

Investigation of the Effect of Soil Moisture in the Sub-root Zone Layer on Water Uptake Amount in Three Different Soil Textures

MASOUD Soltani^{1*}  | HOSSEIN Rabbaniha²  | Masood Parsinejad³ 

¹ Department of Water Sci. and Eng., Faculty of Agricultural and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

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

³ Department of Irrigation and Reclamation Eng., College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 04 August
2024

Received in revised
form 31 October 2024

Accepted 10 November
2024

Published online 29
January 2024

Keywords:

Buffer,
HYDRUS,
Simulation,
Root Water Uptake,
Soil Moisture.

ABSTRACT

Objective: Changes in precipitation patterns and incidence of drought stress necessitate the optimal use of water resources and their frugal consumption has emerged more than before. The soil moisture content under the root zone can fulfill the plant's water requirement. Currently, the zone under the plant root is not considered in calculating the water balance, and the plant water requirement.

Methods: In this research, HYDRUS 2D/3D software was used to simulate water flow in the soil in the area under the roots of the sugar beet plant. The investigated scenarios included 4 buffer treatments with different depths (without buffer, 25, 50, and 75 cm) under the root zone and three different soil textures including loam, silty clay loam, and sandy loam.

Results: The results showed that in all three soil textures, increasing the buffer's depth caused more water to be absorbed by the roots, the best result was obtained for the loam texture, with a buffer depth of 50 cm below the root zone. In this condition, the amount of water uptake compared to the condition without buffer depth, was increased by 7.9%. This value was obtained for the texture of silty clay loam and sandy loam at the buffer depth of 75 cm, with an increase of 8.8% and 4.3%, respectively. Deep percolation in loam, silty clay loam, and sandy loam texture decreased by 81, 56, and 90% respectively with increasing buffer depth. The ratio of useful water to total consumed water was enhanced with the increase of the buffer depth in all three textures, and its highest value was increased by 14, 10, and 11% in the scenario with a depth of 75 cm, respectively. The ratio of the actual water uptake to the potential value (relative performance) in all three soil textures, considering the buffer layer, increased and the highest value at a depth of 50 cm for loam soil was equal to 90.5% and at a depth of 75 cm for sandy loam and silty clay loam was 86.6 and 86.8%, respectively.

Conclusions: The results of this study showed that the moisture content of the lower layer of the plant's root zone had positively influenced the water balance components. Thus, it should be taken into account in the water requirement calculations.

*Corresponding author, Email: msoltani@eng.ikiu.ac.ir

Cite this article: Soltani, M., Rabbaniha, H., & Parsinejad, M. (2024). Investigation of the effect of soil moisture in the Sub-root zone layer on water uptake amount in three different soil textures. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 3(1), 1-20.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/nawee.2024.475122.1105>

Publisher: Gonbad Kavous University.

بررسی تأثیر رطوبت خاک لایه زیر ناحیه ریشه چغندر قند بر میزان جذب آب در سه بافت خاک مختلف

مسعود سلطانی^{۱*}، حسین ربانی‌ها^۲، مسعود پارسی نژاد^۳

^۱ گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
^۲ گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
^۳ گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: تغییر الگوی بارش‌ها و بروز تنش خشکی، لزوم استفاده بهینه از منابع آبی و صرفه‌جویی در مصرف آن را بیش از پیش نمایان می‌کند. محتوای رطوبتی خاک لایه زیر ناحیه ریشه می‌تواند قسمتی از نیاز آبی گیاه را تأمین کند. در حال حاضر ناحیه زیر ریشه گیاه در محاسبه بیلان آب و نیاز آبی گیاه در نظر گرفته نمی‌شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳	مواد و روش: در این پژوهش از نرم‌افزار HYDRUS 2D/3D برای شبیه‌سازی جریان آب در خاک در ناحیه زیر ریشه گیاه چغندر قند استفاده شد. سناریوهای مورد بررسی شامل ۳ لایه بافر با عمق‌های مختلف (بدون بافر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر) در زیر ناحیه ریشه و سه بافت خاک مختلف شامل لوم، لوم‌رسی سیلتی و لوم‌شنی بود.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۰۵	نتایج: نتایج نشان داد که در تمامی بافت‌ها افزایش عمق بافر باعث جذب بیشتر آب توسط ریشه شد. بهترین حالت در بافت لوم با در نظر گرفتن عمق بافر ۵۰ سانتی‌متری زیر ناحیه ریشه بود که مقدار جذب آب نسبت به حالت بدون عمق بافر، ۷/۹ درصد افزایش داشت. این مقدار برای بافت لوم رسی سیلتی و لوم‌شنی در عمق بافر ۷۵ سانتی‌متر و به ترتیب با مقدار افزایش ۸/۸ و ۴/۳ درصد به دست آمد. نفوذ عمقی در بافت لوم، لوم‌رسی سیلتی و لوم‌شنی با افزایش عمق بافر به ترتیب ۸۱، ۵۶ و ۹۰ درصد کاهش یافت. نسبت آب مفید به کل آب مصرفی، با افزایش عمق بافر در هر سه بافت افزایش یافت و بیشترین مقدار آن در سناریو با عمق ۷۵ سانتی‌متر به ترتیب ۱۴، ۱۰ و ۱۱ درصد افزایش داشت. نسبت جذب واقعی آب به مقدار پتانسیل (عملکرد نسبی) در هر سه بافت خاک با در نظر گرفتن لایه بافر، افزایش یافت و بیشترین مقدار در عمق ۵۰ سانتی‌متر برای خاک لوم، برابر با ۹۰/۵ درصد و در عمق ۷۵ سانتی‌متر برای خاک‌های لوم‌شنی و لوم‌رسی سیلتی به ترتیب ۸۶/۶ و ۸۶/۸ درصد بود.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰	نتیجه‌گیری: نتایج این بررسی نشان داد محتوای رطوبتی لایه زیرین ناحیه ریشه گیاه، تأثیری مثبت در اجزای بیلان آب دارد و لازم است در محاسبات نیاز آبی به آن توجه شود.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰	
کلیدواژه‌ها: بافر، HYDRUS، شبیه‌سازی، جذب آب ریشه، محتوای رطوبتی خاک.	

* نویسنده مسئول، Email:msoltani@eng.ac.ir

استناد: سلطانی، مسعود؛ ربانی‌ها، حسین؛ و پارسی نژاد، مسعود (۱۴۰۳). بررسی تأثیر رطوبت خاک لایه زیر ناحیه ریشه چغندر قند بر میزان جذب

آب در سه بافت خاک مختلف. رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست،

<http://doi.org/10.22034/nawee.2024.475122.1105>

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه گنبد کاووس.



