

Performance Evaluation of the Geocomposite Water-Emitting Sheets on the Soil Moisture Distribution Pattern in Subsurface Irrigation System

Fatemeh Heshamti¹ , Mahdi Ghobadinia^{1*} , Mohammadreza Nouri¹ , Sayyed Hassan Tabatabaei¹ 

¹Department of water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 29 March 2026

Revised 30 April 2026

Accepted 08 May 2026

Published online 23 September 2026

Keywords:

Geotextile

Geomembrane

Pressure-compensating
emitter

Soil wetting pattern

ABSTRACT

Objective: The primary objective of this research was to investigate the influence of dimensions and material types of geocomposite irrigation plates on soil moisture distribution patterns.

Methods: The experiment was conducted as a two-factor factorial design based on a completely randomized design (CRD) with three replications. The first factor involved geocomposite plate dimensions at three levels (4×4, 8×8, and 12×12 cm). The second factor compared two material types: Type 1 consisted of two geotextile layers sandwiching a geonet, and Type 2 consisted of one geotextile layer and one geomembrane layer on either side of the geonet. A pressure-compensating emitter (8 L/h) with a cover served as the control treatment (CTRL).

Results: Results indicated that 12×12 cm geocomposite plates with one geotextile layer and one geomembrane layer (12TM) achieved the most significant effect and optimal wetted bulb conditions. This treatment resulted in a 37% reduction in the soil surface wetted area and a 28.19% increase in the maximum wetted area of the soil moisture profile compared to the control. The maximum wetted area was associated with the 12TM treatment (approximately 4500 cm²), while the minimum was recorded for the control (3250 cm²).

Conclusions: Overall, the results demonstrated that the utilization of geocomposite irrigation plates significantly reduced the surface wetted area while increasing the maximum wetted area within the soil profile, with statistical significance at the 1% level.

*Corresponding author, Email: mahdi.ghobadi@sku.ac.ir

Cite this article: Heshamti, F., Ghobadinia, M., Nouri, M., & Tabatabaei, S. H. (2026). Performance evaluation of the geocomposite water emitting sheets on the soil moisture distribution pattern in subsurface irrigation system. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 5(3), 145-160. <https://doi.org/10.22034/nawee.2026.576685.1200>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/0000000000000000000000>

Publisher: Gonbad Kavous University.

Introduction

Subsurface drip irrigation (SDI) is widely recognized as one of the most efficient irrigation methods because water is delivered directly to the plant root zone. This targeted water application improves water use efficiency, reduces evaporation losses, limits weed growth, and can enhance crop productivity. Despite these advantages, conventional SDI systems still face several operational challenges, including emitter clogging, intrusion of fine soil particles during pressure fluctuations, non-uniform water distribution, and gradual deterioration of soil wetting patterns over time. These limitations become more critical in fine-textured soils and when irrigation water contains suspended solids or dissolved salts, conditions that may reduce system reliability and increase maintenance requirements.

Recent developments in geosynthetic materials have introduced new opportunities to improve irrigation system performance. Geocomposites, which are composed of combinations of geotextiles, geonets, and geomembranes, provide controlled permeability, structural stability, and adaptable hydraulic behavior. Previous studies have investigated the use of geotextiles or geocomposites as protective layers around emitters to prevent clogging and soil intrusion. However, the direct application of geocomposite water-emitting sheets as substitutes for conventional drip emitters has rarely been investigated.

Furthermore, limited information is available regarding how the size and material configuration of geocomposite sheets affect soil moisture distribution patterns under subsurface irrigation conditions. Understanding these effects is essential for improving water delivery efficiency and optimizing soil wetting patterns within the root zone. Therefore, the main objective of this study was to evaluate the performance of geocomposite water-emitting sheets in a subsurface irrigation system and to determine how sheet dimensions and material composition influence soil moisture distribution characteristics.

Method

This study was conducted as a factorial experiment arranged in a completely randomized design with three replications. Two experimental factors were considered: the dimensions of geocomposite water-emitting sheets at three levels (4×4, 8×8, and 12×12 cm), and the material composition of the sheets at two levels. The first material configuration consisted of geotextile layers on both sides of a geonet, whereas the second configuration consisted of one geotextile layer and one geomembrane layer placed on either side of the geonet. A pressure-compensating drip emitter with a nominal discharge of 8 L h⁻¹, covered with geotextile, was used as the control treatment.

The experiment was carried out using lysimeters filled with silty clay soil under controlled field conditions. The geocomposite sheets were installed horizontally at a depth of 20 cm below the soil surface and connected to spaghetti tubing. To ensure comparability among treatments, the same irrigation water volume corresponding to the soil water-holding capacity was applied to all experimental units.

After irrigation, soil profiles were carefully excavated and key indicators of soil moisture distribution were measured, including wetted ground surface area, maximum wetted soil profile area, and wetted soil volume. Statistical analysis was performed using SAS software. Analysis of variance (ANOVA) was applied to determine the effects of experimental factors and their interaction. Mean comparisons were conducted using the LSD test at the 5% significance level, and the control treatment was included in all comparisons.

Results

The results indicated that the effects of geocomposite sheet dimensions, material composition, and their interaction were highly significant ($P < 0.01$) for wetted ground surface area and maximum wetted soil profile area. In contrast, treatment effects on wetted soil volume

were not statistically significant, which is consistent with the equal volume of irrigation water applied to all treatments. Low coefficients of variation confirmed the reliability and precision of the experimental measurements.

Mean comparison results showed that geocomposite water-emitting sheets substantially modified the soil moisture distribution pattern compared with the conventional drip emitter. Treatments containing a geomembrane layer restricted horizontal water movement near the soil surface, resulting in a deeper and more concentrated moisture distribution within the soil profile.

The smallest wetted ground surface area was observed in the 12×12 cm geocomposite sheet with a geotextile–geomembrane configuration, representing approximately a 37% reduction compared with the control treatment. This reduction is beneficial because it decreases surface evaporation and limits weed development. In contrast, the same treatment produced the largest maximum wetted soil profile area, with an increase of approximately 28% relative to the control treatment. This improvement suggests that larger geocomposite sheets enhance vertical water movement and improve moisture availability in the plant root zone. The improved performance is likely related to the larger contact area between the sheet and surrounding soil and the more controlled release of irrigation water.

Conclusions

The findings of this study demonstrate that geocomposite water-emitting sheets can be used as an effective alternative to conventional drip emitters in subsurface irrigation systems. By reducing the wetted ground surface area while simultaneously increasing the maximum wetted soil profile area, these sheets promote a more efficient soil moisture distribution and enhance water availability within the root zone.

Among the evaluated treatments, larger sheets combined with a geomembrane layer exhibited the best performance, indicating that both sheet dimensions and material composition play important roles in regulating soil water movement. From a practical perspective, the application of geocomposite water-emitting sheets may help reduce evaporation losses, restrict weed growth, and mitigate operational problems such as emitter clogging.

