

Research Article**Effect of Different Surrounding Media on the Geometric and Temporal Development of the Wetting Bulb in PVC Cylinder–Based Subsurface Irrigation****Zahra Mahdian¹, Abdolmajid Liaghat², Farhad Mirzaei³, Armin Hassanzade⁴**

1- Ph.D. Student in Irrigation and Drainage Engineering, Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

***Corresponding Author:** 3-Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

4- M.Sc. Graduate in Landscape Engineering, Department of Horticultural Sciences and Landscape Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(✉ **Corresponding Author:** : fmirzaei@ut.ac.ir)

ARTICLE INFO

Received: 24 August 2026

Revised: 9 August 2026

Accepted: 24 September 2026

Available Online: 10 October 2026

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Mahdian, Z., Liaghat, A.M., Mirzaei, F., Hassanzade, A., (2026). Effect of Different Surrounding Media on the Geometric and Temporal development of the Wetting Bulb in PVC Cylinder-Based Subsurface Irrigation. V.27, No.103, P:25-44
<https://doi.org/10.22092/idser.2026.374045.1662>

Extended Abstract**Introduction**

Water scarcity in arid and semi-arid regions has increased the need for irrigation technologies that improve water-use efficiency while minimizing water losses. Subsurface irrigation delivers water directly to the root zone through buried emitters, thereby reducing surface evaporation and runoff. PVC cylinder–based subsurface irrigation systems have attracted attention because of their simple design, low cost, and adaptability. However, the medium surrounding the cylinder can strongly influence water transfer into the soil and, consequently, the geometry and temporal development of the wetting bulb. Differences in porosity, hydraulic conductivity, pore structure, and water-retention capacity among surrounding media may alter water-flow pathways and wetting patterns. Therefore, this study investigated the effects of eight surrounding media on wetting-bulb depth, width, area, and volume at 1, 3, and 7 days after irrigation.

Methodology

The experiment was conducted at the research station of the College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, using a silty clay loam soil (30% clay, 56% silt, and 14% sand), with a bulk density of 1.13 g cm^{-3} and total porosity of 47%. The antecedent soil water content was $0.07 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ for all treatments. Perforated PVC cylinders (6 cm internal diameter and 55 cm length) were installed vertically to a depth of 50 cm, leaving 5 cm above the soil surface for connection to a bubbler emitter. Each cylinder had eight outlet perforations distributed at four depths (10, 20, 30, and 40 cm), with perforation diameters determined using an orifice-flow relationship to achieve uniform discharge. Eight surrounding media—aeolian sand, agricultural pumice, local soil (control), perlite, pea gravel, non-woven geotextile, vermicompost, and cocopeat—were evaluated, with one PVC cylinder used for each treatment. Each treatment received a single 100-L irrigation application at an inlet pressure of 0.1 bar. Wetting-bulb development was monitored using the trench method. The same trench was progressively extended at 1, 3, and 7 days after irrigation to expose the advancing wetting front while avoiding repeated backfilling and re-excavation that could disturb soil structure and preferential flow pathways. To minimize evaporative losses from the exposed soil surface, the trench was covered with a plastic sheet between successive observations. Wetted-zone boundaries were traced and digitized in

AutoCAD, and two-dimensional and three-dimensional reconstructions were used to determine wetting-bulb depth, width, area, and volume.

Results and Discussion

Because one PVC cylinder was used for each treatment, the results represent observed differences rather than statistically tested treatment effects. Vermicompost and non-woven geotextile progressively restricted outlet flow, causing an inflow–outflow mismatch and water overflow; consequently, both were excluded from further analysis. Among the remaining six media, perlite produced the most balanced wetting pattern and the greatest wetted area and volume. By day 7, its wetted area and volume reached 5,227 cm² and 348,877 cm³, representing increases of approximately 50% and 80%, respectively, relative to day 1. This performance may be associated with its high porosity, low bulk density, and favorable hydraulic properties, which could facilitate lateral and vertical water redistribution. Agricultural pumice produced the greatest wetting depth, suggesting that its coarse and heterogeneous pore structure may have promoted greater vertical redistribution. Thus, pore-size distribution and pore continuity, in addition to hydraulic conductivity, may influence dominant flow pathways. Aeolian sand and pea gravel exhibited relatively rapid initial wetting but limited subsequent expansion. By day 7, wetted area and volume had increased by approximately 24% and 29% for sand and 32% and 50% for gravel, respectively. The local-soil control produced a more restricted wetting bulb than most amended media. Cocopeat showed the most limited initial wetting but the greatest relative expansion over time, with wetted area and volume increasing by approximately 153% and 205%, respectively, by day 7. This behavior may be related to its fibrous structure and high water-retention capacity, which can support gradual redistribution of stored water.

Conclusions

The surrounding medium strongly influences the hydraulic performance and geometric and temporal development of wetting bulbs in PVC cylinder–based subsurface irrigation. Vermicompost and non-woven geotextile may be unsuitable for direct placement around concentrated outlets because they restricted discharge and caused overflow. Among the functional media, perlite produced the greatest wetted area and volume and the most balanced wetting pattern, whereas agricultural pumice resulted in the greatest wetting depth. Cocopeat, despite limited initial wetting, exhibited the greatest relative expansion over time, indicating potential for gradual water redistribution. Therefore, surrounding-medium selection should consider the intended hydraulic function—maximizing wetted volume and spatial coverage or promoting gradual redistribution—rather than relying on a single hydraulic property such as saturated hydraulic conductivity. These findings are limited to the tested soil texture, irrigation volume, discharge conditions, seven-day observation period, and single-cylinder design. Further studies using multiple replicates, different soil textures, and non-destructive moisture monitoring are recommended.

Keywords: Subsurface irrigation, PVC cylinder, Wetting bulb, Moisture development, Porous media.

Acknowledgments

The authors would like to express their sincere appreciation to the Editor-in-Chief and the anonymous reviewers for their valuable time, thorough evaluation, and insightful comments and suggestions. Their constructive feedback substantially contributed to improving the scientific quality, methodological rigor, structural organization, and overall clarity of this manuscript.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Funding

This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Authors' Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the research problem and to the preparation of both the original draft and the final version of the manuscript. Z.M. was responsible for the methodology, literature review, execution of the research, data collection, data analysis, and preparation of the preliminary draft of the results section. A.H. contributed to the implementation of the experimental work, including laboratory and field experiments, as well as data collection. A.L. and F.M.A.S. jointly supervised the research, validated the findings, provided the facilities and resources required for the study, and critically reviewed and edited the manuscript. All four authors contributed to the conceptualization of the research problem, participated in preparing the original and subsequent drafts of the manuscript, and have read and approved the final published version.



© 2026, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

[https:// 10.22092/idser.2026.374045.1662](https://10.22092/idser.2026.374045.1662)

نوع مقاله: پژوهشی

بررسی اثر بسترهای مختلف پیرامونی بر توسعه هندسی و زمانی پیاز رطوبتی در آبیاری زیرسطحی مبتنی بر استوانه PVC

زهرا مهدیان^۱ , عبدالمجید لیاقت^۲ , فرهاد میرزایی^۳ , آرمین حسن‌زاده^۴ 

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۶/۰۲ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۱۸ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۰۲ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۱۸

چکیده

محدودیت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، توسعه سامانه‌های آبیاری کم‌مصرف مانند آبیاری زیرسطحی را ضروری ساخته است. این پژوهش با هدف بررسی اثر بسترهای مختلف پیرامونی استوانه PVC بر توسعه هندسی و تغییرات زمانی پیاز رطوبتی در خاک لوم رسی سیلتی، در ایستگاه تحقیقاتی دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران (کرج) به اجرا در آمد. استوانه‌های PVC مدفون منافذی با قطر ۱/۵ تا ۲/۵ میلی‌متر دارند و آبیاری با حجم ثابت ۱۰۰ لیتر توسط بابلر صورت گرفت. هشت بستر پیرامونی شامل ماسه‌بادی، پوکه کشاورزی، خاک منطقه (شاهد)، پرلیت، شن بادامی، ژئوتکستایل، ورمی کمپوست و کوکوپیت بررسی شدند. پیاز رطوبتی در روزهای ۱، ۳ و ۷ پس از آبیاری به روش ترانسه‌برداری برداشت و در نرم‌افزار AutoCAD بازسازی دوبعدی و سه‌بعدی صورت گرفت. نتایج تحقیق نشان داد ورمی کمپوست و ژئوتکستایل، به دلیل انسداد منافذ خروجی، توسعه رطوبت را محدود کرده‌اند. پرلیت متعادل‌ترین الگو را با بیشترین مساحت و حجم (۵۲۲۷ سانتی‌متر مربع و ۳۴۸۸۷۷ سانتی‌متر مکعب در روز هفتم) نشان داد. پوکه کشاورزی بیشترین توسعه عمقی را به دلیل مسیرهای جریان ترجیحی و کوکوپیت با وجود توسعه اولیه محدود، بیشترین افزایش نسبی زمانی (۱۵۳ و ۲۰۵ درصد در مساحت و حجم) را داشتند. ماسه‌بادی و شن بادامی نیز از نظر توسعه پیاز رطوبتی عملکردی مشابه و در حد متوسط داشتند. نتایج بیانگر آن است که انتخاب بستر مناسب، با تأثیر بر ویژگی‌های هیدرولیکی، تخلخل و ظرفیت نگهداشت آب می‌تواند عملکرد سامانه‌های آبیاری زیرسطحی مبتنی بر استوانه را بهبود بخشد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری زیرسطحی، استوانه PVC، پیاز رطوبتی، توسعه رطوبت، محیط‌های متخلخل

مقدمه

بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب شیرین است، افزایش بهره‌وری مصرف آب یکی از الزامات اساسی برای مدیریت پایدار منابع آب و تأمین امنیت غذایی محسوب می‌شود (Alizadeh, 2014). در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تبخیر بالا موجب افزایش تلفات آب در زمین‌های تحت آبیاری می‌شود (Gheysari et al., 2017). از این رو، استفاده از سامانه‌های آبیاری کارآمد راهکاری مؤثر برای کاهش هدررفت آب و افزایش راندمان مصرف آن است (Sharma et al., 2015). روش‌های آبیاری سنتی، به‌رغم سادگی و پایین بودن هزینه اولیه، معمولاً با تلفات قابل توجه آب از طریق

محدودیت منابع آب شیرین در دهه‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین چالش‌های بخش کشاورزی و توسعه پایدار در جهان تبدیل شده است. رشد جمعیت، توسعه اقتصادی، تغییرات اقلیمی، افزایش فراوانی خشکسالی‌ها و کاهش ذخایر آب‌های زیرزمینی فشار قابل توجهی بر منابع آب وارد کرده‌اند (FAO, 2017; Guo et al., 2023). این مسئله در کشورهای خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، به دلیل بارندگی محدود، تبخیر بالا و وابستگی شدید بخش کشاورزی به منابع آب زیرزمینی، اهمیت بیشتری دارد. از آنجا که

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.^۲ استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.^۳ استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. (Email: fmirzaei@ut.ac.ir) نویسنده مسئول^۴ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی فضای سبز، گروه باغبانی و فضای سبز، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

گذشت زمان و افزایش عمق خیس‌شدگی، نقش نیروی ثقل افزایش می‌یابد و حرکت عمقی تشدید می‌شود. پس از قطع آبیاری، بازتوزیع رطوبت در خاک ادامه می‌یابد. بنابراین، بررسی پیاز رطوبتی در زمان ثابت نمی‌تواند تصویر کاملی از رفتار سامانه را ارائه دهد و تحلیل زمانی آن ضروری است.

