Iranian Journal of Soil and Water Research
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir
ISNN: 2423-7833

Improving the Water Productivity by Using Clean Household Wastewater and Technical Management of the Field in Hyper-Arid Regions (Case Study: Zabol City)

Moien Jahantigh [1]✉ | **Mansour Jahantigh** [2]

1. Corresponding Author, Department of Soil Conservation and Water Management, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Zabol, Iran. E-mail: moienja23@yahoo.com
2. Department of Soil Conservation and Water Management, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Zabol, Iran. E-mail: MJahantigh2000@yahoo.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Feb. 27, 2026

Revised: May. 13, 2026

Accepted: June. 3, 2026

Published online: June. 2026

Keywords:
Barley,
Clean wastewater,
Drought,
Sistan

ABSTRACT

Currently, water scarcity due to severe drought and mismanagement is a prominent challenge in arid regions. The alarming consequences of this phenomenon include water quality deterioration, soil fertility decline, and subsidence, which threaten sustainable development goals. This research aims to present an integrated approach to improving water productivity by using clean household wastewater and technical management of the field in the Sistan region. This study was conducted with treatments of soil texture type (Loamy-clay-silty, loam and sandy-loamy), organic fertilizer (cow and sheep manure), and type of water consumption (uncontaminated household wastewater, Potable water) in a completely randomized design with 12 treatments and three replications. To calculate the water consumption efficiency, was water productivity index (WP) was used. In each treatment, the amount of water consumption was measured during the study period. Growth characteristics of plant, such as height, fresh weight, and Yield (ton/ha) were measured during the growth period of plants too. Based on the results, the volume of water consumed in the treatments was different, and the highest and lowest water consumption was measured to be 245 and 155 liters, respectively. By analyzing the data, the findings showed that the effects of soil texture, fertilizer type at the 1% level, and the interaction effect of soil and fertilizer at the 5% level on irrigation frequency and soil moisture content were significant ($p \leq 0.05$). In contrast, the type of water consumption did not show a significant difference.

Cite this article: Jahantigh, M., Jahantigh, M., (2026) Improving the water productivity by using clean household wastewater and technical management of the field in hyper-arid regions (Case study: Zabol city), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (4),889-905. https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.412092.670113

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.412092.670113

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Currently, water scarcity due to severe drought and mismanagement is a prominent challenge in arid regions. The alarming consequences of this phenomenon include water quality deterioration, soil fertility decline, and subsidence, which threaten sustainable development goals. Hence to mitigate the water scarcity threats, it is essential to manage water consumption in agricultural production. Implementing technical management strategies for farming conditions is a powerful approach to significantly reducing consumption in the agricultural sector. Beside that, recycling clean household wastewater is a practical approach to managing water consumption and dealing with the water scarcity crisis to adapt to drought conditions in arid regions. The Sistan region is one of the country's semi-arid regions, which is facing numerous challenges in managing water and soil resources, due to recent droughts and the negative impacts of climate change. To address these issues, it is essential to integrate management strategies for water and soil resources. Therefore, this research aims to present an integrated approach to water consumption management by introducing an alternative water source to supply plant water demand using clean household wastewater, as well as technical management of field conditions for agricultural crop production in the Sistan region.

Materials and Methods

This research was conducted at the Sistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, located in the north of Sistan and Baluchestan province and Zabol city, with geographical coordinates of 61° 29 ' 12 " to 61 ° 29 ' 13 " and 31 ° 1 ' 14 " to 31 ° 1 ' 15 " north latitude, at an altitude of 480 meters above sea level. The 120-day Sistan winds are one of the most important climatic indicators of this region, which starts in mid-June and continues until early October.The soil texuture in this area is heavy and has poor drainage due to sediments deposited by the Helmand River from the highlands of Afghanistan. Additionally, the soil has high salinity. This study was conducted with treatments of soil texture type (Loamy-clay-silty, loam and sandy-loamy), organic fertilizer (cow and sheep manure), and type of water consumption (Domestic wastewater, Potable water) in a completely randomized design with 12 treatments and three replications. To calculate the water consumption efficiency, was water productivity index (WP) was used. In each treatment, the amount of water consumption was measured during the study period. Growth characteristics of plant, such as height, fresh weight, and Yield (ton/ha) were measured during the growth period of plants too.

Results and Discussion

Based on the results, the volume of water consumed in the treatments was different, and the highest and lowest water consumption was measured to be 245 and 155 liters, respectively. By analyzing the data, the findings showed that the effects of soil texture, fertilizer type at the 1% level, and the interaction effect of soil and fertilizer at the 5% level on irrigation frequency and soil moisture content were significant ($p \leq 0.05$). In contrast, the type of water consumption did not show a significant difference. In this context, the properties of soil, such as structure and its constituent particles, play a significant role in soil porosity and, consequently, water storage capacity in the soil. Moreover, utilizing animal manure due to increases the soil moisture absorption, significantly reducing water consumption. So, result shows that varition of soil moisture among the treatment are significantly difference ($p \leq 0.05$). So that, using cow manure (14.6%) increased the soil moisture content by 15.7 % more than using sheep manure (12.3%). Investigation of the growth characteristics of barley showed that the plant height, fresh and dry weight of the plant were affected by soil texture type and animal manure at the 1% level too ($p \leq 0.01$). Accordingly, this issue manifested that farm management by improving the soil texture and soil fertilizer leads to increase the water use efficiency and plant growth performance.

Conclusion

In this study, we implemented an integrated approach for water consumption efficiency by recycling the Domestic wastewater and farm management for producing the barley crop in the Sistan region. Results showed that the effect of managing field conditions (soil texture type and manure) had a significant effect on soil moisture content, plant growth indices, and water use efficiency. In addition, using clean household wastewater is a sustainable water source for agricultural production in arid areas. Overall, due to many challenges in the agricultural sector of the Sistan region, implementation of this strategy provides a suitable baseline for expanding the area under cultivation of agricultural products and, as well, restoring vegetation and protecting soil in abandoned agricultural lands in this region.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authorship contribution

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

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

During the preparation of this work, the author(s) did not use artificial intelligence tools.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank the reviewers and editor for their critical comments that helped to improve the paper. The authors gratefully acknowledge the support and facilities provided by the Department of Hydrology and Water Resour, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Organization (AREEO), Iran.

Ethical considerations

The Authors avoid falsifying data, plagiarism and misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۷، شماره ۴ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

بهبود بهره‌وری آب با کاربرد پساب خانگی و مدیریت بستر کشت در مناطق فراخشک (مطالعه موردی: شهر زابل)

معین جهان‌تیغ [۱] ✉ | منصور جهان‌تیغ [۲]

۱. نویسنده مسئول، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سیستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زابل، ایران. رایانامه: moienja23@yahoo.com

۲. بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سیستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زابل، ایران. رایانامه: MJahantigh2000@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۱۲/۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۲/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۳/۱۳
تاریخ انتشار: تیر ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:
بهره‌وری آب،
پساب خانگی،
قصیل جو،
سیستان،
خشکسالی.

چکیده

هدف از اجرای پژوهش حاضر بررسی اثر الگوی تلفیقی کاربرد پساب خانگی و مدیریت بستر کشت بر افزایش بهره‌وری آب در منطقه فراخشک سیستان (شهر زابل) است. این پژوهش در قالب طرح فاکتوریل با سه تکرار اجرا شد. تیمارهای مورد مطالعه در این تحقیق شامل نوع کیفیت آب مصرفی (پساب خانگی و آب شرب)، بافت خاک (لومی–رسی–سیلتی، لومی، شنی– لومی)، نوع کود دامی (گاوی و گوسفندی) برای کاشت گیاه قصیل جو بود. نتایج نشان داد که اثر نوع بافت خاک و کود دامی بر عملکرد قصیل جو و شاخص بهره‌وری علوفه تر و خشک، در سطح احتمال یک درصد ($p \leq$ ۰/۰۱) معنی‌دار است؛ به‌طوری‌که بیشترین میزان علوفه تر برابر با ۱۱۱ تن در هکتار (طی دو مرحله برداشت) مربوط به بافت خاک لومی–رسی–سیلتی بود که به‌ترتیب ۶ و ۱۰ درصد نسبت به بافت شنی–لومی و لومی افزایش عملکرد محصول را نشان داد. افزون بر این، کاربرد کود گاوی در مقایسه با کود گوسفندی؛ باعث افزایش ۷ درصدی عملکرد محصول و ۱۲ درصدی بهره‌وری مصرف آب شد. بررسی اثر کیفیت آب نیز بیانگر آن بود که آبیاری با پساب خانگی، با وجود افزایش نسبی عملکرد محصول و شاخص بهره‌وری علوفه تر و خشک نسبت به آب شرب، به لحاظ آماری معنی‌دار نبود. نتایج کلی حاکی از آن است که مدیریت مصرف آب از طریق بازچرخانی پساب خانگی همراه با اصلاح بستر خاک، ضمن افزایش عملکرد محصول موجب صرفه‌جویی در مصرف آب و ارتقای بهره‌وری آن می‌شود. اتخاذ این رویکرد، با وجود چالش‌های پیش‌رو در بخش کشاورزی، بستری مناسب برای تولید و توسعه سطح زیر کشت محصولات کشاورزی و احیاء اراضی کشاورزی رهاشده منطقه سیستان را فراهم می‌نماید.