Overall, the results suggest that geocomposite-based emitters have the potential to improve the efficiency and reliability of subsurface irrigation systems, particularly in fine-textured soils and under challenging irrigation water quality conditions. Future research should focus on long-term field evaluations, economic feasibility, and the effects of these systems on crop growth and yield under different soil and climatic conditions.

Author Contributions

First Author: Conducting experiments, writing the original draft of the manuscript.

Second Author: Supervision, performing software/statistical analyses, editing, and reviewing the manuscript, and validating the results.

Third Author: Consultation.

Fourth Author: Research consultation, editing, and reviewing the manuscript.

Data Availability Statement

Data supporting the reported results are available on request from the corresponding author.

Acknowledgements

This research was financially supported by the Vice-Chancellor for Research of Shahrekord University. The authors sincerely acknowledge the support provided by Shahrekord University, Faculty of Agriculture, in the form of research funding for the first author's graduate thesis as well as research grants for the other authors.

Ethical Considerations

The authors adhered to all principles of research ethics in conducting and publishing this scientific study, and all authors confirm compliance with ethical standards.

Funding

This research was supported by the Vice-Chancellor for Research of Shahrekord University. Financial support for this study was provided through the graduate thesis research grant of the first author and additional research grants allocated to the co-authors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

During the preparation of this work, the authors used Gapgpt to review the manuscript text, conduct a pre-submission review, and assist with editing the English abstract. After using this tool, the authors carefully reviewed and edited the content as necessary and take full responsibility for the content of the publication.



ارزیابی عملکرد صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت بر الگوی توزیع رطوبت در آبیاری زیرسطحی

فاطمه حشمتی^۱، مهدی قبادی نیا^{۱*}، محمدرضا نوری امامزاده ای^۱، سیدحسین طباطبایی^۱

^۱ گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	هدف: هدف از این پژوهش بررسی تاثیر ابعاد و نوع مواد صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت بر الگوی توزیع رطوبت در خاک می باشد.
مقاله پژوهشی	مواد و روش ها: آزمایش به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور و سه تکرار انجام شد. فاکتور اول، ابعاد صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت در سه سطح (۴×۴، ۸×۸ و ۱۲×۱۲) سانتی متر، فاکتور دوم، نوع مواد صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت در دو سطح (سطح اول دو لایه ژئوتکستایل در دو طرف ژئونت و سطح دوم یک لایه ژئوتکستایل و یک لایه ژئوممبران طرفین ژئونت) و قطره چکان تنظیم کننده فشار (۸ lit.h ⁻¹) دارای پوشش به عنوان تیمار شاهد در نظر گرفته شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۱۲/۲۹	نتایج نتایج نشان داد که صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت با ابعاد (۱۲×۱۲) سانتی متر و به صورت یک لایه ژئوتکستایل و یک لایه ژئوممبران طرفین ژئونت با کاهش حدود ۳۷ درصد مساحت خیس شده سطح زمین و افزایش ۲۸/۱۹ درصد حداکثر سطح خیس شده پروفیل رطوبتی نسبت به تیمار شاهد (قطره چکان با پوشش)، بیشترین تاثیر و بهترین شرایط پیاژ رطوبتی را ایجاد می کند. بیشترین مقدار مساحت مربوط به تیمار صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت با ابعاد (۱۲×۱۲) سانتی متر و ترکیب یک لایه ژئوتکستایل و یک لایه ژئوممبران در طرفین ژئونت (12TM) و در حدود ۴۵۰۰ سانتی متر مربع بوده و کمترین مقدار مربوط به تیمار شاهد قطره چکان با پوشش (CTRL) و مقدار ۳۲۵۰ سانتی متر مربع اختصاص دارد.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۰	نتیجه گیری: به طور کلی نتایج نشان داد که استفاده از صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت باعث کاهش سطح خیس شده زمین و افزایش حداکثر سطح خیس شده پروفیل خاک در سطح معنی دار یک درصد گردیده است.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۸	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱	
کلیدواژه ها:	پیاژ رطوبتی ژئوتکستایل ژئوممبران قطره چکان تنظیم فشار

*نویسنده مسئول، Email: mahdi.ghobadi@sku.ac.ir

استناد: حشمتی، فاطمه؛ قبادی نیا، مهدی؛ نوری، محمدرضا؛ و طباطبایی، سیدحسین (۱۴۰۵). ارزیابی عملکرد صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت بر الگوی توزیع رطوبت خاک در سیستم آبیاری زیرسطحی. رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست، ۵ (۳)، ۱۴۵-۱۶۰.

<https://doi.org/10.22034/nawee.2026.576685.1200>

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه گنبد کاووس.



مقدمه

روش آبیاری زیرسطحی یکی از فناوری‌های نوین آبیاری است که به دلیل برخورداری از مزایای متعدد و منحصر به فرد از نظر مسائل زراعی، حفظ منابع آب و خاک و جنبه‌های اقتصادی، به عنوان راهکاری مناسب برای کاهش اثرات خشکسالی و بحران کمبود آب در اراضی فاریاب مطرح می‌باشد. کاهش میزان مصرف آب، افزایش رشد، عملکرد و کیفیت محصول، افزایش بهره‌وری مصرف آب، کاهش خطر شوری برای گیاهان، تعدیل مصرف کودهای شیمیایی، کنترل رشد علف‌های هرز، کاهش مصرف انرژی، تسهیل عملیات کشاورزی، حفظ ساختمان خاک و حفاظت بیشتر از محیط‌زیست از جمله مهم‌ترین مزایای آبیاری زیرسطحی به شمار می‌روند. در این روش، آب تحت تأثیر نیروی ماتریک خاک توزیع می‌شود که این امر موجب کاهش صعود موینگی آب در خاک می‌گردد (Ayars et al., 2015).

از جمله مشکلات آبیاری قطره‌ای، گرفتگی قطره‌چکان‌ها است که در اثر وجود املاح، مواد معلق موجود در آب و ذرات خاک ایجاد می‌شود و همچنین به دلیل حرکت محدود آب در خاک، توسعه ریشه با محدودیت مواجه می‌گردد به طور کلی گرفتگی قطره‌چکان‌ها در اثر عوامل فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی ایجاد می‌شود (Dehghanisanij et al., 2025). گرفتگی فیزیکی توسط ذرات معلق نظیر شن، سیلت و رس، گرفتگی شیمیایی ناشی از ترکیباتی مانند کربنات و سولفات کلسیم، هیدروکسید فلزات سنگین، کربنات‌ها، سیلیکات‌ها، سولفیدها، روغن‌ها و برخی کودهای شیمیایی، و گرفتگی بیولوژیکی توسط فیلامان‌ها، لجن‌ها، نهشته‌های میکروبی و باکتری‌ها ایجاد می‌شود (علیزاده ۱۳۸۸). گرفتگی کامل یا جزئی قطره‌چکان‌ها موجب کاهش یکنواختی توزیع آب و در نتیجه کاهش راندمان آبیاری و افزایش حجم آب مصرفی می‌گردد (علیزاده ۱۳۸۸، Shi et al., 2022). از دیگر مشکلات این سامانه، برگشت آب به داخل قطره‌چکان‌ها در زمان خاموش بودن سیستم است که در اثر مکش منفی، آب حاوی املاح و ناخالصی‌های خاک به داخل قطره‌چکان وارد شده و احتمال گرفتگی را افزایش می‌دهد. تجارب نشان می‌دهد که در مناطق خشک و نیمه‌خشک، قرار دادن قطره‌چکان‌ها در زیر سطح خاک و استفاده از فیلتر یا پوشش مناسب، می‌تواند موجب کاهش تبخیر و افزایش طول عمر قطره‌چکان‌ها شود (Najafi and Tabatabaei, 2010).

