns | $2.083 \times 10^{-6}$ns | 0.00003ns | 5.227** | 0.0037ns |
| بافت*پامیس S × P | 2 | 157.5** | 1.12** | $3.958 \times 10^{-5}$ns | $5.208 \times 10^{-5}$ns | $1.458 \times 10^{-5}$ns | 0.00008ns | 10.899** | 0.0196** |
| بافت*آبیاری*پامیس S × I × P | 2 | 85.7* | 0.05ns | $2.146 \times 10^{-4}$** | $2.083 \times 10^{-6}$ns | $4.375 \times 10^{-5}$* | 0.00004ns | 1.043ns | 0.0013ns |
| خطا Error (c) | 24 | 19.8ns | 0.04ns | $3.125 \times 10^{-5}$ns | $1.597 \times 10^{-5}$ns | $1.111 \times 10^{-5}$ns | 0.00004ns | 0.566ns | 0.0025ns |

**، *، ns به ترتیب بیانگر اثر معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، ۵ درصد و عدم وجود اثر معنی‌دار است.

**, * and ns indicate significant effects at the 1% ($P \leq 0.01$) and 5% ($P \leq 0.05$) probability levels, and non-significant effects, respectively.

**جدول ۴- تجزیهٔ واریانس اثر کاربرد تیمارها بر پایداری خاکدانه‌ها به روش الک خشک و تر.**

**Table 4. Analysis of variance (MSs) for the effects of treatments on soil aggregate stability determined by dry and wet sieving methods.**

| منابع تغییرات Source of variation | درجهٔ آزادی DF | میانگین وزنی قطر خاکدانه (الک خشک) Dry MWD | میانگین هندسی قطر خاکدانه (الک خشک) Dry GMD | میانگین وزنی قطر خاکدانه (الک تر) Wet MWD | میانگین هندسی قطر خاکدانه (الک تر) Wet GMD |
|---|---|---|---|---|---|
| تکرار Replication (R) | 2 | 0.1419ns | 0.00937ns | $3.611 \times 10^{-5}$ns | 0.00124ns |
| ابیاری Irrigation (I) | 1 | 0.0289ns | 0.00538ns | 0.04840ns | 0.00080ns |
| خطا Error (a) | 2 | 0.0825ns | 0.01235ns | $3.508 \times 10^{-3}$ns | 0.00021ns |
| بافت خاک Soil texture (S) | 1 | 16.4565** | 1.73361** | 11.1111** | 0.98340** |
| آبیاری*بافت I × S | 1 | 0.0312ns | 0.00134ns | 0.54268* | 0.03802** |
| خطا Error (b) | 4 | 0.0978ns | 0.00928ns | 0.04821ns | 0.00007ns |
| پامیس Pumice (P) | 2 | 0.0905ns | 0.00497ns | 0.21308ns | 0.00545ns |
| آبیاری*پامیس I × P | 2 | 0.2464* | 0.00819ns | 0.15903ns | 0.02920** |
| بافت*پامیس S × P | 2 | 0.2871* | 0.06967** | 0.24721ns | 0.01410* |
| بافت*آبیاری*پامیس S × I × P | 2 | 0.0382ns | 0.00270ns | 0.15708ns | 0.00427ns |
| خطا Error (c) | 16 | 0.0609ns | 0.00707ns | 0.04555ns | 0.00272ns |

**، *، nsبه ترتیب بیانگر اثر معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، ۵ درصد و عدم وجود اثر معنی‌دار است.

**, * and ns indicate significant effects at the 1% ($P \leq 0.01$) and 5% ($P \leq 0.05$) probability levels, and non-significant effects, respectively.

## اثر کاربرد پامیس و تنش کم‌آبی بر وزن تر و وزن خشک گیاه

بر اساس نتایج، تنش کم‌آبیاری موجب کاهش تولید زیست‌تودهٔ نعناع فلفلی (وزن تر و وزن خشک) گردید، در حالی‌که کاربرد پامیس توانست اثرات منفی کاهش رطوبت خاک را تعدیل کرده و موجب بهبود رشد گیاه گردد (جدول ۵). اثر متقابل سه‌گانهٔ بافت خاک × آبیاری × کاربرد پامیس بر وزن تر گیاه معنی‌دار بود (جدول ۳؛ $P\leq0.05$). مقایسهٔ میانگین اثر متقابل سه‌گانه نشان داد که بیشترین وزن تر گیاه (۱۶۹/۸۱ گرم در گلدان) در خاک لوم رسی و تحت آبیاری بهینه (وجود ۷۵ درصد آب قابل دسترس و استفادهٔ گیاه (۷۵٪ AW)) و کاربرد ۸ گرم پامیس بر کیلوگرم خاک مشاهده شد. در مقابل، کمترین مقدار این وزن تر (۶۲/۶۲ گرم در گلدان) در گیاهان رشد یافته در خاک لوم شنی، تحت شرایط کم‌آبی (وجود ۵۰ درصد آب قابل دسترس و استفادهٔ گیاه (۵۰٪ AW)) و بدون کاربرد پامیس مشاهده شد (جدول ۵). افزایش مقدار تنش کم‌آبیاری از ۲۵ درصد تخلیهٔ رطوبت به ۵۰ درصد تخلیه رطوبتی، موجب کاهش وزن تر گیاه در هر دو بافت خاک شد. در خاک لوم شنی و بدون کاربرد پامیس، افزایش تخلیه آب قابل استفاده از ۲۵ به ۵۰ درصد باعث کاهش وزن تر گیاه از ۸۲/۶۰ به ۶۲/۶۲ گرم در گلدان شد. همچنین در خاک لوم رسی،

وزن تر گیاه در شرایط بدون پامیس از ۱۳۶/۰۷ به ۱۰۵/۴۷ گرم در گلدان کاهش یافت (جدول ۵). همچنین، کاربرد پامیس در هر دو شرایط رطوبتی، در هر دو نوع خاک موجب افزایش وزن تر گیاه شد، اما اثر آن در شرایط محدودیت شدیدتر آب بیشتر نمایان گردید. در خاک لوم رسی و در محتوای رطوبتی ۷۵ درصد آب قابل دسترس (AW ۷۵٪: رطوبت بهینه)، کاربرد ۴ و ۸ گرم پامیس، به‌ترتیب، موجب افزایش ۱۵/۶ و ۲۴/۷ درصدی وزن تر گیاه نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد پامیس) شد. در خاک لوم شنی تحت رژیم کم‌آبیاری (رطوبت ۵۰ درصد دامنهٔ آب قابل دسترس گیاه (۵۰ درصد AW))، کاربرد ۴ و ۸ گرم پامیس موجب افزایش وزن تر گیاه به‌ترتیب ۱۶/۴ و ۲۹/۳ درصد نسبت به عدم کاربرد پامیس (سطح پامیس صفر) شد، اگرچه اختلاف بین دو سطح کاربرد پامیس از نظر آماری معنی‌دار نگردیده است (جدول ۵).

به طور مشابه، کاهش محتوای رطوبت خاک از ۷۵ درصد به ۵۰ درصد دامنهٔ آب قابل دسترس گیاه (AW)، موجب کاهش وزن خشک گیاه شده که البته امری کاملاً بدیهی است. بیشترین وزن خشک (۲۹/۲۴ گرم در گلدان) در رطوبت بهینه (۷۵ درصد آب قابل دسترس گیاه) و کاربرد ۸ گرم پامیس بر کیلوگرم خاک مشاهده گردید، در حالی‌که کمترین مقدار آن (۲۳/۰۰ گرم در گلدان) در گیاهان رشد یافته تحت تیمار کم‌آبیاری (۵۰٪ آب قابل دسترس گیاه) و بدون کاربرد پامیس مشاهده شد (جدول ۵). کاربرد پامیس موجب افزایش وزن خشک گیاه در هر دو سطح رطوبتی شد. در شرایط بهینه رطوبتی، کاربرد ۴ و ۸ گرم پامیس به‌ترتیب موجب افزایش ۴/۱ و ۹/۲ درصد وزن خشک اندام‌هوایی گیاه نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد پامیس) شد. همچنین، در شرایط تنش کم‌آبیاری، کاربرد ۴ و ۸ گرم پامیس، وزن خشک گیاه را به‌ترتیب ۳/۹ و ۸/۷ درصد در مقایسه با شاهد (عدم کاربرد پامیس) افزایش داد (جدول ۵).