آب مهمترین عامل محدودکننده کشاورزی در کشور است. بنابراین استفاده بهینه از منابع آب موجود و مدیریت آن‌ها با توجه به علم روز، امری بسیار حیاتی است (عربی آیسک و همکاران ۱۴۰۲). کاهش نزولات جوی، وقوع خشکسالی‌های پی‌درپی، پایین بودن بازده آبیاری در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، برداشت بی‌رویه آب از منابع آب سطحی و مهار آب‌های سطحی توسط سدهای متعدد (در نتیجه آن افزایش سطح زیرکشت و فعالیت‌های کشاورزی بیش از حد)، تغییر اقلیم، الگوی نامناسب کشت (کشت محصولات پرمصرفی مثل چغندر قند)، در سال‌های اخیر باعث کاهش سطح دریاچه و افت سطح آب آن شده است (بنی حبیب و قرشی ۱۳۹۳، منتصری و همکاران ۱۳۹۵). بهره‌گیری از راه‌کارهای مؤثر در کاهش میزان آب مصرفی در صورت حفظ میزان تولید کشاورزی، دستیابی به تعادل آبی را در منطقه فراهم می‌آورد. این دیدگاه با هدف افزایش بهره‌وری آب و با رویکرد کاهش میزان مصرف است. یکی از برنامه‌های مدیریتی ستاد احیای دریاچه ارومیه برای احیای آن، کاهش ۴۰ درصدی مصرف آب در بخش کشاورزی و کاهش تخصیص آب تحویلی به کشاورزان است (علیزاده‌دیچ ۱۳۹۶). از سوی دیگر با توجه به اعمال قوانین سختگیرانه ستاد احیای دریاچه ارومیه مبنی بر ممنوعیت صادرات چغندر قند به خارج از حوضه توسط کشاورزان (باهدف کنترل سطح زیرکشت چغندر قند)، پدیده صادرات چغندر قند به خارج از حوضه نیز از جمله مسائل مورد توجه است. چغندر قند یکی از محصولات زراعی - صنعتی است و آذربایجان غربی (به عنوان بخش عمده‌ای از حوضه آبریز دریاچه ارومیه) یکی از قطب‌های تولید این محصول در کشور است. طبق گزارش آمارنامه محصولات زراعی وزارت جهاد کشاورزی در سال زراعی ۱۴۰۱ - ۱۴۰۰ سطح زیر کشت چغندر قند در استان آذربایجان غربی ۳۱/۸۲۵ هزارهکتار است که بعد از گندم و یونجه بیشترین سطح زیر کشت متعلق به این محصول است (آمارنامه محصولات زراعی ۱۴۰۱). یکی از راه‌کارهای کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی، افزایش جذب آب توسط ریشه و کاهش تلفات است. افزایش عمق آبیاری می‌تواند میزان مصرف مفید از آب آبیاری را افزایش دهد. با افزایش عمق آبیاری و به تبع آن، افزایش دور آبیاری، تعداد دفعات خیس شدن سطح خاک کاهش می‌یابد. در نتیجه تلفات تبخیر سطحی از خاک کم می‌شود. از طرف دیگر افزایش عمق آبیاری خطر تلفات نفوذ عمقی را بیشتر می‌کند. بنابراین لازم است عمق آب آبیاری بهینه بررسی شود. اگرچه حداکثر عمق آبیاری را برابر با عمق توسعه ریشه گیاه در نظر می‌گیرند، خشک شدن خاک لایه‌های بالایی خاک باعث ایجاد جریان رو به بالا می‌شود؛ در نتیجه محتوای رطوبتی خاک زیر ناحیه توسعه ریشه گیاه می‌تواند تا حدودی کمبود رطوبتی را جبران کند و به مصرف گیاه برسد. در مطالعات زیادی کاهش تبخیر سطحی خاک به عنوان جزء غیرمفید آبیاری و به منظور افزایش بهره‌وری آب بررسی شده است. برای این منظور به روش‌های مختلفی از جمله استفاده از انواع مالچ‌های طبیعی و معدنی در سطح خاک، افزایش عمق کارگذاری قطره‌چکان‌ها در آبیاری قطره‌ای، روش‌های کم‌آبیاری، بهره‌گیری از روش‌های آبیاری زیر سطحی و همچنین کشت زیرپلاستیکی توجه شده است. (Bainbridg, 2001; Camp & Sadler, 2002; Rajput & Patel, 2006؛ حقیقتی و همکاران ۱۳۹۵، جولیانو و گنجی‌مقدم ۱۳۹۷).

نورجو و همکاران (۱۳۹۷) اجزای حسابداری آب و شاخص‌های عملکرد را برای کشت چغندر قند در منطقه میان‌دوآب، به کمک شبیه‌سازی با مدل AquaCrop بررسی کردند. در این پژوهش تأثیر دور و عمق آبیاری بر بهره‌وری چغندر قند ارزیابی شد. نتایج آن‌ها نشان داد افزایش دور آبیاری موجب افزایش نشانگر سهم تخلیه فرآیندی از کل آب مصرفی شد که جزء اهداف مدیریت آب در مزرعه بوده است. همچنین گزارش کردند صرفه‌جویی در مصرف آب مستلزم به‌کارگیری چندین شیوه‌ی مدیریتی به‌طور همزمان است. بنابراین لازم است کم‌آبیاری در کشت چغندر قند همراه با مدیریت استفاده از خاکپوش و آبیاری قطره‌ای باشد تا سهم تبخیر به عنوان تلفات غیرفرآیندی و غیرمفید کنترل گردد.

در مطالعه‌ای تأثیر برنامه‌ریزی آبیاری بر بهره‌وری آب در کشاورزی برای شبکه آبیاری آبخیز در استان اصفهان بررسی شد. نتایج نشان داد که شاخص سودمندی اقتصادی آب با افزایش میزان آب کاربردی تا عمق بهینه افزایش یافت، لیکن افزایش عمق آب آبیاری بیش از عمق بهینه تأثیر معنی‌داری بر بهره‌وری اقتصادی آب نداشت (اکبری و همکاران ۱۳۸۸).

در پژوهش دیگری مناسب‌ترین عمق آب آبیاری گیاه گندم با استفاده از مدل Aquacrop با هدف ارتقاء کارایی مصرف آب ارزیابی شد. نتایج نشان داد که با در نظرگیری دور آبیاری متعارف گندم در منطقه حمیدیه خوزستان (۴ تا ۵ نوبت آبیاری) و

عمق کاربرد آب آبیاری ۱۰۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر، امکان افزایش عملکرد دانه گندم به میزان ۳۰ درصد و کاهش حجم مصرف آب به مقدار حدود ۴۶ درصد نسبت به شرایط معمول زراع وجود دارد (امداد و تافته ۱۳۹۸).

نرم‌افزار HYDRUS-2D

نرم‌افزار HYDRUS-2D، مدل شبیه‌ساز تحت ویندوز برای تجزیه و تحلیل جریان آب، انتقال املاح و گرما در شرایط دوبعدی است و قادر به برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی و انتقال املاح به روش مدل‌سازی معکوس است. این مدل قادر به شبیه‌سازی در شرایط اشباع و غیراشباع در حالت افقی، عمودی و شعاعی است و در بسیاری از پژوهش‌های مزرعه‌ای و آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در خاک، بهینه‌سازی و برآورد معکوس ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آن تاحدی رضایت‌بخش بوده است (Šimůnek, et al., 2006).

در پژوهشی توزیع رطوبت در خاک در دو سیستم آبیاری سطحی و زیرسطحی برای گیاه پسته با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-2D شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد میزان جذب آب ریشه در آبیاری زیرسطحی به میزان قابل توجهی بیشتر از آبیاری سطحی بود. کاهش تلفات تبخیر سطحی خاک یکی از دلایل مهم در دستیابی به این نتیجه است (عطایی و همکاران ۱۳۹۷). در پژوهش دیگری عملکرد مدل HYDRUS-2D در مدل‌سازی توزیع رطوبت خاک تا عمق‌های ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متری کارگذاری لوله‌های قطره‌چکان‌دار بررسی شد و نتایج نشان‌دهنده دقت بالای مدل و اختلاف کم در مقایسه با داده‌های واقعی مزرعه بود (پتل و راجپوت ۲۰۰۸). در تحقیقی مدل‌های عددی، تحلیلی و تجربی پیش‌بینی الگوی خیس‌شدگی خاک بررسی شد. تحلیل‌ها نشان داد مدل عددی HYDRUS-2D از نتایج رضایت‌مندی برخوردار بود. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که مدل WetUp برای شبیه‌سازی مناسب نبوده، متوسط خطای آن به ۵۸/۱ سانتی‌متر رسید (Kandelous, & Šimůnek, 2010).