استناد: جهان‌تیغ، معین، جهان‌تیغ؛ منصور، (۱۴۰۵) بهبود بهره‌وری آب با کاربرد پساب خانگی و مدیریت بستر کشت در مناطق فراخشک (مطالعه موردی: شهر زابل)، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۷ (۴)، ۹۰۵-۸۸۹. https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.412092.670113

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.412092.670113

مقدمه

خشکسالی و بحران کم آبی از مهمترین چالش‌های پیش‌رو در مناطق خشک و نیمه خشک به‌شمار می‌روند. باتوجه به روند افزایشی جمعیت و محدودیت منابع آب، پاسخگویی به نیاز آبی برای مصارف مختلف ازجمله شرب، صنعت و کشاورزی را در این مناطق با مشکل مواجه نموده است (FAO, 2017). بنا به گزارش‌های ارائه شده، بخش عمده‌ای از مصارف آب در ایران (حدود ۸۰ درصد) و جهان (حدود ۷۰ درصد) مربوط به بخش کشاورزی می‌باشد (World Bank, 2020). به‌طوری‌که در مقایسه با سایر کاربردهای آب به دلیل کاهش راندمان آبیاری و عملکرد محصول بهره‌وری و بازدهی کمتری دارد که نیازمند تغییر نگرش در نحوه استفاده از منابع آب و خاک جهت افزایش بهره‌وری آب در حوزه کشاورزی می‌باشد (Ling, 2019; Rout and Arulmozhiselvan, 2022).

با توجه به کمبود شدید منابع آب و از طرفی کاهش حاصل‌خیزی خاک در مناطق خشک در نظر گرفتن ارتباط متقابل آب، خاک و گیاه جهت مدیریت بهینه منابع و افزایش بهره‌وری آب امری اجتناب ناپذیر است (جعفری، ۱۴۰۴). به‌طوری‌که محققان، افت کیفیت خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در اراضی کشاورزی مناطق خشک و همچنین بهره‌برداری غیر اصولی از منابع محدود آب را از مهمترین عوامل موثر بر کاهش تولید محصول و بهره‌وری آب در این مناطق برشمرده‌اند (Mia et al., 2017). از این‌رو برای افزایش بهره‌وری آب در مناطق فراخشک مدیریت همزمان منابع آب و خاک در مقیاس مزرعه بسیار حائز اهمیت می‌باشد که تحقق این امر بستری مناسب برای خودکفایی در تولید محصولات راهبردی و از طرفی بهره‌برداری پایدار از منابع آب و خاک در مناطق خشک را فراهم می‌نماید (Sun et al., 2021; Franzluebbers, 2024; Gubiani et al., 2024 ;Bocean, 2025; Liang et al., 2025).

یکی از راهکارهای مؤثر برای افزایش بهره‌وری آب در مناطق فراخشک، استفاده مجدد از پساب خانگی برای مصارف غیر شرب است. به‌طوری‌که مطالعات متعدد در زمینه مدیریت منابع آب، استفاده مجدد از پساب خانگی و بازچرخانی آن را رویکردی مناسب جهت بهره‌برداری بهینه و صرفه جویی در مصرف آب در مناطق فراخشک معرفی کرده‌اند. در این خصوص نتایج برخی مطالعات بیانگر آن است که بخش قابل توجهی از مصارف خانوار در محیط آشپزخانه (حدود ۷۷ /۳۰ درصد آب مصرفی) با توجه به خصوصیات کیفی مناسب (عدم وجود مواد شوینده، چربی‌ها و ....) برای آبیاری مستقیم محصولات کشاورزی کاربرد دارد (Parwin and Karar Paul, 2020). از این‌رو پساب خانگی به عنوان یک منبع آبی پایدار برای توسعه فعالیت‌های کشاورزی در مناطق فراخشک به‌شمار می‌رود (Prajapati et al., 2025; Deepa et al., 2022; Stasinakis et al., 2022; López-Morales et al., 2019; Fraga et al., 2017).

علاوه بر مدیریت منابع آب، توجه به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک نیز نقش مهمی در بهره‌وری مصرف آب و تولید محصول در مناطق خشک دارد (Aller et al., 2025; Grant et al., 2019; Wu et al., 2018). برخی منابع مدیریت فنی مزرعه را به‌منظور اعمال برنامه‌های مدیریتی برای بهره‌برداری بهینه از خاک مورد توجه قرار داده‌اند (Bocean., 2025). این رویکرد با رعایت اصول کشاورزی و اعمال برنامه‌های مدیریتی در مقیاس مزرعه باعث بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و همچنین افزایش حاصلخیزی خاک می‌شود که عملکرد محصول در واحد سطح و میزان بهره‌وری آب را افزایش می‌دهد (Sun et al., 2021). یکی از روش‌های پیشنهادی برای مدیریت فنی مزرعه اصلاح بستر خاک می‌باشد. برخی محققین اذعان داشتند که تغییر بافت خاک با تاثیر بر ذخیره رطوبتی خاک، ظرفیت مزرعه و میزان نفوذپذیری آن نقش موثری بر عملکرد محصول و در نتیجه میزان بهره‌وری آب دارد (Lin and Cheng, 2016; Rout and Arulmozhiselvan, 2019 ; Dong and Ochsner, 2018; Reichert et al., 2009). علاوه بر بافت خاک، حاصل‌خیزی آن نیز در مدیریت فنی مزرعه حائز اهمیت است. در این راستا افزودن کود دامی به خاک نقش‌بسزایی بر افزایش حاصلخیزی و همچنین بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک دارد. استفاده از کود دامی منبع غنی برای افزایش ماده آلی خاک به‌شمار می‌رود که در صورت مدیریت صحیح و رعایت اصول تغذیه گیاهی، می‌تواند عملکرد محصول در واحد سطح را افزایش می‌دهد (Liang et al., 2025; Mia et al., 2017). بنا به‌نظر برخی محققین افزودن کود دامی به خاک ضمن افزایش حاصلخیزی با بهبود ساختمان و پایداری خاکدانه‌ها، باعث افزایش میزان نفوذپذیری آب در خاک نیز می‌شود. بنابه گزارش‌های ارائه شده به ازای افزایش یک درصد ماده آلی خاک، ظرفیت نگهداری آب در خاک در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر، پنج میلی‌متر افزایش می‌یابد (Aller et al., 2025; Arulmozhiselvan, 2019; Franzluebbers, 2024; Sun et al., 2021;). با توجه به شرایط خاص اقلیمی مناطق فراخشک، افزایش عملکرد محصول مستلزم رعایت اصول زراعی و انتخاب گونه گیاهی سازگار با این مناطق است. در این میان ارقام پر محصول غلات از جمله جو که مقاوم به محدودیت‌های رشدی (شوری، تنش آبی و ..) در مناطق فراخشک است که سهم عمده‌ای در چرخه غذایی انسان دارد (Dehghanpir and Bazrafshan, 2025; Bijanzadeh etal., 2021). لذا تولید این محصول با مدیریت همزمان منابع آب و خاک ضمن تحقق امر

خودکفایی در تولید محصولات راهبردی، افزایش بهره‌وری آب در مناطق فراخشک را میسر می‌نماید.

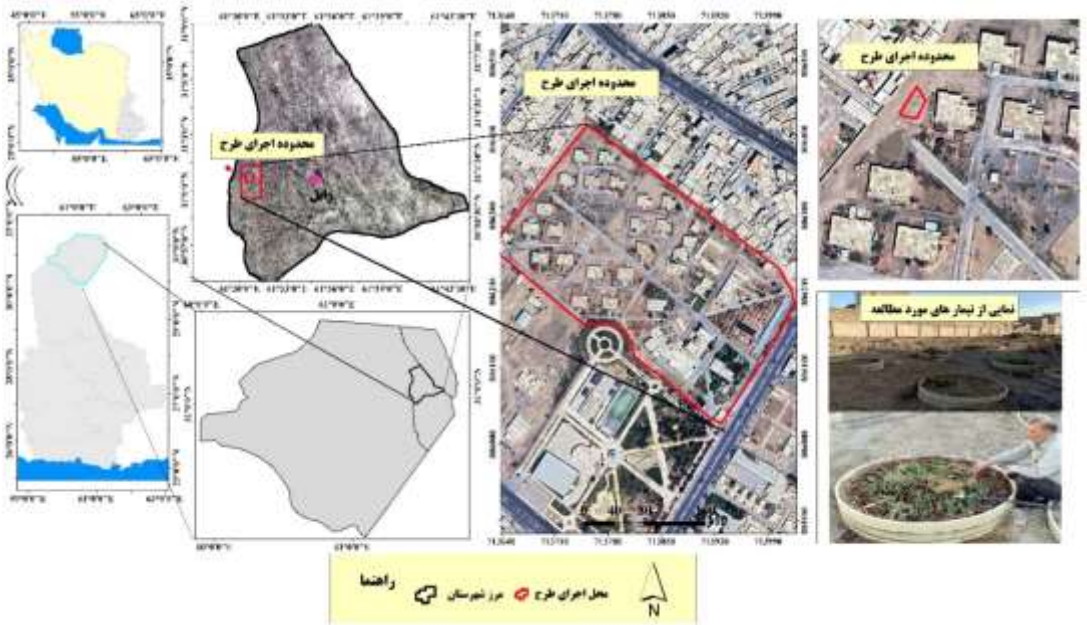
بررسی پیشینه پژوهش گویای این مهم است که افزایش بهره‌وری آب در بخش کشاورزی، نیازمند مدیریت همزمان منابع آب و خاک است که با توجه به کمبود شدید منابع آبی در مناطق فراخشک و از طرفی کاهش حاصل‌خیزی خاک در اراضی کشاورزی، استفاده مجدد از پساب خانگی و همچنین اصلاح بستر خاک به عنوان رویکردهای مدیریتی سازگار با شرایط آب و هوایی مناطق فراخشک می‌تواند بهره‌برداری بهینه از منابع آب و خاک و همچنین افزایش بهره‌وری آب در این مناطق را میسر نماید.