**جدول ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل بافت خاک × وضعیت رطوبتی × سطح پامیس بر وزن‌تر و اثر متقابل وضعیت رطوبتی × سطح پامیس بر وزن خشک گیاه نعناع فلفلی.**

**Table 5. Mean comparison of the interaction effect of soil texture × water regime × pumice application rate on fresh weight (FW) and the interaction effect of water regime × pumice application rate on dry weight (DW) of peppermint.**

| بخش Section | بافت خاک Texture | رژیم رطوبتی Irrigation | پامیس($g\ kg^{-1}$) Pumice | وزن‌تر گیاه FW ($g\ pot^{-1}$) | وزن خشک گیاه DW ($g\ pot^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| الف | لوم رسی(CL) | وجود ۷۵ درصد آب قابل‌استفاده خاک[1] (AW ٪۷۵) 75% of available water[1] | 0 | 136.07[c] | — |
| الف | لوم رسی(CL) | وجود ۷۵ درصد آب قابل‌استفاده خاک (AW ٪۷۵) 75% of available water | 4 | 157.42[b] | — |
| الف | لوم رسی(CL) | وجود ۷۵ درصد آب قابل‌استفاده خاک (AW ٪۷۵) 75% of available water | 8 | 169.81[a] | — |
| الف | لوم رسی(CL) | وجود ۵۰ درصد آب قابل‌استفاده خاک[2] (AW ٪۵۰) 50% of available water[2] | 0 | 105.47[f] | — |
| الف | لوم رسی(CL) | وجود ۵۰ درصد آب قابل‌استفاده خاک (AW ٪۵۰) 50% of available water | 4 | 115.84[e] | — |
| الف | لوم رسی(CL) | وجود ۵۰ درصد آب قابل‌استفاده خاک (AW ٪۵۰) 50% of available water | 8 | 127.42[d] | — |
| الف | لوم شنی(SL) | وجود ۷۵ درصد آب قابل‌استفاده خاک (AW ٪۷۵) 75% of available water | 0 | 82.60[h] | — |
| الف | لوم شنی(SL) | وجود ۷۵ درصد آب قابل‌استفاده خاک (AW ٪۷۵) 75% of available water | 4 | 90.88[g] | — |
| الف | لوم شنی(SL) | وجود ۷۵ درصد آب قابل‌استفاده خاک (AW ٪۷۵) 75% of available water | 8 | 94.82[g] | — |
| الف | لوم شنی(SL) | وجود ۵۰ درصد آب قابل‌استفاده خاک (AW ٪۵۰) 50% of available water | 0 | 62.62[j] | — |
| الف | لوم شنی(SL) | وجود ۵۰ درصد آب قابل‌استفاده خاک (AW ٪۵۰) 50% of available water | 4 | 72.87[i] | — |
| الف | لوم شنی(SL) | وجود ۵۰ درصد آب قابل‌استفاده خاک (AW ٪۵۰) 50% of available water | 8 | 81.00[h] | — |
| ب | — | وجود ۷۵ درصد آب قابل‌استفاده خاک (AW ٪۷۵) 75% of available water | 0 | — | 27.68[c] |
| ب | — | وجود ۷۵ درصد آب قابل‌استفاده خاک (AW ٪۷۵) 75% of available water | 4 | — | 27.88[b] |
| ب | — | وجود ۷۵ درصد آب قابل‌استفاده خاک (AW ٪۷۵) 75% of available water | 8 | — | 29.24[a] |
| ب | — | وجود ۵۰ درصد آب قابل‌استفاده خاک (AW ٪۵۰) 50% of available water | 0 | — | 23.00[f] |
| ب | — | وجود ۵۰ درصد آب قابل‌استفاده خاک (AW ٪۵۰) 50% of available water | 4 | — | 23.89[e] |
| ب | — | وجود ۵۰ درصد آب قابل‌استفاده خاک (AW ٪۵۰) 50% of available water | 8 | — | 25.00[d] |

در بخش (الف)، میانگین‌های دارای حروف یکسان و در بخش (ب)، میانگین‌های دارای حروف یکسان در هر ستون، بر اساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵٪ تفاوت معنی‌داری ندارند. بخش (الف) نشان‌دهنده اثر متقابل بافت خاک × وضعیت رطوبتی × سطح پامیس بر وزن‌تر گیاه و بخش (ب) نشان‌دهنده اثر متقابل وضعیت رطوبتی × سطح پامیس بر وزن خشک گیاه است.

۱: آبیاری پس از تخلیه ۲۵ درصد آب قابل‌استفاده خاک، با باقی‌ماندن ۷۵ درصد آب قابل‌استفاده در خاک؛ ۲: آبیاری پس از تخلیه ۵۰٪ آب قابل‌استفاده خاک، با باقی‌ماندن ۵۰ درصد آب قابل‌استفاده در خاک.

In section (a), means followed by the same letter, and in section (b), means followed by the same letter within each column, are not significantly different according to Fisher's least significant difference (LSD) test at the 5% probability level. Section (a) represents the soil texture × water regime × pumice application rate interaction for fresh weight, whereas section (b) represents the water regime × pumice application rate interaction for dry weight.

[1] Irrigation after 25% depletion of available soil water, with 75% of available soil water remaining; [2] irrigation after 50% depletion of available soil water, with 50% of available soil water remaining.

## جرم مخصوص ظاهری و حقیقی خاک

نتایج نشان داد افزایش مقدار تنش رطوبت از ۷۵ درصد درصد آب قابل دسترس (AW) به ۵۰ درصد درصد آب قابل دسترس گیاه (شرایط رطوبتی بهینه به شرایط تنش کم‌آبیاری)، موجب افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک گردید (جدول ۶). عوامل سطوح آبیاری (رطوبت)، بافت خاک و کاربرد پامیس اثر معنی‌داری بر جرم مخصوص ظاهری خاک دارند (جدول ۳؛ $P\leq0.01$). کاربرد پامیس موجب کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک در هر دو بافت مورد مطالعه شد، اما میزان این کاهش در خاک لوم رسی بیشتر از خاک لوم شنی بود (جدول ۶). در خاک لوم شنی نیز کاربرد پامیس موجب کاهش جرم مخصوص ظاهری شد، اگرچه به دلیل جرم مخصوص اولیه پایین‌تر این خاک، دامنهٔ تغییرات کمتر بود. بررسی اثر متقابل بافت خاک، آبیاری و کاربرد پامیس (جدول ۶) نشان داد که بیشترین جرم مخصوص ظاهری (۱/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب) در خاک لوم رسی، تحت شرایط تنش کم‌آبیاری با رطوبت ۵۰ درصد آب قابل استفاده و بدون کاربرد پامیس مشاهده شد، در حالی‌که کمترین مقدار این ویژگی (۱/۲۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب) در خاک لوم شنی، تحت شرایط رطوبت بهینه با مقدار رطوبتی وجود ۷۵ درصد آب قابل استفاده و کاربرد ۸ گرم پامیس بر کیلوگرم خاک به دست آمد (جدول ۶).

بر اساس نتایج، خاک لوم شنی دارای جرم مخصوص حقیقی بالاتری نسبت به خاک لوم رسی بود (جدول ۶). نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی بافت و اثر متقابل آبیاری × بافت خاک معنی‌دار بود، در حالی که کاربرد پامیس تأثیر معنی‌داری بر این ویژگی نداشت (جدول ۳). اثر تیمار رطوبتی بر جرم مخصوص حقیقی محدود بود. مقایسهٔ میانگین اثر متقابل آبیاری و بافت خاک (جدول ۶) نشان داد که بیشترین مقدار جرم مخصوص حقیقی (۲/۵۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب) در خاک لوم شنی تحت تیمار رطوبت بهینه (وجود ۷۵ درصد آب قابل استفاده) مشاهده شد، درحالی‌که کمترین مقدار (۲/۱۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب) مربوط به خاک لوم رسی تحت تنش کم‌آبیاری (وجود ۵۰ درصد رطوبت قابل استفاده) مشاهده گردید (جدول ۶).