در سال‌های اخیر، ژئوسنتتیک‌ها به عنوان یکی از مصالح پرکاربرد در طرح‌های آب و خاک، مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند به طور کلی، ژئوسنتتیک عنوانی عمومی برای توصیف صفحات نازک و انعطاف‌پذیری است که در داخل یا مجاورت توده خاک با اهدافی نظیر مسلح‌سازی، جداسازی، عایق‌بندی رطوبتی، کنترل فرسایش، فیلتراسیون و زهکشی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ژئوکمپوزیت‌ها به صورت ترکیبی از چند نوع ژئوسنتتیک مانند ژئوتکستایل-ژئونت، ژئوتکستایل-ژئوگرید و ژئوتکستایل-ژئوسل ساخته شده و در بسیاری از کاربردها به‌ویژه به عنوان سیستم‌های فیلتر-زهکش مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سیستم‌ها معمولاً از یک یا دو لایه ژئوتکستایل به عنوان فیلتر و یک لایه میانی ژئونت یا ژئوگرید به عنوان زهکش تشکیل می‌شوند. آب تجمع‌یافته در اطراف فیلتر-زهکش ژئوکمپوزیت، به صورت عمود بر صفحات ژئوتکستایل وارد لایه زهکش شده و در امتداد آن از محیط خارج می‌شود. ژئوتکستایل‌ها به دلیل نفوذپذیری مناسب نسبت به آب و توانایی نگهداری ذرات خاک، نقش مؤثری در فرآیند فیلتراسیون ایفا می‌کنند (Blond, 2019).

در خصوص استفاده از ژئوتکستایل‌ها و ژئوکمپوزیت‌ها در سامانه‌های آبیاری زیرسطحی، با توجه به بررسی سیستماتیک انجام شده، مطالعات بسیار محدودی انجام شده است که در ادامه آن‌ها اشاره می‌شود. (Najafi and Tabatabaei, 2010) از شن و ژئوتکستایل به عنوان پوشش قطره‌چکان‌ها در آبیاری زیرسطحی استفاده کردند و نشان دادند که پوشش‌های ژئوتکستایل برای کاربردهای فصلی و کوتاه‌مدت مناسب بوده و می‌توانند در کاهش مشکلات بهره‌برداری مؤثر باشند. پاک‌نژاد و همکاران (۱۴۰۳) با بررسی استفاده از پنج نوع تشک ژئوتکستایل در اطراف لوله‌های سوراخ‌دار در سیستم آبیاری زیرسطحی گزارش کردند که تشک‌های دارای لایه زیرین کم‌نفوذ، به دلیل کاهش نفوذ عمقی، افزایش عرض خیس‌شدگی و کاهش صعود موینگی، مناسب‌ترین گزینه برای کاربرد در اطراف لوله‌های آبدی محسوب می‌شوند. به طور کلی، نتایج آن‌ها نشان داد استفاده از تشک‌های ژئوتکستایل موجب کاهش عمق خیس‌شدگی و افزایش گسترش افقی رطوبت در خاک می‌گردد. پاک‌نژاد و همکاران (۱۴۰۴) نشان دادند که قراردادن لوله خروجی‌های آبیاری زیرسطحی به طرف پایین می‌تواند سطح خیس شده خاک کمتری ایجاد نماید. گوگوچانی و همکاران (۱۴۰۳) طباطبائی و همکاران (۱۴۰۴) از صفحات ژئوکمپوزیت در دو تراز مختلف، یکی به عنوان صفحه

آبدۀ و دیگری به عنوان صفحۀ زهکش، استفاده کرده و نتایج حاصل از تصفیه زمینی و عملکرد آبیاری را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعات نشان داد که صفحات گسترده ژئوکمپوزیت توانایی مناسبی در انجام فرآیند آبیاری و هدایت آب در خاک دارند. Zahaf et al. (2025) با استفاده از یک سامانه ساده شامل بطری سوراخ دار پوشیده شده با ژئوتکستایل و فیلتر ماسه‌ای به جای قطرۀ چکان زیرسطحی، کاهش ۲۳ درصدی مصرف آب و کاهش ۶۲ درصدی ذرات معلق جامد را گزارش کردند که بیانگر پتانسیل بالای استفاده از مصالح ژئوسنتتیک به عنوان جایگزین اجزای متداول آبیاری زیرسطحی است. ذاکری و باقری (۱۴۰۵) نشان دادند که استفاده از کودآبیاری به همراه پساب می‌تواند باعث افزایش برخی پارامترهای عملکردی کلزا شده است، اما باعث افزایش عملکرد وزن هزار دانۀ نشده است.

حشمتی و همکاران (۱۳۹۶) در مطالعه‌ای به مقایسه خروجی‌های صفحۀای با نقطه‌ای پرداختند. در این پژوهش صفحات ژئوکمپوزیت در دو شکل مربع (۴×۴ سانتی‌متر) و مستطیل (۸×۲ سانتی‌متر) و در دو حالت قرارگیری افقی و عمودی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این پژوهش نشان داد که صفحات مربعی شکلی که به صورت افقی قرار گرفتند عملکرد بهتری در توزیع رطوبت خاک داشتند. پژوهش حاضر در ادامه پژوهش حشمتی و همکاران (۱۳۹۶) می‌باشد. هدف از این پژوهش بررسی امکان استفاده از صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت مربعی با ابعاد مختلف در سیستم آبیاری زیرسطحی به عنوان جایگزین قطرۀ چکان، تاثیر ابعاد و نوع مواد صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت بر سطح خیس شده زمین، حداکثر سطح خیس شده پروفیل خاک و حجم پیاز رطوبتی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعۀ پژوهشی دانشگاه شهرکرد انجام شد. منطقه محل اجرای طرح در محدوده جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۱ دقیقه شرقی و ۳۲ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی با ارتفاع ۲۰۶۱/۴ متر از سطح دریا و در بخش مرکزی رشته کوه‌های زاگرس واقع شده است. اقلیم منطقه بر اساس تقسیم بندی دومارتن نیمه خشک محسوب می‌شود. به منظور تعیین بافت و ویژگی‌های فیزیکی خاک، نمونه برداری از خاک مزرعۀ انجام شد. نمونه‌ها پس از خشک شدن در مجاورت هوا از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شده و برای انجام آزمایش‌های فیزیکی به آزمایشگاه منتقل شدند. تعیین بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتری انجام گرفت. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۱ و ویژگی‌های شیمیایی آب مورد استفاده در آزمایش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. در این پژوهش، به منظور تهیه صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت و همچنین پوشش اطراف قطرۀ چکان شاهد، از ژئوتکستایل نبافته استفاده شد. مشخصات فنی ژئوتکستایل مورد استفاده در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های خاک مورد استفاده در آزمایش