منطقه سیستان با توجه به بحران شدید کم آبی جز مناطق فراخشک کشور به‌شمار می‌رود (جهان‌تیغ و همکاران، ۱۴۰۲). به‌طوری‌که تحت تاثیر خشکسالی‌های اخیر و همچنین اثر سوء تغییر اقلیم در این منطقه با چالش‌های متعدد در مدیریت منابع آب و خاک و تولید محصولات کشاورزی مواجه است. از این‌رو پژوهش حاضر با هدف ارائه رویکردی کاربردی برای مدیریت همزمان آب و خاک با استفاده از پساب خانگی و مدیریت بستر کشت به‌منظور افزایش بهره‌وری آب در اراضی کشاورزی منطقه سیستان (شهر زابل) انجام شد. دست‌آوردهای این پژوهش می‌تواند مبنایی برای تصمیم‌گیری و تدوین راهبردهای تاب‌آوری توسط مدیران جهت مدیریت پایدار آب و خاک در این منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد پژوهش در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی سیستان واقع در شهرستان زابل (استان سیستان و بلوچستان) با مختصات جغرافیایی "۰ '۳۰ °۶۰ تا "۰ '۳۳ °۶۱ طول شرقی و "۰ '۰ °۳۱ تا "۰ '۰۳ °۳۱ عرض شمالی و در ارتفاع حدود ۴۲۱ متر از سطح دریا قرار دارد (شکل ۱). متوسط بارندگی سالیانه این محدوده ۵۰ میلی‌متر است که بخش عمده آن در فصل زمستان ریزش می‌کند. میانگین دمای سالانه برابر با ۲۸ درجه سانتی‌گراد و متوسط تبخیر سالانه نیز در حدود ۵۰۰۰ میلی‌متر گزارش شده است که حدود ۳۰۰۰ میلی‌متر آن طی ماه‌های خرداد، تیر و مرداد صورت می‌گیرد (جهان‌تیغ و جهان‌تیغ، ۱۴۰۴). این منطقه با توجه به شرایط اقلیمی جزء مناطق فراخشک و بحرانی طبقه‌بندی می‌شود. تنها منبع تامین آب منطقه سیستان جریان‌های سیلابی حاصل از بارش در کشور افغانستان است که از طریق رودخانه هیرمند وارد این منطقه می‌شود که علاوه بر بخش کشاورزی، شرب و صنعت نیاز آبی محیط‌زیست منطقه سیستان را نیز تامین می‌کند، ولی کاهش آورد رودخانه هیرمند ناشی از تغییر اقلیم و مدیریت منابع آب در بالادست حوضه، باعث ایجاد چالش‌های متعدد در بخش‌های مختلف به ویژه فعالیت‌های کشاورزی و تولید محصول در منطقه سیستان شده است. علاوه بر محدودیت منابع آبی در منطقه سیستان بخش قابل توجهی از اراضی کشاورزی به دلیل خشکسالی‌های اخیر و نبود پوشش گیاهی تحت تاثیر فرسایش بادی قرار دارد که ضمن کاهش حاصل‌خیزی خاک باعث گسترش کانون‌های فرسایشی در منطقه سیستان شده است.



شکل ۱. موقعیت محل اجرای پژوهش در شهرستان زابل، استان سیستان و بلوچستان، ایران

روش انجام کار

این پژوهش باهدف ارزیابی تاثیر مدیریت مصرف آب با استفاده از پساب خانگی و مدیریت بستر کشت بر میزان بهره‌وری آب در منطقه فراخشک سیستان انجام شد. تیمارهای این پژوهش شامل نوع کیفیت آب مصرفی (پساب خانگی = I_1، آب شرب = I_2)، بافت خاک (شنی–لومی = S_1، لومی = S_2، لومی–رسی–سیلتی = S_3)، نوع کود دامی (کود گاوی = O_1، گوسفندی = O_2) می‌باشد که به صورت فاکتوریل در قالب یک طرح کاملا تصادفی با ۱۲ تیمار و سه تکرار اجرا شد. پساب مورد استفاده در این تحقیق از مصارف روزانه خانوار یکی از منازل مسکونی تامین شده است. بدین منظور در ابتدا سامانه جمع‌آوری پساب خانگی در خارج از منزل مسکونی نصب و پساب حاصل از مصرف روزانه خانوار ۳ نفری (پساب حاصل از مصرف آب در محیط آشپزخانه و روشویی حمام بدون استفاده از مواد شوینده) جمع‌آوری شد. در جدول ۱ نتایج خصوصیات کیفی آب مصرفی برای تیمارهای مورد مطالعه ارائه شده است. برای اجرای عملیات مزرعه‌ای ابتدا حلقه‌هایی به قطر ۱۲۰ و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر با مساحت ۱/۱۳ متر مربع از جنس کامپوزیت با الیاف شیشه‌ای (GRP) که مقاوم به رطوبت هستند، تهیه و در محدوده آزمایش نصب شد. در ادامه با استفاده از عایق لاستیکی (جهت جلوگیری از نفوذ آب) سطح هر یک از حلقه‌های مورد استفاده به چهار قسمت مساوی (مساحت هر یک برابر ۰/۲۷ متر مربع) تقسیم‌بندی شد. با توجه به بالا بودن زه‌آب و شور شدن خاک اراضی منطقه دشت سیستان، از یک لایه ۵ سانتی‌متر سنگریزه درون حلقه‌ها به‌منظور جلوگیری از بالا آمدن زه‌آب و شور شدن خاک تیمارهای مورد مطالعه استفاده شد. همچنین به‌منظور زهکشی بهتر بستر کشت در هریک از حلقه‌های نصب شده نیز سه لوله یک اینچی به‌طول ۲۰ سانتی‌متر در خاک تعبیه شد. اقدامات مدیریتی صورت گرفته برای افزایش بهره‌وری آب شامل تغییر بافت خاک و افزودن کود دامی گوسفندی و گاوی به خاک می‌باشد. خصوصیات فیزیکی شیمیایی خاک تیمارهای مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. در ادامه عملیات کاشت بذر جو در ابتدای آبان ماه سال ۱۴۰۳ انجام شد. برداشت محصول به‌صورت علوفه سبز جو (قصیل) زمانی که دانه جو به مرحله خمیری رسید (اوایل اسفند ماه) انجام و پس از خشک کردن توزین شد. برداشت دوم محصول نیز در اواخر فروردین ماه صورت گرفت. رطوبت خاک با استفاده از روش وزنی و میزان حجم آب مورد استفاده در تیمارهای مورد مطالعه با استفاده از رابطه (۱) تعیین شد.

$$d = (FC-Ø) \times P_b \times D/100$$ رابطه ۱)

در معادله فوق d : عمق معادل آب آبیاری (mm) برای رسیدن رطوبت در عمق مورد نظر به حد ظرفیت زراعی، FC رطوبت وزنی در حد ظرفیت زراعی (%)، Ø رطوبت وزنی خاک قبل از آبیاری (%)، P_b وزن مخصوص ظاهری خاک بر حسب ($g\ cm^{-3}$) و D حداکثر عمق توسعه ریشه گیاه بر حسب (mm) است. در ادامه براساس عملکردهای مختلف گیاه جو بهره‌وری علوفه تر و خشک در تیمارهای مورد مطالعه برآورد شد. به‌منظور محاسبه بهره‌وری گیاه جو از رابطه (۲) استفاده شد :

$$WP = \frac{Y}{I}$$ رابطه ۲)

که در آن WP = بهره‌وری آب آبیاری ($kg\ m^{-3}$)، Y = عملکرد محصول (kg) و I کل حجم آب مصرفی در طول دوره رشد (m^{-3}) است. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار SAS نسخه 9.4 و مقایسه میانگین داده‌ها براساس روش آزمون LSD انجام شد.

جدول ۱. خصوصیات شیمیایی آب مورد استفاده برای آبیاری تیمارهای مورد مطالعه

کیفیت آب مصرفی	Ec ($ds\ m^{-1}$)	pH	نسبت جذب سدیم ($Meq\ l^{-1}$)	سدیم ($Meq\ l^{-1}$)	Ca + Mg ($Meq\ l^{-1}$)	کادمیوم	نیکل
آب شهری	۰/۹	۷/۹	–	–	–	-	–
پساب خانگی	۱/۱	۶/۳	۲/۶	۵/۵	۸/۸	۰/۰۰۲۱	۰/۷۱