**جدول ۶- مقایسهٔ میانگین اثرات متقابل بافت خاک، سطوح آبیاری و کاربرد پامیس بر چگالی ظاهری و حقیقی خاک.**

**Table 6. Comparison of interaction means of soil texture, irrigation levels, and pumice application rates on soil bulk and particle densities.**

| بافت خاک Texture | سطح آبیاری Irrigation | سطح پامیس Pumice (g kg⁻¹) | چگالی‌ظاهری BD (g cm⁻³) | چگالی‌حقیقی PD (g cm⁻³) |
|---|---|---|---|---|
| لوم رسی(CL) | 75% AW [1] | 0 | 1.64[b] | 2.158[b] |
| لوم رسی(CL) | 75% AW | 4 | 1.61[d] | 2.158[b] |
| لوم رسی(CL) | 75% AW | 8 | 1.58[e] | 2.158[b] |
| لوم رسی(CL) | 50% AW [2] | 0 | 1.65[a] | 2.145[c] |
| لوم رسی(CL) | 50% AW | 4 | 1.63[c] | 2.145[c] |
| لوم رسی(CL) | 50% AW | 8 | 1.61[d] | 2.145[c] |
| لوم شنی(SL) | 75% AW | 0 | 1.24[g] | 2.521[a] |
| لوم شنی(SL) | 75% AW | 4 | 1.22[i] | 2.521[a] |
| لوم شنی(SL) | 75% AW | 8 | 1.20[k] | 2.521[a] |
| لوم شنی(SL) | 50% AW | 0 | 1.25[f] | 2.520[a] |
| لوم شنی(SL) | 50% AW | 4 | 1.23[h] | 2.520[a] |
| لوم شنی(SL) | 50% AW | 8 | 1.21[j] | 2.520[a] |

[1] آبیاری پس از تخلیهٔ ۲۵ درصد آب قابل‌استفادهٔ خاک (باقی‌ماندن ۷۵ درصد آب قابل‌استفاده در خاک: رژیم رطوبت بهینه)؛ [2] آبیاری پس از تخلیهٔ ۵۰ درصد آب قابل‌استفادهٔ خاک (باقی‌ماندن ۵۰ درصد آب قابل‌استفاده در خاک: رژیم تنش کم‌آبیاری و یا محدودیت رطوبتی). در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف یکسان بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند ($P \leq 0.05$).

[1] 75% AW: irrigation after 25% depletion of available soil water; [2] 50% AW: irrigation after 50% depletion of available soil water. Within each column, means followed by the same letter are not significantly different according to the LSD test at $P \leq 0.05$.

## تخلخل و نسبت پوکی خاک

نتایج نشان داد کاربرد پامیس در هر دو نوع خاک موجب افزایش فضای منفذی خاک شد و ویژگی‌های فضای منفذی خاک شامل تخلخل و نسبت پوکی تحت تأثیر نوع بافت خاک، شرایط رطوبتی و کاربرد پامیس قرار گرفتند (جداول ۳ و ۷). همچنین اثر متقابل سه‌گانه بافت خاک × سطوح آبیاری × کاربرد پامیس بر تخلخل خاک کاملاً معنی‌دار بوده است ($P\leq0.01$)، در حالی‌که نسبت پوکی تحت تأثیر اثر دوگانهٔ متقابل آبیاری × بافت خاک قرار گرفته است ($P\leq0.01$) (جدول ۳). در مورد تخلخل، بیشترین مقدار آن (۰/۴۳۵) در خاک لوم رسی، تحت شرایط آبیاری بهینه و کاربرد ۸ گرم پامیس بر کیلوگرم خاک مشاهده شد، در حالی‌که کمترین مقدار (۰/۳۴۰) در خاک لوم شنی بدون کاربرد پامیس و در هر دو شرایط رطوبتی بهینه و کم‌آبیاری مشاهده شد (جدول ۷). افزایش تخلخل در اثر کاربرد پامیس در

هر دو بافت خاک مشاهده شد، اما میزان این افزایش در خاک لوم شنی قابل توجه‌تر بود. به‌طوری‌که در شرایط رژیم آبیاری بهینه، افزودن ۴ و ۸ گرم پامیس در خاک لوم شنی، تخلخل را از ۰/۳۴۰ در تیمار شاهد (سطح صفر پامیس) به ترتیب به ۰/۳۵۲ و ۰/۳۶۵ افزایش داد.

در خاک لوم رسی نیز کاربرد پامیس موجب افزایش تخلخل شد؛ به‌طوری‌که در شرایط رطوبت بهینه و مطلوب، مقدار تخلخل از ۰/۴۲۰ در تیمار شاهد (پامیس ۰) به ۰/۴۳۰ و ۰/۴۳۵ به‌ترتیب در سطوح ۴ و ۸ گرم پامیس افزایش یافت. با این حال، میزان تغییرات مطلق تخلخل در خاک لوم شنی بیشتر بود. روند تغییرات نسبت پوکی (VR) نیز مشابه تخلخل بود و کاهش مقدار رطوبت خاک موجب کاهش این شاخص گردید. بیشترین مقدار نسبت پوکی (۰/۷۵۰) در خاک لوم رسی تحت شرایط آبیاری و رطوبت بهینه مشاهده گشت، در حالی‌که کمترین مقدار (۰/۵۳۳) مربوط به خاک لوم شنی تحت شرایط رژیم کم‌آبیاری (جدول ۸). کاهش مقدار آب قابل استفادهٔ خاک از ۷۵ به ۵۰ درصد موجب کاهش نسبت پوکی خاک شد؛ به‌طوری‌که این کاهش در خاک لوم رسی ۳/۸ درصد و در خاک لوم شنی ۱/۱ درصد بوده است (جدول ۸). روی‌هم‌رفته نتایج نشان داد که اثر اصلاحی پامیس بر ویژگی‌های فضای منفذی خاک، به‌ویژه در خاک لوم شنی و تحت شرایط محدودیت رطوبتی، اهمیت بیشتری داشته است.

**جدول ۷- مقایسه میانگین اثر متقابل بافت خاک، سطوح مختلف آبیاری و کاربرد پامیس بر مقدار تخلخل خاک.**

**Table 7- Mean comparison of the interaction effects of soil texture, irrigation, and pumice application on soil porosity.**

| بافت خاک Texture | سطوح آبیاری Irrigation Levels | سطوح پامیس ($gkg^{-1}$) Pumice | تخلخل خاک Porosity |
|---|---|---|---|
| لوم رسی CL | وجود ۷۵ درصد آب قابل‌استفاده خاک (۷۵٪ AW) 75% of available water | 0 | 0.42 c |
| | | 4 | 0.43 b |
| | | 8 | 0.435 a |
| لوم رسی CL | وجود ۵۰ درصد آب قابل‌استفاده خاک (۵۰٪ AW) 50% of available water | 0 | 0.41 d |
| | | 4 | 0.42 c |
| | | 8 | 0.43 b |
| لوم شنی SL | وجود ۷۵ درصد آب قابل‌استفاده خاک (۷۵٪ AW) 75% of available water | 0 | 0.34 h |
| | | 4 | 0.352 g |
| | | 8 | 0.365 e |
| لوم شنی SL | وجود ۵۰ درصد آب قابل‌استفاده خاک (۵۰٪ AW) 50% of available water | 0 | 0.34 h |
| | | 4 | 0.35 g |
| | | 8 | 0.357 f |

در هر ستون، میانگین‌های دارای یک حرف مشابه تفاوت معنی‌داری بر طبق آزمون LSD، در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Within each column, means followed by the same letter are not significantly different according to Fisher's least significant difference (LSD) test at $P \leq 0.05$.

**جدول ۸- مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری و نوع بافت خاک بر مقدار نسبت پوکی خاک.**

**Table 8- Mean comparison of the interaction effects of irrigation levels and soil texture on soil void ratio (e).**

| سطوح آبیاری Irrigation | بافت خاک Texture | نسبت پوکی Void ratio |
|---|---|---|
| وجود ۷۵ درصد آب قابل‌استفاده خاک (۷۵٪ AW) 75% of available water | لوم رسی CL | 0.75 a |
| وجود ۵۰ درصد آب قابل‌استفاده خاک (۵۰٪ AW) 50% of available water | | 0.721 b |
| وجود ۷۵ درصد آب قابل‌استفاده خاک (۷۵٪ AW) 75% of available water | لوم شنی SL | 0.539 c |
| وجود ۵۰ درصد آب قابل‌استفاده خاک (۵۰٪ AW) 50% of available water | | 0.533 d |

در هر ستون، میانگین‌های دارای یک حرف مشابه تفاوت معنی‌داری بر طبق آزمون LSD، در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Within each column, means followed by the same letter are not significantly different according to Fisher's least significant difference (LSD) test at $P \leq 0.05$.

## ظرفیت نگهداشت آب خاک

بر اساس نتایج خاک لوم رسی در مقایسه با خاک لوم شنی ظرفیت نگهداشت آب بیشتری داشت. همچنین، کاربرد پامیس در هر دو نوع خاک موجب افزایش ظرفیت نگهداشت آب شد، اگرچه میزان تأثیر آن در خاک لوم رسی بیشتر از خاک لوم شنی بود. همچنین با توجه به معنی‌دار بودن اثر متقابل بافت خاک × کاربرد پامیس، ظرفیت نگهداشت آب خاک به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع بافت خاک و کاربرد پامیس قرار گرفت (جداول ۳ و ۹). بیشترین مقدار ظرفیت نگهداشت آب خاک (۲۶/۹۷ درصد) در خاک لوم رسی همراه با کاربرد ۸ گرم پامیس بر کیلوگرم خاک مشاهده شد، در حالی‌که کمترین مقدار آن (۱۵/۱۴ درصد) مربوط به خاک لوم شنی بدون کاربرد پامیس (سطح صفر) بود (جدول ۹). این نتایج نشان داد که تفاوت ذاتی بین دو بافت خاک مورد بررسی، نقش مهمی در ظرفیت نگهداری آب داشته و افزودن

پامیس توانسته است این ویژگی را در هر دو خاک بهینه و تعدیل کند. در خاک لوم رسی، کاربرد ۴ و ۸ گرم پامیس بر کیلوگرم خاک موجب افزایش ظرفیت نگهداشت آب به‌ترتیب ۱۲/۷ و ۲۴/۳ درصد نسبت به تیمار شاهد (سطح صفر) شد. همچنین در خاک لوم شنی، افزایش ظرفیت نگهداشت آب در اثر کاربرد ۴ و ۸ گرم پامیس به‌ترتیب ۶/۲ و ۱۳/۰ درصد نسبت به عدم کاربرد پامیس بوده است (جدول ۹). اگرچه پاسخ خاک لوم شنی از نظر مقدار مطلق افزایش کمتر بود، اما روند افزایشی ظرفیت نگهداشت آب با افزایش سطح پامیس در این خاک نیز به‌طور بارزی مشاهده گردید.