در سال‌های اخیر، سامانه‌های آبیاری زیرسطحی مبتنی بر استوانه‌های مدفون به دلیل سادگی و پایین بودن هزینه مورد توجه قرار گرفته‌اند. استفاده از لوله‌ها و سازه‌های مدفون در خاک سابقه‌ای طولانی دارد؛ از کوزه‌ها و لوله‌های سفالی مدفون در قرن نوزدهم تا انواع لوله‌های سیمانی، سرامیکی، پلاستیکی و لاستیکی متخلخل در مطالعات بعدی (Bastani, 2018). در پژوهش‌های جدیدتر، نیز سامانه‌های مبتنی بر استوانه‌های PVC^۲ مدفون برای هدایت آب به ناحیه ریشه و کاهش تلفات سطحی بررسی شده‌اند (Savartondrow et al., 2024). در این راستا، سوارتندرو و همکاران (Savartondrow et al., 2025) با مقایسه آبیاری عمقی ریشه از طریق لوله PVC همراه با لایه شنی پیرامونی با آبیاری سطحی مرسوم نشان دادند استفاده از این گونه سامانه‌های مدفون می‌تواند بر استقرار و شاخص‌های رویشی گونه‌های بیابانی، از جمله ارتفاع، عمق ریشه و زیست‌توده اثرگذار باشد. این یافته‌ها بر اهمیت بررسی نقش بستر پیرامونی در عملکرد سامانه‌های آبیاری عمقی و زیرسطحی تأکید می‌کنند.

در این سامانه‌ها، آب پس از ورود به استوانه مدفون از طریق دیواره یا بستر پیرامونی^۳ به خاک اطراف منتقل می‌شود؛ بنابراین، علاوه بر ویژگی‌های خاک، نوع بستر پیرامونی نقش مهمی در الگوی توزیع آب دارد. این بسترها به دلیل تفاوت در تخلخل، هدایت هیدرولیکی، ظرفیت نگهداری آب و رفتار مویینگی می‌توانند مسیر حرکت آب را تغییر دهند و بر توسعه افقی و عمقی پیاز رطوبتی اثرگذار باشند. در سامانه‌های مبتنی بر استوانه، به دلیل تمرکز جریان خروجی، انتقال آب معمولاً به صورت موضعی و با شدت بالا است که می‌تواند منجر به اشباع سریع ناحیه مجاور، کاهش یکنواختی توزیع رطوبت و ایجاد جریان‌های ترجیحی^۴ گردد. در چنین شرایطی، استفاده از بسترهای متخلخل پیرامونی به عنوان لایه‌ای میان‌گیر^۵ می‌تواند نقش تعدیل‌کننده داشته باشد، به گونه‌ای که شدت انتقال آب را کنترل کند، از اشباع موضعی جلوگیری کند و توزیع تدریجی‌تر و پایدارتر رطوبت در خاک اطراف

تبخیر سطحی، رواناب، نفوذ عمقی و کاهش یکنواختی توزیع همراه هستند (Naghedifar et al., 2020; Guo et al., 2023). با توجه به تغییر اقلیم و افزایش هزینه‌های آب و انرژی، توسعه سامانه‌های کم‌مصرف و کارآمد بیش از پیش ضروری است (Gunarathna et al., 2017).

آبیاری زیرسطحی یکی از روش‌های مؤثر مدیریت آب است که در آن آب از طریق لوله‌ها یا سازه‌های مدفون، مستقیماً در زیر سطح خاک و نزدیک ناحیه ریشه توزیع می‌شود (Roshani, 2018). این روش با کاهش تبخیر سطحی، کاهش رواناب، افزایش یکنواختی رطوبت و بهبود دسترسی گیاه به آب همراه است. مطالعات نشان داده‌اند که این سامانه می‌تواند راندمان مصرف آب را افزایش دهد، رشد علف‌های هرز را کاهش دهد و عملکرد محصول را بهبود بخشد (Lamm, 2002; Payero et al., 2005; Guo et al., 2023).

پژوهشگرانی مانند لی و همکاران (Li et al., 2024) نشان دادند که راهبردهای مختلف آبیاری در سامانه آبیاری قطره‌ای عمیق می‌تواند با تغییر شرایط میکرومحیط خاک، از جمله وضعیت رطوبت و دمای خاک، بر رشد و بهره‌وری مصرف آب پنبه اثرگذار باشند. این یافته نشان می‌دهد در سامانه‌های آبیاری زیرسطحی، علاوه بر مقدار آب مصرفی، نحوه و زمان‌بندی اعمال آب و شرایط ایجادشده در اطراف ناحیه ریشه نیز می‌تواند در پاسخ گیاه و کارایی مصرف آب نقش داشته باشد.

عملکرد آبیاری زیرسطحی به الگوی توزیع آب در خاک و توسعه رطوبت در اطراف منبع آبیاری وابسته است. یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در این زمینه، پیاز رطوبتی^۱ است. پیاز رطوبتی ناحیه‌ای از خاک است که پس از آبیاری در اثر حرکت آب مرطوب می‌شود و ابعاد آن (عمق، عرض، مساحت و حجم) بیانگر میزان ذخیره آب در محدوده ریشه و تلفات احتمالی است (Philip, 1969; Warrick, 2003). هدایت هیدرولیکی، دبی، عمق نصب و مدت آبیاری از عوامل کلیدی در شکل‌گیری آن هستند (Thorburn et al., 2000; 2003; Siyal & Skaggs, 2009; Cai et al., 2018). به طور کلی، در خاک‌های درشت‌بافت حرکت عمقی غالب است، در حالی که در خاک‌های ریزبافت گسترش افقی بیشتر تحت تأثیر نیروهای مویینگی رخ می‌دهد. علاوه بر ابعاد هندسی، رفتار زمانی پیاز رطوبتی نیز اهمیت دارد. در مراحل اولیه نفوذ، نیروهای مویینگی غالب هستند و توسعه افقی بیشتر مشاهده می‌شود، اما با

^۴ Preferential Flow

^۵ Buffer Layer

^۱ Wetting bulb

^۲ Polyvinyl chloride (PVC)

^۳ Surrounding media

سامانه‌های آبیاری زیرسطحی و افزایش کارایی مصرف آب در شرایط خشک و نیمه‌خشک به کار رود.

مواد و روش‌ها

محل آزمایش

این پژوهش در محوطه آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب، خاک و هوا، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، واقع در کرج (35°47'57.7"N, 50°59'51.0"E) به اجرا در آمد. این محل به عنوان بستر اجرای آزمایش آبیاری زیرسطحی مبتنی بر استوانه PVC و ارزیابی اثر بسترهای پیرامونی مختلف بر توسعه پیاز رطوبتی انتخاب گردید. بر اساس داده‌های بلندمدت (از سال ۱۳۶۴ تا کنون) ایستگاه هواشناسی کرج، اقلیم منطقه نیمه‌خشک و میانگین سالانه دما، رطوبت نسبی، بارندگی و تبخیر به ترتیب ۱۴/۴ درجه سلسیوس، ۵۳ درصد، ۲۴۷/۳ میلی‌متر و ۲۱۸۴ میلی‌متر است (اداره کل هواشناسی استان البرز).

تعیین ویژگی‌های خاک

به منظور تعیین ویژگی‌های خاک محل آزمایش، از عمق صفر تا ۵۰ سانتی‌متری نمونه برداری شد. نتایج تعیین ویژگی‌های فیزیکی، رطوبتی و هیدرولیکی خاک در (جدول‌های ۱ و ۲) ارائه شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی خاک محل آزمایش (عمق صفر تا ۵۰ سانتی‌متر)

Table 1- Physical characteristics of the experimental soil (0-50 cm depth)

بافت خاک Soil texture	رس (درصد) Clay (%)	سیلت (درصد) Silt (%)	شن (درصد) Sand (%)	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب) Bulk density (g/cm ³)	چگالی حقیقی (گرم بر سانتی متر مکعب) Particle density (g/cm ³)	تخلخل کل (درصد) Total porosity (%)
لوم رسی سیلتی Silty clay loam	30	56	14	1.13	2.14	47

جدول ۲- ویژگی‌های رطوبتی و هیدرولیکی خاک محل آزمایش (عمق صفر تا ۵۰ سانتی‌متر)

Table 2- Water retention and hydraulic characteristics of the experimental soil (0-50 cm depth)

بافت خاک Soil texture	رطوبت اولیه (درصد) θ_i (%)	رطوبت ظرفیت زراعی (درصد) θ_{FC} (%)	رطوبت در نقطه پژمردگی دائم (درصد) θ_{PWP} (%)	آب قابل استفاده (درصد) AW (%)	رطوبت اشباع (درصد) θ_s (%)	هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی متر بر ساعت) Ks (cm/h)
لوم رسی سیلتی Silty clay loam	7	27	16	11	49	1.32

اجرا شد. در این آبیاری، آب پس از ورود در داخل استوانه جمع می‌شود و از طریق منافذ تعبیه شده در بدنه به بستر پیرامونی و خاک اطراف منتقل می‌شود. هدف از این طراحی بهبود توزیع

را فراهم سازد. این عملکرد در نهایت می‌تواند بر هندسه و پویایی زمانی پیاز رطوبتی اثرگذار باشد.

مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از موادی مانند ژئوتکستایل^۱ و فیلتر شنی می‌تواند بر الگوی توزیع آب و کاهش گرفتگی مؤثر باشد (Najafi & Tabatabaei, 2009; Lenjaji et al., 2010). مواد مانند پرلیت و کمپوست نیز با افزایش تخلخل و ظرفیت نگهداری آب می‌توانند کارایی مصرف آب را بهبود دهند (Shahadha et al., 2023). با این حال، مطالعات پیشین بیشتر بر عملکرد کلی سامانه‌های آبیاری زیرسطحی، راهبردهای آبیاری و اصلاح خصوصیات محیط خاک تمرکز داشته‌اند و درباره اثر همزمان بسترهای پیرامونی مختلف بر توسعه هندسی و روند زمانی تغییرات پیاز رطوبتی در سامانه‌های مبتنی بر استوانه PVC اطلاعات محدودی وجود دارد.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثر بسترهای مختلف پیرامونی بر توسعه هندسی و زمانی پیاز رطوبتی در آبیاری زیرسطحی مبتنی بر استوانه PVC اجرا شد. در این مطالعه، بسترهای کوکوپیت، پرلیت، ماسه بادی، پوکه کشاورزی، شن بادامی، ورمی کمپوست، ژئوتکستایل و خاک منطقه به عنوان تیمار شاهد از نظر تأثیر بر عمق، عرض، مساحت، حجم و روند تغییرات زمانی پیاز رطوبتی ارزیابی شدند. نتایج این پژوهش می‌تواند در انتخاب بستر مناسب پیرامون استوانه، بهینه‌سازی طراحی

طراحی و استقرار آبیاری زیرسطحی مبتنی بر استوانه PVC

در این پژوهش، آبیاری زیرسطحی مبتنی بر استوانه PVC به منظور انتقال کنترل شده آب به لایه‌های مؤثر خاک طراحی و

¹ Geotextile

رطوبت در ناحیه ریشه، کاهش تمرکز جریان در عمق‌های پایین‌تر و فراهم‌سازی شرایط مناسب برای ارزیابی اثر بسترهای مختلف پیرامونی بر توسعه و شکل‌گیری پیاز رطوبتی است.

$$Q = C_d \sum_k (2A_k \sqrt{2gh_k}) \quad (2)$$

که در آن:

Q = دبی کل خروجی از استوانه (مترمکعب بر ثانیه)؛ C_d = ضریب تخلیه (بدون بعد)؛ A_k = سطح مقطع منفذ k -ام (مترمربع)؛ g = شتاب گرانشی (متر بر مجذور ثانیه)؛ h_k = هد هیدرولیکی یا ارتفاع ستون آب مؤثر بر منفذ k -ام (متر)؛ k = شماره منفذ؛ و n = تعداد کل منافذ است.

به‌منظور دستیابی به توزیع متعادل‌تر دبی خروجی بین ترازهای مختلف استوانه، قطر منافذ خروجی بر اساس رابطه ۱ (جریان از روزنه نازک لبه^۱) تعیین شد.

$$q_i = C_d A_i \sqrt{2gh_i} \quad (1)$$

که در آن:

q_i = دبی خروجی هر منفذ (مترمکعب بر ثانیه)؛ C_d = ضریب تخلیه (بدون بعد)؛ A_i = سطح مقطع منفذ (مترمربع)؛ g = شتاب گرانش (متر بر مجذور ثانیه)؛ h_i = ارتفاع ستون آب بالای منفذ (متر) است.

جدول ۳- مشخصات هندسی-هیدرولیکی منافذ استوانه PVC و سهم دبی هر تراز

Table 3- Geometric-hydraulic characteristics of the PVC cylinder perforations and discharge contribution at different elevations

تراز (سانتی‌متر) Elevation (cm)	بار هیدرولیکی (متر) h (m)	قطر منفذ (میلی‌متر) d (mm)	مساحت مقطع منفذ (مترمربع) A (m ²)	دبی هر منفذ (لیتر بر ساعت) q _i (L/h)	دبی هر تراز (لیتر بر ساعت) Q _i (L/h)	سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه) V (m/s)	عدد رینولدز Re	رژیم جریان Flow regime
40	0.35	1.50	1.77×10 ⁻⁶	10.34	20.67	1.62	2437	مرزی آشسته Transitional-turbulent
30	0.25	1.50	1.77×10 ⁻⁶	8.74	17.47	1.37	2060	انتقالی Transitional
20	0.15	2.00	3.14×10 ⁻⁶	12.03	24.06	1.06	2127	انتقالی Transitional
10	0.05	2.50	4.91×10 ⁻⁶	10.85	21.70	0.61	1535	انتقالی Transitional

با توجه به کاهش بار هیدرولیکی در ترازهای بالاتر، قطر منافذ به‌صورت افزایشی از پایین به بالا طراحی شد تا توزیع خروجی آب بین ترازهای مختلف متعادل‌تر شود. قطر منافذ خروجی استوانه در عمق‌های ۴۰، ۳۰، ۲۰ و ۱۰ سانتی‌متری بر اساس دبی مورد انتظار در فشار کاری مشخص انتخاب شد، به‌گونه‌ای که آب ورودی به استوانه با دبی قابل‌کنترل از منافذ خارج و از تجمع و سرریز آب در داخل استوانه جلوگیری شود. قطر منافذ به‌ترتیب ۱/۳۰، ۱/۴۰، ۱/۹۵ و ۲/۵۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. با توجه به محدودیت ابزار سوراخ‌کاری، قطرهای نهایی ساخته‌شده به‌ترتیب ۱/۵، ۱/۵، ۲/۰ و ۲/۵ میلی‌متر انتخاب شد (جدول‌های ۳ و ۴).

جدول ۴- مشخصات هندسی استوانه PVC مورد استفاده در آبیاری زیرسطحی

Table 4- Geometric characteristics of the PVC cylinder used in the subsurface irrigation system

جنس استوانه Cylinder material	قطر داخلی استوانه (سانتی‌متر) Internal diameter (cm)	ضخامت جداره (میلی‌متر) Wall thickness (mm)	ارتفاع استوانه (سانتی‌متر) Cylinder height (cm)	عمق نصب (سانتی‌متر) Installation depth (cm)	وضعیت انتهای پایینی Bottom end condition	تعداد ترازهای خروج آب Number of outlet elevations	ترازهای خروج آب (سانتی‌متر) Outlet elevations depth (cm)	تعداد منافذ در هر تراز Number of perforations per elevation	تعداد کل منافذ Total number of perforations	قطر منافذ در هر تراز (میلی‌متر) Perforation diameter at each elevation (mm)
PVC	6	2	55	50	بسته Closed	۴	10-20-30-40	2	8	2.5-2-1.5-1.5

¹ Sharp-edged orifice equation

تمامی استوانه‌های مورد استفاده با مشخصات یکسان ساخته شدند (شکل ۱) و تنها نوع بستر پیرامونی به‌عنوان عامل آزمایشی تغییر داده شد. برای نصب، چاله‌هایی با قطر تقریبی ۲۰ و عمق ۵۰ سانتی‌متر حفر شد. پس از قرار دادن یک لایه ۵ سانتی‌متری از بستر پیرامونی در کف چاله، استوانه PVC به‌صورت قائم در مرکز آن نصب گردید. فضای اطراف استوانه با بستر مربوط به هر تیمار پر شد، به‌طوری‌که حدود ۵ سانتی‌متر از بخش فوقانی استوانه بالاتر از سطح زمین قرار گرفت. به‌منظور جلوگیری از هم‌پوشانی پیازهای رطوبتی و اثرهای متقابل هیدرولیکی، فاصله بین استوانه‌ها حدود ۱/۵ تا ۲ متر در نظر گرفته شد.



شکل ۱- نمایی از جزئیات فنی استوانه، عملیات حفاری و آماده‌سازی محل نصب

Fig. 1- Overview of the PVC cylinder technical details, excavation procedure, and installation site preparation

مشخصات هیدرولیکی بابلر مورد استفاده

در این پژوهش، آب ورودی به استوانه‌های PVC توسط گسیلنده بابلر^۱ فراهم شد. بابلرها از گسیلنده‌های متداول در سامانه‌های آبیاری موضعی هستند که با دبی نسبتاً بالا و فشار کاری پایین تا متوسط، آب را به‌صورت متمرکز تأمین می‌کنند. به دلیل بزرگ‌تر بودن قطر خروجی نسبت به قطره‌چکان‌ها، این گسیلنده‌ها حساسیت کمتری نسبت به گرفتگی دارند و در شرایط مختلف عملکردشان پایدارتر است (Roshani, 2018).

در آبیاری مورد بررسی، بابلرها در بخش فوقانی استوانه PVC نصب شدند، به‌گونه‌ای که جریان خروجی آن‌ها به‌صورت مستقیم وارد فضای داخلی استوانه می‌شد.

بابلرهای مورد استفاده در این پژوهش، بر اساس مشخصات فنی ارائه‌شده توسط تأمین‌کننده، دارای نازل‌های رنگی مختلف با دبی اسمی ۳۰، ۷۵، ۱۳۵، ۱۹۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ لیتر بر ساعت و PN برابر ۱ تا ۶/۵ بار بودند. به‌منظور تعیین عملکرد هیدرولیکی بابلرها

در شرایط آزمایش، دبی خروجی ۲۱ بابلر در فشار ۰/۱۰ بار اندازه‌گیری شد. حجم آب خروجی در یک بازه زمانی مشخص جمع‌آوری و دبی هر بابلر محاسبه گردید (جدول ۵). در آزمایش‌های اصلی، دبی ورودی بابلر با توجه به روند نفوذ آب در خاک و با استفاده از معادله نفوذ کوستیاکف (رابطه ۳) به‌عنوان مبنای برآورد ظرفیت نفوذ، به‌صورت کنترل‌شده تنظیم شد.

$$I(t) = 0.27t^{0.77} \quad (3)$$

که در آن:

I = عمق نفوذ تجمعی آب در خاک (سانتی‌متر); t = زمان سپری‌شده از شروع آبیاری (دقیقه); ضریب‌های عددی ۰/۲۷ و ۰/۷۷ به‌ترتیب ضریب نفوذ (k) و توان زمانی (a) معادله کوستیاکف هستند که بر اساس داده‌های آزمون نفوذ خاک محل آزمایش تعیین شدند.

به‌منظور ارزیابی یکنواختی عملکرد بابلرها، شاخص‌های ضریب تغییرات ساخت (CV)، ضریب یکنواختی کریستین‌سن

¹ Bubbler emitter

(CU)، یکنواختی خروجی (EU) و تغییرات دبی (q_{var}) مطابق روابط ۴ تا ۷ محاسبه شدند (Alizadeh, 2014).

$$q_{var} = 100 \left(1 - \frac{q_{min}}{q_{max}} \right) \quad (7)$$

که در آن‌ها:

S = انحراف معیار دبی‌ها (لیتر بر ساعت)؛ q_{avg} = میانگین دبی (لیتر بر ساعت)؛ q_i = دبی هر بابلر (لیتر بر ساعت)؛ n = تعداد بابلرها (بدون بعد)؛ q_{LQ} = میانگین ربع پایین دبی‌ها (لیتر بر ساعت)؛ q_{max} و q_{min} = کمینه و بیشینه دبی (لیتر بر ساعت) است.

$$Cv = \frac{S}{q_{avg}} \quad (4)$$

$$CU = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - q_{avg}|}{n q_{avg}} \quad (5)$$

$$EU = 100 \times \frac{q_{LQ}}{q_{avg}} \quad (6)$$

جدول ۵- شاخص‌های عملکرد هیدرولیکی بابلر مورد استفاده در فشارهای مختلف

Table 5- Hydraulic performance characteristics of the bubbler under different operating pressures

فشار کاری (بار) pressure (bar)	تعداد نمونه Number of samples	ضریب تغییرات (درصد) CV (%)	حداقل دبی (لیتر بر ساعت) q_{min} (L/h)	حداکثر دبی (لیتر بر ساعت) q_{max} (L/h)	میانگین دبی (لیتر بر ساعت) q_{avg} (L/h)	دبی ربع پایین (لیتر بر ساعت) q_{LQ} (L/h)	تغییرات دبی (درصد) q_{var} (%)	یکنواختی خروجی (درصد) EU (%)	یکنواختی گریستین سن (درصد) CU (%)
0.10	21	1	9.23	9.65	9.41	9.26	4	98	99

مصنوعی با ویژگی‌های متفاوت تخلخل، ظرفیت نگهداری آب و هدایت هیدرولیکی را در توسعه هندسی و زمانی پیاز رطوبتی فراهم کرد.