جدول ۲. برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد آزمایش

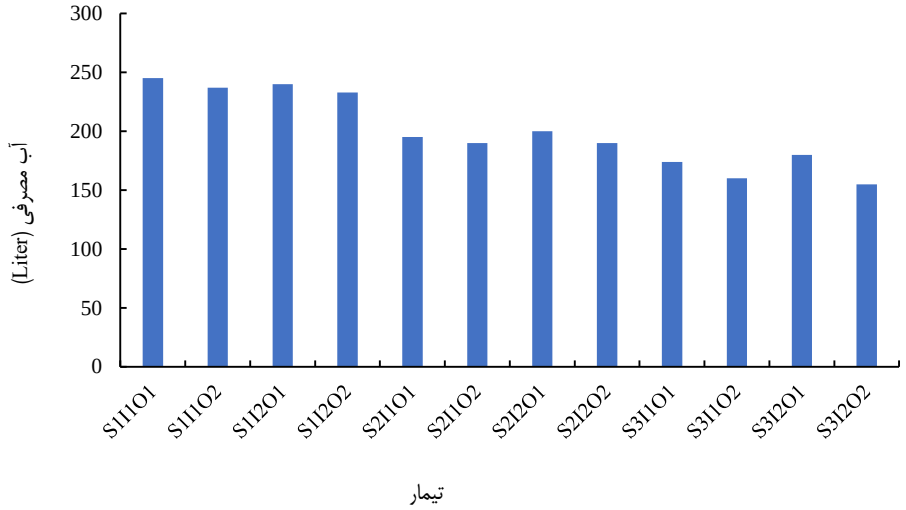
متغیر		واحد	نوع خاک		
			Loamy-clay-silty	Loam	Sandy-loamy
pH		-	۷/۸	۷/۷	۷/۸
Ec		$ds\ m^{-1}$	۱۶/۷	۱۷/۱	۱۸/۱
کربن		%	۳/۸	۱/۷۸	۱/۴
نیتروژن		%	۰/۳۸	۰/۱۸	۰/۱۴
C/N		-	۱۰	۵/۷	۰/۲۱
Ca^{+} mg		$Meq\ l^{-1}$	۹۹	۱۲۳	۱۳۶
Na^{+}		$Meq\ l^{-1}$	۱۱۰	۱۷۸/۵	۱۳۶
مجموع کاتیون‌ها		$Meq\ l^{-1}$	۲۰۹	۳۱۰/۵	۴۷۳/۵
سدیم محلول		%	۵۳	۶۰	۷۱
نسبت جذب سدیم		-	۱۵/۶	۲۳/۹	۴۰/۹
پتاسیم قابل جذب		ppm	۱۹۶۰	۱۲۴۸	۷۷۰
بافت	Sand	%	۱۸	۳۴	۶۶
	Silt	%	۴۸	۴۶	۲۶
	clay	%	۳۴	۲۰	۸

یافته‌های پژوهش

آب مصرفی، دور آبیاری و رطوبت خاک

نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان آب مصرفی در تیمارها طی دوره رشد محصول جو و برداشت آن به صورت قصیل (دو مرحله برداشت) در شکل ۲ ارائه شده است. با توجه به خشکسالی‌های اخیر در منطقه دشت سیستان، بارندگی موثری در طی دور مورد مطالعه صورت نگرفت. براساس نتایج به‌دست آمده حجم آب مصرفی در تیمارها متفاوت و بیشترین و کمترین آب مصرفی به ترتیب برابر با ۲۴۵ و ۱۵۵ لیتر اندازه‌گیری شد. با تجزیه واریانس داده‌ها یافته‌ها نشان داد که اثر بافت خاک، نوع کود در سطح یک درصد و اثر متقابل بافت خاک و کود در سطح پنج درصد بر دور آبیاری و میزان رطوبت خاک معنی‌دار شد ($p \leq ۰/۰۵$). در مقابل نوع کیفیت آب آبیاری و اثر متقابل سه عامل مورد مطالعه (کیفیت آب مصرفی، بافت خاک و کود دامی) اثر معنی‌داری بر تغییرات مقادیر این پارامترها نداشت (جدول ۳). در بررسی اثر کیفیت آب بر میزان رطوبت خاک نتایج بیانگر آن است که مقادیر این متغیر در تیمارهای آبیاری شده با استفاده از پساب خانگی نسبت به آب شهری با افزایش جزئی همراه بوده است ولی به لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری را نشان نمی‌دهد. نتایج به دست آمده از مقایسه میانگین رطوبت خاک در بافت‌های مورد مطالعه بیانگر آن است که بیشترین مقدار این شاخص برابر با ۱۶/۴ درصد و مربوط به کلاس بافتی خاک لومی–رسی–سیلتی می‌باشد که به ترتیب ۱۴/۸و ۲۶ درصد بیشتر از کلاس بافتی لومی و لومی – شنی است و به لحاظ آماری دارای اختلاف معنی‌دار می‌باشد (جدول ۴). تغییرات مقادیر رطوبت خاک متاثر از نوع کود دامی نیز تفاوت معنی‌داری را نشان داد ($p \leq ۰/۰۵$). بطوریکه با استفاده از کودگاوی (۱۴/۶ درصد) میزان رطوبت خاک افزایش ۱۵/۷ درصدی نسبت به شرایط استفاده از کود گوسفندی (۱۲/۳ درصد) را به‌همراه داشت. با توجه به نتایج، مقایسه تغییرات دور آبیاری تحت تاثیر کیفیت آب مصرفی (پساب خانگی و آب شهری) معنی‌دار نبود و اثر یکنواخت بر مقادیر این متغیر را نشان داد. براساس نتایج به‌دست آمده، اثر بافت خاک بر دور آبیاری به لحاظ آماری در سطح ۵ درصد دارای اختلاف معنی‌دار می‌باشد. به‌طوری‌که بیشترین دور آبیاری با میانگین ۹/۶ روز مربوط به خاک‌های با بافت لومی–رسی–سیلتی است که به‌طور محسوس بیشتر از خاک‌های لومی (۸ روز) و لومی–شنی (۶/۷ روز) می‌باشد. در بررسی تاثیر کود حیوانی بر دور آبیاری نیز یافته‌ها نشان داد که استفاده از کود گاوی باعث افزایش ۱/۲ برابری دوره آبیاری نسبت به کود گوسفندی شده است که در سطح ۵ درصد دارای اختلاف معنی‌دار است. در بررسی اثر متقابل کیفیت آب، خاک و کود بر مقادیر متغیرهای مورد بررسی نیز یافته‌ها تفاوت معنی‌داری در تیمارها مورد مطالعه را نشان داد (شکل ۳). بطوریکه بیشترین میزان رطوبت خاک در تیمار خاک لومی–رسی–سیلتی با استفاده از کود گاوی و آب شهری/ پساب خانگی حاصل شد که نسبت به سایر تیمارهای اندازه‌گیری شده در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار را به‌همراه داشت. روند تغییرات دور آبیاری نیز مشابه با تغییرات رطوبت خاک می‌باشد و بیشترین و کمترین مدت زمان آبیاری به ترتیب مربوط به تیمارهای خاک لومی–رسی–سیلتی با استفاده از کود گاوی و آب شهری (برابر با ۹/۸ روز) و تیمار خاک لومی– شنی با

استفاده از کود گوسفندی و پساب تمیز خانگی (برابر با ۶/۲ روز) می‌باشد که به‌لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری را نشان داد.



شکل۲. مقایسه میزان آب مصرفی تیمارها در طی دوره مورد مطالعه

جدول ۳. تجزیه واریانس عملکرد اثر بافت خاک، کیفیت آب و کود حیوانی بر رطوبت و دور آبیاری تیمارهای مورد مطالعه

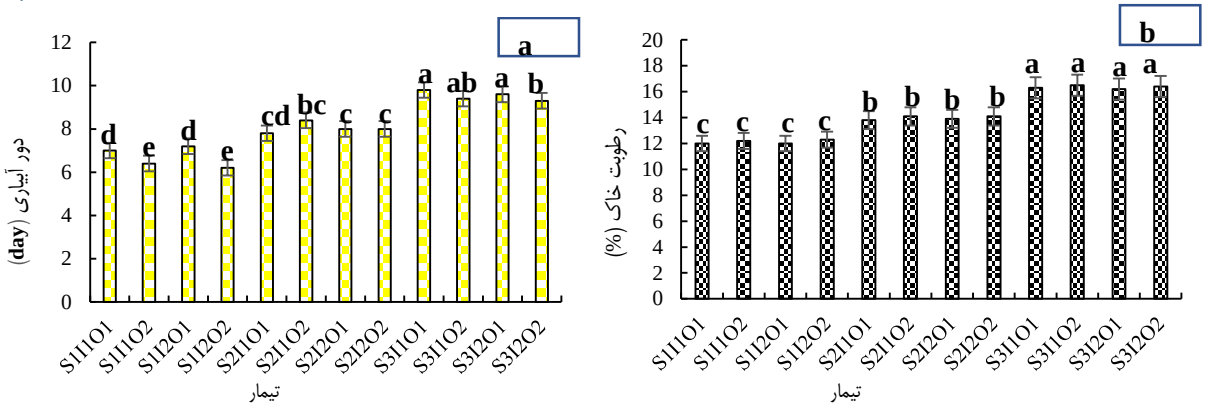
متغیر	df	میانگین مربعات	
		دور آبیاری (day)	رطوبت خاک (%)
بافت خاک	۲	۱۵/۹۷ *	۳۶/۸۱ *
کیفیت آب مصرفی	۱	۰/۰۴۲ ns	۰/۱۵ ns
کود حیوانی	۱	۱۴/۵۶ *	۱۸/۲ *
کیفیت آب مصرفی × بافت خاک	۲	۱/۳۵ ns	ns۰/۳۵
کود حیوانی × کیفیت آب مصرفی	۱	ns۰/۵۵	۰/۲۵ ns
کود حیوانی × بافت خاک	۲	۳/۶۴ **	۴/۰۲ **
کود حیوانی × کیفیت آب مصرفی × بافت خاک	۲	۰/۵۶ ns	۰/۰۰۵ ns
خطا	۲۴	۱/۲	۳/۱۲

***، ** و ns : به‌ترتیب معنی داری درسطح ۱ و ۵ درصد و عدم معنی‌داری**

جدول ۴. نتایج مقایسه میانگین سطوح مختلف کیفیت آب، بافت خاک و کود حیوانی بر رطوبت و دور آبیاری

متغیر		دور آبیاری (day)	رطوبت خاک (%)
کیفیت آب مصرفی	پساب خانگی	۸/۱۳ a	۱۴/۱۵ a
	آب شهری	۸/۰۵ a	۱۴/۰۵ a
بافت خاک	**Sandy-loamy**	۶/۷ c	۱۲/۱۲ c
	Loam	۸/۰۵ b	۱۳/۹۷ b
	Loamy-clay-silty	۹/۵۲ a	۱۶/۴ a
کود حیوانی	کود گاوی	۸/۳ a	۱۴/۶ a
	کو گوسفندی	۶/۹ b	۱۲/۳ b

نکته : میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون از نظر آماری بر اساس آزمون LSD تفاوت معنی‌داری ندارند.