**جدول ۹- مقایسه میانگین اثر متقابل بافت خاک و سطوح مختلف پامیس بر مقدار ظرفیت نگهداشت خاک.**

**Table 9- Mean comparison of the interaction effects of soil texture and pumice levels on WHC.**

| بافت Texture | سطوح پامیس Pumice ($gkg^{-1}$) | ظرفیت نگهداشت خاک(٪) Water Holding Capacity |
|---|---|---|
| لوم رسی CL | 0 | 21.70 c |
| | 4 | 24.46 b |
| | 8 | 26.97 a |
| لوم شنی SL | 0 | 15.14 f |
| | 4 | 16.08 e |
| | 8 | 17.11 d |

در هر ستون، میانگین‌های دارای یک حرف مشابه تفاوت معنی‌داری بر طبق آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Within each column, means followed by the same letter are not significantly different according to Fisher's least significant difference (LSD) test at $P \leq 0.05$.

## شاخص خمیری خاک

نتایج نشان داد که ویژگی‌های خمیری خاک (PI) عمدتاً تحت تأثیر نوع بافت خاک و کاربرد پامیس قرار گرفته است، به‌طوری‌که خاک لوم رسی در مقایسه با خاک لوم شنی دارای شاخص خمیری بیشتری بود. اثر اصلی بافت خاک و کاربرد پامیس و همچنین اثر متقابل بافت خاک × کاربرد پامیس بر شاخص خمیری معنی‌دار بود (جدول ۳؛ $P\leq0.01$). لذا مقایسهٔ میانگین PI بر اساس اثر متقابل معنی‌دار بافت و کاربرد پامیس انجام شد. به‌طور کلی، افزایش مقدار پامیس موجب افزایش جزئی شاخص خمیری در هر دو خاک شد، اما میزان این تغییر در خاک لوم رسی بیشتر از خاک لوم شنی بود (جدول ۱۰). بیشترین مقدار شاخص خمیری (۷/۸۶ درصد) در خاک لوم رسی همراه با کاربرد ۸ گرم پامیس بر کیلوگرم خاک مشاهده شد، در حالی‌که کمترین مقدار آن (۶/۵۵ درصد) در خاک لوم شنی بدون کاربرد پامیس (سطح صفر) به دست آمد (جدول ۱۰). کاربرد ۴ و ۸ گرم پامیس بر کیلوگرم خاک در خاک لوم رسی موجب افزایش شاخص خمیری به‌ترتیب ۱/۳ و ۳/۴ درصد نسبت به تیمار بدون پامیس (صفر) شد. همچنین، در خاک لوم شنی، کاربرد ۴ و ۸ گرم پامیس افزایش ۱/۸ و ۲/۲ درصدی این شاخص را نسبت به شاهد (بدون پامیس) ایجاد کرد. اگرچه میزان افزایش شاخص خمیری در اثر کاربرد پامیس نسبتاً محدود بود، اما روند افزایشی آن در هر دو نوع خاک نشان داد که افزودن پامیس می‌تواند بر رفتار خمیری خاک به‌طور بارزی اثرگذار باشد. به‌طور کلی نتایج مشخص کرد که کاربرد پامیس باعث تغییر معنی‌دار شاخص خمیری خاک شد، اما میزان این اثر به نوع بافت خاک وابسته بود، به‌گونه‌ای که بیشترین تغییرات در خاک لوم رسی مشاهده شد (جدول ۱۰).

**جدول ۱۰- مقایسه میانگین اثر متقابل نوع بافت خاک و سطوح مختلف پامیس بر مقدار شاخص خمیری.**

**Table 10- Mean comparison of the interaction effects of soil texture and pumice levels on soil plasticity index.**

| بافت خاک Texture | سطوح پامیس Pumice ($gkg^{-1}$) | شاخص خمیری Plasticity Index |
|---|---|---|
| لوم رسی CL | 0 | 7.60 c |
| | 4 | 7.70 b |
| | 8 | 7.86 a |
| لوم شنی SL | 0 | 6.55 e |
| | 4 | 6.67 d |
| | 8 | 6.70 d |

در هر ستون، میانگین‌های دارای یک حرف مشابه تفاوت معنی‌داری بر طبق آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Within each column, means followed by the same letter are not significantly different according to Fisher's least significant difference (LSD) test at $P \leq 0.05$.

### میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها

نتایج نشان داد که کاربرد پامیس موجب بهبود و اصلاح ویژگی‌های مرتبط با پایداری و اندازه خاکدانه‌ها در هر دو بافت خاک شد، اگرچه مقدار این پاسخ به نوع بافت خاک وابسته بود. خاک لوم رسی مقادیر بالاتری از شاخص‌های اندازهٔ خاکدانه‌ای را نسبت به خاک لوم شنی نشان داد؛ با این حال، افزودن پامیس در هر دو خاک باعث افزایش قطر متوسط خاکدانه‌ها و بهبود تشکیل و پایداری ساختار خاک گردید (جداول ۴ و ۱۱). اثر متقابل بافت خاک × کاربرد پامیس بر شاخص‌های میانگین وزنی قطر (MWD) و هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD) معنی‌دار بود (جدول ۴). در روش الک خشک، کاربرد پامیس موجب افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در هر دو خاک شد، اما این افزایش در خاک لوم رسی محسوس‌تر بود. در این خاک، افزودن ۴ و ۸ گرم پامیس بر کیلوگرم خاک، مقدار MWD را نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب ۱۱/۵ و ۱۲/۷ درصد افزایش داد و مقدار آن را از ۳/۴۶ به ۳/۸۶ و ۳/۹۰ میلی‌متر رساند. در خاک لوم شنی نیز کاربرد پامیس باعث افزایش MWD شد، اما دامنهٔ این تغییر کمتر بود؛ به‌طوری‌که مصرف ۸ گرم پامیس مقدار این شاخص را تنها ۵/۵ درصد نسبت به شاهد افزایش داد (جدول ۱۱). روند مشابهی برای میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD) در روش الک خشک مشاهده گردید. در خاک لوم رسی، کاربرد پامیس موجب افزایش GMD از ۱/۵۴ میلی‌متر در تیمار شاهد (سطح صفر پامیس) به ۱/۶۵ میلی‌متر در تیمارهای ۴ و ۸ گرم پامیس شد. در خاک لوم شنی، اگرچه مقادیر مطلق GMD کمتر بود، اما افزایش نسبی در سطح بالاتر پامیس بیشتر و بارزتر مشاهده شد؛ به‌طوری‌که کاربرد ۸ گرم پامیس باعث افزایش ۱۶/۵ درصدی GMD نسبت به تیمار بدون پامیس (سطح صفر) گردید (جدول ۱۱).

بررسی MWD خاکدانه‌ها با روش الک تر نیز تأثیر مثبت پامیس بر پایداری خاکدانه‌ها در برابر تخریب ناشی از آب را تأیید کرد. در خاک لوم رسی، کاربرد ۸ گرم پامیس موجب افزایش معنی‌دار MWD از ۱/۱۴ به ۱/۲۴ میلی‌متر شد، در حالی‌که تغییرات این شاخص در خاک لوم شنی محدودتر بود و اختلاف بین سطوح پامیس از نظر آماری معنی‌دار نبود (جدول ۱۱). به‌طور کلی، نتایج مشخص کرد که کاربرد پامیس، به‌ویژه در سطح ۸ گرم بر کیلوگرم خاک، موجب بهبود شاخص‌های مرتبط با اندازه و پایداری خاکدانه‌ها شده است. اگرچه خاک لوم رسی به دلیل ویژگی‌های ذاتی خود مقادیر بالاتری از MWD و GMD داشت، اما پاسخ نسبی خاک لوم شنی به کاربرد سطوح مختلف پامیس نشان داد که این ماده می‌تواند به‌عنوان یک اصلاح‌کننده دارای آثار بارزتر و مشهودتر بر ساختمان خاک‌های سبک باشد (جدول ۱۱).