بافت خاک	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	چگالی ظاهری (gr.cm ⁻³)	pH	EC (dS.m ⁻¹)
شنی رسی سیلتی	۳۴	۵۰	۱۶	۱/۴	۷/۶۰	۰/۴۵

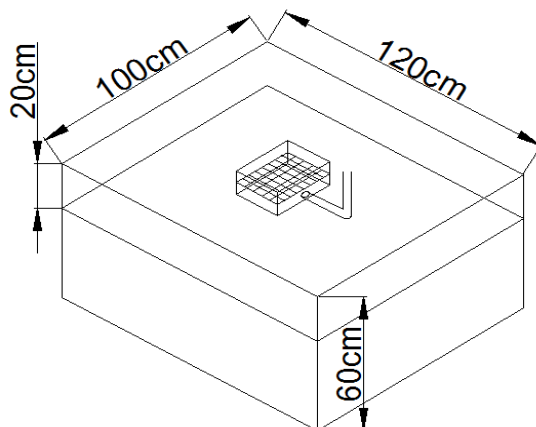
جدول ۲- ویژگی شیمیایی آب مورد استفاده در آزمایش

Ca+Mg (meq.L ⁻¹)	Na (meq.L ⁻¹)	K (meq.L ⁻¹)	HCO ₃ (meq.L ⁻¹)	Cl (meq.L ⁻¹)	EC (dS.m ⁻¹)	pH	SAR (meq.L ⁻¹) ^{0.5}
۲	۰/۷۰	۰/۰۸	۰/۳۶	۰/۱۹	۰/۳۴	۷/۶۸	۰/۲۲

جدول ۳- مشخصات پوشش ژئوتکستایل نبافته مورد استفاده

وزن در واحد سطح (gr.m ⁻²)	ضخامت (mm)	آبگذری عمودی (10 ⁻³ m.s ⁻¹)	مقاومت پارگی (N)	نام تجاری
۷۵۰	۶/۱۰	۲/۴۰	۸۷۵	PP750

برای تعیین پیاز رطوبتی حاصل از صفحات آبد، از ۹ لایسیمتر با ابعاد $120 \times 100 \times 60$ سانتی متر استفاده شد. خاک از مزرعه تهیه و پس از هواخشک شدن، از الک ۱۰ میلی متر عبور داده شد تا سنگریزه و کلوخه‌ها حذف گردد. سپس خاک در لایسیمترها به صورت لایه‌های ۱۰ سانتی متری پر و کوبیده شد. صفحات آبد ژئوکمپوزیت (یا قطره چکان‌ها) در عمق ۲۰ سانتی متری از سطح خاک و به صورت افقی نصب شدند. تمامی تکرارهای تیمارها به صورت همزمان و تحت شرایط محیطی یکسان اجرا شدند تا اثر تغییرات دمایی و فیزیکی خاک به حداقل برسد (شکل ۱).



شکل ۱- شمای کلی لایسیمتر آزمایش

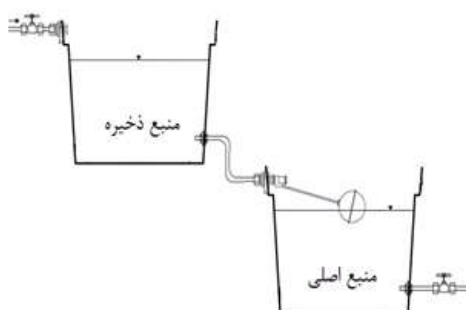
آزمایش در قالب آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور و سه تکرار انجام گرفت. فاکتور اول آزمایش ابعاد صفحات آبد ژئوکمپوزیت در سه سطح (4×4 ، 8×8 و 12×12 سانتی متر)، فاکتور دوم نوع مواد صفحات آبد ژئوکمپوزیت در دو سطح (سطح اول دو لایه ژئوتکستایل در دو طرف ژئونت و سطح دوم یک لایه ژئوتکستایل و یک لایه ژئوممبران در طرفین ژئونت) می‌باشد. در تمام تیمارهای آزمایش صفحات آبد ژئوکمپوزیت به طور مستقیم به لوله اسپاگتی متصل شده و عمل آبدی را انجام دادند تیمار شاهد، قطره چکان تنظیم کننده فشار *Netafim* با دبی ۸ لیتر بر ساعت که با ژئوتکستایل پوشش شده و متصل به لوله اسپاگتی بود (جدول ۴). صفحات ژئوکمپوزیت در ابعاد تعیین شده برش داده شده و به منظور جلوگیری از نشت جانبی آب، لبه‌های آن‌ها به طور کامل آب‌بندی گردید، به طوری که خروج آب تنها از سطح ژئوتکستایل امکان‌پذیر باشد. شکل ۲ نمایی از صفحات آبد ژئوکمپوزیت نصب شده در داخل لایسیمتر را نشان می‌دهد. به منظور ثابت نگه داشتن بار آبی خروجی صفحات آبد ژئوکمپوزیت، از دو منبع آب استفاده شد. منبع اول به عنوان مخزن ذخیره و اندازه‌گیری حجم آب خروجی و منبع دوم به عنوان تثبیت کننده بار آبی به کار رفت. برای ثابت نگه داشتن فشار در منبع اصلی، ارتفاع آب توسط یک شناور کنترل شد (شکل ۳).