شکل ۳. اثرات متقابل کیفیت آب، خاک و نوع کود بر دور آبیاری (a) و درصد رطوبت (b) در تیمارهای مورد مطالعه

خصوصیات رشدی گیاه

نتایج تجزیه واریانس صفات رشدی قصیل جو نشان داد که ارتفاع گیاه، وزن تر و خشک گیاه جو تحت تاثیر نوع بافت خاک و کود حیوانی در سطح ۱ درصد معنی‌دار می‌باشد ($p \leq ۰/۰۱$). این درحالی است که اثر نوع کیفیت آب آبیاری بر عملکرد رشدی گیاه جو اختلاف معنی‌داری را نشان نداد (جدول ۵). مقایسه میانگین داده‌ها بیانگر آن بود که ارتفاع گیاه در کلاس بافت لومی–رسی– سیلتی به ترتیب ۱/۱۱ و ۱/۰۵ برابر بیشتر از بافت خاک لومی–شنی و لومی می‌باشد. با توجه به نتایج استفاده از کودگاوی در خاک باعث افزایش ۱/۰۶ برابری ارتفاع جو نسبت به‌کاربرد کود گوسفندی در خاک شده است که به لحاظ آماری نیز اختلاف معنی‌داری را در سطح ۵ درصد نشان داد ($p \leq ۰/۰۵$). مقایسه میانگین وزن تر محصول جو به صورت قصیل طی دو مرحله برداشت نیز بیانگر آن بود که بیشترین میزان این متغیر در خاک لومی–رسی– سیلتی (۱۰/۹ کیلوگرم بر مترمربع) حاصل شده است که نسبت به خاک لومی و شنی–لومی به ترتیب ۸ و۳۰ درصد افزایش تولید محصول را نشان داد (جدول ۶). یافته‌ها همچنین نشان داد که وزن تر قصیل جو تحت تاثیر استفاده از کود گاوی، ۱۱/۱ درصد نسبت به شرایط استفاده از کود گوسفندی افزایش یافته که به لحاظ آماری معنی‌داری بود. مقایسه میانگین وزن خشک قصیل جو بیانگر آن بود که کیفیت آب مصرفی و همچنین نوع کود دامی تاثیر معنی‌دار بر مقادیر این متغیر نداشته است. این درحالی است وزن خشک این محصول به‌طور معنی‌دار تحت تاثیر بافت خاک قرار گرفته و بیشترین و کمترین مقادیر این متغیر به ترتیب مربوط به خاک لومی–رسی– سیلتی و شنی– لومی است. در بررسی اثر متقابل نوع کیفیت آب، بافت خاک و کود دامی بر متغیرهای فوق الذکر یافته‌ها بیانگر آن است که به جز ارتفاع گیاه، وزن علوفه تر و خشک قصیل جو با کاربرد پساب خانگی – آب شهری در خاک لومی–رسی– سیلتی و اضافه کردن کود گاوی به آن به‌طور محسوس نسبت به سایر تیمارها افزایش داشته است (جدول ۷).

جدول ۵. تجزیه واریانس عملکرد اثر بافت خاک، کیفیت آب و کود حیوانی بر شاخص‌های رشد گیاه و شاخص بهره‌وری مصرف آب در تیمارهای مورد مطالعه

متغیر	df	میانگین مربعات				
		وزن خشک (gr)	وزن تر (gr)	ارتفاع (cm)	عملکرد محصول ($ton\ ha^{-1}$)	بهره‌وری علوفه خشک ($kg\ m^{-3}$)
بافت خاک	۲	۰/۵۵ *	۱/۶۵ *	۶/۵ *	۶۸/۱۷ *	۲۰/۰۸ *
کیفیت آب مصرفی	۱	۰/۰۲ ns	۰/۲۵ ns	۰/۶۶۷ ns	۴/۱ ns	۰/۵۶۴ ns
کود حیوانی	۱	۰/۴۲ *	۰/۶۵ *	۶/۱ *	۱۴۰/۲ *	۴/۶۷ **
کیفیت آب مصرفی × بافت خاک	۲	۰/۰۱ ns	۰/۰۱ ns	۰/۱۶۷ ns	۲/۱ ns	۰/۷۸۱ ns
کود حیوانی × کیفیت آب مصرفی	۱	۰/۰۶ ns	۰/۰۳ ns	۰/۶۶۷ ns	۱/۱ ns	۰/۳۲۶ ns
کود حیوانی × بافت خاک	۲	۰/۳۶ *	۰/۶۹ *	۱/۵۷ *	۴/۱ *	۱/۵۳۱ *
کود حیوانی × کیفیت آب مصرفی × بافت خاک	۲	۰/۰۱ ns	۰/۰۱۳ ns	۱/۰۶ ns	۱/۰۱ ns	۰/۶۲۱ns
خطا	۲۴	۰/۱۲	۴/۲	۳/۱	۲/۳۱	۱/۱

*، ** و ns : به‌ترتیب معنی داری درسطح ۱ و ۵ درصد و عدم معنی‌داری

جدول ۶. مقایسه میانگین اثر کیفیت آب، خاک و کود بر شاخص‌های رشدی قصیل جو و بهره‌وری علوفه خشک و تر در تیمارها

متغیر		وزن خشک [۱] (gr)	وزن تر [۱] (gr)	ارتفاع (cm)	عملکرد محصول (ton ha^{-1})	بهره‌وری علوفه خشک (kg m^{-3})	بهره‌وری علوفه تر (kg m^{-3})
کیفیت آب	پساب خانگی	۲/۶۵ a	۱۰/۶ a	۶۱/۳۳ a	۱۰۷/۹ a	۷/۰۴ a	۵۳/۶ a
مصرفی	آب شهری	۲/۷ a	۱۰/۸ a	۶۱/۶ a	۱۰۸/۴۵ a	۷/۱ a	۵۳/۳ a
بافت خاک	Sandy-loamy	۲/۳۸ c	۸/۴ c	۵۷/۱ c	۱۰۱/۱ c	۵/۴۴ c	۴۲/۳۸ c
	Loam	۲/۶۵ b	۱۰/۱ b	۶۰/۲ b	۱۰۶ b	۷/۲۵ b	۵۵/۸۰ b
	Loamy-clay-silty	۲/۷۶ a	۱۰/۹ a	۶۳/۵ a	۱۱۱ a	۸/۶ a	۶۲/۲۳ a
کود دامی	گاوی	۲/۷۳ a	۱۰/۸ a	۶۲ a	۱۱۰/۸ a	۷/۲ a	۵۶/۲ a
	گوسفندی	۲/۶۲ a	۹/۶ b	۵۸ b	۱۰۴ b	۶/۴ b	۵۰/۶ b

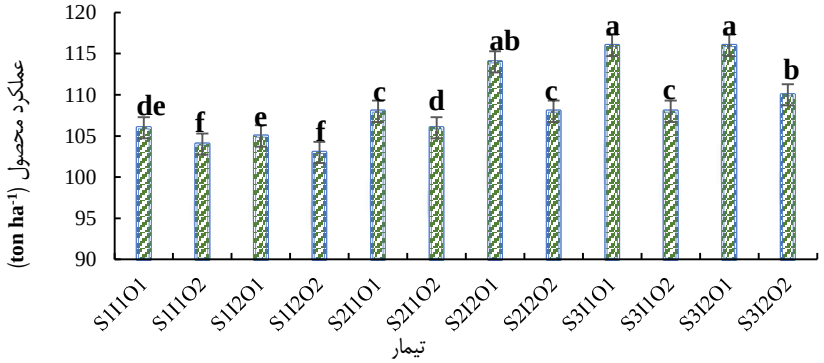
۱- وزن محصول طی دو مرحله برداشت

جدول ۷. اثرات متقابل کیفیت آب، خاک و نوع کود بر میزان تولید محصول در تیمارهای مورد مطالعه

متغیر / تیمار	تولید محصول (kg m^{-2}) وزن خشک	تولید محصول (kg m^{-2}) وزن تر	ارتفاع (cm)
$S_1I_1O_1$	۲/۷ b	۱۰/۶ e	۶۰ b
$S_1I_1O_2$	۲/۵ cd	۱۰/۴ f	۵۹ c
$S_1I_2O_1$	۲/۶ c	۱۰/۷ d	۶۱ a
$S_1I_2O_2$	۲/۴ d	۱۰/۳ f	۵۸/۵ c
$S_2I_1O_1$	۲/۷ b	۱۰/۸ d	۶۱ a
$S_2I_1O_2$	۲/۵ cd	۱۰/۴ f	۶۰ b
$S_2I_2O_1$	۲/۷۵ b	۱۰/۲ f	۶۲ a
$S_2I_2O_2$	۲/۷ b	۱۰/۸ d	۶۱ a
$S_3I_1O_1$	۲/۸ a	۱۱/۵ a	۶۲ a
$S_3I_1O_2$	۲/۷ b	۱۰/۸ d	۶۲ a
$S_3I_2O_1$	۲/۹ a	۱۱/۵ a	۶۲ a
$S_3I_2O_2$	۲/۷۵ b	۱۱/۰۱ c	۶۱ a

عملکرد محصول

بر اساس نتایج به‌دست آمده، عملکرد رشدی علوفه‌تر جو در سطح ۵ درصد تحت تاثیر بافت خاک، کود و اثر متقابل این متغیرها قرار داشته است. درحالیکه نوع کیفیت آب مصرفی و اثر متقابل آنها بر عملکرد رشدی گیاه تاثیر معنی‌دار را نشان نداد (جدول ۵). مقایسه میانگین عملکرد رشدی جو در بافت‌های مختلف بیانگر آن بود که بیشترین میزان این متغیر طی دو مرحله برداشت قصیل جو برابر با ۱۱۱ تن در هکتار برآورد شد که به ترتیب ۴/۸ و ۹/۸ درصد نسبت به بافت شنی–لومی و لومی افزایش عملکرد محصول را نشان داد. با توجه به شکل ۴ بیشترین میزان عملکرد محصول برابر با ۱۱۶ تن در هکتار می‌باشد که مربوط به تیمارهای $S_3I_1O_1$ و $S_3I_2O_1$ است. با توجه به متفاوت بودن کیفیت آب آبیاری در تیمارهای فوق الذکر این نکته حائز اهمیت است که با تشدید بحرانی بی آبی در منطقه سیستان استفاده از منابع آب نامتعارف برای تولید محصول جو عملکرد مطلوبی دارد. نمایی از عملکرد محصول جو در تیمارهای مورد مطالعه در شکل ۵ نشان داده شده است.