با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی آب و خاک نظیر HYDRUS می‌توان سناریوهای زیادی اجرا نمود که پیاده‌سازی آن‌ها در مزرعه نیازمند زمان و هزینه زیاد است. سپس از بین سناریوهای شبیه‌سازی شده مواردی را که تأثیر قابل توجهی دارند، برای داده‌برداری و تدقیق نتایج مدل در مزرعه اعمال نمود. در برخی از پژوهش‌ها صرفاً نتایج شبیه‌سازی سناریوهای مختلف گزارش شده است. در پژوهشی اثر محل قرارگیری نوار تیپ آبیاری، ارتفاع پشته، استفاده از مالچ و شوری آب بر تجمع نمک در طولانی‌مدت بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که قرارگیری نوار تیپ روی پشته باعث افزایش ۱۰ درصدی شوری خاک در مدت ۱۰ سال می‌شود (لطیفی و همکاران ۲۰۲۳). همچنین در پژوهشی دیگر تأثیر عمق کارگذاری قطره‌چکان بر افزایش راندمان جذب آب ریشه گیاه ذرت با بررسی ۴۸ سناریو ارزیابی شد. نتایج نشان داد در بافت لوم‌شنی با افزایش عمق کارگذاری مقدار تبخیر تجمعی تا ۴۰٪ کاهش یافت، ولی با توجه به مقدار نفوذ عمقی و آب مصرفی، بهترین عمق کارگذاری در ۱۵ سانتی‌متری و با دبی ۱ لیتر بر ساعت به‌دست‌آمد (سلطانی و همکاران ۱۴۰۰).

در این پژوهش با هدف بررسی تأثیر محتوای رطوبتی لایه خاک زیر ناحیه ریشه بر روی میزان جذب آب توسط ریشه گیاه چغندرقد، سناریوهایی در سه بافت خاک مختلف تعریف و ارزیابی شد. همچنین سه عمق بافر (عمق لایه خاک زیر ناحیه ریشه) برای تعیین مقدار بهینه به عنوان فاکتور فرعی در نظر گرفته شد و بهترین نتیجه با مقایسه اجزای بیلان از جمله مقدار جذب آب توسط ریشه، نفوذ عمقی از زیر ناحیه بافر و کل حجم آب مصرفی، تعیین شد.

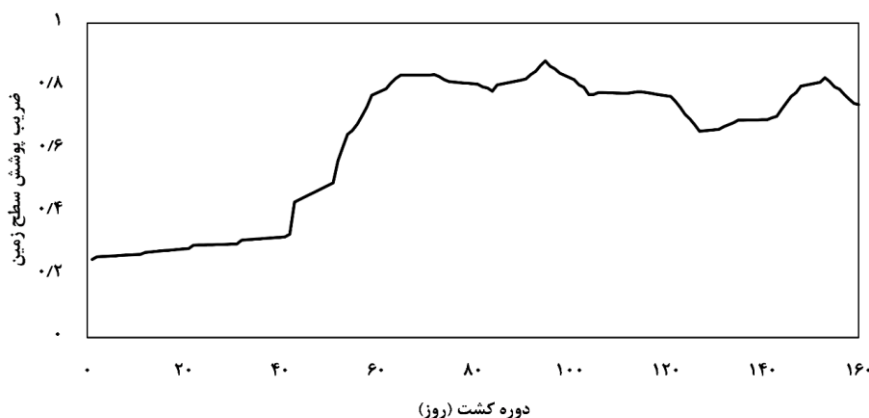
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

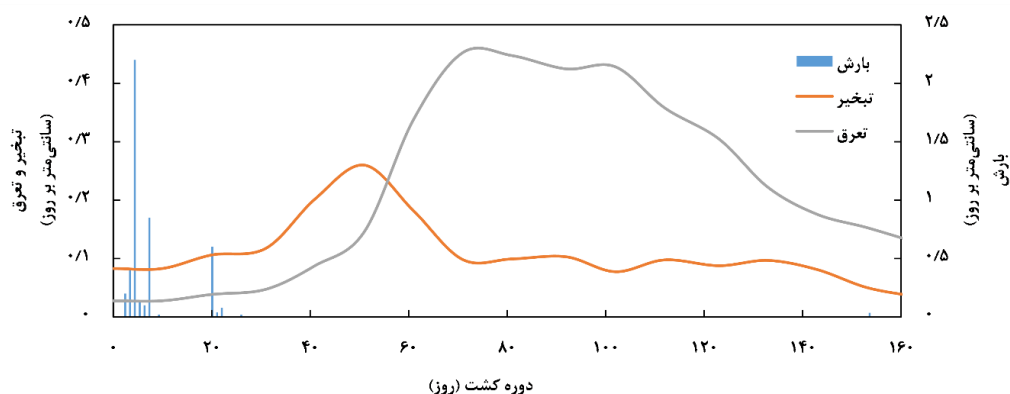
پیرانشهر از لحاظ محدوده جغرافیایی در جنوب استان آذربایجان غربی و در راستای عرض جغرافیایی $36^{\circ}41'42''$ شمالی و در راستای طول جغرافیایی $45^{\circ}8'40''$ خاوری از نیمروز گرینویچ واقع شده است. ارتفاع متوسط آن ۱۴۳۰ متر از سطح

آب‌های آزاد است. میانگین بارش سالانه حدود ۶۰۰ میلی‌متر است و بنابراین رودهای دائمی و پراپی در این حوضه کوچک جریان دارد. دشت پیرانشهر، یکی از زیرحوضه‌های ارومیه است.

به‌منظور انتخاب بازه شبیه‌سازی، میانگین بارش و دیگر عوامل هواشناسی در سال‌های ۱۹۸۶-۲۰۲۱ محاسبه شد. مقدار تبخیر تفرق با استفاده از داده‌های هواشناسی و نرم‌افزار Cropwat محاسبه گردید. برای محاسبه تبخیر تفرق گیاه چغندر قند از اطلاعات پیش فرض نرم‌افزار استفاده شده است. پس از محاسبه تبخیر تفرق گیاهی، با استفاده از ضریب پوشش سطح زمین (شکل ۱) جز تبخیر از تفرق جدا شده است. همچنین مقدار تبخیر، تفرق و بارش برای طول دوره شبیه‌سازی در شکل ۲ نشان شده است.



شکل ۱- ضریب پوشش سطح زمین گیاه چغندر قند (وانگ و همکاران ۲۰۲۱)



شکل ۲- میانگین بلند مدت (۱۹۸۶ - ۲۰۲۱) تبخیر، تفرق و بارش در دوره رشد چغندر قند در شهرستان پیرانشهر، استان آذربایجان غربی

مدل‌سازی جریان آب

در این پژوهش هندسه جریان به صورت دوبعدی شبیه‌سازی شد و برای تعیین میزان نفوذ عمقی، تبخیر از سطح خاک و جذب آب توسط ریشه، از نرم‌افزار HYDRUS-2D استفاده شد که برای شبیه‌سازی از معادله ریچاردز استفاده می‌کند.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K \left(K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_i} K_{iz}^A \right) \right] - S \quad (1)$$

که در آن: θ محتوای رطوبت حجمی خاک [L³.L⁻³], h ارتفاع آب هیدروستاتیکی معادل فشار [L], S عبارت تخلیه یا تغذیه [T-1], x_i مختصات مکانی [L], t زمان [T], K_{ij}^A مؤلفه‌های بی‌بعد تانسور غیرهمگنی K^A خاک و K

هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک [L.T-1]، S حجم آب تخلیه-تغذیه شده در واحد زمان از یک واحد حجم خاک است (Simunek, et. al., 2006).

در این پژوهش از مدل ون گنوختن برای رسم منحنی مشخصه رطوبتی خاک استفاده شده است؛ این مدل از نوع تجربی است و به علت شکل ساده و کاربرد مؤثر آن در حل های عددی، رایج ترین مدل رطوبتی خاک است. همچنین از مدل معلم برای بیان تابع هدایت هیدرولیکی استفاده شده است (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980).