**جدول ۱۱- مقایسهٔ میانگین اثر متقابل بافت خاک و کاربرد پامیس بر میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها.**

**Table 11. Comparison of interaction means of soil texture and pumice application rates on the MWD and GMD of soil aggregates.**

| بافت خاک Texture | پامیس($g\ kg^{-1}$) Pumice | MWD خشک (mm) | GMDخشک(mm) | GMD تر(mm) |
|---|---|---|---|---|
| لوم رسی(CL) | 0 | $3.46^{b}$ | $1.54^{b}$ | $1.14^{b}$ |
| لوم رسی(CL) | 4 | $3.86^{a}$ | $1.65^{a}$ | $1.17^{b}$ |
| لوم رسی(CL) | 8 | $3.90^{a}$ | $1.65^{a}$ | $1.24^{a}$ |
| لوم شنی(SL) | 0 | $2.34^{c}$ | $1.09^{d}$ | $0.84^{c}$ |
| لوم شنی(SL) | 4 | $2.36^{c}$ | $1.16^{d}$ | $0.85^{c}$ |
| لوم شنی(SL) | 8 | $2.47^{c}$ | $1.27^{c}$ | $0.87^{c}$ |

در هر ستون، میانگین‌های دارای یک حرف مشابه تفاوت معنی‌داری بر طبق آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Within each column, means followed by the same letter are not significantly different according to the LSD test ($P \leq 0.05$).

## بحث

### اثر تیمارها بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و ارتباط آن با رشد گیاه

یافته‌های حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که کاربرد پامیس به‌عنوان یک اصلاح‌کننده معدنی متخلخل، موجب بهبود مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی خاک مشتمل بر کاهش جرم مخصوص ظاهری، افزایش تخلخل، بهبود نسبت پوکی و افزایش ظرفیت نگهداری آب شده است. این تغییرات نشان می‌دهد که پامیس با اصلاح و بهبود ساختار فیزیکی خاک، احتمالاً محیط مناسب‌تری برای ذخیره و حرکت آب، تبادل هوا و توسعهٔ سیستم ریشه فراهم آورده است. با این حال، میزان تأثیر این ماده اصلاح‌کننده به نوع بافت خاک و شرایط رطوبتی وابسته بود، زیرا ویژگی‌های اولیه و نیز ذاتی خاک نقش تعیین‌کننده‌ای در نحوه تعامل ذرات پامیس با اجزای خاک و تغییر رفتار فیزیکی آن ایفا می‌کنند. کاهش جرم مخصوص ظاهری در تیمارهای حاوی پامیس را می‌توان عمدتاً به ویژگی‌های ساختاری این ماده نسبت داد. پامیس به دلیل منشأ آذرین آتشفشانی، چگالی پایین و وجود

شبکه‌ای از منافذ داخلی، در مقایسه با بسیاری از اجزای معدنی خاک دارای جرم مخصوص کمتری است. افزودن این ماده موجب کاهش میانگین چگالی تودهٔ خاک و افزایش سهم اجزای سبک و متخلخل در ساختار خاک می‌شود. این نتایج با مطالعات اخیر دربارهٔ نقش مواد معدنی متخلخل در اصلاح ساختار خاک و بهبود ویژگی‌های فیزیکی–مکانیکی و هیدرولیکی از نظر رشد گیاه، همخوانی دارد (Pollacco et al., 2024).

افزایش تخلخل و نسبت پوکی در اثر کاربرد پامیس نشان‌دهنده تغییر در حجم و توزیع منافذ خاک است. ساختار متخلخل پامیس شامل مجموعه‌ای از منافذ داخلی و خارجی است که پس از اختلاط با خاک می‌تواند فضای منفذی جدیدی ایجاد کرده و پیوستگی شبکه منافذ را تغییر دهد. افزایش منافذ کوچک‌تر نقش مهمی در ذخیره آب و کاهش سرعت تخلیه و یا خروج رطوبت دارد، در حالی‌که افزایش منافذ بزرگ‌تر می‌تواند موجب بهبود تهویه، نفوذ آب و تبادل گازها در خاک گردد؛ بنابراین، اثر اصلی پامیس را می‌توان ایجاد تعادل مناسب‌تر بین ظرفیت نگهداری آب و انتقال و تبادل هوا و گازها در محیط خاک دانست؛ تعادلی که برای حفظ عملکردهای خاک و فعالیت زیستی ریشه (حیات گیاه) اهمیت ویژه‌ای دارد. افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک در تیمارهای دارای پامیس نیز بیانگر نقش این ماده در بهبود روابط آب–خاک است. منافذ داخلی پامیس قادرند بخشی از آب را در ساختار خود ذخیره کرده و آن را به‌تدریج در اختیار خاک اطراف قرار دهند. این ویژگی باعث کاهش سرعت کاهش رطوبت خاک و افزایش مدت زمان دسترسی گیاه به آب قابل استفاده می‌شود. اهمیت این اثر در شرایط تنش رطوبتی و کم‌آبیاری بیشتر است، زیرا کاهش سرعت تخلیهٔ آب خاک می‌تواند از افت سریع پتانسیل آب جلوگیری کرده و شرایط پایدارتری را برای فعالیت گیاه ایجاد نماید. نقش اصلاح‌کننده‌های متخلخل در افزایش ظرفیت نگهداری آب و بهبود عملکرد خاک در شرایط کم‌آبی نیز در مطالعات جدید Kong و همکاران (۲۰۲۱)، Pollacco و همکاران (۲۰۲۴) و نیز Leuther و همکاران (۲۰۲۱) مورد تأکید قرار گرفته و با یافته‌های پژوهش حاضر مطابقت دارد.

تفاوت پاسخ دو بافت خاک به کاربرد پامیس نیز نشان داد که عملکرد این اصلاح‌کننده به ویژگی‌های اولیه و ذاتی خاک وابسته است. خاک لوم رسی به دلیل مقدار بیشتر ذرات ریز، سطح ویژه بالاتر و ظرفیت طبیعی بیشتر برای نگهداری آب، توانایی بیشتری در بهره‌گیری از منافذ ایجادشده توسط پامیس داشت. همانگونه که در تحقیقات Malekian و همکاران (۲۰۱۲) نیز اشاره شده است، در چنین شرایطی، اضافه شدن پامیس می‌تواند موجب بهبود تعادل بین ذخیره آب و تهویهٔ خاک شود. در مقابل، خاک لوم شنی به دلیل غالب بودن منافذ درشت و سرعت بالاتر زهکشی، اگرچه از کاربرد پامیس سود برد، اما بخشی از اثر اصلاحی آن به دلیل محدودیت ذاتی خاک در حفظ آب کاهش یافت. این موضوع نشان می‌دهد که کارایی اصلاح‌کننده‌های معدنی متخلخل تابعی از برهم‌کنش میان ویژگی‌های مادهٔ اصلاح‌کننده و خصوصیات فیزیکی خاک اولیه است. کاهش جرم مخصوص ظاهری، افزایش فضای منفذی و بهبود نگهداری آب، موجب افزایش کیفیت فیزیکی خاک و فراهم شدن شرایط مناسب‌تر برای جذب آب توسط گیاه شد؛ بنابراین، افزایش رشد مشاهده‌شده در گیاه نعناع فلفلی را می‌توان پیامد نهایی زنجیره‌ای از تغییرات فیزیکی خاک دانست که با اصلاح و یا بهبود ساختار خاک آغاز شده و از طریق بهبود روابط آب–خاک–ریشه به افزایش عملکرد و زیست‌تودهٔ گیاه منجر شده است. یافته‌های پژوهش نشان داد که کاربرد پامیس می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای بهبود خصوصیات خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و ارتقای تاب‌آوری سیستم خاک–گیاه در شرایط محدودیت آبی مورد استفاده قرار گیرد که همسو با یافته‌های تحقیقات اخیر بوده است (Kong et al., 2021; Kong et al., 2022; Yerli, 2026).