روش اجرای آزمایش و مدیریت آبیاری

پیش از آغاز آزمایش، رطوبت اولیه خاک در چندین نقطه و در عمق‌های مختلف پروفیل خاک اندازه‌گیری شد. میانگین رطوبت اولیه خاک پیش از شروع آبیاری حدود ۷ درصد وزنی بود و این مقدار به‌عنوان شرایط اولیه خاک در آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. در این پژوهش، خاک پیش از شروع آبیاری اشباع اولیه مصنوعی نشد و آزمایش‌ها در شرایط رطوبتی اولیه خاک دنبال شدند.

پیش از اجرای آبیاری اصلی، عملکرد هیدرولیکی بابلرها، از نظر یکنواختی دبی خروجی در شرایط آزمایش ارزیابی شد. هدف از این مرحله کاهش اثر تغییرات دبی خروجی بابلرها و تضمین شرایط مرزی یکنواخت در تمامی تیمارها بود (شکل ۳). سامانه شامل لوله فرعی پلی‌اتیلنی با قطر ۱۶ میلی‌متر به‌صورت حلقه‌ای^۱ بود که شش تیمار استوانه با بسترهای پیرامونی مختلف را در بر می‌گرفت؛ دو تیمار اولیه به دلیل اختلال در عملکرد هیدرولیکی و ناممکن بودن پایش پایدار توسعه پیاز رطوبتی از تحلیل نهایی حذف شدند.

نتایج تحقیق نشان داد مقادیر بالای EU و UC و مقادیر پایین CV بیانگر یکنواختی مناسب عملکرد بابلرها و قابلیت استفاده آن‌ها در سامانه آبیاری زیرسطحی مورد مطالعه است.

تیمارهای آزمایشی

به‌منظور ارزیابی اثر بستر پیرامونی استوانه PVC بر الگوی توسعه پیاز رطوبتی، هشت تیمار آزمایشی شامل ماسه‌بادی، پوکه معدنی کشاورزی، خاک منطقه به‌عنوان شاهد، پرلیت، شن بادمی، ژئوتکستایل نفاخته، ورمی‌کمپوست و کوکوپیت بررسی شد (شکل ۲). این مواد بر اساس تفاوت در ویژگی‌هایی مانند تخلخل، چگالی ظاهری، هدایت هیدرولیکی اشباع، ظرفیت نگهداری آب، پایداری ساختاری و قابلیت کنترل حرکت افقی و عمقی آب انتخاب شدند. در هر تیمار، ماده موردنظر در فضای پیرامونی استوانه PVC قرار گرفت تا اثر آن بر شکل، مساحت، حجم و تداوم توسعه زمانی پیاز رطوبتی بررسی شود. مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی بسترهای مورد استفاده در (جدول ۶) ارائه شده است.

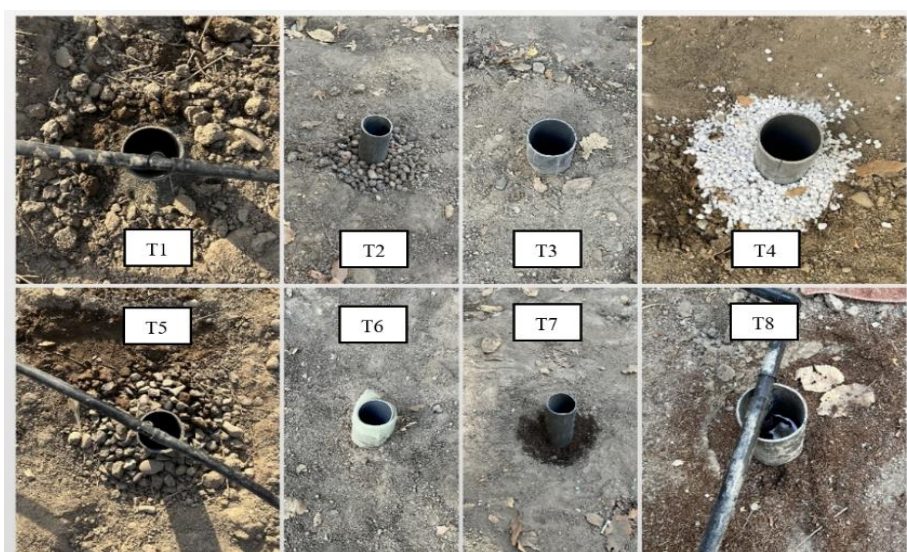
تیمار شاهد شامل خاک بومی محل آزمایش بود و به‌عنوان مبنای مقایسه با سایر بسترهای پیرامونی در نظر گرفته شد. تنوع مواد انتخاب‌شده امکان مقایسه رفتار بسترهای معدنی، آلی و

¹ Loop

جدول ۶- مشخصات عمومی و دامنه ویژگی‌های فیزیکی مواد پیرامونی مورد استفاده در پژوهش

Table 6- General characteristics and ranges of physical properties of the surrounding media used in this study

منبع Reference	ظرفیت نگهداری آب (درصد) Water-holding capacity (%)	هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی متر بر ساعت) Ks (cm/h)	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب) pb (g/cm ³)	تخلخل کل (درصد) n (%)	ماده پیرامونی Surrounding medium	کد تیمار Treatment code
(Woesner & Poeter, 2020)	≈10-20	≈30-200	≈1.40	≈30-50	ماسه بادی Aeolian sand	T1
(Gizas & Savvas, 2007; Ilahi & Ahmad, 2017)	25-30	≈100-800	0.70-0.40	70-85	پوکه معدنی کشاورزی Agricultural pumice	T2
اندازه گیری در این پژوهش Measured in this study	11	1.32	1.13	47	خاک منطقه (شاهد) Local soil (control)	T3
(Sahin <i>et al.</i> , 2002; Buechel, 2014; Ilahi & Ahmad, 2017; Gohardoust <i>et al.</i> , 2020; Lim <i>et al.</i> , 2021)	20-50	≈20-180	≈0.10-0.15	≈70-80	پرلیت Perlite	T4
(Woesner & Poeter, 2020)	≈0	≈500-3000	≈1.70-1.80	≈25-35	شن بادامی Pea gravel	T5
(Jingwei Geosynthetics, 2025)	ND	102-103	0.10-0.25	85-90	ژئوتکستایل نبافته (۲۰۰ گرم بر مترمربع) Non-woven geotextile (200 g/m ²)	T6
(Rahmanzadeh Bahram <i>et al.</i> , 2014; Khater, 2015; Kumari, 2020)	≈50-70	ND	0.50-0.80	≈40-60	ورمی کمپوست Vermicompost	T7
(Buechel, 2014; Ilahi & Ahmad, 2017; Gohardoust <i>et al.</i> , 2020; Al-Ajlouni <i>et al.</i> , 2024)	66-73	≈0.50-10	≈0.05-0.10	80-87	کوکوپیت Cocopeat	T8



شکل ۲- نمایی از استقرار استوانه‌های PVC در تیمارهای مختلف بستر پیرامونی (T1 تا T8) حین کار

Fig. 2- PVC cylinders installed under different surrounding-media treatments (T1–T8) during the experiment



شکل ۳- نمای بابلر-استوانه PVC شامل آرایش حلقه‌ای لوله، کنترل فشار و دبی، و اجرای آبیاری حین کار
Fig. 3- Bubbler-PVC cylinder system during irrigation, showing the ring-shaped pipe arrangement and pressure and discharge control

ناشی از تخریب خاک و تغییر شرایط هیدرولیکی حذف شود. نمونه‌برداری در سه بازه زمانی شامل ۱، ۳ و ۷ روز پس از آبیاری ادامه یافت تا امکان بررسی تغییرات زمانی ناحیه خیس‌شدگی در دوره پس از آبیاری فراهم شود. در هر مرحله، ترانشه‌ای در امتداد محور استوانه حفر شد، به‌گونه‌ای که مقطع عمودی پیاز رطوبتی به‌صورت مستقیم قابل مشاهده و اندازه‌گیری باشد (شکل ۴). مرز ناحیه خیس‌شده بر اساس تغییرات رنگ، بافت و میزان رطوبت خاک نسبت به ناحیه خشک مجاور تعیین شد. در هر مقطع، عرض ناحیه مرطوب در فاصله‌های عمقی ۵ سانتی‌متری از سطح خاک تا حداکثر عمق توسعه اندازه‌گیری گردید.

پس از هر مرحله برداشت، سطح ترانشه و ناحیه مجاور با پوشش پلاستیکی پوشانده شد تا با کاهش تبخیر از سطح خاک، تغییرات رطوبتی ناشی از تبخیر بین زمان‌های برداشت به حداقل برسد و شرایط رطوبتی خاک تا حد امکان حفظ شود. همچنین، آزمایش‌ها در ناحیه‌ای بدون پوشش گیاهی اجرا شدند؛ بنابراین جذب آب توسط ریشه در روند بازتوزیع رطوبت دخیل نبود. برای بازسازی هندسی پیاز رطوبتی، داده‌های برداشت‌شده در مقاطع عمقی مختلف به‌صورت پروفیل دوبعدی ناحیه خیس‌شده استفاده گردید. در این فرآیند، عمق توسعه به‌عنوان بیشترین فاصله عمودی جبهه رطوبتی از سطح خاک و عرض توسعه به‌عنوان بیشترین گسترش افقی ناحیه مرطوب تعریف شد.

حجم آب آبیاری به‌صورت سناریویی کنترل‌شده و یکنواخت برای تمامی تیمارها در نظر گرفته شد و مقدار ۱۰۰ لیتر آب برای هر تیمار اعمال گردید. فشار کاری بابلرها حدود ۰/۱۰ بار تنظیم شد. در آغاز هر آزمایش، سطح آب داخل استوانه تا ارتفاع ۴۵ سانتی‌متر از کف تنظیم گردید تا هد هیدرولیکی اولیه در تمامی تیمارها یکسان باشد. دبی ورودی با توجه به روند نفوذ آب در خاک و بر اساس معادله نفوذ کوستیاکف تنظیم شد و آبیاری تا تأمین حجم ۱۰۰ لیتر ادامه یافت.