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$K(S_e) = K_s S_e^l (1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m)^2 \quad (3)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1 \quad (4)$$

که در آن ها Se درجه مؤثر اشباع یا کاهش مقدار آب است [-]، θ_r و θ_s حجم آب باقی مانده و اشباع هستند [L3.L-3]، α یک پارامتر تجربی است [L-1] که رابطه معکوس با مقدار ورودی هوا دارد، n و m ثابت های تجربی هستند که بر شکل منحنی مشخصه رطوبتی خاک تاثیر می گذارد [-] که مقدار m توسط $m = 1 - 1/n$ محاسبه می شود، پارامتر (l) برای بسیاری از خاک ها حدود ۰/۵ است و K_s هدایت هیدرولیکی اشباع است. برای شبیه سازی جذب آب توسط ریشه، از مدل فدس استفاده شد (Feddes, 1982).

$$S(h) = \alpha(h) S_p \quad (5)$$

که در آن S_p مقدار جذب پتانسیل، α ضریب کاهش جذب به دلیل تغییرات مکش خاک و S مقدار جذب آب است. ضریب کاهش جذب آب با توجه به رابطه ۶ محاسبه می شود.

$$\alpha(h) = \begin{cases} \frac{h - h_4}{h_3 - h_4}, & h_3 > h > h_4 \\ 1 & h_2 \geq h \geq h_3 \\ \frac{h - h_1}{h_2 - h_1}, & h_1 > h > h_2 \\ 0, & h \leq h_4 \text{ or } h \geq h_1 \end{cases} \quad (6)$$

که در آن h مکش خاک، h_1 مقدار مکش آستانه شروع جذب آب، h_2 مقدار مکش حد آستانه جذب پتانسیل، h_3 مقدار مکش حد آستانه کاهش جذب نسبت به پتانسیل و h_4 مقدار مکشی که جذب آب در آن متوقف می شود. ضرایب مربوط به گیاه چغندر قند با توجه به پایگاه داده موجود در نرم افزار هایدروس انتخاب گردید (Wesseling, et. al., 1991) (جدول ۱).

جدول ۱- ضرایب محاسبه جذب آب توسط ریشه در رابطه فدس برای گیاه چغندر قند

پارامتر	h_1	h_2	h_3	h_4
فشار (سانتی متر)	-۱۰	-۲۵	-۳۲۰، -۶۰۰	-۱۶۰۰

سناریوهای مورد بررسی

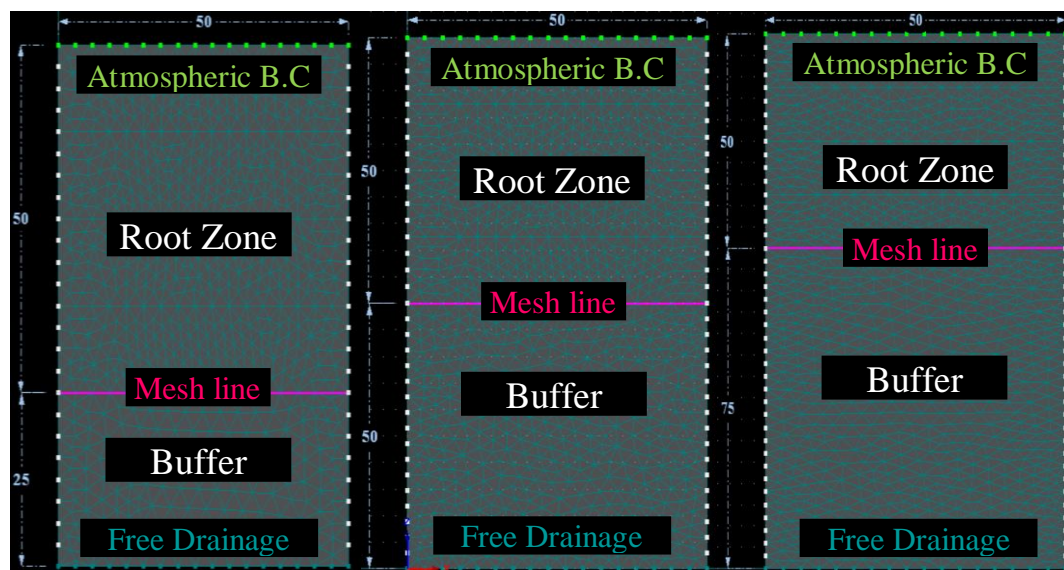
هدف از انجام این پژوهش بررسی وجود یک لایه بافر با بافت یکسان با محیط بافت خاک محیط ریشه با عمق های مختلف در زیر ناحیه ریشه بود. در نظر گرفتن یک لایه بافر در زیر ناحیه ریشه باعث توزیع مجدد آب نفوذ یافته می شود و گیاه می تواند در فاصله بین دو آبیاری از آب برگشتی استفاده نماید. این امر موجب تغییر در اجزای بیلان آب و تغییر راندمان واقعی مصرف

آب می‌شود. از این رو برای در نظر گرفتن عمق‌های مختلف بافر و تأثیر هر کدام بر روی مقدار آب جذب‌شده گیاه و دیگر اجزای بیلان آب چهار تیمار، با عمق صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر لایه بافر در سه بافت مختلف خاک (مجموعاً ۱۲ سناریو) بررسی شد. سه نوع خاک لومرسی‌سیلتی، لوم و لوم‌شنی بررسی شد. برای تعیین ضرایب معادله منحنی مشخصه رطوبتی هر سه بافت خاک از مقادیر پیش فرض نرم‌افزار HYDRUS در مدل ROSETTA استفاده گردید (جدول ۲). عمق توزیع ریشه ۵۰ سانتی‌متر به صورت یکسان در نظر گرفته شد. پس از محاسبه تبخیر و تعرق، نیاز آبیاری در دور آبیاری ۱۴ روزه به صورت یکسان در همه سناریوها تأمین گردید.

جدول ۲- پارامتر هیدرولیکی بافت‌های مختلف خاک بر اساس نتایج تخمین مدل ROSETTA

I (-)	K_s ($\text{cm}\cdot\text{day}^{-1}$)	n (-)	α (cm^{-1})	θ_s ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	θ_r ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	بافت خاک
۰/۵	۱/۶۸	۱/۲۳	۰/۰۱	۰/۴۳	۰/۰۸۹	لومرسی‌سیلتی
۰/۵	۲۴/۹۶	۱/۵۶	۰/۰۳۶	۰/۴۳	۰/۰۷۸	لوم
۰/۵	۱۰۶/۱	۱/۸۹	۰/۰۷۵	۰/۴۱	۰/۰۶۵	لوم شنی

تغییرات بافت خاک به صورت یکنواخت در نظر گرفته شد و عمق ریشه گیاه ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. شرایط مرزی در سطح خاک به صورت اتمسفریک در نظر گرفته شد. در این شرط مرزی مقدار بارش، تبخیر و تعرق در مدل قابل تعریف است. همچنین آبیاری به صورت سطحی در نظر گرفته شده و مقدار آبیاری به مدل داده شد. شرط مرزی پایین نیز به صورت زهکشی آزاد در نظر گرفته شد. همچنین به منظور بررسی مقدار جریان برگشتی رو به بالا از زیر ناحیه ریشه، در قسمت مرز لایه ناحیه ریشه و لایه بافر با استفاده از ابزارهای مدل یک Mesh-line ترسیم گردید. در شکل ۳ شرایط مرزی و عمق لایه بافر در یک سناریو آورده شده است.

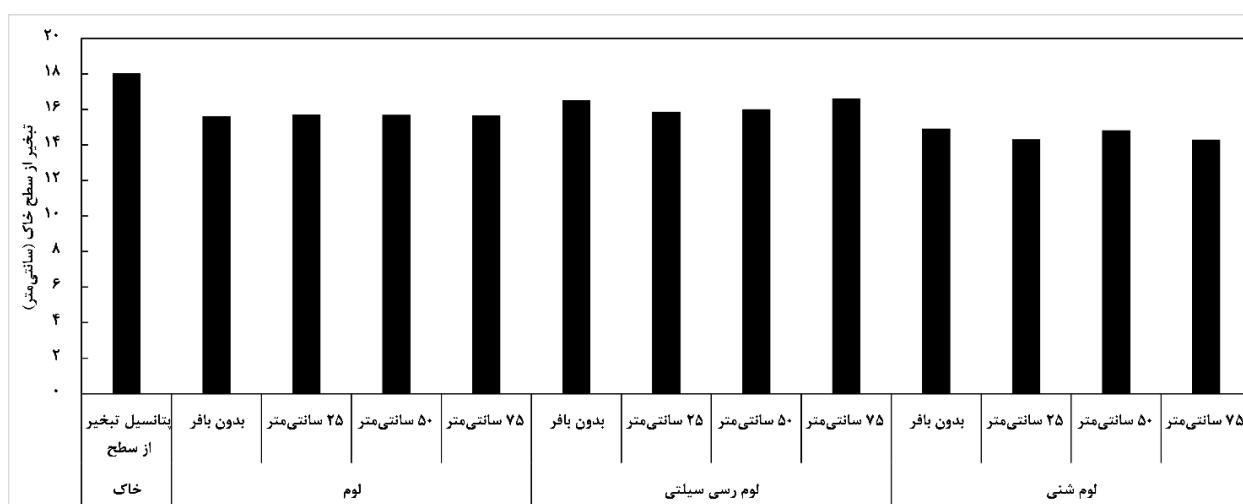


شکل ۳- شکل شماتیک شرایط مرزی، ناحیه ریشه و عمق خاک زیر ناحیه ریشه به عنوان بافر (اعداد به سانتی‌متر و شکل بدون مقیاس است)

نتایج

به منظور بررسی اثر هر سناریو، اجزای مختلف بیلان آب شامل تبخیر از سطح خاک، نفوذ عمقی و جذب آب توسط ریشه در سناریوهای مختلف آورده شده است. در شکل ۴ مقدار تبخیر سطح خاک در سناریوهای مختلف و پتانسیل تبخیر از سطح خاک آورده شده است. پتانسیل تبخیر از سطح خاک برابر با ۱۸ سانتی‌متر در دوره کشت محاسبه شد. مقدار تبخیر در خاک های لوم، لومرسی‌سیلتی و لوم شنی در حالت بدون بافر به ترتیب برابر با ۱۵/۶، ۱۶/۵ و ۱۴/۹ سانتی‌متر توسط مدل هایدروس

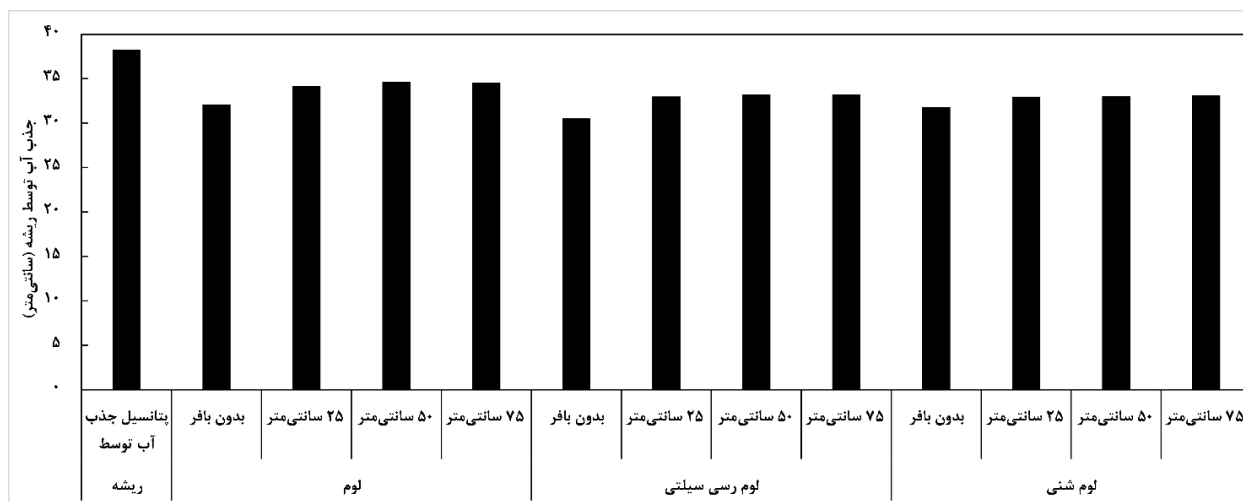
محاسبه شد. تبخیر در مدل هایدروس در سه فاز صورت می‌گیرد (Rassam, et. al., 2003). فاز اول زمانی است که خاک به صورت اشباع بوده و آب به اندازه پتانسیل تبخیر در خاک وجود دارد، در این حالت مقدار تبخیر واقعی و پتانسیل برابر است. در فاز دوم مقدار آب خاک کاهش یافته و رطوبت از مقدار اشباع کمتر می‌شود. در این حالت مقدار تبخیر واقعی توسط جریان رو به بالا تعیین می‌شود و مشخصات هیدرولیکی خاک نقش قابل توجهی ایفا می‌کند. در فاز سوم خاک به قدری خشک می‌شود که دیگر جریان آب منقطع می‌شود و مقدار مکش لایه سطحی خاک تعیین‌کننده مقدار تبخیر واقعی است (An, et. al., 2018). با توجه به بافت‌های لوم، لومرسی‌سیلتی و لوم شنی هر چه بافت خاک سبک تر شده است، مقدار جریان رو به بالا کاهش یافته و در نتیجه آن مقدار تبخیر واقعی کمتر شده است. از این رو در بافت لومرسی‌سیلتی که نسبت به دو بافت دیگر سنگین تر است، مقدار جریان مؤینگی رو به بالا بیشتر است و با افزایش عمق بافر مقدار آبی که قابلیت برگشت رو به بالا دارد افزایش یافته و در نتیجه آن مقدار تبخیر واقعی در این سناریو افزایش می‌یابد. در سناریوهای اعماق مختلف بافر تأثیر قابل توجهی در عمق تبخیر مشاهده نشد و در نظر گرفتن لایه بافر در زیر ناحیه ریشه بر روی میزان تبخیر تأثیر چندانی نداشت. با توجه به اینکه عمق مؤثر لایه تبخیر ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود (Allen, et. al., 2005)، وقتی که رطوبت خاک کاهش می‌یابد، لایه سطحی خاک خشک شده، باعث کاهش تبخیر می‌شود (فاز دوم و سوم تبخیر). از آنجایی که همه سناریوهای مورد بررسی در این پژوهش زیر ناحیه ریشه تعریف شده است، لذا رطوبت ذخیره‌شده در لایه بافر تأثیر قابل توجهی بر مقدار تبخیر واقعی نداشته است و بدیهی است که مقدار تبخیر واقعی نسبت به تغییرات عمق بافر در یک بافت خاک تقریباً یکسان باشد (Gao, et. al., 2015)، چاری و افراسیاب (۱۳۹۸).



شکل ۴- مقدار تبخیر از سطح خاک در سناریوهای مختلف

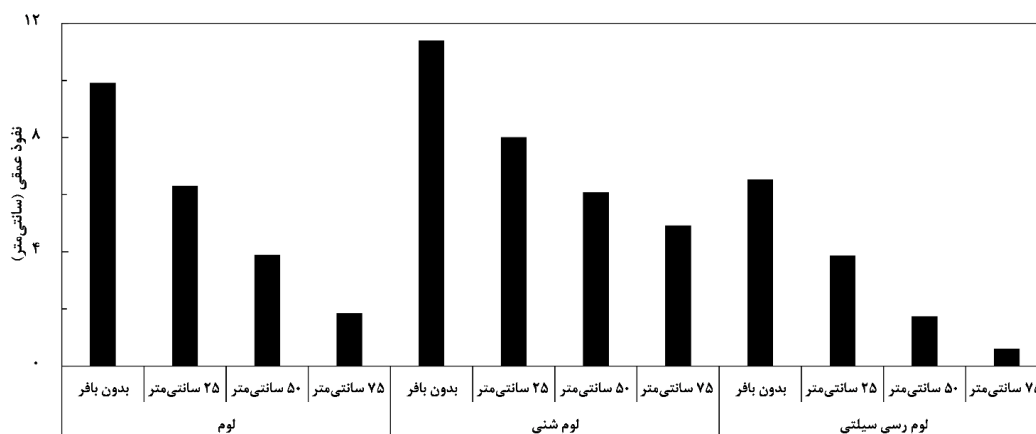
در شکل ۵ جذب آب توسط ریشه گیاه در سناریوهای مختلف و پتانسیل جذب آب آورده شده است. پتانسیل جذب آب که فارغ از سناریوهای مختلف است، برابر با $38/27$ سانتی‌متر در دوره کشت محاسبه شد. مقدار جذب آب در خاک‌های لوم، لومرسی‌سیلتی و لوم شنی در حالت بدون بافر به ترتیب برابر با $32/12$ ، $30/54$ و $31/78$ سانتی‌متر توسط مدل هایدروس محاسبه شد. در بافت لوم بیشترین مقدار جذب آب توسط ریشه، در سناریو عمق بافر ۵۰ سانتی‌متر برابر با $34/65$ سانتی‌متر و در بافت‌های لوم‌شنی و لومرسی‌سیلتی در سناریو عمق بافر ۷۵ به ترتیب برابر با $33/14$ و $33/23$ سانتی‌متر محاسبه شد؛ هر چند که در بافت لومرسی‌سیلتی مقدار جذب آب در دو سناریوی بافر با عمق ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر تقریباً یکسان به دست آمد. برای جذب آب و رشد گیاهان علاوه بر مقدار آب پتانسیل ماتریک آب خاک نیز دارای اهمیت است (عابدی کویایی و همکاران ۱۴۰۲). با توجه به معادله جذب آب فدس، تأثیر مکش خاک به‌عنوان عامل تعیین‌کننده مقدار جذب آب گیاه مشخص می‌شود (Feddes, 1982). با کاهش رطوبت خاک در فاصله بین دو آبیاری، مکش خاک منفی‌تر شده و باعث کاهش جذب آب می‌شود. از این رو دلیل کمتر بودن مقدار جذب آب واقعی نسبت به پتانسیل در همه سناریوها کمبود رطوبت خاک در دوره بین دو آبیاری است

(Rao, et. al., 2020). از آنجا که دور آبیاری در همه سناریوها به صورت یکسان و برابر با ۱۴ روز در نظر گرفته شده است، در فاصله بین دو آبیاری رطوبت خاک کاهش یافته، مقدار مکش از حد قابل جذب گیاه چغندر قند کمتر شده تنش رطوبتی کمتری به گیاه وارد می شود.



شکل ۵- مقدار جذب آب توسط ریشه در سناریوهای مختلف

در شکل ۶ نفوذ عمقی آب که توسط مدل HYDRUS محاسبه شده است، در سناریوهای مختلف آورده شده است. مقدار نفوذ عمقی در خاک های لوم، لوم رسی سیلتی و لوم شنی در حالت بدون بافر به ترتیب برابر با ۹/۹، ۶/۵ و ۱۱/۴ سانتی متر به دست آمد. با افزایش عمق بافر مدت زمان بیشتری نیاز است تا آب از محیط جریان و از دسترس گیاه خارج شود، از این رو در فاصله بین دو آبیاری که رطوبت خاک در ناحیه ریشه کاهش می یابد، جریان رو به بالا شکل گرفته، آب مجدد در دسترس گیاه قرار می گیرد. همچنین دلیل دیگر کاهش نفوذ عمقی در عمق بافر زیاد این است که منطقه ای که آب در خاک ذخیره می شود، افزایش یافته است. از طرفی در عمق یکسان بافر، بافت خاک عامل تعیین کننده مقدار نفوذ عمقی است. هر چه بافت خاک ریزتر می شود به دلیل کاهش هدایت هیدرولیکی، مقدار نفوذ عمقی نسبت به حالت بدون بافر کمتر می شود. کمترین مقدار نفوذ عمقی در بافت لوم، لوم شنی و لوم رسی سیلتی در بافر با عمق ۷۵ سانتی متر مشاهده شد که به ترتیب در این سه بافت ۵۶/۸۱ و ۹۰/۶۶ درصد نسبت به حالت بدون بافر، کاهش نفوذ عمقی مشاهده شد. مشخصات خاک تاثیر بیشتری نسبت به عمق بافر بر تبخیر و جذب آب ریشه دارد. لذا در هر سه بافت مورد بررسی با افزایش عمق بافر مقدار نفوذ عمقی کاهش یافته است. در صورتی که در مقدار تبخیر و جذب آب ریشه روند مشابهی مشاهده نشد.



شکل ۶- مقدار نفوذ عمقی در سناریوهای مختلف

در جدول ۳ مقدار جریان برگشتی، درصد تبخیر و تعرق (جزء مفید) به کل آب مصرفی و نسبت جذب واقعی آب به پتانسیل (عملکرد نسبی) آورده شده است. مقدار جریان برگشتی از لایه بافر در سه بافت خاک روند یکسانی ندارد. در بافت لوم با افزایش عمق بافر از ۲۵ به ۵۰ سانتی متر مقدار جریان برگشتی افزایش یافته، ولی با افزایش عمق بافر از ۵۰ به ۷۵ سانتی متر کاهش یافته است. در بافت لوم شنی با افزایش عمق بافر از ۲۵ به ۵۰ سانتی متر مقدار جریان برگشتی افزایش یافته، ولی با افزایش عمق بافر از ۵۰ به ۷۵ سانتی متر تغییر محسوسی نداشته است. همچنین در بافت لومرسی سیلتی، بیشترین مقدار جریان برگشتی در لایه بافر به عمق ۲۵ سانتی متر اتفاق افتاده است. در هر سه بافت با افزایش عمق بافر نسبت آب مفید به کل آب مصرفی افزایش یافته و بیشترین مقدار آن در سناریو با عمق ۷۵ سانتی متر اتفاق افتاده است. در بافت‌های لوم، لوم شنی و لومرسی سیلتی به ترتیب ۱۴، ۱۰ و ۱۱ درصد افزایش نسبت جزء مفید به کل آب مصرفی اتفاق افتاده است. مقدار عملکرد نسبی (نسبت جذب آب واقعی گیاه به مقدار پتانسیل) در هر سه بافت با در نظر گرفتن لایه بافر افزایش یافته است. به دلیل اینکه در فاصله بین دو آبیاری رطوبت خاک کاهش یافته و به تبع آن سرعت حرکت آب در خاک کم می‌شود، مدت زمان بیشتری نیاز است تا آب از اعماق پایین‌تر به ناحیه ریشه برسد و در دسترس گیاه قرار بگیرد. همچنین با توجه به این که با کاهش رطوبت مقدار جذب آب گیاه کاهش می‌یابد، لذا گرادیان هیدرولیکی بین ریشه و خاک کم می‌شود و گرادیان برای برگشت آب از اعماق پایین‌تر کافی نیست. از این رو در سناریوهای با اعماق مختلف بافر تغییر قابل ملاحظه‌ای در عملکرد نسبی اتفاق نیفتاده است. بیشترین مقدار عملکرد نسبی در بافت‌های لوم، لوم شنی و لومرسی سیلتی به ترتیب در اعماق ۵۰، ۷۵ و ۷۵ سانتی متر و برابر با ۹۰/۵۵، ۸۶/۶۰ و ۸۶/۸۴ محاسبه شد که به ترتیب ۶/۶۲، ۳/۵۶ و ۷/۰۳ درصد نسبت به حالت بدون بافر افزایش داشت (جدول ۳).

جدول ۳ - مقدار جریان برگشتی، نسبت جذب آب ریشه و نسبت آب مفید به کل آب مصرفی

بافت	سناریو	جریان برگشتی از ناحیه بافر (سانتی‌متر)	تبخیر تعرق به کل آب مصرفی (%)	جذب آب واقعی ریشه به مقدار پتانسیل (%)
لوم	بدون بافر	---	۸۲/۸۱	۸۳/۹۳
	۲۵ سانتی‌متر	۱/۳۳	۸۸/۷۷	۸۹/۲۷
	۵۰ سانتی‌متر	۱/۸۸	۹۲/۸۲	۹۰/۵۵
	۷۵ سانتی‌متر	۱/۷۹	۹۶/۴۳	۹۰/۲۴
لوم شنی	بدون بافر	----	۸۰/۳۷	۸۳/۰۳
	۲۵ سانتی‌متر	۰/۵۵	۸۵/۵	۸۶/۱۴
	۵۰ سانتی‌متر	۰/۶۷	۸۸/۷۲	۸۶/۳۴
	۷۵ سانتی‌متر	۰/۶۶	۹۰/۶۰	۸۶/۶۰
لومرسی سیلتی	بدون بافر	----	۸۶/۶۸	۷۹/۸۱
	۲۵ سانتی‌متر	۳/۴۸	۹۱/۴۸	۸۶/۲۲
	۵۰ سانتی‌متر	۲/۶۵	۹۵/۲۷	۸۶/۸۳
	۷۵ سانتی‌متر	۲/۰۴	۹۷/۴۳	۸۶/۸۴

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به بررسی اثرات لایه بافر با عمق‌های مختلف بر اجزای بیلان آب و راندمان مصرف آب در سه نوع بافت خاک پرداخته است. نتایج حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی نشان داد که لایه بافر تأثیری بر تبخیر سطحی نداشت و مقدار تبخیر در حالت بدون بافر و با بافر مشابه بود. همچنین افزایش عمق بافر موجب افزایش جذب آب توسط ریشه شد؛ به طوری که بیشترین جذب آب در بافت لوم با عمق بافر ۵۰ سانتی‌متر و در بافت‌های لوم شنی و لومرسی سیلتی با عمق بافر ۷۵ سانتی‌متر به ترتیب برابر با ۳۴/۶۵، ۳۳/۱۴ و ۳۳/۲۳ سانتی‌متر مشاهده شد. با افزایش عمق بافر، مقدار نفوذ عمقی کاهش یافت. کمترین نفوذ عمقی در هر سه بافت خاک در عمق بافر ۷۵ سانتی‌متر اتفاق افتاد. در بافت‌های لوم، لوم شنی و لومرسی سیلتی در بافر با عمق ۷۵ سانتی‌متر به ترتیب ۸۱/۲، ۵۶/۸۱ و ۹۰/۶۶ درصد نسبت به حالت بدون بافر کاهش نفوذ عمقی مشاهده شد. مقدار جریان برگشتی

در عمق‌های مختلف بافر در بافت‌های مختلف خاک متفاوت بود و بیشترین مقدار آن در بافت لومرسی سیلتی با بافر ۲۵ سانتی‌متر مشاهده شد. با افزایش عمق بافر، نسبت آب مفید به کل آب مصرفی افزایش یافت. بیشترین نسبت در عمق بافر ۷۵ سانتی‌متر مشاهده شد. در هر سه بافت خاک با افزایش عمق بافر، عملکرد نسبی افزایش یافت. بیشترین عملکرد نسبی در عمق بافر ۵۰ سانتی‌متر برای خاک لوم و ۷۵ سانتی‌متر برای خاک‌های لوم‌شنی و لومرسی سیلتی برابر با ۹۰/۵۵، ۸۶/۶۰ و ۸۶/۸۴ بدست آمد که به ترتیب ۶/۶۲، ۳/۵۶ و ۷/۰۳ درصد نسبت به حالت بدون بافر افزایش داشت. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از لایه بافر در عمق مناسب می‌تواند بهبود قابل توجهی در راندمان مصرف آب و جذب آب توسط گیاهان ایجاد کند و از نفوذ عمقی آب به لایه‌های زیرین جلوگیری نماید. بنابراین، در طراحی سیستم‌های آبیاری و مدیریت آب در کشاورزی، در نظر گرفتن لایه بافر می‌تواند راهکار مؤثری برای بهینه‌سازی مصرف آب با تغییر در عمق آب آبیاری و یا دور آبیاری باشد.

منابع

- اکبری، م.، دهقانی س.، حسین و میرلطیفی، س.م.، ۱۳۸۸. تاثیر برنامه‌ریزی آبیاری بر بهره‌وری آب در کشاورزی (مطالعه موردی در شبکه آبشار اصفهان). *آبیاری و زهکشی ایران*، ۳(۱): ۶۹-۷۹.
- آمارنامه محصولات زراعی و باغی، ۱۴۰۱. وزارت جهاد کشاورزی.
- امداد، م. ر.، و تافته، آ.، ۱۳۹۸. تعیین مناسب‌ترین عمق آب آبیاری گیاه گندم با استفاده از مدل AquaCrop با هدف راستای ارتقا کارایی مصرف آب. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۳(۲): ۴۱۷-۴۲۵.
- بنی حبیب، م.، و قرشی ابهری، س.م.ع.، ۱۳۹۳. توسعه مدل تصمیم‌گیری چند معیاره برای تعیین راهکارهای مدیریت منابع آب دریاچه ارومیه مبتنی بر معیارهای توسعه پایدار (پژوهش کاربردی ش. WRE-۹۱۰۲۱). شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران، تهران.
- جلینی، م.، و گنجی‌مقدم، ا.، ۱۳۹۶. اثر روش‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی بر عملکرد و کارایی مصرف آب دو رقم شلیل. *مدیریت آب و آبیاری*، ۷(۲): ۲۱۱-۲۲۶.
- چاری، م.م.، و افراسیاب، پ.، ۱۳۹۸. تاثیر عمق سطح ایستابی در مقدار تبخیر از خاک. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۶(۳): ۱۹۲-۱۷۷.
- حقیقتی، ب.، برومند نسب، س.، و ناصری، ع.ع.، ۱۳۹۵. تأثیر کم آبیاری و خشکی موضعی ریشه بر عملکرد و کارایی مصرف آب دو رقم سیب زمینی. *آب و خاک*، ۳۰(۳): ۷۱۷-۷۲۹.
- سلطانی، م.، ربانپناه، ح.، فخار، م.س.، ۱۴۰۰. تاثیر عمق کارگذاری قطره چکان بر افزایش راندمان جذب ریشه گیاه ذرت در سه نوع بافت خاک. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۲(۳): ۷۷۱-۷۸۲.
- عابدی کویایی، ج.، پورعبدالله، ن.، و انصاری، ش.، ۱۴۰۲. برآورد پارامترهای منحنی مشخصه آب خاک در مدل‌های مختلف در خاک‌های سبک. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست*، ۲(۲): ۱۳۷-۱۴۸.
- عربی آیسک، م.، پوررضا بیلندی، م.، یعقوب زاده، م.، و آذرمی آتاجان، ف.، ۱۴۰۲. بررسی تاثیر نوع روش آبیاری بر عملکرد پیاز تحت تنش خشکی. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست*، ۲(۲): ۹۹-۱۱۲.
- علیزاده دیزج، ا.، ۱۳۹۷. تحلیل شبکه ذی‌نفعان محلی در راستای ارتقاء بهره‌وری آب کشاورزی در شرایط کم آبیاری (منطقه مورد مطالعه: شهرستان ارومیه)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، تهران.
- منتصری، م.، رسولی مجد، ن.، بهمنش، ج.، و رضایی، ح.، ۱۳۹۵. ارزیابی تغییرات رد پای آب محصولات زراعی حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از روش LMDI. *دانش آب و خاک*، ۲۶(۳): ۱۹۹-۲۰۱.
- نورجو، ا.، منتصری، م.، بهمنش، ج.، و اکبری، م.، ۱۳۹۷. حسابداری آب در مزرعه چغندر قند تحت مدیریت دور و عمق آب آبیاری (مطالعه موردی: منطقه میان‌دواب). *چغندر قند*، ۳۴(۱): ۴۸-۳۱.

References

- Abedi koupae, J., Pourabdollah, N., Ansari, S. 2024. Estimation of soil water characteristic curve parameters in different models in light soils. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 2(2), 137-148. doi: 10.22034/nawee.2024.434088.1060. (In Persian)
- Akbari, M., Dehghani Sanij, H., Mirlatifi, S. M. 2009. Impact of irrigation scheduling on agriculture water productivity. *Iranian journal of irrigation and drainage*, 3(1), 69-79. sid. <https://sid.ir/paper/131630/en>. (In Persian)
- Alizadeh Dizaj, A. 2017. The Analysis of Local Stakeholder's Network in Order to Increase the Agricultural Water Productivity Use Under Deficit Irrigation Conditions (Case study: Urmia District). Master's Thesis. University of Tehran. (In Persian)
- Allen, R. G., Pruitt, W. O., Raes, D., Smith, M., Pereira, L. S. 2005. Estimating evaporation from bare soil and the crop coefficient for the initial period using common soils information. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131(1), 14-23.
- An, N., Hemmati, S., Cui, Y. J., Tang, C. S. 2018. Numerical investigation of water evaporation from Fontainebleau sand in an environmental chamber. *Engineering Geology*, 234, 55-64.
- Ataee, A., Neyshaboori, M., Akbari, M., Zare Hagi, D., Onnabi Milani, A. 2018. Evaluation of HYDROUS-2D model for determination of soil moisture distribution under surface and sub-surface drip irrigation of pistachio trees. *Journal of Water Research in Agriculture*, 32(4), 581-595.
- Arabi Aysk, M., Pourreza Bilandi, M., Yaghoobzadeh, M., & Azarmi Atajan, F. 2024. Investigating the effect of irrigation method on onion yield under drought stress. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 2(2), 99-112. doi: 10.22034/nawee.2023.424811.1054. (In Persian)
- Bainbridge, D. A. 2001. Buried clay pot irrigation: a little known but very efficient traditional method of irrigation. *Agricultural water management*, 48(2), 79-88.
- Bani Habib, M. & GHoreshi Abhari, S. M. A. 2014. Development of a multi-criteria decision-making model to determine the water resources management solutions of Lake Urmia based on sustainable development criteria. Tehran. IRAN Water Resources Management Company. (In Persian)
- Camp, C. R., & Sadler, E. J. 2002. Irrigation, deep tillage, and nitrogen management for a corn–soybean rotation. *Transactions of the ASAE*, 45(3), 601.
- Chari, M. M., Afrasiab, P. 2019. Effect of water table depth on evaporation from soil. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(3), 177-192. doi: 10.22069/jwsc.2019.15786.3100. (In Persian)
- Emdad, M. R., Tafteh, A. 2019. Determining the most suitable depth of irrigation water of wheat plant using the AquaCrop model in order to increase water use efficiency. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(2), 417-425. (In Persian)
- Feddes, R. A. 1982. Simulation of field water use and crop yield. In *Simulation of plant growth and crop production* (pp. 194-209). Pudoc.
- Gao, X., Huo, Z., Bai, Y., Feng, S., Huang, G., Shi, H., Qu, Z. 2015. Soil salt and groundwater change in flood irrigation field and uncultivated land: a case study based on 4-year field observations. *Environmental Earth Sciences*, 73, 2127-2139.
- Haghighati, B., Broomand Nasab, S., Naseri, A. 2016. Effect of Deficit Irrigation and Partial Root – Zone Drying on Yield and Water Use Efficiency of Two Potato Cultivars. *Water and Soil*, 30(3), 717-729. doi: 10.22067/jsw.v30i3.42913. (In Persian)
- Jolaini, M., & Ganji moghaddam, E. 2017. Effect of surface and subsurface drip irrigation methods on yield and water use efficiency of two nectarine cultivars. *Water and Irrigation Management*, 7(2), 211-226. doi: 10.22059/jwim.2017.237445.551. (In Persian)

- Kandelous, M. M., Šimůnek, J. 2010. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management*, 97(7), 1070-1076.
- Latif, M., Etedali, H.R. and Soltani, M. 2023. Evaluation of the different soil management effects on salinity control in maize cropping by HYDRUS-2D. *Soil Science Annual*, 74 (2).
- Montaseri, M., Rasouli Majd, N., Behmanesh, J., Rezaie, H. 2016. Evaluation of Water Footprint of Crop Production Variability in Lake Urmia Basin using LMDI Method. *Water and Soil Science*, 26(3-2), 199-210. (In Persian)
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*, 12(3), 513-522.
- Nourjou, A., Montaseri, M., Behmanesh, J., Akbari, M. 2018. Water accounting in sugar beet field under duration and depth of irrigation management (case study: Miandoab region). *Journal of Sugar Beet*, 34(1), 31-48. (In Persian)
- Patel, N., & Rajput, T. B. S. 2008. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion. *Agricultural water management*, 95(12), 1335-1349.
- Rajput, T. B. S., Patel, N. 2006. Water and nitrate movement in drip-irrigated onion under fertigation and irrigation treatments. *Agricultural water management*, 79(3), 293-311.
- Rao, S., Lesparre, N., Flores-Orozco, A., Wagner, F., Kemna, A., Javaux, M. 2020. Imaging plant responses to water deficit using electrical resistivity tomography. *Plant and Soil*, 454, 261-281 .
- Rassam, D., Simunek, J., Van Genuchten, M. T. 2003. *Modelling variably saturated flow with HYDRUS-2D*. Brisbane, Australia: ND Consult.
- Šimůnek, J. I. R. K. A., Van Genuchten, M. T., Šejna, M. 2006. The HYDRUS software package for simulating two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. *Technical manual, version, 1*, 241.
- Soltani, M., Rabbaniha, H., Fakhar, M. 2021. The Effects of Dripper Installation Depth on Increasing the Maize Root Water Uptake Efficiency for Three Various Soil Textures. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(3), pp. 771-782. (In Persian)
- Statistics of agricultural products. 2022. Ministry of Agriculture Jihad. (In Persian)
- 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.
- Wang, T., Melton, F. S., Pôças, I., Johnson, L. F., Thao, T., Post, K., Cassel-Sharma, F. 2021. Evaluation of crop coefficient and evapotranspiration data for sugar beets from landsat surface reflectances using micrometeorological measurements and weighing lysimetry. *Agricultural Water Management*, 244, 106533.
- Wesseling, J. G., Elbers, J. A., Kabat, P., Van den Broek, B. J. 1991. *SWATRE: instructions for input*. Internal Note, Winand Staring Centre, Wageningen, the Netherlands, 1991, 700.