## اثر کاربرد پامیس بر پایداری ساختمان خاک و نقش آن در بهبود کیفیت فیزیکی خاک

از یافته‌های مهم این پژوهش، افزایش شاخص‌های پایداری ساختمان خاک شامل میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD) در پاسخ به کاربرد سطوح مختلف پامیس بود. افزایش این شاخص‌ها نشان می‌دهد که افزودن پامیس علاوه بر تغییر در ویژگی‌های مرتبط با فضای منفذی خاک، بر سازمان‌یافتگی ذرات و مقاومت ساختمان خاک در برابر تخریب فیزیکی نیز اثرگذار بوده است. پایداری مناسب خاکدانه‌ها از مؤلفه‌های مهم کیفیت فیزیکی خاک محسوب می‌شود، زیرا ساختار پایدار خاک نقش اساسی در حفظ پیوستگی منافذ، کنترل جریان آب و جلوگیری از تخریب ساختار خاک در اثر عوامل محیطی دارد. بهبود پایداری خاکدانه‌ها پس از کاربرد پامیس را می‌توان به ویژگی‌های فیزیکی و ساختاری این ماده نسبت داد. پامیس دارای ساختار سلولی، وزن مخصوص پایین و شبکه‌ای از منافذ داخلی (ماکرو و مایکروپورز) است که پس از اختلاط با خاک می‌تواند به‌عنوان یک جزء پایدارکننده در ماتریس خاک عمل کند. حضور ذرات پامیس موجب تغییر آرایش ذرات خاک، کاهش فشردگی بیش از حد و ایجاد شرایط مناسب‌تر برای تشکیل و حفظ خاکدانه‌های پایدار می‌شود.

بنابراین، افزایش MWD و GMD در تیمارهای دارای پامیس احتمالاً حاصل اثر مستقیم این ماده بر سازمان ساختاری

خاک و اثرات غیرمستقیم آن بر فرآیندهای زیستی مرتبط با تشکیل خاکدانه بوده است. بر اساس نتایج، تفاوت پاسخ دو نوع بافت خاک به کاربرد پامیس نیز اهمیت نقش ویژگی‌های اولیه خاک را نشان داد. خاک لوم رسی به دلیل مقدار بیشتر ذرات ریز، سطح ویژه بالاتر و حضور بیشتر عوامل اتصال‌دهنده طبیعی، ظرفیت بالاتری برای تشکیل و حفظ خاکدانه‌های پایدار دارد؛ بنابراین، افزودن پامیس در این خاک می‌تواند اثر بیشتری بر سازمان‌دهی ساختمان خاک و افزایش شاخص‌های پایداری داشته باشد. در مقابل، در خاک لوم شنی، به دلیل مقدار کمتر ذرات ریز و محدودیت عوامل چسباننده طبیعی، ظرفیت تشکیل خاکدانه‌های پایدار کمتر است؛ اگرچه کاربرد پامیس موجب بهبود شاخص‌های پایداری در این بافت نیز گردید، ولی میزان آن ممکن است محدودتر باشد. افزایش MWD و GMD در اثر کاربرد پامیس نشان‌دهنده بهبود مقاومت ساختمان خاک در برابر فرآیندهای تخریبی و حفظ بهتر سازمان منافذ است. خاک‌هایی با خاکدانه‌های پایدارتر، توانایی بیشتری در حفظ ساختار فیزیکی–مکانیکی خود در برابر تغییرات محیطی، به‌ویژه چرخه‌های خشک و مرطوب شدن، دارند. مطالعات اخیر نیز نشان داده‌اند که استفاده از اصلاح‌کننده‌های معدنی متخلخل می‌تواند از طریق تغییر آرایش ذرات، بهبود ساختار منافذ و افزایش مقاومت خاک در برابر تخریب ساختاری، کیفیت فیزیکی خاک را ارتقا و بهبود دهد (Leuther et al., 2021; Pollacco et al., 2024; Yerli, 2026). نتایج این پژوهش نشان داد پامیس می‌تواند به‌عنوان اصلاح‌کنندهٔ ساختاری، در بهبود پایداری ساختمان خاک و حفظ عملکرد فیزیکی–مکانیکی آن نیز نقش ایفا کند. همانگونه که مشاهده شد بهبود شرایط فیزیکی خاک در اثر کاربرد پامیس سبب بهبود و ارتقای حیات و عملکرد گیاه نیز می‌شود.

## اثر کاربرد پامیس و رژیم‌های آبیاری بر رشد گیاه و تعامل خاک–گیاه تحت شرایط تنش کم‌آبیاری

در پژوهش حاضر، اثر کاربرد پامیس به‌عنوان مادهٔ بهبوددهنده و اصلاح‌کنندهٔ معدنی متخلخل بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک و نیز رشد گیاه نعناع فلفلی، تحت دو رژیم آبیاری (شرایط بهینهٔ رطوبتی و شرایط تنش کم‌آبی) مبتنی بر محتوای رطوبتی خاک (مقدار رطوبت قابل دسترس و قابل استفادهٔ گیاه (دامنهٔ AW)) و در دو بافت متفاوت خاک مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش مقدار کمبود محتوای رطوبتی خاک (کاهش رطوبت قابل استفاده برای گیاه) از طریق کاهش آب قابل دسترس در محیط ریشه (دامنهٔ رطوبتی AW)، موجب کاهش تجمع زیست‌تودهٔ اندام‌هوایی گیاه شده است. این کاهش رشد و به نوعی عملکرد گیاه مربوطه، نشان‌دهندهٔ تأثیر مستقیم محدودیت آب بر روابط متقابل آب–خاک–گیاه و کاهش توانایی گیاه برای حفظ شرایط مناسب رشد در محیط با رطوبت کم و یا تنش کم‌آبیاری است. این یافته با گزارش‌های اخیر دربارهٔ نقش محدودیت آب در کاهش رشد و عملکرد گیاهان در شرایط تنش کم‌آبیاری همخوانی دارد (Seleiman et al., 2021; Zandalinas et al., 2021). در مقابل، کاربرد پامیس توانست بخشی از اثرات منفی کاهش رطوبت خاک (تنش کم‌آبیاری) در کاهش زیست‌تودهٔ گیاهی را تعدیل کند. این پاسخ احتمالاً به ویژگی‌های تخلخل و سطح ویژهٔ پامیس و توانایی آن در بهبود شرایط فیزیکی محیط ریشه مرتبط است. مواد اصلاح‌کنندهٔ معدنی متخلخل می‌توانند با تغییر شرایط ساختاری خاک، محیط مناسب‌تری برای نگاهداشت آب و فعالیت ریشه ایجاد کنند و در نتیجه، ظرفیت گیاه برای تحمل دوره‌های محدودیت آبی را افزایش دهند (Kong et al., 2021; Pollacco et al., 2024). نتایج نشان داد عوامل اصلی پژوهش شامل رژیم‌های آبیاری، نوع بافت و سطوح اعمال پامیس بر غالب خصوصیات مورد بررسی در خاک آثار بارز و معنی‌داری داشته است و پاسخ سامانهٔ خاک–گیاه به کاربرد پامیس به نوع بافت خاک وابستگی زیادی نشان داده و این عامل (بافت) بر بیشتر خصوصیات فیزیکی خاک و عملکرد گیاه نیز تأثیر بارزی داشته است. همچنین بر اساس جداول تحلیل واریانس ارائه شده، معنی‌دار بودن برخی برهم‌کنش‌های دوگانه و سه‌گانه بین عوامل آزمایشی نیز نشان داد که پاسخ ویژگی‌های فیزیکی خاک و گیاه به اعمال سطوح پامیس تا حد زیادی تحت تأثیر شرایط رطوبتی و بافت خاک قرار گرفته است. البته تفاوت مشاهده‌شده بین خاک لوم شنی و لوم رسی بیانگر آن است که ویژگی‌های اولیهٔ خاک، از جمله توانایی طبیعی خاک در حفظ آب و وضعیت ساختاری آن، نقش مهمی در تعیین میزان اثرگذاری اصلاح‌کننده‌ها دارند. به همین دلیل، کارایی پامیس نمی‌تواند مستقل از خصوصیات ذاتی خاک ارزیابی شود و باید در چارچوب تعامل میان نوع خاک، شرایط رطوبتی و نیاز آبی گیاه مورد بررسی قرار گیرد (Leuther et al., 2021; Carminati et al., 2024). در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان داد که کاربرد پامیس می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مدیریتی برای افزایش تاب‌آوری سامانهٔ خاک–گیاه در برابر کمبود آب مطرح شود. اثر مثبت پامیس تنها به افزایش ذخیره آب محدود نمی‌شود، بلکه از طریق بهبود خصوصیات فیزیکی خاک و تعدیل اثرات تنش کم‌آبیاری، امکان حفظ رشد گیاه را در شرایط محدودیت آبی فراهم می‌آورد. این نتایج فرضیهٔ اصلی پژوهش مبنی بر اینکه اصلاح شرایط فیزیکی خاک توسط پامیس احتمالاً می‌تواند اثرات منفی تنش کم‌آبیاری را کاهش دهد، تأیید می‌کند که با نتایج Kong و همکاران

(۲۰۲۱)، Malekian و همکاران (۲۰۱۲) و همچنین Sahin و Anapali (۲۰۰۶) همخوانی دارد.

## اثر تیمارها بر رشد گیاه نعناع فلفلی و نقش پامیس در کاهش اثرات تنش رطوبتی

نتایج نشان داد که تنش رطوبتی و کم‌آبیاری موجب کاهش معنی‌دار و بارز وزن‌تر و وزن‌خشک گیاه شد، در حالی‌که کاربرد پامیس توانست رشد گیاه را در شرایط محدودیت آب ارتقا و بهبود دهد. کاهش زیست‌تودهٔ گیاهی مشاهده‌شده در شرایط تنش رطوبتی و کم‌آبیاری را می‌توان نتیجهٔ مستقیم کاهش توانایی گیاه در حفظ رشد فعال و عملکرد خود، تحت محدودیت آبی دانست (Seleiman et al., 2021; Zandalinas et al., 2021). افزایش زیست‌تودهٔ گیاه در تیمارهای دارای پامیس نشان داد که این ماده توانسته است شرایط مناسب‌تری برای استمرار رشد گیاه در دوره‌های محدودیت آب و تنش کم‌آبیاری فراهم آورد. بهبود رشد و عملکرد مشاهده‌شده می‌تواند ناشی از کاهش کمبود رطوبت و افزایش نگاهداشت آب در محیط ریشه و افزایش پایداری وضعیت آبی گیاه بوده باشد.

پاسخ گیاه به کاربرد پامیس تحت تأثیر نوع بافت خاک نیز قرار گرفت. بر اساس نتایج، اگرچه کاربرد پامیس در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی موجب بهبود رشد و عملکرد گیاه شد، در خاک لوم رسی، احتمالاً به دلیل وجود ذرات رس و سیلت بالاتر خاک دارای ظرفیت تبادل کاتیونی، عناصر غذایی و نیز مادهٔ آلی بالاتری برای رشد گیاه بوده است، البته اثر اصلاحی پامیس نیز سبب تشدید و هم‌افزایی این آثار گردیده است. در مقابل، در خاک لوم شنی، علاوه بر سرعت بالاتر از دست رفتن آب و محدودیت ذاتی در نگهداری رطوبت، احتمالاً به دلیل مقادیر کمتر ذرات رس و سیلت که مبنای تغذیهٔ گیاهی نیز هستند، پاسخ گیاه به کاربرد پامیس محدودتر بود. این تفاوت نشان می‌دهد که میزان تأثیر اصلاح‌کننده‌های خاک بر رشد گیاه به تعامل میان ویژگی‌های ذاتی و اولیهٔ خاک و سطوح رطوبتی نیز وابسته است. همچنین، افزایش مقدار پامیس از ۴ به ۸ گرم بر کیلوگرم خاک همیشه موجب افزایش متناسب رشد گیاه نگردید. این موضوع بیانگر آن است که رابطهٔ بین مقدار مصرف اصلاح‌کنندهٔ خاک (بهبود دهنده[1]) و پاسخ گیاه الزاماً خطی نیست و پس از دست‌یابی محیط ریشه به شرایط مطلوب‌تر فعالیت، افزایش بیشتر مقدار پامیس ممکن است تأثیر محدود و حتی کمتری بر افزایش زیست‌توده داشته باشد (Seleiman et al., 2021)؛ بنابراین، تعیین مقدار بهینه مصرف پامیس باید با توجه به ویژگی‌های خاک، سطوح تنش رطوبتی و حساسیت گیاه مورد نظر انجام شود. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که پامیس با بهبود شرایط رطوبتی خاک، توانست شرایط مناسب‌تری برای رشد بیشتر گیاه نعناع فلفلی فراهم آورد.

## سنتز یافته‌ها و تبیین مکانیسم اثر پامیس بر سامانهٔ خاک–گیاه

در مجموع، نتایج تحقیق حاضر نشان داد که اثر مثبت کاربرد پامیس بر رشد گیاه نعناع فلفلی و کاهش پیامدهای کمبود رطوبت در–دسترس، حاصل یک فرآیند چندعاملی در سامانهٔ خاک–گیاه بوده است و نمی‌توان آن را تنها به تغییر یک ویژگی منفرد خاک نسبت داد. کاربرد پامیس موجب ایجاد شرایط فیزیکی مناسب‌تر برای رشد گیاه شد و از طریق بهبود تعامل میان آب، هوا و فضای ریشه، ظرفیت خاک برای حمایت از رشد گیاه را افزایش داد. این تغییرات در نهایت باعث شد گیاه در شرایط محدودیت آبی توانایی بیشتری برای حفظ فعالیت‌های حیاتی و ادامه رشد داشته باشد. یکی از نکات مهم این پژوهش آن است که نقش پامیس در کاهش اثرات تنش کم‌آبیاری صرفاً به افزایش مقدار آب ذخیره‌شده در خاک محدود نمی‌شود، بلکه این ماده با ایجاد یک محیط پایدارتر، شرایط مناسب‌تری برای تداوم جذب آب و عملکرد ریشه فراهم می‌کند. همچنان که در تحقیقات Pollacco و همکاران (۲۰۲۴)،Kong و همکاران (۲۰۲۱) و Malekian و همکاران (۲۰۱۲) نیز بدان اشاره شده و اثبات شده است، در شرایط تنش رطوبتی و محدودیت‌های کم‌آبیاری، کاهش تدریجی آب قابل استفادهٔ خاک معمولاً با افزایش مقاومت انتقال آب در مسیر خاک–ریشه همراه است و در نهایت موجب کاهش جذب رطوبت مورد نیاز گیاه می‌شود. کاربرد پامیس در این شرایط، با تعدیل شرایط فیزیکی–مکانیکی–هیدرولیکی خاک پیرامون ریشهٔ گیاه، می‌تواند مقدار و درجهٔ این محدودیت را کاهش داده و امکان حفظ بهتر وضعیت آبی گیاه را فراهم آورد. نتایج همچنین نشان داد کاربرد پامیس در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی موجب بهبود شرایط رشد گیاه شد و پاسخ سامانهٔ خاک–گیاه به کاربرد پامیس به‌شدت تحت تأثیر ویژگی‌های اولیه خاک و شرایط رطوبتی قرار دارد. بر اساس یافته‌های پژوهش، فرضیهٔ اصلی مبنی بر اینکه کاربرد پامیس از طریق اصلاح شرایط فیزیکی–هیدرولیکی خاک می‌تواند اثرات منفی تنش کم‌آبیاری و محدودیت رطوبتی را کاهش داده و رشد نعناع فلفلی را بهبود دهد، تأیید شد.

[1] Soil conditioner/Improver

## محدودیت‌های پژوهش و پیشنهادات برای تحقیقات آینده

اگرچه نتایج این پژوهش مشخص کرد که کاربرد پامیس می‌تواند از طریق اصلاح برخی ویژگی‌های خاک، اثرات منفی تنش کم‌آبی را کاهش داده و رشد گیاه را بهبود دهد، برخی جنبه‌های مرتبط با فرآیندهای خاک–گیاه در این مطالعه بررسی نشدند. در این پژوهش، پاسخ سامانه خاک–گیاه بر اساس ویژگی‌های فیزیکی خاک و شاخص‌های رشد گیاه ارزیابی شد؛ بنابراین، بررسی فرآیندهای تکمیلی مانند تغییرات دقیق وضعیت آب خاک، روابط آب–خاک–گیاه و شاخص‌های فیزیولوژیکی گیاه می‌تواند در مطالعات آینده به درک جامع‌تر سازوکارهای مؤثر در حفظ رشد گیاه تحت شرایط تنش کم‌آبیاری و محدودیت‌های رطوبتی کمک کند. همچنین، اگرچه تغییرات ایجادشده در جرم مخصوص ظاهری، تخلخل، نسبت پوکی، ظرفیت نگهداری آب و پایداری خاکدانه‌ها نشان‌دهنده اثر اصلاحی پامیس بود، برخی ویژگی‌های مکانیکی و هیدرولیکی پیشرفتهٔ خاک، از جمله تغییرات منحنی مشخصهٔ رطوبتی (SMCC)، هدایت هیدرولیکی (HC) و توزیع دقیق اندازه منافذ (PoSD)، به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری نشدند. بررسی این خصوصیات در تحقیقات آینده می‌تواند ارتباط میان تغییرات ساختاری خاک و دسترسی واقعی گیاه به آب را با دقت بیشتری مشخص کند. از آنجا که این آزمایش در شرایط کنترل‌شده گلخانه‌ای انجام شد، انجام مطالعات مزرعه‌ای بلندمدت تحت شرایط طبیعی چرخه‌های خشک و مرطوب شدن، بررسی دامنهٔ وسیع‌تر مقادیر مصرف پامیس و ارزیابی تأثیر اندازه و ویژگی‌های فیزیکی ذرات پامیس می‌تواند برای تعیین مقدار بهینهٔ مصرف و بررسی پیوستگی و پایداری اثرات اصلاحی آن ضروری باشد

.

## نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به مطالعهٔ اثر سطوح مختلف پامیس بر ویژگی‌های فیزیکی خاک و رشد گیاه نعناع فلفلی تحت دو رژیم رطوبتی (رطوبت بهینه و تنش کم‌آبیاری) و در دو بافت خاک لوم رسی و لوم شنی پرداخت. نتایج نشان داد که افزایش کمبود رطوبت قابل استفاده و در–دسترس گیاه تحت محدودیت کم‌آبیاری موجب کاهش وزن‌تر و وزن خشک و بالطبع عملکرد گیاه شد. با این حال، کاربرد مقادیر مورد بررسی پامیس توانست اثرات منفی محتوای‌کم رطوبت خاک را کاهش داده و رشد و عملکرد گیاه را بهبود دهد. اثر مثبت پامیس عمدتاً به توانایی این ماده در اصلاح شرایط فیزیکی خاک مرتبط بود. کاربرد پامیس تاحدی موجب اصلاح و بهبود جرم مخصوص ظاهری، فضای منفذی، نسبت پوکی، ظرفیت نگهداری آب و پایداری خاکدانه‌ها شد و در نتیجه شرایط مناسب‌تری برای توسعهٔ ریشه، دسترسی گیاه به آب و حفظ عملکرد گیاه تحت شرایط محدودیت آبی فراهم کرد. پاسخ خاک و گیاه به کاربرد پامیس، همچنین، تحت تأثیر نوع بافت خاک قرار گرفت، به‌طوری‌که میزان اثرگذاری این اصلاح‌کنندهٔ معدنی و متخلخل به طور بارز و معنی‌دار با ویژگی‌های ذاتی و اولیهٔ خاک همچون مقادیر شن، سیلت و رس خاک مرتبط بوده است. با این وجود، کاربرد پامیس در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و رشد گیاه گردید. در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان داد که پامیس می‌تواند به‌عنوان یک اصلاح‌کنندهٔ معدنی مؤثر برای بهبود کیفیت فیزیکی خاک و کاهش اثرات تنش کم‌آبی در کشت نعناع فلفلی مورد استفاده قرار گیرد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، به‌دلیل فراهم‌کردن امکانات آزمایشگاهی، تجهیزات و حمایت‌های علمی لازم برای انجام این پژوهش، صمیمانه قدردانی نمایند. همچنین از تمامی کارشناسان و همکارانی که در مراحل مختلف اجرای آزمایش، نمونه‌برداری، انجام اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و گردآوری داده‌ها همکاری و همراهی نمودند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

**References**


1. Bagnall, D.K., Morgan, C.L.S. and et al. (2022) 'Carbon-sensitive pedotransfer functions for plant available water', *Soil Science Society of America Journal*, 86, pp. 1285–1298. doi:10.1002/saj2.20395.
2. Blanchy, G., Bragato, G., Di Bene, C., Jarvis, N., Larsbo, M., Meurer, K. and Garré, S. (2023) 'Soil and crop management practices and the water regulation functions of soils: A qualitative synthesis of meta-analyses relevant to European agriculture', *SOIL*, 9, pp. 1–21. doi:10.5194/soil-9-1-2023.
3. Bouyoucos, G.J. (1962) 'Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils', *Agronomy Journal*, 54(5), pp. 464–465. doi:10.2134/agronj1962.00021962005400050028x.
4. Chiappero, J., Cappellari, L. del R., Palermo, T.B., Giordano, W. and Banchio, E. (2022) 'Influence of drought stress and PGPR inoculation on essential oil yield and volatile organic compound emissions in *Mentha piperita*', *Horticulturae*, 8(12), p. 1120. doi:10.3390/horticulturae8121120.
5. Danielson, R.E. and Sutherland, P.L. (1986) 'Porosity', in Klute, A. (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. 2nd edn. Madison, WI: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, pp. 443–461.
6. García-Caparrós, P., Romero, M.J., Llanderal, A., Cermeño, P., Lao, M.T. and Segura, M.L. (2019) 'Effects of drought stress on biomass, essential oil content, nutritional parameters, and costs of production in six Lamiaceae species', *Water*, 11(3), p. 573. doi:10.3390/w11030573.
7. Kang, M.W., Yibeltal, M., Kim, Y.H., Oh, S.J., Lee, J.C., Kwon, E.E. and Lee, S.S. (2022) 'Enhancement of soil physical properties and soil water retention with biochar-based soil amendments', *Science of the Total Environment*, 836, p. 155746. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.155746.
8. Kemper, W.D. and Rosenau, R.C. (1986) 'Aggregate stability and size distribution', in Klute, A. (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. 2nd edn. Madison, WI: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, pp. 425–442.
9. Klute, A. (ed.) (1986) *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. 2nd edn. Madison, WI: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.
10. Kong, C., Camps-Arbestain, M., Clothier, B.E., Bishop, P. and Macías Vázquez, F. (2021) 'Use of either pumice or willow-based biochar amendments to decrease soil salinity under arid conditions', *Environmental Technology & Innovation*, 24, p. 101849. doi:10.1016/j.eti.2021.101849.
11. Kong, C., Camps-Arbestain, M. and Clothier, B.E. (2022) 'Influence of the physical properties of pumice and biochar amendments on the soil's mobile and immobile water: implications for use in saline environments', *Soil Research*, 60(3), pp. 234–241. doi:10.1071/SR20327.
12. Leuther, F. and Schlüter, S. (2021) 'Impact of freeze–thaw cycles on soil structure and soil hydraulic properties', *SOIL*, 7(1), pp. 179–191. doi:10.5194/soil-7-179-2021.
13. Malekian, A., Valizadeh, E., Dastoori, M., Samadi, S., & Bayat, V. (2012). Soil water retention and maize (Zea mays L.) growth as effected by different amounts of pumice. Australian Journal of Crop Science, 6(3), 450–454.
14. Mittler, R., Zandalinas, S.I., Fichman, Y. and Van Breusegem, F. (2022) 'Reactive oxygen species signalling in plant stress responses', *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 23, pp. 663–679. doi:10.1038/s41580-022-00499-2.
15. Pollacco, J.A.P., Eger, A., Rajanayaka, C. and Fernández-Gálvez, J. (2024) 'Improved partitioning between matrix and macropore flow: Novel bimodal lognormal functions for water retention and hydraulic conductivity in pumice and non-pumice soils', *Journal of Hydrology*, 644, p. 131985. doi:10.1016/j.jhydrol.2024.131985.
16. Sahin, U., & Anapali, O. (2006). Addition of Pumice Affects Physical Properties of Soil Used for Container Grown Plants. Agriculturae Conspectus Scientificus, 71(2), 59–64.
17. Seleiman, M.F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H.H. and Battaglia, M.L. (2021) 'Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects', *Plants*, 10(2), p. 259. doi:10.3390/plants10020259.
18. Seyedsadr, S., Šípek, V., Jačka, L., Sněhota, M., Beesley, L., Pohořelý, M., Kovář, M. and Trakal, L. (2022) 'Biochar considerably increases the easily available water and nutrient content in low-organic

soils amended with compost and manure', *Chemosphere*, 293, p. 133586. doi:10.1016/j.chemosphere.2022.133586.

19. Soil Survey Staff. (2014). Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual: Soil Survey Investigations Report No. 51, Version 2.0. Edited by R. Burt and Soil Survey Staff. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, Nebraska.
20. Trakal, L., Veselý, M., Šigut, L., Száková, J. and Tlustoš, P. (2022) 'Biochar considerably increases the easily available water and nutrient content in low-organic soils amended with compost and manure', *Chemosphere*, 293, p. 133586. doi:10.1016/j.chemosphere.2022.133586.
21. Yerli, C. (2026) 'Evaluation of the interaction of biochar, pumice, and arbuscular mycorrhiza fungi in wastewater irrigation in terms of soil and pepper plant productivity and heavy metal contamination', *Journal of Agricultural Sciences*, 32(2), pp. 290–316. doi:10.15832/ankutbd.1767684.
22. Zandalinas, S.I., Mittler, R., Balfagón, D., Arbona, V. and Gómez-Cadenas, A. (2018) 'Plant adaptations to the combination of drought and high temperature stress', *Plant Science*, 274, pp. 77–83. doi:10.1016/j.plantsci.2018.06.011.
23. Zandalinas, S.I., Sengupta, S., Fritschi, F.B. and et al. (2021) 'The impact of multifactorial stress combination on plant growth and survival', *New Phytologist*, 230, pp. 1034–1048. doi:10.1111/nph.17232.
24. Zandalinas, S.I. and Mittler, R. (2022) 'Plant responses to multifactorial stress combination', *New Phytologist*, 234, pp. 1161–1167. doi:10.1111/nph.18087.