تمامی تیمارها تحت شرایط کاملاً یکسان از نظر حجم آب ورودی، موقعیت نصب بابلرها، فاصله بین استوانه‌ها و شرایط آغاز آزمایش اجرا شدند تا اثر مستقل بسترهای پیرامونی بر توسعه پیاز رطوبتی بررسی شود.

روش ترانشه برداری برای اندازه‌گیری شکل پیاز رطوبتی

به‌منظور ارزیابی الگوی توسعه پیاز رطوبتی در تیمارهای مختلف، داده‌ها از طریق روش ترانشه‌برداری در مجاورت محور مرکزی استوانه PVC برداشت شدند. به دلیل ماهیت مخرب روش ترانشه‌برداری، برداشت هر مقطع موجب برهم خوردن ساختار خاک، تغییر مسیرهای جریان و اختلال در الگوی توزیع رطوبت می‌شود؛ بنابراین، امکان برداشت‌های مکرر از یک پیاز رطوبتی در محل واحد وجود نداشت. از این‌رو، هر تیمار برای هر زمان برداشت به‌صورت مستقل و تحت شرایط اولیه یکسان اجرا شد تا اثرهای



شکل ۴- برداشت ترانشه‌ای و بازسازی هندسی پیاز رطوبتی در سه بازه زمانی پس از آبیاری

Fig. 4- Trench excavation and geometric reconstruction of the wetting bulb at three post-irrigation time intervals

(سانتی‌متر)؛ n = تعداد نقاط برداشت عرض پیاز رطوبتی در امتداد عمق (بدون بعد)؛ Δz = فاصله عمودی بین دو نقطه متوالی برداشت (سانتی‌متر)؛ π = عدد پی است.

برای تحلیل زمانی توسعه پیاز رطوبتی، شاخص‌های هندسی شامل عمق، عرض، مساحت و حجم در سه زمان ۱، ۳ و ۷ روز پس از آبیاری مقایسه شدند. روز اول پس از آبیاری به‌عنوان شرایط اولیه توسعه رطوبت در نظر گرفته شد و تغییرات زمانی سایر زمان‌ها نسبت به آن ارزیابی گردید. درصد تغییرات هر شاخص از رابطه ۹ محاسبه شد:

$$\Delta X_t = \frac{X_t - X_1}{X_1} \times 100 \quad (9)$$

که در آن X_t مقدار شاخص در زمان t (روز ۳ یا ۷) و X_1 مقدار همان شاخص در روز اول پس از آبیاری است. این شاخص برای تحلیل روند گسترش یا بازتوزیع رطوبت در طول زمان و مقایسه رفتار تیمارهای مختلف به‌کار گرفته شد.

نتایج و بحث

الگوی توسعه پیاز رطوبتی در تیمارهای مختلف

ارزیابی عملکرد آبیاری بابلر-استوانه PVC زیرسطحی نشان داد که نوع بستر پیرامونی علاوه بر تأثیر بر توسعه پیاز رطوبتی نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری هیدرولیکی سامانه و انتقال آب از استوانه به محیط خاک دارد. در میان هشت بستر مورد بررسی، دو تیمار ورمی‌کمپوست و ژئوتکستایل نفاخته به دلیل عملکرد هیدرولیکی نامناسب از ادامه تحلیل‌ها حذف شدند.

برای برآورد مساحت و حجم پیاز رطوبتی، پروفیل دوبعدی بازسازی‌شده در نرم‌افزار AutoCAD رسم شد و مختصات نقاط مرزی در عمق‌های مختلف وارد نرم‌افزار گردید. مساحت مقطع خیس‌شده با استفاده از ابزارهای محاسباتی نرم‌افزار تعیین شد. به‌منظور برآورد حجم پیاز رطوبتی، مقادیر عرض ناحیه مرطوب در دو سمت محور مرکزی استوانه در هر عمق اندازه‌گیری شد. با توجه به ناهمگنی طبیعی خاک و احتمال ایجاد جریان‌های ترجیحی، اختلاف جزئی بین دو سمت مشاهده شد؛ بنابراین، میانگین عرض اندازه‌گیری‌شده در دو طرف به‌عنوان عرض مؤثر در نظر گرفته شد و سپس با فرض تقارن محوری نسبت به محور استوانه، بازسازی سه‌بعدی پیاز رطوبتی و محاسبه حجم صورت گرفت. حجم نهایی با استفاده از روش دیسکی^۱ (رابطه ۸) محاسبه شد. این روش انتگرال‌گیری عددی از مقاطع، ضمن حفظ سادگی محاسبات، امکان برآورد نسبتاً دقیق مساحت و حجم پیاز رطوبتی را بر اساس داده‌های برداشت‌شده در شرایط مزرعه فراهم کرد.

$$V = \pi \int_0^D [\bar{w}(z)]^2 dz \approx \pi \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\bar{w}(z_i)^2 + \bar{w}(z_i + 1)^2}{2} \Delta z \quad (8)$$

که در آن:

V = حجم پیاز رطوبتی (سانتی‌متر مکعب)؛ D = عمق نهایی پیاز رطوبتی از سطح خاک (سانتی‌متر)؛ z = عمق مورد بررسی از سطح خاک (سانتی‌متر)؛ $\bar{w}(z)$ = میانگین عرض پیاز رطوبتی در عمق z ، در نظر گرفته‌شده به‌عنوان شعاع مؤثر مقطع (سانتی‌متر)؛ z_i و $z_i + 1$ = عمق دو نقطه متوالی برداشت عرض پیاز رطوبتی

¹ Solid of revolution

در تیمار ژئوتکستایل نبافته، لایه ژئوتکستایل با ایجاد مقاومت هیدرولیکی موضعی، انتقال مؤثر آب به خاک اطراف را محدود کرد و توسعه جبهه رطوبتی را به‌طور قابل توجهی کاهش داد. اگرچه ژئوتکستایل به‌طور گسترده به‌عنوان لایه‌ای برای جلوگیری از جابه‌جایی ذرات و افزایش پایداری ساختاری در سامانه‌های آبیاری زیرسطحی به‌کار می‌رود، نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از آن در مجاورت استوانه می‌تواند با کاهش قابلیت عبور جریان، الگوی انتقال آب را تحت تأثیر قرار دهد. این یافته با یافته‌های نجفی و طباطبایی (Najafi & Tabatabaei, 2009) مبنی بر ضرورت برقراری تعادل میان عملکرد فیلتراسیون و قابلیت عبور جریان در کاربرد ژئوتکستایل‌ها مطابقت دارد.

در تیمار ورمی‌کمپوست، ظرفیت بالای نگهداری آب، همراه ریزدانی، چسبندگی زیاد ذرات و تغییرات ساختاری در شرایط مختلف رطوبتی، موجب کاهش نفوذپذیری در اطراف منافذ خروجی استوانه و افزایش مقاومت هیدرولیکی شد (شکل ۵). در نتیجه، دبی خروج آب از استوانه کمتر از دبی ورودی بابلر بود و تجمع آب در داخل استوانه، سرریز از قسمت فوقانی آن را به دنبال داشت. این نتایج نشان می‌دهد ویژگی‌های فیزیکی ورمی‌کمپوست می‌تواند با کاهش قابلیت عبور جریان، انتقال آب در محیط متخلخل را محدود کنند. این رفتار با یافته‌های رحمن زاده بهرام و همکاران (Rahmanzadeh Bahram et al., 2014) مبنی بر کاهش نفوذپذیری مواد آلی متراکم در اثر تغییر ساختار و افزایش مقاومت در برابر جریان همخوانی دارد.



شکل ۵- انسداد منافذ استوانه و سرریز آب در بسترهای ورمی‌کمپوست و ژئوتکستایل

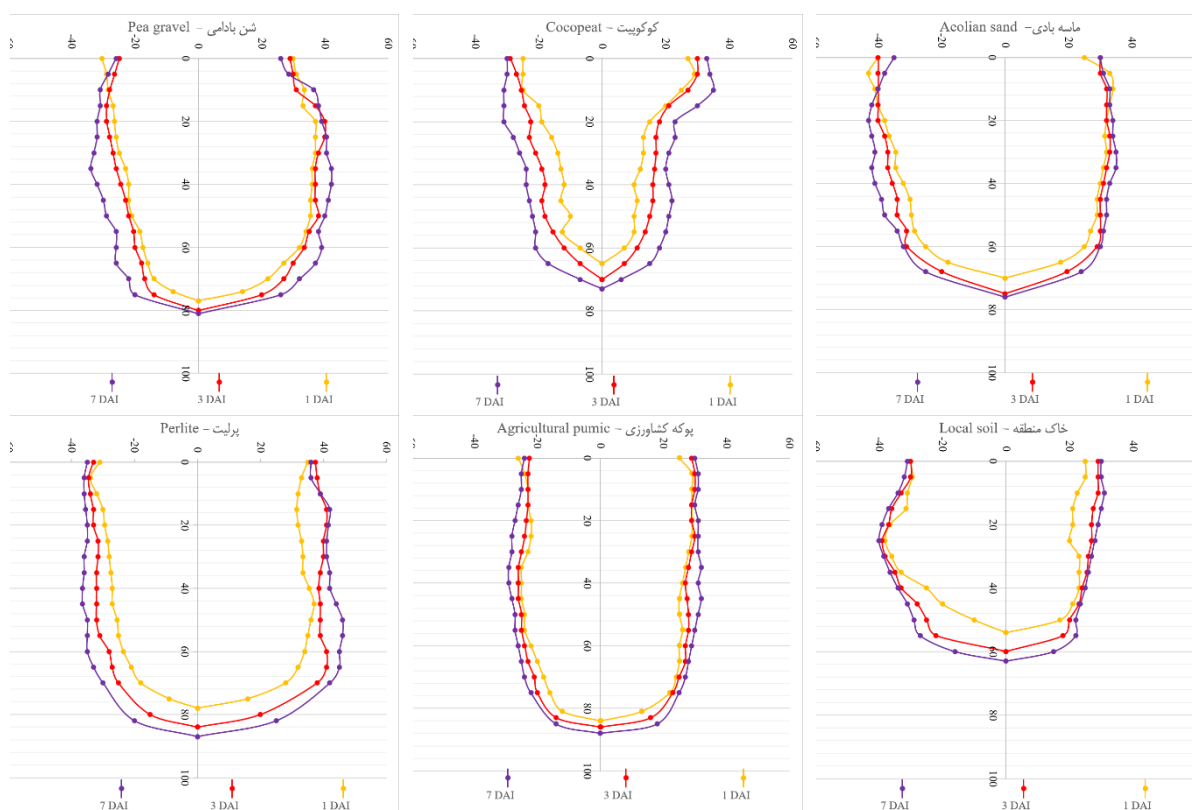
Fig. 5- Clogging of the cylinder openings and water overflow in the vermicompost and geotextile media

گسترش جبهه رطوبتی در راستاهای افقی و عمقی شد. این رفتار نشان‌دهنده نقش کوکوپیت به‌عنوان محیطی با قابلیت ذخیره و بازتوزیع تدریجی رطوبت پس از پایان آبیاری است.