جدول ۴- مشخصات تیمارهای آزمایش

علامت اختصاری	توصیف تیمارها
4TT	صفحات آبد ژئوکمپوزیت با ابعاد (4×4) سانتی متر با دو لایه ژئوتکستایل در دو طرف ژئونت
4TM	صفحات آبد ژئوکمپوزیت با ابعاد (4×4) سانتی متر با یک لایه ژئوتکستایل و یک لایه ژئوممبران طرفین ژئونت
8TT	صفحات آبد ژئوکمپوزیت با ابعاد (8×8) سانتی متر با دو لایه ژئوتکستایل در دو طرف ژئونت
8TM	صفحات آبد ژئوکمپوزیت با ابعاد (8×8) سانتی متر با یک لایه ژئوتکستایل و یک لایه ژئوممبران طرفین ژئونت
12TT	صفحات آبد ژئوکمپوزیت با ابعاد (12×12) سانتی متر با دو لایه ژئوتکستایل در دو طرف ژئونت
12TM	صفحات آبد ژئوکمپوزیت با ابعاد (12×12) سانتی متر با یک لایه ژئوتکستایل و یک لایه ژئوممبران طرفین ژئونت
CTRL	تیمار شاهد قطره چکان تنظیم کننده فشار (8 L.h^{-1}) با پوشش



شکل ۲- صفحه ژئوتکستایل مورد استفاده در آزمایش



شکل ۳- شماتیکی از سیستم تنظیم فشار سامانه آبیاری

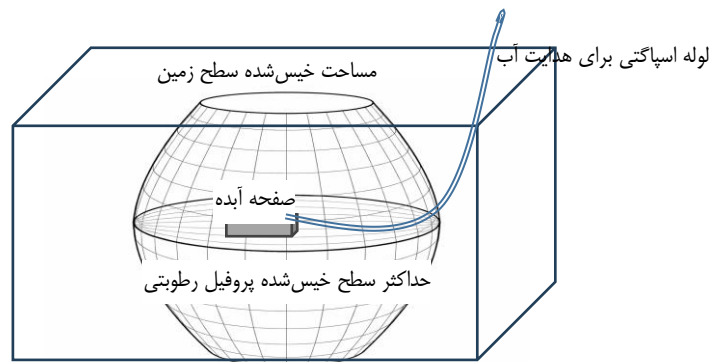
تعیین حجم آب آبیاری و اعمال آن

حجم آب مصرفی مطابق با میزان نگهداری آب خاک و با استفاده از معادله زیر محاسبه گردید:

$$V = (\theta_{FC} - \theta_{Soil}) \times D \times A \quad (1)$$

در معادله فوق، V حجم آب مصرفی (لیتر)، θ_{FC} رطوبت حجمی خاک در حد ظرفیت زراعی (درصد)، θ_{Soil} رطوبت حجمی خاک (درصد)، A سطح مقطع (مترمربع) و D ارتفاع ستون خاک (میلی‌متر) می‌باشد. در طی آزمایش حجم آب داده شده برای تمام تیمارها یکسان در نظر گرفته شد.

برای آماده کردن لایسی‌مترها ابتدا خاک از الک ۱۰ میلی‌متر عبور داده شد تا سنگریزه و کلوخه‌های آن جدا گردد و لایه لایه ۱۰ سانتی‌متر از خاک پر و کوبیده شد با کارگذاری صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت در عمق ۲۰ سانتی‌متر، میزان حجم مشخصی از آب از طریق صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت‌ها به خاک وارد گردید. بعد از انجام آزمایش با پروفیل‌برداری خاک، سطح خیس‌شده خاک، حداکثر سطح خیس‌شده پروفیل خاک و پیاژ رطوبتی اندازه‌گیری گردید. در آبیاری زیرسطحی هدف کاهش سطح خیس‌شده خاک به منظور کاهش تبخیر از سطح خاک و افزایش سطح خیس‌شده در ناحیه ریشه است که آب بیشتری در دسترس گیاه باشد. به این منظور جهت مقایسه تیمارها و انتخاب تیمار مناسب، پس از انجام آزمایش با پروفیل‌برداری خاک، مساحت خیس‌شده سطح زمین و حداکثر سطح خیس‌شده پروفیل رطوبتی و حجم پیاژ رطوبتی اندازه‌گیری گردید (شکل ۴).



شکل ۴- شماتیک پروفیل رطوبتی و محلهای اندازه گیری

ابعاد پروفیل های رطوبتی به نرم افزار AutoCAD منتقل شده و شاخص ها به صورت ترسیمی و محاسباتی تعیین شدند. سپس داده ها با استفاده از نرم افزارهای Excel و SAS تجزیه و تحلیل شده و مقایسه میانگین ها با آزمون LSD انجام گرفت.

نتایج و بحث

بررسی حداکثر مساحت خیس شده سطح زمین

جدول ۵ تجزیه واریانس اثر تیمارها بر سطح خیس شده زمین را نشان می دهد. نتایج بیانگر آن است که اثر هر دو فاکتور صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت (ابعاد و نوع مواد) و همچنین اثر متقابل آن ها بر سطح خیس شده زمین معنی دار بوده و این اختلاف در سطح احتمال یک درصد (۰/۱) معنی دار می باشد.

جدول ۵- تجزیه واریانس سطح خیس شده زمین

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
ابعاد	۲	۱۵۵۴۶/۷۴**
مواد	۱	۱۰۰۵۱۵/۵۸**
ابعاد×مواد	۲	۲۷۳۲۶/۲۷**
خطا	۱۴	۲۱۳۰/۸۰
ضریب تغییرات	۲/۵۱	-

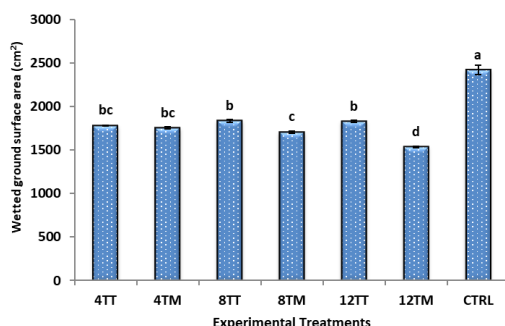
ns, *, ** به ترتیب عدم معنی داری و معنی داری در سطح ۰/۵ و ۰/۱

شکل ۵ مساحت خیس شده سطح زمین توسط تیمارهای مختلف را نشان می دهد. همان گونه که از شکل مشخص است، کمترین مساحت خیس شده سطح زمین مربوط به تیمار صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت مربعی شکل با ابعاد (۱۲×۱۲) سانتی متر و ترکیب یک لایه ژئوتکستایل و یک لایه ژئوممبران در طرفین ژئونت (12TM) بوده و بیشترین سطح خیس شده زمین به تیمار شاهد (قطره چکان با پوشش) اختصاص دارد (CTRL). از آنجاییکه تبخیر از سطح خیس شده خاک اتفاق می افتد بهترین گزینه، گزینه ای است که در آن، کمترین سطح خیس شده زمین روی داده است. شکل ۵ نشان می دهد به طور کلی استفاده از تیمارهای ژئوتکستایل باعث کاهش سطح خیس شده گردیده است

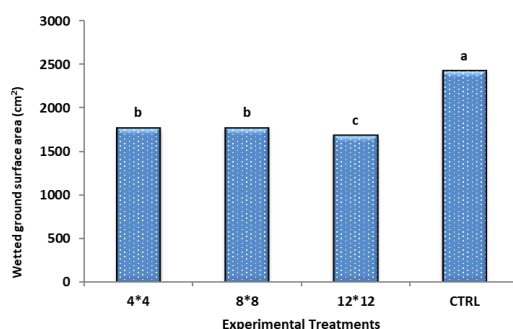
استفاده از صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت به صورت یک لایه ژئوتکستایل در یک طرف و لایه ژئوممبران در طرف دیگر ژئونت، در مقایسه با قطره چکان با پوشش، به واسطه وجود لایه ژئوممبران به عنوان یک لایه غیرقابل نفوذ، بر الگوی توزیع رطوبت خاک تأثیر گذاشته و موجب کاهش گسترش رطوبت در سطح خاک شده است این نتایج با یافته های حشمتی و همکاران (۱۳۹۶) تطابق داشت. همچنین صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت با ابعاد (۱۲×۱۲) سانتی متر نسبت به سایر ابعاد، به دلیل بزرگ تر بودن سطح لایه

نفوذناپذیر ژئوممبران و افزایش سطح تماس مؤثر، باعث محدود شدن گسترش افقی رطوبت و در نتیجه کاهش سطح خیس شده زمین گردیده‌اند.

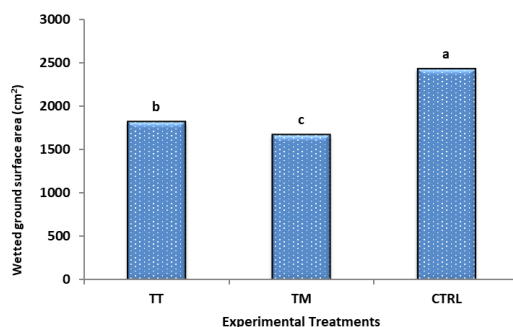
همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، تیمارهای صفحات آبده ژئوکمپوزیت در مقایسه با قطره‌چکان با پوشش، سطح کمتری از زمین را خیس نموده‌اند و بخش بیشتری از آب در عمق ناحیه ریشه ذخیره شده است. در صفحات آبده ژئوکمپوزیت با ابعاد (۴×۴) سانتی‌متر، صرف‌نظر از نوع مواد به‌کاررفته (دو لایه ژئوتکستایل در طرفین ژئونت یا ترکیب یک لایه ژئوتکستایل و یک لایه ژئوممبران)، تفاوت معنی‌داری در سطح خیس‌شده زمین مشاهده نشد. با توجه به نتایج با افزایش اندازه صفحات آبده در صورتی که از دو لایه ژئوتکستایل در طرفین ژئونت استفاده شده باشد تأثیر قابل توجهی بر کاهش مساحت خیس‌شده سطح زمین نسبت مشاهده نمی‌شود. با توجه به شکل ۷ استفاده از صفحات آبده دارای یک لایه ژئوممبران توانسته مساحت خیس‌شدگی سطح زمین را کاهش دهد. این کاهش به دلیل عملکرد لایه ژئوممبران به‌عنوان یک لایه نفوذناپذیر و محدود کردن خروجی از یک طرف باشد و در نهایت مساحت خیس‌شده سطح زمین را نسبت به تیمار شاهد به میزان حدود ۳۷ درصد کاهش داده است.



شکل ۵- مساحت خیس شده سطح زمین



شکل ۶- مقایسه اندازه صفحات آبده بر مساحت خیس شده سطح زمین



شکل ۷- مقایسه جنس صفحات آبده بر مساحت خیس شده سطح زمین

حداکثر سطح خیس شده پروفیل رطوبتی

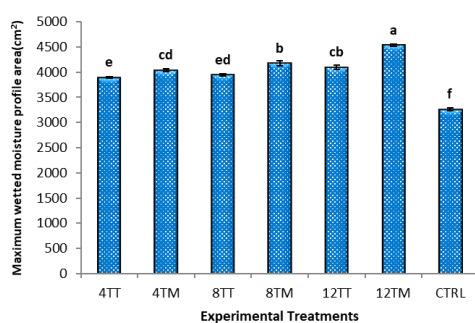
نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که الگوی توزیع رطوبت در سیستم توزیع آب با صفحات ژئوکمپوزیت از یک الگوی شبیه بیضوی تبعیت می‌کند. بر اساس اندازه‌گیری‌ها، مساحت خیس شده در سطح خاک (عمق صفر سانتیمتر) حداقل و حداکثر مساحت خیس شده پروفیل رطوبتی در محل کارگذاری قطره چکان یا صفحات ژئوکمپوزیت (عمق ۲۰ سانتیمتر) مشاهده و اندازه‌گیری شده است. در این بخش مساحت خیس شده در عمق نصب خروجی تحلیل می‌شود. نتایج حاکی از آن است که اثر هر دو فاکتور ابعاد صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت و نوع مواد به کاررفته، همچنین اثر متقابل آن‌ها بر حداکثر سطح خیس‌شده پروفیل رطوبتی در سطح احتمال یک درصد (۰/۱) معنی‌دار می‌باشند.

جدول ۶- تجزیه واریانس حداکثر سطح خیس شده پروفیل رطوبتی

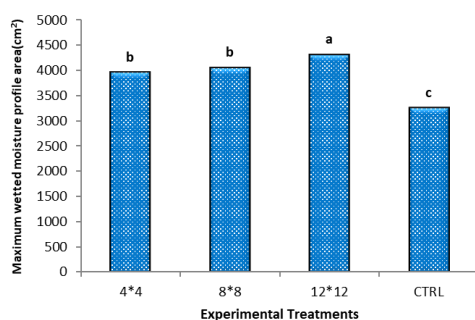
منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
ابعاد	۲	۱۹۸۳۱۷/۰۳ **
مواد	۱	۳۳۳۸۶۸/۷۸ **
ابعاد×مواد	۲	۳۵۴۲۲۱۹ **
خطا	۱۴	۴۰۳۶
ضریب تغییرات (CV)	۱/۵۹	-

ns, **, * به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح ۵٪ و ۱٪

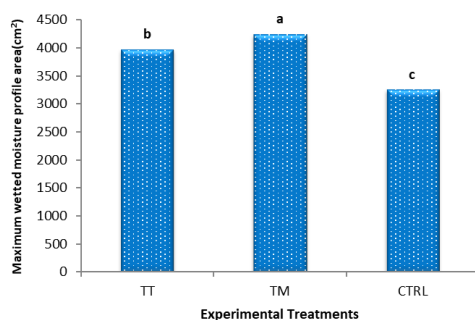
شکل ۸ حداکثر سطح خیس‌شده پروفیل رطوبتی در تیمارهای مختلف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، بیشترین مساحت مربوط به تیمار صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت با ابعاد (۱۲×۱۲) سانتی‌متر و ترکیب یک لایه ژئوتکستایل و یک لایه ژئوممبران در طرفین ژئونت و در حدود ۴۵۰۰ سانتیمتر مربع (12TM) بوده و کمترین مقدار به تیمار شاهد قطره‌چکان با پوشش (CTRL) و مقدار ۳۲۵۰ سانتیمتر مربع اختصاص دارد. با توجه به اینکه مقدار مساحت در سطح خاک در حدود ۱۵۰۰ سانتیمتر مربع اندازه‌گیری شده است لذا تیمار 12TM مساحت خیس شده در عمق خاک بسیار بیشتری را تولید کرده است (۳ برابر). استفاده از صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت به دلیل اتصال مستقیم به لوله اسپاگتی، دارای دبی خروجی بالاتری نسبت به قطره‌چکان با پوشش متصل به لوله اسپاگتی می‌باشد؛ هرچند در طول دوره آزمایش، حجم کل آب آبیاری برای تمامی تیمارها ثابت در نظر گرفته شده است. بنابراین، افزایش دبی خروجی همراه با حجم ثابت آبیاری، منجر به افزایش حداکثر سطح خیس‌شده پروفیل خاک شده است که این نتایج با یافته‌های شریف بیان‌الحق (۱۳۷۶) و شریف‌نیا و همکاران (۱۳۸۸) مطابقت دارد. با توجه به شکل ۹ افزایش اندازه صفحات به ۱۲ سانتی‌متر توانسته است حداکثر سطح خیس شده را افزایش دهد. با توجه به شکل ۱۰ صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت با لایه ژئوممبران در لایه بالایی و ژئوتکستایل در لایه پایینی، توانسته موجب توزیع بهتر آب در طرفین و در نتیجه افزایش حداکثر سطح خیس‌شده پروفیل رطوبتی شده‌اند. از سوی دیگر، صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت با ابعاد (۱۲×۱۲) سانتی‌متر نسبت به ابعاد کوچکتر، به دلیل سطح تماس بیشتر با خاک و احتمال کمتر گرفتگی، امکان نفوذ راحت‌تر آب به خاک را فراهم کرده و در نتیجه باعث افزایش حداکثر سطح خیس‌شده پروفیل رطوبتی شده‌اند. به‌طوری‌که مقدار حداکثر سطح خیس‌شده پروفیل رطوبتی در تیمار ۱۲TM نسبت به تیمار شاهد (قطره‌چکان با پوشش) حدود ۲۸ درصد افزایش یافته است. این نتایج در خصوص استفاده از صفحات آبدۀ با نفوذپذیری کمتر در بهبود رطوبت با نتایج پاک‌نژاد و همکاران (۱۴۰۳) و حشمتی و همکاران (۱۳۹۶) تطابق دارد.



شکل ۸- حداکثر سطح خیس شده پروفیل رطوبتی



شکل ۹- مقایسه اندازه صفحات آبدۀ بر حداکثر سطح خیس شده پروفیل رطوبتی



شکل ۱۰- مقایسه جنس صفحات آبدۀ بر حداکثر سطح خیس شده پروفیل رطوبتی

حجم پروفیل (پیاز) رطوبتی

جدول ۷ تجزیه واریانس حجم پروفیل رطوبتی را نشان می دهد بر اساس نتایج حاصل هر دو فاکتور (ابعاد و مواد صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت)، قطره چکان با پوشش و اثر متقابل آن ها بر حجم خاک خیس شده اثر معنی دار ندارد. به همین دلیل مقایسه میانگین ها انجام نگرفت و شکلی نیز ترسیم نگردید

جدول ۷- تجزیه واریانس حجم خاک خیس شده

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
ابعاد	۲	۲۳۴۶۸۵۱۳/۴۲ ^{ns}
مواد	۱	۴۲۳۲۷۲/۷۸ ^{ns}
ابعاد×مواد	۲	۱۷۸۹۸۲۲۱/۱۹ ^{ns}
خطا	۱۴	۱۵۹۹۶۱/۱۵
ضریب تغییرات (CV)	۳/۰۱	-

ns, *, ** به ترتیب عدم معنی داری و معنی داری در سطح ۵٪ و ۱٪

با توجه به اینکه حجم آب آبیاری در تمامی تیمارها یکسان در نظر گرفته شد، حجم خاک خیس شده نیز در همه تیمارها تقریباً ثابت به دست آمد و اختلاف معنی داری بین آن‌ها مشاهده نشد. به بیان دیگر، یکسان بودن حجم آب آبیاری موجب شد که تغییر در ابعاد و نوع مواد صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت تأثیر معنی داری بر حجم خیس شدگی خاک نداشته باشد. نتایج این بخش از آزمایش با یافته‌های شریف بیان‌الحق (۱۳۷۶) مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

بر اساس این پژوهش، نتایج زیر بدست آمده است:

- استفاده از صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت به عنوان جایگزین قطره‌چکان در آبیاری زیرسطحی، موجب کاهش مساحت خیس شده سطح زمین و افزایش حداکثر سطح خیس شده پروفیل خاک می‌گردد که نشان‌دهنده بهبود الگوی توزیع رطوبت در ناحیه ریشه است. با کاهش مساحت خیس شده سطح خاک میزان تبخیر از سطح خاک کاهش و در نتیجه تلفات تبخیر از خاک کاهش و راندمان افزایش می‌یابد.
- صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت با ابعاد (۱۲×۱۲) سانتی‌متر و ترکیب یک لایه ژئوتکستایل و یک لایه ژئوممبران در طرفین ژئونت، کمترین سطح خیس شده زمین را ایجاد نموده‌اند؛ به طوری که سطح خیس شده زمین در این تیمار نسبت به تیمار شاهد (قطره‌چکان با پوشش) ۳۷ درصد کاهش یافته است.
- تیمار (۱۲×۱۲) سانتی‌متر با یک لایه ژئوتکستایل و یک لایه ژئوممبران بیشترین حداکثر سطح خیس شده پروفیل خاک را ایجاد کرده و موجب افزایش ۲۸ درصدی این شاخص نسبت به تیمار شاهد شده است.
- به طور کلی به نظر می‌رسد برای سامانه‌های آبیاری زیرسطحی خروجی‌های صفحه‌ای و گسترده بهتر از خروجی‌های نقطه‌ای مانند قطره‌چکان مناسب‌تر باشد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: انجام آزمایش‌ها، نگارش نسخه اولیه مقاله

نویسنده دوم: راهنمایی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج

نویسنده سوم: مشاوره

نویسنده چهارم: مشاوره پژوهش، ویرایش و بازبینی متن مقاله

تعارض منافع

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

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهرکرد انجام شد. حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه شهرکرد، دانشکده کشاورزی در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانه برای سایر نویسندگان انجام شده است.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهرکرد انجام شد. بدین وسیله از حمایت‌های معاونت پژوهشی دانشگاه شهرکرد قدردانی می‌شود.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

متن اعلامیه: در طول آماده‌سازی این اثر، نویسنده(گان) از گپ جی بی تی به منظور بررسی متن مقاله، داوری پیش از ارسال برای مجله و ویراستاری چکیده انگلیسی استفاده کردند. پس از استفاده از این ابزار، نویسنده(گان) مطالب را در صورت نیاز بررسی و ویرایش کرده و مسئولیت کامل محتوای نشریه را بر عهده می‌گیرند.

منابع

- پاک‌نژاد، م.، قبادی‌نیا، م.، طباطبائی، س. ح. (۱۴۰۳). بررسی بهبود پیاز رطوبتی در آبیاری زیرسطحی با لوله‌های روزنه‌دار و استفاده از تشک‌های ژئوتکستایل. پژوهش آب ایران، ۱۸(۲)، ۴۹-۵۸.
- پاک‌نژاد، م.، طباطبائی، س. ح.، قبادی‌نیا، م.، موسوی زاده، ر. (۱۴۰۴). تأثیر جهت خروج آب از لوله‌های لاترال بر الگوی توزیع رطوبت در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در شرایط استفاده از ژئوتکستایل. رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست، ۴(۱): ۱۶۴-۱۷۷.
- ذاکری نیا، م.، باقری، ک. (۱۴۰۵). امکان‌سنجی تأثیر کودآبیاری قطره ای سطحی و زیر سطحی با پساب بر عملکرد کلزا. رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست، ۵(۱): ۱۲۸-۱۴۱.
- حشمتی ف.، قبادی‌نیا، م.، نوری امامزاده‌ای، م.، طباطبائی س. ح. (۱۳۹۶). تأثیر کاربرد صفحات ژئوکمپوزیت بر پیاز رطوبتی در سیستم آبیاری زیرسطحی نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۷: ۴۱-۵۲.
- شریف‌بیان‌الحق، م. ح. (۱۳۷۶). توزیع رطوبت در پروفیل خاک از منبع نقطه‌ای در سطوح شیب‌دار. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران.
- شریف‌نیا، ر.، میرزایی، ف.، لیاقت، ع. (۱۳۸۸). عوامل مؤثر بر شکل خیس‌شدگی خاک در آبیاری قطره‌ای و اصلاح موقعیت قطره‌چکان در اراضی شیب‌دار. پژوهش آب ایران، ۳: ۹-۱۶.
- طباطبائی، س. ح.، گوگوچانی، س.، قبادی‌نیا، م.، متقیان، ح.، عسگری، ع. (۱۴۰۴). اثر کاربرد دوترازی صفحات ژئوکمپوزیت بر ویژگی‌های شیمیایی و بیوشیمیایی خاک در شرایط استفاده از فاضلاب. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۵(۱): ۱-۱۴.
- علیزاده، امین. ۱۳۸۸. اصول و عملیات آبیاری قطره‌ای. انتشارات آستان قدس رضوی، ۴۱۵ صفحه.
- گوگوچانی، س.، قبادی‌نیا، م.، طباطبائی، س. ح.، متقیان، ح.، عسگری، ع. (۱۴۰۳). اثر کاربرد دوترازی صفحات ژئوکمپوزیت بر کیفیت پساب دانشگاه شهرکرد. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۴(۴): ۲۰۳-۲۲۱.
- Alizadeh, A., 2009. Principles and Practices of Drip Irrigation. Astan Quds Razavi Publications, Mashhad, Iran. 415 p. [In Persian]
- Ayars, J. E., Fulton, A., Taylor, B., 2015. Subsurface drip irrigation in California—Here to stay?. *Agricultural water management*, 157: 39-47. doi: 10.1016/j.agwat.2015.01.001

- Blond, E., Boyle, S., Ferrara, M., Herlin, B., Plusquellec, H., Rimoldi, P., Stark, T., 2019. Applications of geosynthetics to irrigation, drainage and agriculture. *Irrigation and Drainage*, 68(1):67-83.
- Dehghanisani, H., Mirlatifi, S. M., Emami, S., Rajabzadeh, T., 2025. Reducing the clogging of emitters in drip irrigation systems using acid washing and ultrasonic technology. *Scientific reports*, 15(1): 12499. doi:10.1038/s41598-025-95915-w
- Googoochani, S., Ghobadinia, M., Tabatabaei, S. H., Motaghian, H., Asgari, A., 2024. The effect of using bi-levels of geocomposite sheets on the quality of Shahrekord University wastewater. *Water and Soil Management and Modelling*, 4(4): 203-218. doi:10.22098/mmws.2023.13732.1362. [In Persian]
- Heshmati, F., Ghobadinia, M., Nouri, M.R., Tabatabaei, S.H., 2017. The effect of geocomposite sheets on the wetting pattern in subsurface irrigation system. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 7(2):41-52.[In Persian]
- Li, J., Zhang, J., Rao, M. 2004., Wetting Pattern and Nitrogen Distribution as Affected by Fertilization Strategies from a Surface Point Source. *Agricultural Water Management*, 67: 89-104.
- Najafi, P., Tabatabaei, S.H. 2010., Application of sand and geotextile envelope in subsurface drip irrigation. *African Journal of Biotechnology*, 9: 5147-5150.
- Paknejad, M., Ghobadinia, M., Tabatabaei, S. 2024., Improving wetting pattern in subsurface irrigation with perforated pipes and using geotextile mattresses. *Iranian Water Research Journal*, 18(2): 49-58. doi: 10.22034/IWRJ.2024.14680.2582. [In Persian]
- Paknejad, M., Tabatabaei, S.H., Ghobadinia, M., Mousavizadeh, R. 2025., Effect of perforated pipe layout with geotextile padding on the soil wetting pattern. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 4(1): 164-177. doi: 10.22034/nawee.2025.498103.1127[In Persian]
- Sharif-Bayanolhagh, M. H. 1997., Soil moisture distribution in the soil profile from a point source on sloping lands (Master's thesis, Irrigation and Drainage). Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. [In Persian]
- Sharifnia, R., Mirzaei, F., Layaqat, A. 2009., Factors affecting soil wetting pattern in drip irrigation and improvement of emitter placement on sloping lands. *Iranian Water Research Journal*, 3: 9–16. [In Persian]
- Shi, K., Lu, T., Zheng, W., Zhang, X., Zhangzhong, L. 2022., A review of the category, mechanism, and controlling methods of chemical clogging in drip irrigation system'. *Agricultural Water Management*, 272: 107831. doi: 10.1016/j.agwat.2022.107831.
- Tabatabaei, S., Googoochani, S., Ghobadinia, M., Motaghian, H. R., Asgari, A. 2025., The effect of using bi-levels geocomposite sheets on the chemical and biochemical characteristics of soil under wastewater reuse. *Water and Soil Management and Modelling*, 5(1), 1-14. doi: 10.22098/mmws.2023.13904.1372. [In Persian]
- Zahaf, M., Oulhaci, D., Zegait, R. 2025., Novel low-cost solution for sustainable irrigation in hyper arid regions: Field evaluation of bottle-based subsurface systems. *Ecological Engineering & Environmental Technology (EET)*, 26(10):167-181. doi:10.12912/27197050/210495
- Zakerinia, M., Bagheri K. 2026., The effect of surface and subsurface fertigation with waste water on Canola yield. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 5(1): 128-141. doi:10.22034/nawee.2025.495667.1125. [In Persian]