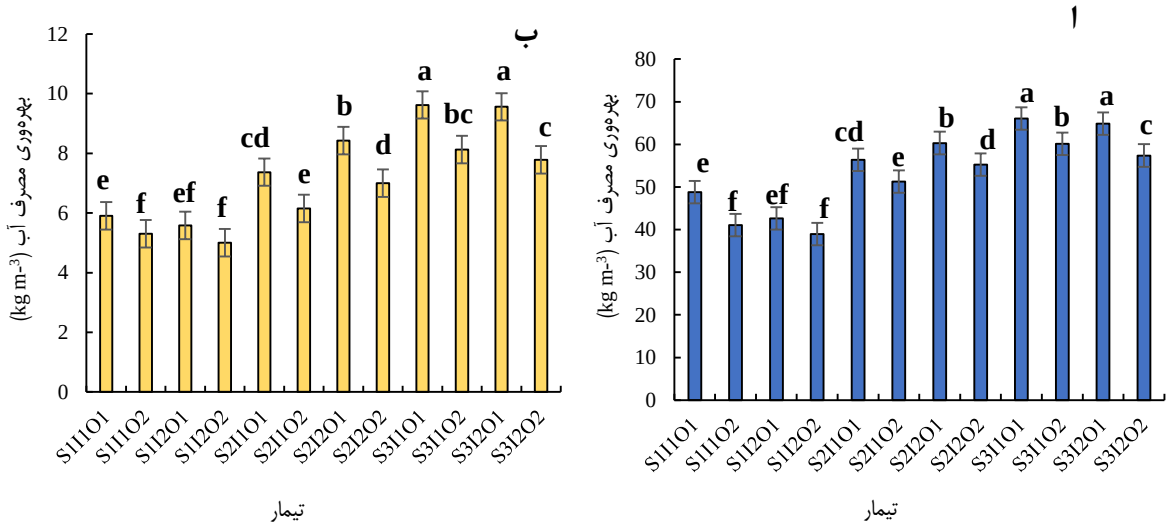


شکل ۴. اثرات متقابل کیفیت آب، خاک و نوع کود بر عملکرد قصیل جو (دو بار برداشت محصول) در تیمارهای مورد مطالعه

شکل ۵. مقایسه محصول تولیدی در تیمارهای مورد مطالعه

بهره‌وری آب براساس وزن تر و خشک قصیل جو

در این تحقیق شاخص بهره‌وری آب برحسب عملکرد علوفه تر طی دو مرحله برداشت به صورت قصیل جو به ازای مقدار کل آب مورد استفاده برای هر تیمار برآورد شده است. با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر بافت خاک در سطح یک درصد و نوع کود در سطح ۵ درصد بر میزان بهره‌وری آب معنی‌دار می‌باشد. همچنین نتایج بیانگر آن است که اثر متقابل خاک و کود نیز بر مقادیر این متغیر معنی‌داری است. در مقابل کیفیت آب مورد استفاده بر تغییرات شاخص بهره‌وری آب معنی‌دار نشد (جدول ۵). با مقایسه میانگین داده‌ها در بین گروهای مختلف خاک یافته‌ها نشان داد که خاک لومی- رسی- سیلتی به ترتیب باعث افزایش ۱/۱۸ و ۱/۵۸ برابری میزان بهره‌وری علوفه خشک قصیل جو در خاک‌های لومی و شنی-لومی شده است که به لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری را نیز نشان داد (جدول ۶). در بررسی اثر نوع کود حیوانی بر بهره‌وری خشک محصول جو نیز یافته‌ها بیانگر آن است که با استفاده از کود گاوی میزان بهره‌وری علوفه‌تر به‌طور متوسط ۱/۱۱ برابر نسبت به کود گوسفندی افزایش یافته است. با توجه به نتایج بهره‌وری علوفه تر قصیل جو نیز متاثر از نوع بافت خاک و کود دامی متفاوت و به لحاظ آماری معنی‌داری بود (جدول ۶). حداکثر میزان بهره‌وری علوفه تر جو طی دو مرحله برداشت مربوط به تیمار $S_3I_1O_1$ (برابر با ۶۶/۱ کیلوگرم بر مترمکعب) و کمترین آن مربوط به تیمار $S_1I_2O_2$ (برابر با ۳۸/۹ کیلوگرم بر مترمکعب) می‌باشد (شکل ۶). با توجه به نتایج بیشترین میزان بهره‌وری علوفه خشک برابر با ۹/۶۲ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد که در تیمار پساب غیر آلوده و خاک لومی- رسی- سیلتی با استفاده از کود گاوی حاصل شد که نسبت به سایر تیمارها بهره‌وری بیشتری را نشان داد ($p \leq ۰/۰۵$). این درحالی است که در خاک شنی-لومی با کاربرد کود گوسفندی و آب شهری کمترین بهره‌وری آب حاصل شده است.



شکل ۶. اثرات متقابل کیفیت آب، خاک و نوع کود بر بهره‌وری آب براساس الف) علوفه تر و خشک ب) جو در تیمارهای مورد مطالعه

بحث

در پژوهش حاضر افزایش بهره‌وری آب با استفاده از پساب خانگی و مدیریت بستر کشت در اراضی کشاورزی منطقه سیستان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بافت خاک، نوع کود و اثر متقابل این متغیرها، تاثیر معنی‌داری بر دور آبیاری و میزان رطوبت خاک دارد. از آنجا که ویژگی‌هایی از جمله ساختمان و ذرات تشکیل دهنده خاک نقش بسزایی بر خلل و فرج خاک و در نتیجه ظرفیت ذخیره آب در خاک دارند (Deveci et al., 2025)، لذا افزایش ذرات ریزدانه در بافت خاک لومی–رسی–سیلتی (افزایش ۱/۷ و ۴/۳ برابری درصد رس نسبت به خاک‌های لومی و شنی–لومی) از مهمترین دلایل افزایش رطوبت در این بافت خاک نسبت به سایر خاک‌های مورد مطالعه است. این مهم به نوعی منعکس کننده تاثیر غالب بافت خاک بر تغییرات رطوبت خاک در مناطق فراخشک است. بر این اساس در شرایط یکسان آبیاری، بافت لومی–رسی–سیلتی نسبت به دو بافت دیگر مدت زمان بیشتری آب را در خاک ذخیره می‌نماید که این فرآیند کاهش محسوس حجم آب مصرفی را بهمراه دارد و در مطالعات صورت گرفته همچون مجیدی و شهبازی (۱۳۹۹) نیز به اهمیت این موضوع اذعان شده است که با نتایج به دست آمده از این تحقیق همخوانی دارد. علاوه بر بافت خاک استفاده از مواد افزودنی ازجمله کود حیوانی نقش بسزایی بر افزایش جذب و در نتیجه بهبود رطوبت خاک دارد (مجیدی و شهبازی، ۱۳۹۹). براساس مطالعات صورت گرفته مخلوط کردن کود دامی با جرم مخصوص کمتر نسبت به خاک و از طرفی دیگر وجود ماده آلی در آن با بهبود ساختمان و دانه‌بندی خاک باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک و در نتیجه افزایش تخلخل آن می‌شود که این مهم رابطه مستقیمی بر جذب رطوبت خاک دارد (نیکپور و همکاران، ۱۴۰۱). از طرفی دیگر مطالعات اخیر نشان داده است که نوع کود دامی نیز در این خصوص بر جذب و افزایش رطوبت خاک تاثیر بسزایی دارد و استفاده از کود گاوی به دلیل کارایی بیشتر سیستم گوارش این حیوان نسبت به سایر دام‌ها کارآمدی بیشتر در جذب آب و افزایش رطوبت خاک دارد. آنچه از نتایج این بخش قابل استنباط می‌باشد تاثیر ملموس شرایط فنی و مدیریت زراعی در حجم آب مصرفی و به تبع آن رطوبت خاک می‌باشد که با نتایج Uossef gomrokchi (2023) همخوانی دارد. در بررسی اثر سطوح مختلف کیفیت آب بر رطوبت خاک نتایج نشان داد که میانگین رطوبت خاک در خاک تیمارهای آبیاری شده با استفاده از پساب خانگی نسبت به آب شرب با افزایش جزئی همراه بوده است ولی به لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری را نشان نمی‌دهد. در مطالعات صورت گرفته همچون نیک‌روش و همکاران (۲۰۱۳) دلیل افزایش نگهداشت رطوبت در خاک آبیاری شده با استفاده از فاضلاب را بالا بودن میزان یون سدیم و نسبت جذب سدیم معرفی نموده اند که باعث افزایش منافذ ریز و متخلخل غیرمؤثر در خاک بوده است. با توجه به نتایج حاصل از بررسی خصوصیات شیمیایی پساب استحصالی، بالا بودن میزان سدیم و نسبت جذب سدیم در پساب مورد استفاده در این پژوهش را از مهمترین دلایل افزایش نسبی رطوبت خاک تحت تاثیر استفاده از پساب خانگی نسبت به آب شرب برشمرد. در بررسی شاخص‌های رشدی گیاه یافته‌ها نشان داد که اثر نوع بافت خاک و کود حیوانی بر ارتفاع گیاه، وزن تر و خشک قصیل جو معنی‌دار است. همان‌طور که پیشتر اشاره شد، خصوصیات فیزیکی خاک نقش بارزی بر حفظ رطوبت و رشد و نمو گیاه به ویژه در مناطق خشک ایفا می‌نماید. این مقوله با تاثیر بر ظرفیت ذخیره آب در خاک و تامین آب مورد نیاز گیاه شاخص‌های رشدی گیاه را به‌طور مستقیم تحت تاثیر قرار می‌دهد (Aller et al., 2025). با توجه به نتایج به دست آمده نیز آشکار شد که شاخص‌های رشدی گیاه در بافت‌های سنگین نسبت به خاک‌هایی با بافت سبک‌تر به‌طور محسوس افزایش یافته است که با نتایج جمالی و همکاران (۱۴۰۱) مبنی بر اثر بافت خاک بر شاخص‌های رشدی گیاه همخوانی دارد. علاوه بر بافت خاک، نوع کود دامی به عنوان یک منبع غنی برای افزایش ماده آلی خاک نقش موثری بر چرخه عناصر در خاک و تغذیه گیاه دارد. بطوریکه نتایج نشان داد که بیشترین شاخص‌های رشدی گیاه تحت تاثیر استفاده از کود گاوی حاصل شده است. بنا به نظر مجیدی و شهبازی (۱۳۹۹) این امر متاثر از متفاوت بودن ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و همچنین قابلیت استفاده عناصر غذایی و معدنی ترکیبات آلی موجود در کود گاوی می‌باشد که باعث برتری نسبی عملکرد کود گاوی نسبت به کود گوسفندی می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده عملکرد محصول قصیل جو تحت تاثیر بافت خاک و کود دامی نیز تفاوت معنی‌داری را نشان داد. در پژوهش‌های صورت گرفته همچون دهقانی و همکاران (۱۴۰۰) افزایش عملکرد محصول متاثر از بافت خاک و کود دامی نیز گزارش شده است. در این مطالعه تاثیر بافت خاک بر فراهمی آب مورد نیاز گیاه و از طرفی استفاده از کود دامی با ارتقاء حاصلخیزی خاک را مهمترین دلایل افزایش عملکرد محصول گزارش شده است. براساس نتایج به دست آمده مدیریت بستر کشت با بهبود ساختمان خاک و افزایش حاصل‌خیزی آن نقش موثری در افزایش عملکرد محصول و کاهش حجم آب مصرفی و از طرفی افزایش بهره‌وری آب دارد که در مطالعات صورت گرفته همچون مجیدی و شهبازی (۱۳۹۹) و جمالی و همکاران (۱۴۰۱) به اهمیت این موضوع اشاره شده است. یافته‌ها همچنین نشان داد که استفاده از پساب خانگی افزایش نسبی بهره‌وری آب را نسبت به شرایط استفاده از آب شهری به‌همراه داشته است که این شرایط بنا به نظر کریمی و همکاران (۱۳۹۷) به

دلیل وجود مواد غذایی بیشتر در پساب جمع‌آوری شده می‌باشد که به‌طور مؤثر عملکرد رشدی گیاه را افزایش می‌دهد. این نتایج با مطالعات صورت گرفته همچون عباسی و همکاران (۱۴۰۰) و زنجانی (۱۴۰۳) مبنی بر افزایش عملکرد محصول در شرایط استفاده از پساب خانوار برای تولید محصولات زراعی همخوانی دارد. علاوه بر موارد فوق مدیریت برداشت محصول نیز در طی بازه زمانی مورد مطالعه (دو مرحله برداشت) تاثیر قابل‌توجهی بر عملکرد محصول و بهره‌وری تولید علوفه تر و خشک را نشان داد. این رویکرد باتوجه به بحران بی‌آبی در منطقه سیستان نقطه عطفی برای افزایش عملکرد محصولات زراعی و همچنین تامین علوفه دام با توجه به کمبود نهاده‌های دامی در منطقه سیستان به‌شمار می‌رود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش که با هدف افزایش بهره‌وری آب در منطقه سیستان انجام شد اثر الگوی تلفیقی برای مدیریت همزمان منابع آب و خاک با استفاده از پساب خانگی و مدیریت بستر کشت جهت سازگاری با شرایط خشکسالی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اثر نوع بافت خاک و کود دامی بر میزان رطوبت خاک، شاخص‌های رشدی گیاه و همچنین بهره‌وری علوفه تر و خشک قصیل جو معنی‌دار بود. همچنین استفاده از پساب خانگی اثر مطلوبی بر عملکرد رشدی محصول جو را نشان داد. اما در مجموع تغییر بافت خاک به کلاس لومی–رسی–سیلتی و استفاده از کود گاوی با کاربرد پساب خانگی بهبود بهره‌وری آب در مقایسه با سایر تیمارها را بههمراه داشته است. از اینرو با توجه به بحران بی‌آبی در منطقه سیستان پساب خانگی به عنوان یک منبع آبی پایدار می‌تواند نیاز آبی بخش کشاورزی جهت تولید محصولات زراعی را تامین نماید. به‌طورکلی نتایج به‌دست آمده از این تحقیق بیانگر آن است که استفاده از پساب خانگی و همچنین مدیریت بستر کشت با تغییر بافت خاک و افزودن کود دامی باعث افزایش عملکرد محصول و بهره‌وری آب می‌شود که توجه به این مهم باوجود چالش‌های پیش رو در بخش کشاورزی منطقه سیستان، بستری مناسب برای توسعه سطح زیر کشت محصولات کشاورزی و از طرفی احیاء پوشش گیاهی و حفاظت خاک در اراضی کشاورزی رها شده این منطقه را فراهم می‌نماید. علاوه بر آن تعمیم این رویکرد برای حل مشکلات زیست محیطی با هدف نهال‌کاری و توسعه کمربند سبز اطراف مناطق شهری جهت اجرای پروژه‌های بیابانزدایی در این منطقه نیز بسیار حائز اهمیت می‌باشد که می‌تواند مبنایی برای مطالعات آتی در این منطقه برای حل چالش‌های زیست محیطی منطقه سیستان باشد.

ملاحظات اخلاقی

حمایت مالی

این تحقیق هیچ حمایت مالی خاصی از سازمان‌های تأمین مالی در بخش‌های دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به طور مساوی در کلیهٔ مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

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

در طول آماده‌سازی این اثر، نویسنده(گان) از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نکرده‌اند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از مسئولین محترم پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری به دلیل تأمین هزینه اعتبارات این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود

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.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

جهان‌تیغ، معین، جهان‌تیغ، منصور، ایرانمنش، فاضل. (۱۴۰۲). شناسایی طوفان‌ها و کانون‌های تولید گرد و غبار در جنوب شرقی ایران (مطالعه موردی: منطقه سیستان. پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۱۳(۳)، ۹۲-۶۷.

جهان‌تیغ، منصور و جهان‌تیغ، معین. (۱۴۰۴). تأثیر عمق رسوبات مخازن بندهای خاکی تغذیه‌ای بر توزیع اندازه ذرات و تغییرات نفوذپذیری در مناطق خشک (مطالعه موردی: غرب سیستان). تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۲۶(۱)، ۷۴-۵۶.

جمالی، صابر، بانژاد، حسین و صفری‌زاده ثانی، عباس. (۱۴۰۱). بررسی برهمکنش سطوح آبیاری و بافت خاک برعملکرد، اجزای عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاه شاهی. مدیریت آب در کشاورزی، ۹(۲)، ۵۹ – ۷۲.

جعفری, مصطفی. (۱۴۰۴). تغییر اقلیم و کاهش انتشار– از تعهد تا اقدام. طبیعت ایران، ۱۰(۲)، ۹۱-۹۰.

دهقانی، سمیه، نادری، مهدی و کریمی، احمد. (۱۴۰۰). بررسی برخی ویژگی‌های فیزیکی و ارزیابی قابلیت بعد فراکتالی ذرات اولیه خاک در کاربری‌های مختلف. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۲ (۱۲)، ۳۰۸۳ – ۳۰۹۸.

مجیدی، عزیز و شهبازی، کریم. (۱۳۹۹). مقایسه اثرات باقیمانده کودهای گوسفندی و گاوی بر برخی صفات کمی و کیفی گندم پائیزه. پژوهش‌های خاک، ۳۴ (۲)، ۱۵۵– ۱۶۷.

زنجانی، مصطفی، مشعل، محمود و پورغلام آمیجی، مسعود. (۱۴۰۳). اثر بیوچار و کیفیت آب آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب ذرت. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۸(۶)، ۹۲۷ -۹۳۶.

عباسی، پدرام، بابازاده، حسین، یارقلی، بهمن و باخدا، حسین. (۱۴۰۰). اثر استفاده از پساب شهری بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت تحت مدیریت کم آبیاری (مطالعه موردی: شهرستان مرودشت). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۵ (۲)، ۴۰۲ – ۴۱۳.

کریمی، بختیار، عبدی، چنور و فتحی تیلکو، زینب. (۱۳۹۷). تأثیر آبیاری با پساب شهری تصفیه شده بر عملکرد و برخی ویژگی‌های رشد گوجه‌فرنگی و ذرت در شرایط گلخانه‌ای. دانش آب و خاک. ۲۸(۴)، ۱۹ – ۲۹.

نیکپور، معصومه، نیشابوری، محمدرضا، اوستان، شاهین و نقوی، هرمزد. (۱۴۰۱). تأثیر درجات مختلف آبگریزی خاک حاصل از افزودن کود گاوی بر ویژگیهای پایداری خاک و فراهمی آب. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳(۶)، ۱۲۸۱– ۱۲۹۶.

نیک‌روش، ایمان، معاضد، هادی، برومند نسب، سعید و ناصری، عبدعلی. (۱۳۹۲). تأثیر شوری آب آبیاری با کدورت ثابت بر منحنی مشخصه رطوبتی خاک. *آب و خاک*، ۲۷(۴)، ۷۶۳ – ۷۶۸.

REFERENCES

Aller, D., Archontoulis, S., & Laird, D. (2025). Soil Organic Matter and Biochar Effects on Soil Water: Measurements, Pedotransfer Functions and APSIM Simulations. *European Journal of* Soil Science, 76(2), e70083. https://doi.org-/10.1111/ejss.70083

Abbasi, P., Babazadeh, H., Yargholi, B., & Bakhoda, H. (2023). Development of forage maize yield–water functions by applying simultaneous different levels of irrigation and treated municipal wastewater. *Irrigation and Drainage*, 72(1), 119-137. (In Persian)

Bocean, C. G. (2025). The Role of Organic Farming in Reducing Greenhouse Gas Emissions from Agriculture in the European Union. *Agronomy*, 15(1), 198. https://doi.org/10.3390/agronomy-15010198

Bijanzadeh, E., Tarazkar, M. H., & Emam, Y. (2021). Water productivity and virtual water of barley cultivars under different irrigation regimes. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 23(3), 603-616.

Dehghanpir, S., & Bazrafshan, O. (2025). Analysis of Water Resource Sustainability in Barley Production in Iran. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 19(3), 357-372. (In Persian)

Dehghani, S., Naderi, M., & Karimi, A. (2022). Investigation of Some Physical Properties and Evaluation of Fractal Dimension of Primary Soil Particles in Different Uses. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *52*(12), 3083-3098. doi: 10.22059/ijswr.2021.329439.669055

Dong, J., & Ochsner, T. E. (2018). Soil texture often exerts a stronger influence than precipitation on mesoscale soil moisture patterns. *Water Resources Research*, 54(3), 2199-2211. DOI:10.1111/j.1365-2389.1965.tb01416.x

FAO. (2017). https://www.fao.org/faostories/article/ en/c/ 1185405/.

Deepa, D., Keerthana, R., Kumar, R. P., & Suryaprakash. R. (2022). Primary treatment of dairy wastewater using bio based natural coagualnts. Materials Today: *Proceedings*, 60:616-21. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.125

Farmaha, B. S., Sekaran, U., & Franzluebbers, A. J. (2022). Cover cropping and conservation tillage improve soil health in the southeastern United States. *Agronomy Journal*, 114, 296–316.

https://doi.org/10.1002/agj2.20865
Franzluebbers, A. J. (2024). Texture and organic matter associations with soil functional properties in crop and conservation land uses in North Carolina. *Soil Science Society of America Journal*, 88(2), 449-464. https://doi.org/10.1002/saj2.20620
Fraga, F. A., García, H. A., Hooijmans, C. M., Míguez, D., & Brdjanovic, D. (2017). Evaluation of a membrane bioreactor on dairy wastewater treatment and reuse in Uruguay. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 119:552-64. http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.11.025
Grant, K. N., Macrae, M. L., & Ali, G. A. (2019). Differences in preferential flow with antecedent moisture conditions and soil texture: Implications for subsurface P transport. *Hydrological Processes*, 33, 2068–2079. https://doi.org/10.1002/hyp.13454
Gubiani, P. I., do Santos, V. P., Mulazzani, R. P., Sanches Suzuki, L. E. A., Drescher, M. S., Zwirtes, A. L., Koppe, E., Pereira, C. A., Mentges, L. R., Galarza, R. d. M., Boeno, D., Eurich, K., Bitencourt Junior, D., Marcolin, C. D., & Müller, E. A. (2024). Relationship between Plant-Available Water and Soil Compaction in Brazilian Soils. *Sustainability*, 16(16), 6951. https://doi.org/10.3390/su1616-6951
Jafari, M., (2025). Climate Change and Emission Reduction (Mitigation) - from Commitment to Action. *Iran Nature*, 10(2), 90-91. doi: 10.22092/irn.2025.134086 (In Persian)
Jamali, S., Banejad, H., & Safarizadeh-sani, A. (2023). investigate the interaction effect of irrigation levels and soil textures on yield, yield components, and water productivity of Garden cress (Lepidium sativum L.). *Water Management in Agriculture*, *9*(2), 59-72. (In Persian)
Jahantigh, M., Jahantigh, M., & Iranmanesh, F. (2023). Identification of Storms and Centers of Dust Production in Southeast of Iran (Case Study: Sistan Region). *Environmental Erosion Research***,** 13(3),67-92. (In Persian)
Jahantigh, M., & Jahantigh, M. (2025). The effect of sediment depth in recharging earthen dam reservoirs on particle size distribution and permeability changes in arid regions (Case study: West of Sistan). *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, *26*, 74-56. doi: 10.22092/idser.2025.370760.1631 (In Persian)
Liang, Y., Leifheit, E. F., Lehmann, A., & Rillig, M. C. (2025). Soil organic carbon stabilization is influenced by microbial diversity and temperature. *Scientific Reports*, 15(1), 13990. https://doi.org/10.1038/s41598-025-98009-9
Lin, T. S., & Cheng, F. Y. (2016). Impact of soil moisture initialization and soil texture on simulated land–atmosphere interaction in Taiwan. *Journal of Hydrometeorology*, *17*(5), 1337-1355. doi.org/10.1175/JHM-D-15-0024.1
Ling, T. (2022). A global study about water crisis. In 2021 International Conference on Social Development and Media Communication (SDMC 2021), 809-814.
López-Morales, C. A., & Rodríguez-Tapia, L. (2019). On the economic analysis of wastewater treatment and reuse for designing strategies for water sustainability: Lessons from the Mexico Valley Basin. Resources, *Conservation and Recycling*.140, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.001
Mia, S., Dijkstra, F. A., & Singh, B. (2017). Long-Term Aging of Biochar: A Molecular Understanding With Agricultural and Environmental Implications. *Advances in Agronomy*, 141, 1–51. https://doi.org/10.-1016/bs.agron.2016.10.001
Majidi, A., & Shahbazi, K. (2020). Comparison of Sheep and Cow Manures Residual Effects on Some Quantitative and Qualitative Traits of Winter Wheat. *Iranian Journal of Soil Research*, *34*(2), 155-167. doi: 10.22092/ijsr.2020.122488 (In Persian)
Nikpour, M., Neyshaburi, M.R., Oustan, S. & Naghavii, H. (2022). The effect of different levels of soil water repellency resulting from the addition of manure on soil stability and soil water availability characteristics. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *53*(6), 1281-1296. doi: 10.22059/ijswr.2022.342943.669268 (In Persian)
Nikravesh, I., Moazed, H., Broomandnasab, S. & Naseri, A. (2013). Effect of Irrigation Water Salinity with Constant Turbidity on Soil Moisture Characteristic Curve. *Water and Soil*, *27*(4), 763-768. doi: 10.22067/jsw.v0i0.28136 (In Persian)
Karimi, B., Abdi, C., & Fathi Tileko, Z. (2019). Effects of Irrigation with Treated Urban Wastewater on Yield and Some Growth Characteristics of Tomato and Corn in Greenhouse Condition. *Water and Soil Science*, *28*(4), 19-29. (In Persian)
Reichert, J. M., Albuquerque, J. A., Kaiser, D. R., Reinert, D. J., Urach, F. L., and Carlesso, R. (2009). Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 33, 1547-1560. https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600004

Rout, P. P., & Arulmozhiselvan, K. (2019). Effect of soil texture on drying pattern of soil moisture after saturation. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(03), 697-704.

Sun, C., Zhao, W., Liu, H., Zhang, Y., & Zhou, H. (2021). Effects of textural layering on water regimes in sandy soils in a desert-oasis ecotone, Northwestern China. *Frontiers in Earth Science*, 9, 627500. https://doi.org/10.3389/feart.2021.627500

Stasinakis, A.S., Charalambous, P., & Vyrides, I. (2022). Dairy wastewater management in EU: Produced amounts, existing legislation, applied treatment processes and future challenges. *Journal of Environmental Management*, 303:114152. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114152

World Bank. (2020). Water in Agriculture.

Wu, D., Senbayram, M., Zang, H., Ugurlar, F., Aydemir, S., Brüggemann, N., Kuzyakov, Y., Bol, R., & Blagodatskaya, E. (2018). Effect of biochar origin and soil pH on greenhouse gas emissions from sandy and clay soils. *Applied Soil Ecology*, 129, 121–127. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.05.009

Zanjani, M., Mashal, M., & Pourgholam-Amiji, M. (2025). The effect of Biochar and Irrigation Water Quality on Maize Yield and Water Productivity. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *18*(6), 927-936. (In Persian)

Zhang, C., Wang Y., Lauer A., & Hamilton K. (2012). Configuration and evaluation of the WRF Model for the study of Hawaiian regional climate. Mon. *Wea. Rev*., 140, 3259–3277. doi:10.1175/MWR-D-11-00260.1