در مقابل، پرلیت متعادل‌ترین الگوی توسعه پياز رطوبتی را ایجاد کرد. تخلخل زیاد، چگالی ظاهری پایین و هدایت هیدرولیکی مناسب این بستر، مقاومت در برابر حرکت آب را کاهش داده انتقال یکنواخت‌تر رطوبت از استوانه به محیط اطراف را فراهم کرد. در نتیجه، توسعه پياز رطوبتی در این تیمار در هر دو جهت افقی و عمقی متناسب صورت گرفت و گسترش پایدار جبهه رطوبتی طی زمان نشان‌دهنده توزیع مناسب آب در اطراف استوانه بود.

با توجه به محدودیت هیدرولیکی مشاهده‌شده در این دو تیمار، توسعه پياز رطوبتی در شش بستر باقی‌مانده شامل کوکوپیت، پرلیت، پوک‌ک کشاورزی، ماسه‌بادی، شن بادامی و خاک منطقه (شاهد) در سه زمان ۱، ۳ و ۷ روز پس از آبیاری بررسی شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که شکل و روند توسعه پياز رطوبتی به‌طور مستقیم تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی بسترهای پیرامونی قرار دارد (شکل ۶).

در تیمار کوکوپیت، در روز نخست پياز رطوبتی به‌صورت متمرکز و با ابعاد محدود تشکیل شد که به ظرفیت بالای جذب اولیه و نگهداری آب در ساختار الیافی این بستر نسبت داده می‌شود. با گذشت زمان، آزادسازی تدریجی آب ذخیره‌شده موجب ادامه



شکل ۶- الگوی پیاز رطوبتی تیمارهای آبیاری بابلر-استوانه PVC زیرسطحی

Fig. 6- Wetting bulb patterns under the bubbler-PVC cylinder subsurface irrigation treatments

پایین تر و مقاومت بیشتر خاک طبیعی در برابر حرکت آب مرتبط باشد. در مجموع، نتایج تحقیق نشان داد بستر پیرامونی با ایجاد تغییر در تعادل بین انتقال، ذخیره سازی و بازتوزیع آب می تواند هندسه و تداوم توسعه زمانی پیاز رطوبتی را به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد.

تغییرات مساحت و حجم خاک خیس شده در تیمارهای مختلف

به منظور کمی سازی تفاوت های مشاهده شده در الگوی توسعه پیاز رطوبتی، مقاطع برداشت شده با استفاده از نرم افزار AutoCAD بازسازی و مساحت و حجم ناحیه خیس شده محاسبه شد (شکل های ۷ و ۸).

نتایج به دست آمده نشان داد که در تمامی تیمارها مساحت و حجم ناحیه خیس شده از روز اول تا روز هفتم روند افزایشی دارد که بیانگر تداوم بازتوزیع رطوبت در خاک پس از پایان آبیاری است. این فرآیند ناشی از تداوم گرادیان پتانسیل ماتریک بین نواحی مرطوب و خشک و انتقال تدریجی آب در محیط خاک است (شکل ۹).

بیشترین توسعه عمقی پیاز رطوبتی در تیمار پوکۀ کشاورزی مشاهده شد. وجود حفره های درشت، هدایت هیدرولیکی بالا و ناهمگنی ساختاری این بستر شرایط را برای حرکت سریع تر آب در مسیرهای ترجیحی فراهم کرد و موجب غالب شدن انتقال عمقی نسبت به گسترش جانبی شد (Thorburn *et al.*, 2003; Siyal & Skaggs, 2009). این نتیجه نشان می دهد هدایت هیدرولیکی بالا به تنهایی عامل تعیین کننده الگوی توزیع رطوبت نیست، بلکه ویژگی هایی مانند اندازه، پیوستگی و آرایش منافذ نیز در شکل گیری هندسه پیاز رطوبتی مؤثر هستند.

در تیمارهای ماسه بادی و شن بادمی، توسعه اولیه پیاز رطوبتی سریع تر بود، اما روند گسترش آن در ادامه کاهش یافت. هدایت هیدرولیکی نسبتاً زیاد و ظرفیت پایین نگهداری آب در این بسترها سبب انتقال سریع اولیه آب و محدود شدن تداوم بازتوزیع رطوبت پس از آن شد. بنابراین، این تیمارها اگرچه انتقال سریع آب را فراهم کردند، اما از نظر توسعه پایدار پیاز رطوبتی عملکرد ضعیف تری نسبت به پرلیت و کوکوپیت نشان دادند.

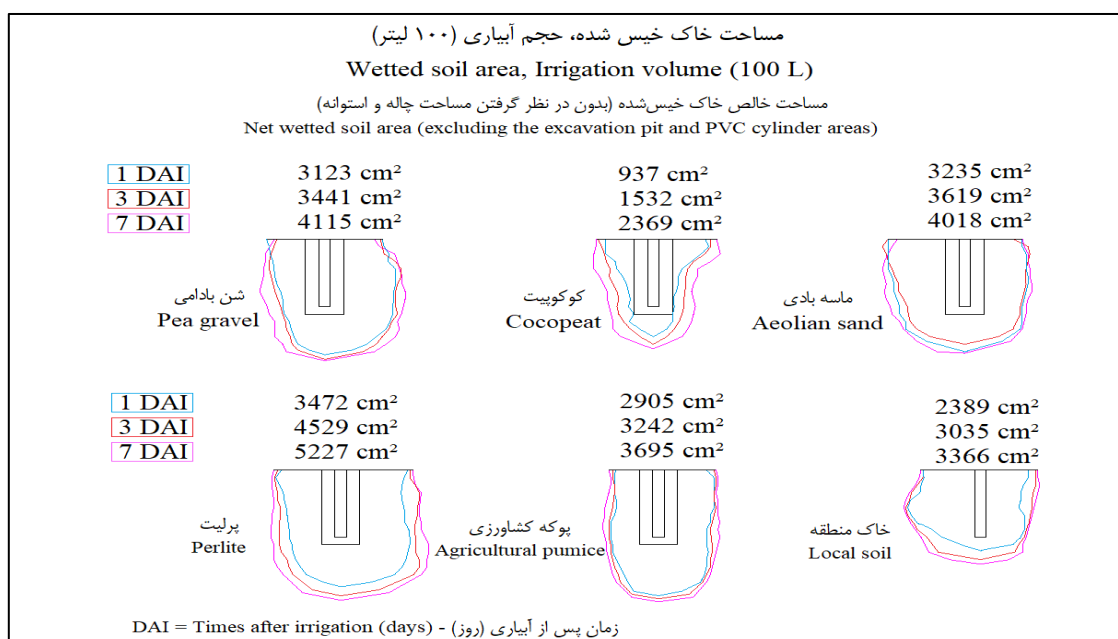
در تیمار شاهد (خاک منطقه)، توسعه پیاز رطوبتی محدودتر از اغلب بسترهای اصلاح شده بود که می تواند به هدایت هیدرولیکی

در تیمار شاهد، افزایش مساحت و حجم پیاز رطوبتی به ترتیب ۴۱ و ۵۸ درصد و در پوکۀ کشاورزی ۲۷ و ۴۰ درصد بود. اگرچه پوکۀ کشاورزی هدایت هیدرولیکی بالایی داشت، اما بخش عمده انتقال آب در راستای عمقی بود و در نتیجه توسعه جانبی و افزایش مساحت پیاز رطوبتی محدودتر باقی ماند.

در مقابل، کوکوپیت بیشترین تغییرات نسبی زمانی را نشان داد، به طوری که مساحت و حجم پیاز رطوبتی نسبت به روز نخست به ترتیب ۱۵۳ و ۲۰۵ درصد افزایش یافت. در مراحل اولیه، توسعه جانبی و عمقی پیاز رطوبتی در این تیمار محدودتر بود که می توان آن را ناشی از ظرفیت بالای جذب و نگهداشت آب در ساختار الیافی کوکوپیت دانست، اما بخش قابل توجهی از آب اعمال شده در ابتدا در این محیط ذخیره گردید و سپس به صورت تدریجی طی زمان به ناحیه خاک اطراف آزاد شد. بنابراین، کوکوپیت با وجود توسعه اولیه محدود، بیشترین توانایی را در بازتوزیع زمانی رطوبت نشان داد و نقش یک مخزن ذخیره و رهاسدن تدریجی آب را ایفا کرد (Al-Ajlouni *et al.*, 2024). این یافته با یافته‌های لی و همکاران (Li *et al.*, 2024) نیز هم‌راستاست که نشان دادند تنظیم تناوب و الگوی اعمال آب، نه صرفاً حجم آب مصرفی، می‌تواند شرایط میکرومحیط رطوبتی و حرارتی خاک را تحت تأثیر قرار دهد. در پژوهش حاضر نیز هرچند زمان‌بندی آبیاری ثابت بود، بستر پیرامونی با تغییر در ظرفیت ذخیره، انتقال و رهاسدن آب به صورت غیرمستقیم بر الگوی زمانی توزیع رطوبت در خاک اثر گذاشت.

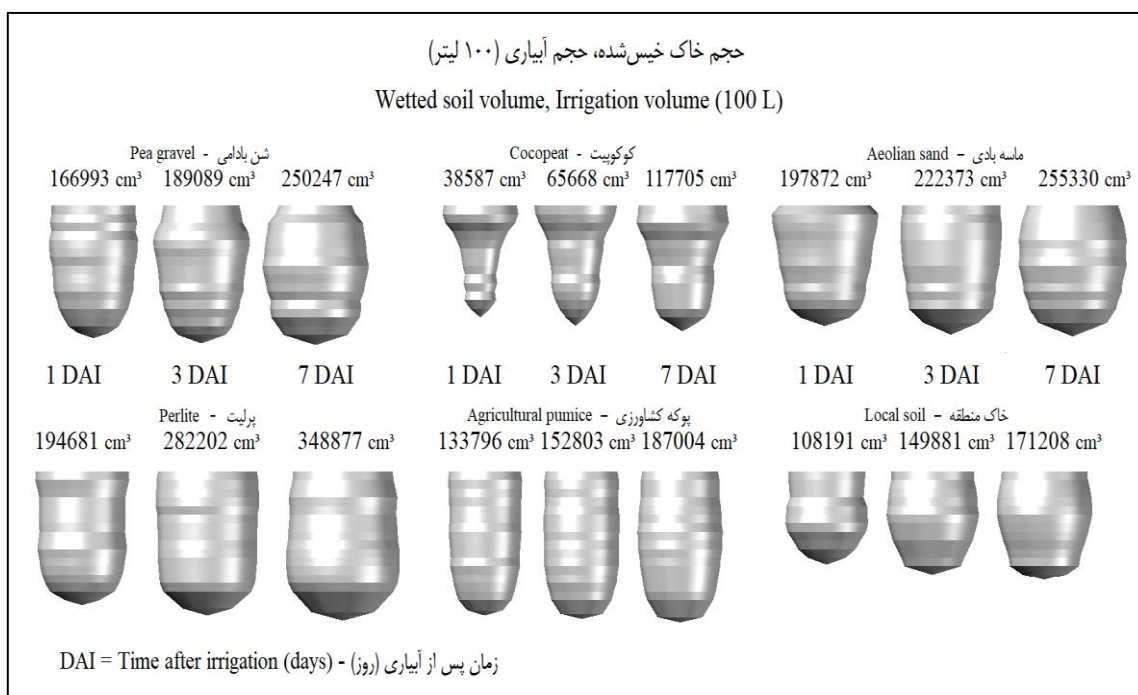
در میان تمامی تیمارها، پرلیت بیشترین مساحت و حجم پیاز رطوبتی را در تمام زمان‌های اندازه‌گیری ایجاد کرد. در روز هفتم، مساحت و حجم پیاز رطوبتی به ترتیب به ۵۲۲۷ سانتی‌متر مربع و ۳۴۸۸۷۷ سانتی‌متر مکعب رسید که نسبت به روز اول به ترتیب ۵۰ و ۸۰ درصد افزایش داشت. این عملکرد را می‌توان به تخلخل بالا، وزن مخصوص پایین، هدایت هیدرولیکی مناسب و مقاومت کم در برابر حرکت آب نسبت داد که موجب افزایش انتقال آب و گسترش یکنواخت‌تر جبهه ترشوندگی شد (Lim *et al.*, 2021; Kong *et al.*, 2021). همچنین، ساختار نسبتاً یکنواخت پرلیت می‌تواند از تمرکز جریان در مسیرهای ترجیحی جلوگیری و به پایداری بیشتر توزیع رطوبت کمک کند، موضوعی که با نتایج تحقیقات گیزاز و ساواس (Gizas & Savvas, 2007) در خصوص نقش مواد معدنی سبک در بهبود یکنواختی توزیع آب مطابقت دارد.

پس از پرلیت، شن بادامی و ماسه‌بادی توسعه نسبتاً پایداری از نظر مساحت و حجم نشان دادند. در شن بادامی، افزایش مساحت و حجم نسبت به روز اول به ترتیب ۳۲ و ۵۰ درصد و در ماسه‌بادی به ترتیب ۲۴ و ۲۹ درصد بود. ظرفیت پایین نگهداری آب در این بسترها موجب شد تا توسعه پیاز رطوبتی عمدتاً در مراحل اولیه رخ دهد و در ادامه روند افزایش آن کاهش یابد. این رفتار با نقش توزیع اندازه منافذ در کنترل همزمان نگهداشت و انتقال آب در محیط متخلخل، مطابق با رابطه منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع، توضیح داده می‌شود (van Genuchten, 1980).



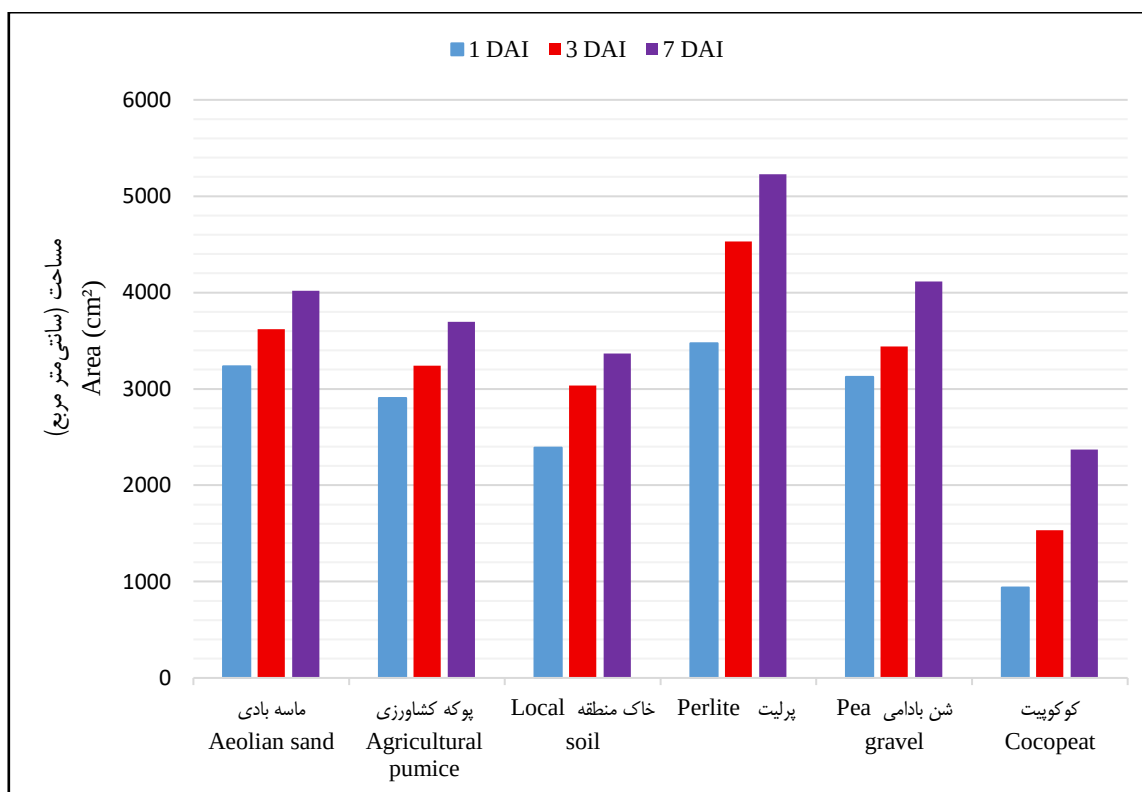
شکل ۷- مساحت خاک خیس شده تیمارهای آبیاری بابلر-استوانه PVC زیرسطحی

Fig. 7- Wetted soil area under the bubbler-PVC cylinder subsurface irrigation treatments



شکل ۸- حجم خاک خیس شده تیمارهای آبیاری بابلر-استوانه PVC زیرسطحی

Fig. 8- Wetted soil volume under the bubbler-PVC cylinder subsurface irrigation treatments



شکل ۹- تغییرات مساحت پیاز رطوبتی در تیمارهای مختلف طی ۱، ۳ و ۷ روز پس از آبیاری

Fig. 9- Changes in wetting bulb area under different treatments at 1, 3, and 7 days after irrigation

بازسازی هندسی ناحیه ترشوندگی نشان داد که فرض تقارن محوری، با وجود ناهمگنی‌های موضعی خاک، تقریب مناسبی برای برآورد حجم پیاز رطوبتی در این سامانه است. با این حال، تفاوت‌های جزئی مشاهده‌شده در دو سوی محور بیانگر وجود ناهمسانی‌های موضعی در هدایت هیدرولیکی خاک و ایجاد جریان‌های غیر یکنواخت است که می‌تواند موجب انحراف از الگوی کاملاً متقارن توزیع رطوبت شود (Lazarovitch et al., 2007).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که نوع بستر پیرامونی استوانه PVC می‌تواند بر رفتار هیدرولیکی سامانه آبیاری زیرسطحی و الگوی توسعه هندسی و زمانی پیاز رطوبتی اثرگذار باشد. بررسی هشت بستر پیرامونی نشان داد که ورمی کمپوست و ژئوتکستایل نبافته، به‌رغم ظرفیت نگهداری آب بالا یا ویژگی‌های مناسب فیلتراسیون، به دلیل افزایش مقاومت هیدرولیکی و محدود کردن خروج آب از منافذ استوانه، در شرایط آزمایش حاضر، عملکرد مطلوبی نشان ندادند و موجب تجمع و سرریز آب در داخل استوانه شدند. این یافته نشان می‌دهد که ویژگی‌های مطلوب ماده در کاربردهایی مانند بستر کشت یا لایه‌های فیلتراسیون، لزوماً به معنای عملکرد مناسب آن در مجاورت مستقیم منبع متمرکز خروج آب نیست.

در میان شش بستر باقی‌مانده، در مقایسه توصیفی، پرلیت در شرایط آزمایش حاضر بیشترین مقادیر مشاهده‌شده مساحت و حجم ناحیه خیس‌شده را در زمان‌های بررسی نشان داد. این رفتار را می‌توان به تخلخل بالا، چگالی ظاهری پایین و ویژگی‌های هیدرولیکی مناسب آن نسبت داد. پوکه معدنی کشاورزی با وجود هدایت هیدرولیکی بالا، بیشترین توسعه را در راستای عمق نشان داد که بیانگر نقش هم‌زمان هدایت هیدرولیکی، اندازه، پیوستگی و آرایش منافذ در تعیین مسیرهای جریان و الگوی گسترش رطوبت است. ماسه‌بادی و شن بادی نیز به دلیل پایین بودن ظرفیت نگهداری آب، توسعه نسبتاً سریع‌تری از پیاز رطوبتی را نشان دادند، در حالی که کوکوپیت، با وجود توسعه اولیه محدودتر، بیشترین افزایش نسبی مساحت و حجم را در فاصله زمانی روز اول تا هفتم نشان داد که می‌تواند با ظرفیت بالای آن برای ذخیره و رهاسدن تدریجی آب مرتبط باشد.

با توجه به برداشت‌های ترانشه‌ای در روزهای ۱، ۳ و ۷ و پس از یک نوبت آبیاری، تغییرات مشاهده‌شده در مرز ناحیه خیس‌شده را نمی‌توان صرفاً به پیشروی جبهه رطوبتی نسبت داد، زیرا بازتوزیع

رطوبت، زهکشی داخلی و حرکت ثقلی-مویینه آب نیز پس از قطع آبیاری در خاک ادامه داشته است. بنابراین، کاهش یا تغییر شکل ناحیه مرطوب‌شده در برخی بخش‌ها می‌تواند هم‌زمان با پیشروی رطوبت در نواحی دورتر رخ داده باشد. همچنین، به دلیل پدیده هیستریزیس در رابطه رطوبت-پتانسیل ماتریک، مرز بصری ناحیه خیس‌شده که بر اساس تغییر رنگ و بافت خاک تعیین شد، الزاماً متناظر با یک مقدار رطوبتی ثابت نیست و این موضوع می‌تواند بخشی از عدم قطعیت موجود در تعیین ابعاد پیاز رطوبتی را توضیح دهد. اگرچه پس از هر مرحله برداشت، سطح ترانشه با پوشش پلاستیکی پوشانده شد، وقوع مقداری تبخیر از سطح خاک اطراف استوانه در فاصله بین برداشت‌ها به‌طور کامل منتفی نیست. از سوی دیگر، آزمایش در شرایط بدون پوشش گیاهی اجرا گردید و بنابراین جذب آب توسط ریشه در نتایج به‌دست آمده دخیل نبوده است. در نتیجه، تغییرات مشاهده‌شده را می‌توان در چارچوب نفوذ، زهکشی داخلی و بازتوزیع ثقلی-مویینه آب در خاک تفسیر کرد.

با این حال، یافته‌های این پژوهش باید با توجه به شرایط آزمایش تفسیر شوند. نتایج بر پایه یک نوع بافت خاک (لوم رسی سیلتی)، یک حجم آبیاری ثابت و یک دوره پایش نسبتاً کوتاه (۷ روز) به دست آمده‌اند و بنابراین تعمیم مستقیم آن‌ها به سایر بافت‌های خاک، دبی‌های خروجی متفاوت و دوره‌های زمانی طولانی‌تر نیازمند احتیاط است. همچنین، به دلیل ماهیت مخرب روش ترانشه‌برداری، امکان پایش مستمر پیاز رطوبتی واحد در طول زمان وجود نداشت و برای هر ترکیب تیمار $\times$ زمان تنها یک واحد آزمایشی بررسی گردید. از این‌رو، مطالعه حاضر فاقد تکرار آماری و طرح آزمایشی متعارف برای آزمون معنی‌داری تفاوت‌ها بوده‌است و نتایج باید به‌عنوان تفاوت‌ها و الگوهای مشاهده‌شده در شرایط آزمایش تفسیر شوند، نه به‌عنوان اثر آماری معنی‌دار آزمون‌شده. به این محدودیت، به‌ویژه در مقایسه بین بسترها، باید توجه شود.

در پژوهش‌های آتی، استفاده از روش‌های غیرمخرب پایش رطوبت، از جمله حسگرهای رطوبتی یا روش‌های تصویربرداری می‌تواند امکان پایش پیوسته پیاز رطوبتی واحد و بررسی دقیق‌تر تغییرات زمانی آن را فراهم کند. بررسی بافت‌های مختلف خاک، سطوح متفاوت دبی خروجی، دوره‌های زمانی طولانی‌تر و تکرارهای آزمایشی مناسب نیز می‌تواند به ارزیابی آماری تفاوت‌های مشاهده‌شده و افزایش قابلیت تعمیم نتایج کمک کند. سرانجام اینکه ارزیابی اقتصادی بسترهای مختلف و بررسی اثر آن‌ها بر رشد و عملکرد گیاه در شرایط واقعی مزرعه می‌تواند مکمل مناسبی برای یافته‌های هیدرولیکی این پژوهش باشد.

تشکر و قدردانی

حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان به طور مساوی در تعریف مسئله و نگارش پیش‌نویس اصلی و متن نهایی مشارکت داشتند. ز.م. روش‌شناسی، پیشینه تحقیق و اجرای پژوهش، گردآوری و تجزیه و تحلیل داده‌ها و تهیه پیش‌نویس نتایج اولیه را انجام داده است. آ.ح. در اجرای بخش عملی پژوهش، انجام عملیات آزمایشگاهی و میدانی و گردآوری داده‌ها مشارکت داشته است. ع.ل. و ف.م. اش. نظارت بر اجرای پژوهش، اعتبارسنجی نتایج، تأمین امکانات و منابع مورد نیاز پژوهش و بازبینی و ویرایش نهایی مقاله را به صورت مشترک انجام داده‌اند. نسخه منتشر شده از مقاله، مورد تأیید هر چهار نویسنده است.

نویسندگان از سردبیر محترم و داوران ارجمند به پاس صرف وقت، بررسی دقیق و ارائه نظرها و پیشنهادهای ارزشمند که موجب ارتقای کیفیت علمی، بهبود ساختار و غنای محتوای این مقاله خواهد شد، صمیمانه قدردانی می‌کنند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسنده (نویسندگان) هیچ‌گونه حمایت مالی برای تحقیق، تألیف و انتشار این مقاله دریافت نکرده‌اند.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه

منابع

- Al-Ajlouni, M. G., Othman, Y. A., Abu-Shanab, N. S., & Alzyoud, L. F. (2024). Evaluating the performance of cocopeat and volcanic tuff in soilless cultivation of roses. *Plants*, 13(16), 2293.
- Alizadeh, A. (2014). Principles of farm irrigation systems design. Mashhad, Iran: Sajjad University Press. (In Persian).
- Bastani, S. (2018). A Historical Review of Innovations and Developments of Subsurface Irrigation Systems. *Journal of Water and Sustainable Development*, 4(2), 69-80. (In Persian)
- Buechel, T. (2014). Greenhouse herb and vegetable production – Part 4/4: Growing media. Premier Tech Horticulture.
- Cai, Y., Zhao, X., Wu, P., Zhang, L., Zhu, D., & Chen, J. (2018). Effect of soil texture on water movement of porous ceramic emitters: A simulation study. *Water*, 11(1), 22.
- Cote, C. M., Bristow, K. L., Charlesworth, P. B., Cook, F. J., & Thorburn, P. J. (2003). Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrigation Science*, 22(3), 143-156.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017). *The future of food and agriculture – Trends and challenges*. FAO.
- Gheysari, M., Sadeghi, S. H., Loescher, H. W., Amiri, S., Zareian, M. J., Majidi, M. M., & Payero, J. O. (2017). Comparison of deficit irrigation management strategies on root, plant growth and biomass productivity of silage maize. *Agricultural Water Management*, 182, 126-138.
- Gizas, G., & Savvas, D. (2007). Particle Size and Hydraulic Properties of Pumice Affect Growth and Yield of Greenhouse Crops in Soilless Culture. *HortScience*, 42(5), 1274-1280.
- Gohardoust, M. R., Bar-Tal, A., Effati, M., & Tuller, M. (2020). Characterization of physicochemical and hydraulic properties of organic and mineral soilless culture substrates and mixtures. *Agronomy*, 10(9), 1403.
- Gunarathna, M., Sakai, K., Nakandakari, T., Kazuro, M., Onodera, T., Kaneshiro, H., Uehara, H., & Wakasugi, K. (2017). Optimized subsurface irrigation system (OPSIS): Beyond traditional subsurface irrigation. *Water*, 9(8), 599.
- Guo, J., Zheng, L., Ma, J., Li, X., & Chen, R. (2023). Meta-analysis of the effect of subsurface irrigation on crop yield and water productivity. *Sustainability*, 15(22), 15716.

- Ilahi, W. F., & Ahmad, D. (2017). Physical and hydraulic characteristics of cocopeat–perlite media. *Sains Malaysiana*, 46(6), 975–980.
- Jingwei Geosynthetics. (2025). 200g geotextile: Technical specifications & engineering applications. Retrieved from <https://diadem.com>
- Khater, E.-S. G. (2015). Some physical and chemical properties of compost. *International Journal of Waste Resources*, 5(1), Article 172.
- Kong, C., Camps-Arbestain, M., & Clothier, B. (2021). Influence of the physical properties of pumice and biochar amendments on the soil's mobile and immobile water. *Soil Research*, 60(3), 234–241.
- Kumari, V., Paul, S. Ch., Singh, M., Kumar, A., & Pradhan, A. K. (2020). Quality Characterisation of Vermicompost Produced from Crop Residue and Cow Dung. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(10), 776.
- Lamm, F. R. (2002). Advantages and disadvantages of subsurface drip irrigation. In *International Meeting on Advances in Drip/Micro Irrigation* (pp. 1-12).
- Lazarovitch, N., Warrick, A. W., Furman, A., & Simunek, J. (2007). Subsurface water distribution from drip irrigation described by moment analyses. *Vadose Zone Journal*, 6(1), 116-123.
- Li, N., X. Shi, H. Zhang, et al. 2024. "Optimizing Irrigation Strategies to Improve the Soil Microenvironment and Enhance Cotton Water Productivity Under Deep Drip Irrigation." *Agricultural Water Management* 305: 109095.
- Lim, C. S., Lee, K. S., Lee, D. S., Jung, H. G., Hong, B. D., Kim, Y. J., & Chung, D. Y. (2021). Estimation of Water Retention Characteristics Depending on the Particle Sizes of Perlite Using van Genuchten Equation with Retention Curve Program. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 54(3), 276–288.
- Naghedifar, S. M. , Ziaei, A. N. and Ansari, H. (2020). Development of a Numerical Model for Furrow Irrigation by Coupling 1D Saint-Venant and 3D Richards' Equations. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(6), 1529-1541. (In Persian)
- Najafi, P., & Tabatabaei, S. H. (2009). Application of Sand and Geotextile Envelope in Subsurface Drip Irrigation. In *ICPTT 2009* (pp. 2026–2031).
- Payero, J. O. et al. (2005). Advantages and Disadvantages of Subsurface Drip Irrigation (SDI). *Univ. of Nebraska–Lincoln Extension*, EC776.
- Philip, J. R. (1969). *Theory of infiltration*. *Advances in Hydrosience*, 5, 215–296.
- Rahmanzadeh Bahram, H., Hassan-Beygi, S. R., Kianmehr, M. H., Valaei, I., & Mohammadi Mazraeh, H. (2014). The effect of moisture content, particle size and consolidation stress on flow properties of vermicompost. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 16(1), 247–252. 1280.
- Roshani, A. (2018). Design of drip irrigation systems (2nd ed.). Tehran, Iran: Agricultural Education and Agricultural Extension Publishing. (In Persian).
- Sahin, U., Anapali, O., & Ercisli, S. (2002). Physico-chemical properties of horticultural substrates. *European Journal of Horticultural Science*, 67(2), 55–60.
- Savartondrow, G., Zare, S., Ahmadauli, K., & Jafari, M. (2024). Evaluation of wetting pattern in deep subsurface irrigation method using PVC pipes in desert areas. *Journal of Range and Watershed Management*, 76(4), 335–349. (In Persian)
- Savartondrow, G., S. Zare, H. Liu, B. Liu, K. Ahmadaali, and M. Jafari. 2025. "Quantitative Assessment of Deep Root Irrigation Efficiency for Haloxylon Ammodendron Establishment in Desert Ecosystems." *Land Degradation & Development* 36, no. 18: 6380–6395.
- Shahadha, S. S., Al-Dharob, M., Al-Jubouri, M., & Salih, R. (2023). The impact of compost and expanded perlite on soil physical properties and water productivity under different irrigation practices. *Journal of Aridland Agriculture*, 92–98.
- Sharma, B., Molden, D., & Cook, S. (2015). Water use efficiency in agriculture. *International Food Policy Research Institute (IFPRI)*.

- Siyal, A. A., & Skaggs, T. H. (2009). Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. *Agricultural Water Management*, 96(6), 893-904.
- Thorburn, P. J., Cook, F. J., & Bristow, K. L. (2000). Variations in wetting patterns from trickle emitters in soils of different textures. *Irrigation Science*, 19(1), 11-17.
- Thorburn, P. J., Cook, F. J., & Bristow, K. L. (2003). Soil-dependent wetting from trickle emitters: Implications for system design and management. *Irrigation Science*, 22(3), 121-127.
- van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.
- Warrick, A. W. (2003). *Soil Water Dynamics*. Oxford University Press.
- Woessner, W. W., & Poeter, E. P. (2020). Hydrogeologic properties of earth materials and principles of groundwater flow. The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada.