Vol 16, No. 3, Autumn 2026

University of Tehran Press

Journal of Water and Irrigation Management Online ISSN: 2382-9931

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

Estimating the Water Needs and Crop Coefficients of *Moringa oleifera* Tree using Lysimetry

Zahra Goorani[1] | Houshang Ghamarnia[2]✉ | Bahman Farhadi Bansoole[3] | Issa Arji[4]

1. Department of Water Science and Engineering. Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: z.goorani@razi.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Water Science and Engineering. Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: hghamarnia@razi.ac.ir
3. Department of Water Science and Engineering. Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: bfarhadi2001@yahoo.com
4. Department of Water Science and Engineering. Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: issaarji@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 9 July 2026
Received in revised form
9 August 2026
Accepted 6 September 2026
Published online 26 October 2026

Keywords:
Moringa oleifera
crop water requirement
single crop coefficient
basal crop coefficient

ABSTRACT

This study was conducted to estimate the water requirements and determine the single and basal crop coefficients (K_c and K_{cb}) of *Moringa oleifera* during various growth stages over the cropping years 2023 and 2024. To this end, six drainage lysimeters were employed; three were used to measure the actual evapotranspiration (ET_c) of the crop, and three were used to measure the reference evapotranspiration (ET_o) in a field environment. $ET_o$was calculated using meteorological data and the Penman-Monteith method. The crop coefficients (K_c) were evaluated for three primary growth stages: initial, development, and mid-season. Subsequently, the single and dual crop coefficients for *Moringa oleifera* were calculated using the appropriate mathematical formulations. The results indicated that in the semi-arid region of Kermanshah, the maximum and minimum daily evapotranspiration for the crop was 11.11and 0.45mm, respectively, while for the reference plant, it was 5.63and 2.08mm. In 2023, the $K_c$values for the initial, development, and mid-season stages were 0.71, 1.59, and 1.70, respectively, and in 2024, they were 0.69, 1.32, and 1.76. The average single crop coefficients across the two years were 0.75, 1.71, and 1.715for the initial, development, and mid-season stages, respectively. Similarly, the average basal crop coefficients (K_{cb}) for the initial, development, and mid-season stages were 0.485, 0.92, and 0.805. These findings provide a scientific basis for the efficient irrigation management of *Moringa* in regions with similar climatic, soil, and water conditions. Furthermore, the obtained crop coefficients (K_c and K_{cb}) offer critical insights into the precise water requirements of *Moringa* in semi-arid climates, serving as a key tool for optimal water resource management. By providing accurate water consumption patterns, these results establish a foundation for enhancing irrigation efficiency in the expansion of this medicinal-industrial crop in water-limited regions.

Cite this article: Goorani, Z., Ghamarnia, H., Farhadi Bansoole, B., & Arji, I. (2026). Estimating the Water Needs and Crop Coefficients of *Moringa oleifera* Tree using Lysimetry. *Journal of Water and Irrigation Management*, 16 (3), 641-657. DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2026.417321.1321

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2026.417321.1321

دوره شانزدهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۵

انتشارات دانشگاه تهران

مدیریت آب و آبیاری

شاپا الکترونیکی: ۹۹۳۱-۲۳۸۲

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

برآورد نیاز آبی و ضرایب گیاهی درخت مورینگا اولیفرا (*Moringa olifera*) به‌روش لایسیمتری

زهرا گورانی[۱] | هوشنگ قمرنیا[۲]✉ | بهمن فرهادی بانسوله[۳] | عیسی ارجی[۴]

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: z.goorani@razi.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: hghamarnia@razi.ac.ir

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: bfarhadi2001@yahoo.com

۴. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: issaarji@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۰۴

کلیدواژه‌ها:

ضریب گیاهی منفرد

ورینگاضریب گیاهی پایه

تبخیر و تعرق

گیاه مرجع

چکیده

این پژوهش با هدف برآورد نیاز آبی و تعیین ضرایب گیاهی منفرد و پایه درخت *مورینگا اولیفرا* (*Moringa olifera*) در مراحل مختلف رشد و طی سال‌های زراعی ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ انجام شد. بدین منظور، از شش دستگاه لایسیمتر زهکش‌دار استفاده شد که سه عدد به‌منظور اندازه‌گیری تبخیر و تعرق واقعی (ET_c) گیاه و سه عدد برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق گیاه مرجع در محیط مزرعه استفاده گردید. تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_o) نیز با استفاده از داده‌های هواشناسی و روش پنمن مانتیث محاسبه شد. ضرایب گیاهی (K_c) برای سه مرحله اصلی رشد گیاه شامل مرحله ابتدایی، مرحله توسعه و مرحله میانی، طی دو سال زراعی موردمطالعه قرار گرفت. سپس، با استفاده از فرمول‌های مربوط به برآورد ضریب گیاهی تک جزیی و دو جزیی، این ضرایب گیاهی برای *مورینگا اولیفرا* محاسبه گردید. نتایج پژوهش برآورد نیاز آبی و ضرایب گیاهی درخت *مورینگا اولیفرا* در منطقه خشک و نیمه‌خشک کرمانشاه نشان داد که در طول دوره دو ساله پژوهش، حداکثر و حداقل تبخیر–تعرق روزانه برای خود گیاه به‌ترتیب ۱۱/۱۱ و ۱/۴۵ میلی‌متر و برای گیاه مرجع به‌ترتیب ۶/۵۳ و ۲/۰۸ میلی‌متر به‌دست آمد. مقادیر ضریب گیاهی (K_c) در سال ۱۴۰۲ برای مراحل رشد ابتدایی، توسعه و میانی به‌ترتیب ۰/۷۱، ۱/۵۹ و ۱/۷۰ و در سال ۱۴۰۳ برابر با ۰/۶۹، ۱/۳۲ و ۱/۷۶ بود. میانگین ضرایب گیاهی منفرد در این مراحل طی دو سال زراعی به‌ترتیب ۰/۷۵، ۱/۷۱ و ۱/۷۱۵ محاسبه شد. میانگین ضرایب گیاهی پایه نیز در مراحل رشد ابتدایی، توسعه و میانی به‌ترتیب ۰/۴۸۵، ۰/۹۲ و ۰/۸۰۵ به‌دست آمد. این نتایج می‌تواند مبنای مناسبی برای مدیریت علمی و بهینه آبیاری درخت مورینگا در مناطق مشابه از نظر شرایط اقلیمی، آب و خاک باشد. ضرایب گیاهی به‌دست‌آمده (K_c و K_{cb}) در مراحل مختلف رشد، ضمن تبیین دقیق نیاز آبی مورینگا در اقلیم نیمه‌خشک، ابزاری کلیدی برای مدیریت بهینه منابع آب فراهم می‌آورد. این نتایج با ارائه الگوهای مصرف دقیق آب، بستری برای افزایش بهره‌وری آبیاری در توسعه کشت این گیاه دارویی–صنعتی در مناطق با محدودیت منابع آب ایجاد می‌کند.

استناد: گورانی، زهرا؛ قمرنیا، هوشنگ؛ فرهادی بانسوله، بهمن و ارجی، عیسی (۱۴۰۵). برآورد نیازآبی و ضرایب گیاهی درخت *مورینگا اولیفرا* (*Moringa olifera*) به‌روش لایسیمتری. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۶ (۳)، ۶۴۱-۶۵۷ DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2026.417321.1321

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

CC BY NC

۱. مقدمه

کشور ایران با شش حوضه آبی یکی از کم آب‌ترین کشورهای جهان است. میزان ۱۳ درصد از کل مساحت ایران دارای آب‌وهوای کوهستانی، ۱۴ درصد آب‌وهوای معتدل و ۷۳ درصد آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک است. ایران به‌دلیل کم‌بودن ریزش‌های با متوسط بارندگی ۲۲۱ میلی‌متر در سال (حدود یک‌سوم متوسط جهانی) و تبخیری معادل سه برابر متوسط جهانی در زمره کشورهای خشک و نیمه‌خشک جهان قرار دارد و همچون سایر کشورهای جهان از این قاعده و بحران مستثنی نخواهد بود (مرزبان و همکاران، ۱۳۹۸؛ قمرنیا و همکاران، ۱۳۹۹). منشأ اصلی منابع آب کشور ایران را بارندگی آن تشکیل می‌دهد. در پژوهشی، با استفاده از نتایج ماهواره‌GRACE، کسری مخزن آب‌های زیرزمینی در سال ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۱ بیش از ۳۵۰ میلیارد مترمکعب برآورد شد (زند پارسا و همکاران، ۲۰۲۴). بنابراین، تعیین میزان دقیق آب موردنیاز آبیاری برای هر گیاه می‌تواند به مدیریت صحیح و مؤثر منابع آبی موجود به‌ویژه آب زیرزمینی کمک قابل‌توجهی نماید. از طرفی تأثیرات و عوارض داروهای شیمیایی سبب شده که تمایل به گیاهان دارویی بیش از پیش شود. ترجیح و اولویت مردم در آن است تا به‌جای داروهای شیمیایی از گیاهان دارویی استفاده کنند. استفاده از گیاهان دارویی از ایام قدیم تاکنون در جامعه وجود داشته است. استفاده از این گیاهان، نه‌تنها به‌عنوان یک منبع قدرتمند برای درمان، بلکه به‌عنوان بخشی از فرهنگ و دانش محلی در بسیاری از جوامع به‌شمار می‌آید. با پیشرفت علم و تکنولوژی، توجه به خواص دارویی گیاهان و استفاده از آن‌ها در صنعت داروسازی و پزشکی افزایش یافته است. خانواده گز روغنیان تیره کوچکی از گیاهان گلدار جداگلبرگ و فقط شامل یک جنس به نام گز روغن است. مرکب از معدود انواع درختی است. غالب آن‌ها در نواحی گرم و مرطوب مانند عربستان، هند، هیمالیا، برمه و استان‌های جنوبی ایران (سیستان و بلوچستان و هرمزگان) مشاهده شده است. تاکنون ۱۴ گونه آن شناسایی و گزارش شده است. *مورینگا اولیفرا* با نام علمی (*Moringa oleifera*) بومی هند شمالی و معروف‌ترین گونه در بین همه گونه‌هاست و مهم‌ترین و اقتصادی‌ترین گونه خانواده است و به تازگی در ایران کشت شده، گیاهی است با ارزش که تمامی بخش‌های آن قابل‌استفاده و بهره‌برداری است و به‌دلیل فواید فراوانش «درخت معجزه» لقب گرفته است. این گیاه منبعی مقرون‌به‌صرفه و غنی از پروتئین‌ها، مولتی ویتامین‌ها (مهم‌تر از همه ویتامین‌های A، B و C)، کلسیم و پتاسیم است و ترکیبی منحصربه‌فرد از کوئرستین، من‌کامفرول، زناتین، سیتوسترول، کافئویلکینیک‌اسید و سایر متابولیت‌های ثانویه ضروری دارویی را داراست و از این‌رو کاربردهای گسترده‌ای از جمله آنتی‌اکسیدان، ضدالتهاب، ضد دیابت، ضد باکتری، ضد قارچ، ضد زخم، ضد فشارخون، ضد تب، ضد صرع، ضد تومور، ضد سرطان، ضد اسپاسم، محرک قلب و گردش خون، خواص ادرارآور، کاهش دهنده کلسترول و محافظت‌کننده کبد را دارد و هم‌چنین در احیای جنگل‌ها، علوفه و خوراک دام، تصفیه آب و جاذب زیستی برای جداسازی فلزات سنگین از آب آلوده نیز به‌کار می‌رود. روغن استخراج‌شده از دانه‌ها علاوه بر مصارف پخت و پز به‌عنوان روان‌کننده، لوسیون‌های پوست به‌ویژه در تولید بیودیزل استفاده می‌شود (Abubakar *et al*., 2021). مطالب ارائه‌شده نشانگر آن است که به‌علت خواص دارویی، بهداشتی و غذایی، برگ، دانه، گل، چوب و غیره مورینگا در جهان به‌طور گسترده‌ای موردمصرف تجاری قرار گرفته و درآمدزایی و اشتغال‌زایی بالایی را برای کشورهای تولیدکننده محصولات آن به ارمغان آورده است. توجه به این موضوع که در ایران، گیاهی ناشناخته باقی مانده و تنها به‌صورت محلی و محدود در استان‌های جنوبی کشور کشت شده است، شناخت بیش‌تر آن می‌تواند به ترویج آن کمک نماید. از طرفی توجه به اینکه ضرایب گیاهی *مورینگا اولیفرا* در هیچ‌کدام از مراجع مربوطه (نشریه فائو ۵۶) ارائه نشده است (ضرایب گیاهی درختان به‌صورت کلی به‌صورت کم ارائه شده‌اند) و بررسی‌های به‌عمل‌آمده نشان داد که پژوهش‌هایی بسیار محدود و کم تعداد (به‌جز یک مورد در برزیل) در زمینه برآورد ضرایب گیاهی (تک‌جزیی و دو جزیی) تاکنون در سطح دنیا انجام گرفته است و هم‌چنین با عنایت به فواید

دارویی این گیاه، بهره‌وری بالای آن در مصرف آب و هم‌چنین توجیه اقتصادی کشت این گیاه، لذا مشخص‌بودن ضرایب گیاهی برای تدوین برنامه‌ریزی‌های آبیاری برای کنترل و مدیریت منابع آب لازم و ضروری است. با توجه به جمیع مطالب گفته شده پژوهش حاضر برای تعیین ضرایب گیاهی در طی دو سال در منطقه کرمانشاه صورت پذیرفته است.

۲. پیشینه پژوهش

با توجه به بررسی‌های به‌عمل‌آمده در خصوص تعیین ضریب گیاهی *مورینگا اولیفرا* به‌جز یک مورد در برزیل پژوهشی در این خصوص صورت نگرفته است و این پژوهش برای اولین‌بار در ایران انجام شده و گزارش می‌شود.

Bayisa *et al.* (2024) در پژوهشی از الگوریتم‌های یادگیری ماشین شامل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و جنگل تصادفی (RF) برای پیش‌بینی رطوبت خاک، تبخیر و تعرق واقعی (ETa) و زیست‌توده هندوانه استفاده کرد. هم‌چنین، رابطه‌ای بین شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) و ضریب گیاهی تعدیل‌شده (Kcaj) توسعه داده شد که به‌صورت یک مدل رگرسیون درجه دوم بیان گردید. نتایج نشان داد که مدل ANN در پیش‌بینی متغیرهای موردبررسی عملکرد بهتری نسبت به مدل RF داشته و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 و شاخص NDVI می‌تواند روشی کارآمد برای برآورد ضریب گیاهی و بهبود مدیریت آبیاری در مناطق نیمه‌خشک باشد.

Ramos *et al.* (2024) در یک مطالعه مروری با بررسی ۵۸ پژوهش، تأثیر مالچ‌پاشی بر تبخیر از سطح خاک، تبخیر و تعرق واقعی گیاه و ضریب گیاهی (Kc) را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از مالچ، به‌ویژه در مراحل ابتدایی رشد که سطح خاک هنوز به‌طور کامل توسط پوشش گیاهی پوشیده نشده است، موجب کاهش قابل‌توجه تبخیر از خاک و ضریب گیاهی می‌شود. هم‌چنین، مالچ‌های پلاستیکی، به‌ویژه پلاستیک سیاه، نسبت به مالچ‌های آلی در کاهش Kc اثربخشی بیش‌تری داشتند، اگرچه این اثر با پیشرفت فصل رشد کاهش یافت. این پژوهش در نهایت دستورالعمل‌هایی برای تعدیل مقادیر ضریب گیاهی براساس نوع محصول، مرحله رشد و نوع مالچ به‌منظور بهبود مدیریت آبیاری ارائه کرد.

Jafari *et al.* (2021) در پژوهشی با هدفِ یافتن نیاز آبی درختان پرتقال بالغ در مناطق نیمه‌خشک (جنوب ایران) با شناسایی نرخ تبخیر و تعرق استاندارد و ضرایب گیاهی (تکی و دوگانه) انجام شد. میانگین نرخ تبخیرو تعرق ۵/۲ میلی‌متر بر روز محاسبه شد و ضریب گیاهی از ۰/۶۵ تا ۰/۹۵ متغیر بود. نتایج نشان داد که میانگین آبیاری که به‌طور متوسط طبق روش‌های سنتی در منطقه انجام می‌شود ۱۹ درصد بیش‌تر از نیاز واقعی بود.

Ghamarnia *et al.* (2021) به مطالعه بر روی گیاه دارویی نعناع فلفلی به‌منظور برآورد ضرایب گیاهی تک‌جزیی و دو جزیی پرداختند و برای این منظور از ۱۲ لایسیمتر قابل تخلیه استفاده شد. از این تعداد لایسیمتر، سه لایسیمتر برای برآورد تبخیر و تعرق چمن، سه لایسیمتر برای برآورد تبخیر از خاک بدون پوشش گیاهی و شش لایسیمتر به گیاه نعناع اختصاص داده شد که در گروه A و B دسته‌بندی شدند. هر دو گروه گیاه نعناع تا پایان دوره گلدهی به رشد خود ادامه دادند و زمان مناسب عصاره‌گیری، سه بار بوته‌ها با رسیدن به ارتفاع ۱۰–۱۲ سانتی‌متری برداشت شدند میانگین نیاز آبی نعناع فلفلی برای دو لایسیمتر A و B به‌ترتیب ۶۴۶ و ۵۳۲ میلی‌متر برآورد شد. ضرایب گیاهی تک‌جزیی و دو جزیی در لایسیمتر گروه A، برای دوره رشد اولیه، توسعه و میانی به‌ترتیب ۰/۶۸، ۱/۰۷، ۱/۳۱و ۰/۳، ۰/۸۸ و ۱/۱۸ برآورد شدند. در لایسیمترهای گروه B میانگین ضریب گیاهی تک‌جزیی ۰/۸۵، ۰/۹۲ و ۰/۹۵ برآورد شد.

Santos *et al.* (2017) در مطالعه‌ای اقدام به برآورد نیاز آبی و ضرایب گیاهی در مراحل مختلف فنولوژیکی گیاه *مورینگا اولیفرا* در منطقه خشک و نیمه‌خشک در پرنامبوکو واقع در برزیل پرداختند. در این پژوهش برای تخمین تبخیر و تعرق از لایسیمتر استفاده شد و تبخیر و تعرق برآوردشده با روش‌های غیرمستقیم مقایسه شد. در این مطالعه شوری

خاک و پتانسیل آب برگ گیاه موردبررسی قرار گرفت. روش غیر مستقیم هارگریوز سامانی نتایج قابل‌قبولی در مقایسه با برآوردها برای منطقه موردمطالعه ارائه کرد. ضرایب گیاهی (K_c) از ۰/۷۳ تا ۱/۷۳ در مراحل مختلف فنولوژیکی متغیر بود. تبخیر و تعرق تجمعی گیاه *مورینگا اولیفرا* از ۱۳۹/۸ تا ۱۳۰/۹۷ میلی‌متر متغیر بود.

عروجیان مشهدی و همکاران (۱۴۰۱)، در پژوهشی اقدام به برآورد نیاز آبی، ضرایب گیاهی و بهره‌وری آب انگور رقم سلطانی در منطقه ملکان در استان آذربایجان‌شرقی دو پژوهش مزرعه‌ای در قالب طرح کاملا تصادفی با سه تکرار در دو سیستم کشت داربستی و خزنده، تحت سیستم آبیاری قطره‌ای زیر سطحی در سال ۱۳۹۹ کردند. با استفاده از داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های دوره‌ای اجزای بیلان آب در مزرعه، نیاز آبی محاسبه گردید. میانگین نیاز آبی انگور در طول دوره رشد در کشت داربستی ۴۵۱ میلی‌متر و در کشت خزنده ۳۹۴ میلی‌متر بود. بهره‌وری آب به‌ازای هر مترمکعب تبخیر–تعرق و آب آبیاری به‌ترتیب در کشت داربستی ۵/۸۳ کیلوگرم و در کشت خزنده به‌ترتیب ۵/۸۳ و ۶/۱ کیلوگرم بود. حداکثر ضریب گیاهی انگور در کشت داربستی ۰/۹ و در کشت خزنده ۰/۸۲ بود که نشان داد میزان تبخیر–تعرق واقعی انگور در طول فصل رشد همواره کم‌تر از تبخیر–تعرق مرجع بوده است.

قوام سعیدی نوقابی و همکاران (۱۳۹۹)، در پژوهشی که با هدف تعیین نیاز آبی گیاه شاهدانه (*Cannabis sativa* L.) در سال ۱۳۹۶ در دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند صورت گرفت، بدین منظور از شش عدد لایسیمتر وزنی استفاده شد و نیاز آبی شاهدانه با معادله بیلان آب محاسبه گردید که سه لایسیمتر به محاسبه تبخیر–تعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن معمول برای فضای سبز با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر) اختصاص یافت و در سه لایسیمتر دیگر گیاه شاهدانه کشت شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده از معادله بیلان آب، میزان تبخیر–تعرق پتانسیل گیاه مرجع و تبخیر–تعرق پتانسیل شاهدانه به‌ترتیب برابر ۶/۸۹۹ و ۸۹/۶۸۸ میلی‌متر بود. طول مراحل مختلف رشد گیاه شامل مراحل ابتدایی، توسعه، میانی و انتهایی به‌ترتیب برابر ۳۰، ۵۵، ۷۵ و ۲۰ روز به‌دست آمد. هم‌چنین مقادیر ضریب گیاهی شاهدانه در مراحل چهارگانه رشد گیاه به‌ترتیب برابر ۰/۲۸، ۰/۶۸، ۱/۰۱ و ۰/۵۴ به‌دست آمد. این مقادیر برای برآورد نیاز آبی و مدیریت آبیاری گیاه شاهدانه توصیه می‌شوند.

۳. روش‌شناسی پژوهش

۳. ۱. منطقه مورد پژوهش

این طرح در محیط مزرعه تحقیقاتی گروه مهندسی آب پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی، با مختصات ۴۷ درجه و ۹ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه عرض شمالی با ارتفاع ۱۳۱۹/۸ متر از سطح دریاهای آزاد، در دو سال ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ انجام شد. شکل (۱) موقعیت انجام پژوهش در کشور، استان و دانشکده کشاورزی را نشان می‌دهد. در جدول‌های (۱) و (۲) نیز به‌ترتیب مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک و آب مورداستفاده در این پژوهش ارائه شده است.

Table 1. Physical and chemical properties of the soil in the study area

As (g/cm^3)	Soil texture	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Saturated moisture content (%)	PWP (%)	FC (%)	Hydraulic onductivity (mm/h)	Available phosphorus (mg/kg)	Extractable potassium (mg/kg)	Organic carbon (%)	Dissolved calcium and magnesium (meq/l)	Dissolved sodium (meq/l)	pH	SAR	EC (dS/m)
1.33	Silty Loam	13.6	63.8	22.6	49.70	14.40	34.10	11.20	32.0	292.0	1.05	3.20	0.46	7.71	0.36	0.284

Table 2. Chemical properties of the water in the study area

TDS (mg/lit)	pH	EC (dS/m)	S.A.R	Sodium (meq/l)	Calcium and magnesium (meq/l)	SO_4^{-2} (meq/l)	HCO_3^- (meq/l)	CO_3^{-2} (meq/l)
C3-S1	7.56	0.865	0.45	0.95	8.8	3.46	6.1	0.2

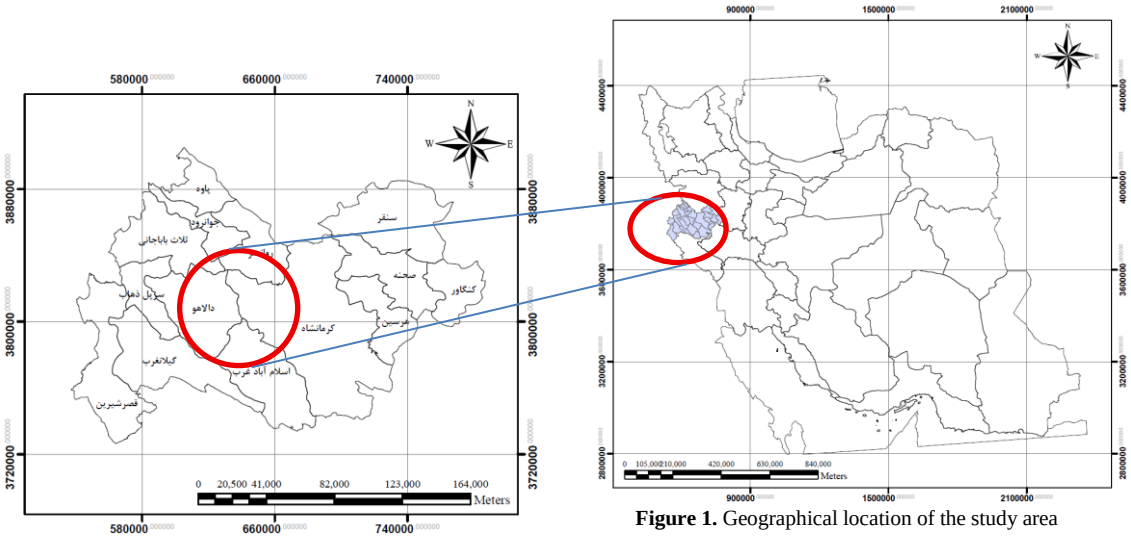


Figure 1. Geographical location of the study area

۳. ۲. جمع‌آوری آمار و اطلاعات هواشناسی محدوده موردمطالعه

آمار و اطلاعات هواشناسی به‌کار رفته در این طرح جهت ایستگاه لایسیمتری (مزرعه) از ایستگاه هواشناسی در فاصله ۵۰ متری از لایسیمترها اخذ گردید. آمار استخراج‌شده از این ایستگاه جهت برآورد مختصات آب‌وهوایی طرح و هم‌چنین برآورد میزان نیاز آبی گیاه (به‌صورت روزانه در طول دوره رشد *مورینگا اولیفرا*) و برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع در سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ در جدول (۳) به‌صورت خلاصه آورده شده است.

Table 3. Average meteorological parameters of the region during the research period

Year	Month	Max temperature (°C)	Min temperature (°C)	Wind speed (m/s)	Max RH (%)	Max RH (%)	P (mm)
1402	Farvardin	18.70	4.12	3.69	83.68	41.29	74.8
	Ordibehesht	24.49	7.30	4.09	64.0	27.1	40.4
	Khordad	32.07	11.76	3.63	59.52	20.19	2.3
	Tir	37.94	15.40	3.45	35.23	11.42	0.0
	Mordad	39.06	19.10	4.26	29.10	17.13	0.0
	Shahrivar	35.77	13.70	3.95	35.26	11.35	0.0
	Mehr	27.81	10.68	4.08	53.90	33.51	10.7
	Aban	20.61	5.53	3.07	81.10	39.10	24.3
	Azar	15.60	0.13	2.14	86.03	37.33	16.0
	Day	11.80	0.62	2.93	90.33	53.40	19.8
	Bahman	11.11	-0.46	3.61	92.90	53.87	51.4
	Esfand	13.27	0.93	4.45	86.41	43.00	70.7
1403	Farvardin	20.15	3.6	3.80	84.93	34.93	55.7
	Ordibehesht	23.44	8.60	3.97	81.24	38.83	91.7
	Khordad	34.12	13.12	4.65	53.77	16.84	4.6
	Tir	38.40	16.14	3.58	36.48	12.16	0.0
	Mordad	39.53	17.23	3.83	37.19	12.32	0.0
	Shahrivar	36.24	14.00	3.75	40.74	11.84	0.0

۳. ۳. مشخصات لایسیمتر زهکش‌دار طرح جهت برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع و *مورینگا اولیفرا*

برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع (چمن) و *مورینگا اولیفرا*، برای هر کدام از سه دستگاه لایسیمتر زهکش‌دار استوانه‌ای و برای محاسبه تبخیر و تعرق مورینگا (محاسبه K_c) و تبخیر از خاک هرکدام به‌ترتیب از سه دستگاه لایسیمتر

زهکش‌دار استوانه‌ای با قطر ۱/۵ متر و ارتفاع ۱/۲ متر و با سطح مقطع ۱/۷۷ مترمربع در مزرعه تحقیقاتی استفاده شد. لایسیمترها از جنس آهن گالوانیزه ساخته شده بودند. برای جلوگیری از نشت آب به خارج، بدنه بیرونی لایسیمترها با لایه‌ای از ایزوگام پوشیده شد و سپس برای جلوگیری از جذب نور و بالارفتن دمای داخلی، لایسیمتر با رنگ سفید پوشیده شدند. جهت نصب لایسیمترها گودال‌هایی بزرگ‌تر از ابعاد لایسیمترها حفر گردید و لایسیمترها در داخل آن‌ها قرار داده شدند. کف لایسیمترها به‌صورت شیب‌دار بوده و در انتها به‌وسیله لوله‌ای به خارج متصل گردیده تا زه‌آب‌ها به محل اندازه‌گیری هدایت شوند. در کف لایسیمترها به اندازه ۱۵ سانتی‌متر شن ریخته شد و سپس لایسیمتر با خاک محل حفر گودال با درنظرگرفتن ترتیب لایه‌های پروفیل خاک پر و در چندین نوبت فشرده گردید. جهت تحکیم خاک قبل از انجام عملیات کشت بر روی لایسیمتر، در چند نوبت به خاک درون لایسیمتر آب داده شد و پس از نشست کامل دوباره لایسیمتر تا سطح موردنظر با خاک پر گردید. در شکل (۲) نمایی از لایسیمتر زهکش‌دار طرح مشاهده می‌شود.



Figure 2. An overview of the project implementation stages in the years 1402 and 1403

۳. ۴. تبخیر و تعرق گیاه مرجع

برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق گیاه مرجع (چمن) و *مورینگا اولیفرا* توسط لایسیمتر زهکش‌دار برای دوره زمانی معین، از رابطه بیلان آبی خاک (رابطه ۱) و معادله پنمن مانتیث (رابطه ۴) جهت صحت سنجی تبخیر و تعرق گیاه مرجع استفاده شد.

$$ETC = P + I - D \pm \Delta S$$ رابطه ۱)

که در آن، ET_c: تبخیر و تعرق گیاه (میلی‌متر)، I: عمق آب آبیاری (میلی‌متر)، P: بارندگی (میلی‌متر)، ΔS: تغییرات رطوبت خاک (میلی‌متر) و D: عمق آب زهکش‌شده (میلی‌متر) اندازه‌گیری شود.

میزان عمق آب آبیاری در هر نوبت آبیاری از تشت تبخیر کلاس A دایره‌ای شکل مستقر در ایستگاه لایسیمتری استفاده شد. این روش توسط آلن و همکاران (۱۹۹۸) به‌منظور محاسبه میزان آب آبیاری انتخاب شد و این موضوع توسط معادله‌های (۲) و (۳) توضیح داده شده است. در این روش ابتدا تشت با آب پر شده، سطح آب تشت به‌طور منظم در بازه‌های زمانی معین اندازه‌گیری می‌شود و به این ترتیب ارتفاع آب تبخیرشده از تشت در دوره آبیاری موردنظر قرائت شده و با درنظرگرفتن ضریب تشت (Kp) میزان آب تبخیرشده از تشت را به آب تبخیرشده از لایسیمتر تعمیم داده و می‌توان ارتفاع آب آبیاری را محاسبه نمود به‌عبارت دیگر، در این روش داده‌ای تبخیر از تشت با استفاده از ضریبی تعدیل می‌شوند تا تبخیر و تعرق محصول (رابطه ۳) محاسبه شود. به‌منظور تعیین میزان آب زهکشی‌شده در این روش، حجم آب زهکشی‌شده از لایسیمترها قبل از شروع دور جدید آبیاری توسط ظروف مدرج اندازه‌گیری‌شده و با تقسیم آن بر سطح مقطع، ارتفاع آب زهکشی‌شده محاسبه شد. علاوه بر این برای محاسبه محتوای رطوبت خاک در عمق‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متری در لایسیمترها از سنسورهای TDR استفاده شد.

رابطه ۲) $ET_p=K_p\times E_{pan}$

که در این رابطه، Etp: تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌متر)، Kp: ضریب تشت که در محدوده ۰/۷۷—۰/۷۴ قرار دارد (Doorenboos & Pruitt, 1977) که در این پژوهش ۰/۷۵ در نظر گرفته شده است (با توجه به سرعت باد، درصد رطوبت و Frtch number) و ETpan تبخیر از تشت (میلی‌متر) است (ارتک، ۲۰۱۱):

رابطه ۳) $ET_c=ET_p\times K_c$

که در آن، ET_c تبخیر و تسعرق گیاه (میلی‌متر)، K_c ضریب گیاهی (بدون بُعد) است.

در این پژوهش به‌منظور برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع، علاوه بر اینکه از سه دستگاه لایسیمتر زهکش‌دار برای کشت چمن استفاده شد، بااستفاده از داده‌های هواشناسی روزانه شامل حداقل و حداکثر دما، سرعت باد، ساعات آفتابی و درصد رطوبت نسبی از معادله پنمن مانتیث میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شد.

رابطه ۴) $$ET_o=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\delta\frac{900}{T+273}U_2(e_s-e_a)}{\Delta+\delta(1+0.34U_2)}$$

که در آن، ET_o تبخیر و تعرق مرجع (میلی‌متر بر روز)، G شار گرمای خاک (مگاژول بر متر مربع بر روز)، T دمای هوا در ارتفاع دومتری (درجه سانتی‌گراد)، U_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)، e_s فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)، e_a فشار بخار واقعی (کیلوپاسکال)، (e_s-e_a) کمبود فشاربخار اشباع (کیلوپاسکال)، Δ شیب منحنی فشار بخار–دما (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، δ ضریب ثابت سایکومتری (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، R_n تابش خالص در سطح گیاه (مگاژول بر مترمربع بر روز) می‌باشند.

۳. ۵. محاسبه ضریب گیاهی منفرد (K_c) *مورینگا اولیفرا*

پس از اندازه‌گیری پارامترهای معادله بیلان آب در دوره آبیاری دو روزه، مقدار تبخیر و تعرق نیز در دور آبیاری محاسبه شد و سپس با تقسیم این مقدار بر تعداد روزهای دور آبیاری، تبخیر و تعرق روزانه گیاه محاسبه شد. سپس مقادیر تبخیر و تعرق *مورینگا اولیفرا* (ET_c) و تبخیر و تعرق مرجع (ET_o) و مقدار ضرایب گیاهی (K_c) در مراحل مختلف رشد به‌دست آمد. از تقسیم (ET_c) بر (ET_o) مقدار ضرایب منفرد *مورینگا اولیفرا* (K_c) از رابطه (۵) محاسبه شد:

رابطه ۵) $$K_c=\frac{ET_C}{ET_O}$$

که در آن، K_c: ضریب گیاهی منفرد، E_{tc}: تبخیر و تعرق روزانه *مورینگا اولیفرا* (میلی‌متر بر روز) و E_{to}: تبخیر و تعرق اندازه‌گیری‌شده گیاه مرجع (میلی‌متر بر روز) می‌باشد.

۳. ۶. ضریب گیاهی دو جزیی

ضریب گیاهی در روش دوجزیی، به دو ضریب جداگانه که یکی اثر تعرق گیاه را توصیف کرده و ضریب گیاهی پایه (K_{cb}) نامیده شده و دیگری اثر تبخیر از خاک (K_e) را بیان می‌کند، تفکیک شده و بنابراین، ضریب گیاهی دو جزیی به‌صورت رابطه (۶) بیان می‌شود (علیزاده، ۱۳۸۱).

رابطه ۶) $K_c=K_{cb}+K_e$

که در آن، K_{cb}: ضریب گیاهی پایه و K_e: ضریب مربوط به تبخیر از از سطح خاک می‌باشد.

۳. ۷. محاسبه ضریب گیاهی پایه (K_{cb}) *مورینگا اولیفرا*

براساس پژوهشی که آلن و پریرا انجام دادند (Allen,1998) برای K_{cb} روابط (۷)، (۸) و (۹) ارائه شد:

$$K_{cb(table)} = K_{c.min} + K_d\left(K_{cbfull} - K_{c.min}\right)$$ رابطه ۷)

$$K_d = \min\left(I, M_l f_{c,eff}, f_{c,eff}^{\left(\frac{1}{1+h}\right)}\right)$$ رابطه ۸)

$$K_{cb\,full} = Fr(\min(1 + 0.1h, 1.2) + +[0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)]\left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}$$ رابطه ۹)

که در این روابط، مقدار K_{cb}: ضریب گیاهی پایه و $K_{c,\ min}$: حداقل ضریب گیاهی برای خاک خشک بدون پوشش (۰/۲–۰/۱۵) می‌باشد که در این آزمایش ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است،، K_d: ضریب تراکم، $K_{cb,full}$: مقدار K_{cb} در دوره پیک رشد گیاه (هنگامی‌که پوشش گیاه کامل باشد)، $f_{c\,eff}$: کسر مؤثر پوشش زمین توسط گیاه یا سطح سایه انداز گیاه که بین (۱–۰/۰۱) است، h: متوسط ارتفاع گیاه در طول دوره رشد (m)، F_r: فاکتور اصلاحی برای کنترل روزنه گیاه که مقدار آن بین (۱–۰) متغیر است. مقدار استاندارد F_r برابر ۱ است، زیرا برای اغلب گیاهان یک‌ساله مقدار r برابر $100\ s\ m^{-1}$ در نظر گرفته می‌شود (Shukla, 2007; Allen, 1996). فرض است که تبخیر از خاک زیرین پوشش گیاهی در Kcb گنجانده شده و بنابراین به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری نمی‌شود. تبخیر محاسبه شده، مربوط به لایه خاک خیس در معرض هوا می‌باشد. تبخیر ار روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شود (علیزاده، ۱۳۸۱؛ وزیری، ۱۳۸۷):

$$f_c\left(\frac{K_{cb}-K_{c\,min}}{K_{c\,max}-K_{c\,min}}\right)^{1+0.5h}$$ رابطه ۱۰)

$$\frac{Ei}{few} = K_e \times ET_o$$ رابطه ۱۱)

در این روابط، عبارت ($\frac{Ei}{few}$)، شدت تبخیر در کسر خاک خیس‌شده و در معرض هوا را نشان می‌دهد و f_{ew}: کسر خاک خیس‌شده و در معرض هوا، K_e: ضریب مربوط به تبخیر از سطح خاک، E_i: تبخیر از خاک، ET_o: تبخیر و تعرق گیاه مرجع، F_c: کسر پوشش گیاهی مؤثر (۰/۹۹–۰)، K_{cb}: ضریب گیاهی پایه برای یک روز یا یک دوره مشخص، $K_{c\ min}$: حداقل ضریب گیاهی برای خاک خشک بدون پوشش (۰/۲–۰/۱۵)، $K_{c\ max}$: حداکثر ضریب گیاهی بلافاصله پس از خیس‌شدن سطح خاک، h: ارتفاع گیاه در دوره موردنظر، U_2: سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (ms^{-1})، RH_{min}: میانگین روزانه حداقل رطوبت نسبی (درصد). در این پژوهش میزان تبخیر از سطح خاک بدون پوشش به‌طور مستقیم از لایسیمتر اندازه‌گیری‌شده و با محاسبه کسر خاک خیس‌شده و در معرض هوا از روابط گفته‌شده، جز تبخیر در معادله ضریب گیاهی دو جزیی برآورد گردید.

۳. ۸. مراحل عملیات زراعی شامل کاشت و داشت و برداشت

لایسیمترهای موردنظر در اول فروردین‌ماه ۱۴۰۲ جهت کشت محصول آماده شدند. پس از آماده‌سازی لایسیمترها، خاک هر لایسیمتر با کود حیوانی پوسیده به میزان پنج تن در هکتار، ۱۵۰کیلوگرم در هکتار کود اوره با خلوص ۴۷ درصد (N)، ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل با خلوص ۴۵ درصد (P) و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم با خلوص ۵۰ (K) مخلوط شد و لایسیمترها به‌صورت دستی لایه‌لایه و هر لایه به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر پر و متراکم شدند. بذرهای *مورینگا اولیفرا* تهیه‌شده از شرکت سبزرویان به‌شماره ثبت ۱۹۹۷ با نام تجاری مزارع مورینگا، برای هر لایسیمتر دو عدد که پس از سبزشدن، نهال مناسب و قوی‌تر نگه داشته و نهال دیگر حذف شد و به‌مدت ۷۲ ساعت در آب معمولی قرار گرفتند و سپس در تاریخ ۱۴۰۲/۱/۷ داخل لایسیمترهای گلخانه و در تاریخ‌های ۱۴۰۲/۲/۱ و ۱۴۰۳/۲/۱ در دو سال متوالی در مزرعه تحقیقاتی کشت شدند. در محیط‌های گلخانه و مزرعه تحقیقاتی در تاریخ‌های ۱۴۰۲/۳/۲۶ و ۱۴۰۳/۴/۸ دوباره کودپاشی با ۷۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسم با خلوص ۵۰ درصد و اوره با خلوص ۴۷ درصد در اختیار گیاه قرار داده شد.



Figure 3. Images which shown different plant growth stages of *Moringa oleifera*

۴. یافته‌های پژوهش و بحث

در شکل (۴) روند تغییرات رطوبت نسبی و دما برای رشد در سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ ارائه شده است که نشان می‌دهد در طی دوره پژوهش هم‌زمان با تغییرات دمای هوا، رطوبت نسبی نیز در حال تغییر و نوسان بوده است.

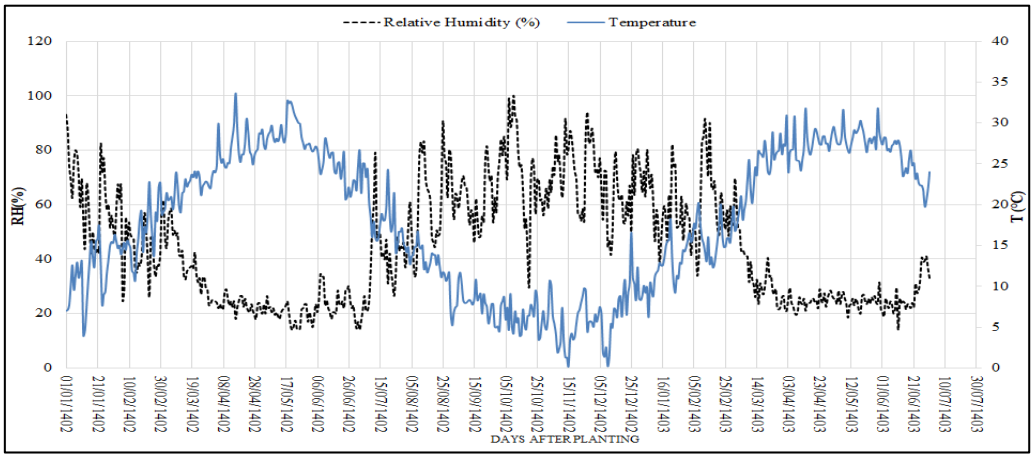


Figure 4. Variations in relative humidity and temperature during the study period

جدول (۵) میزان حداقل و حداکثر نیاز آبی *مورینگا اولیفرا* (ET_c) و تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_o) ارائه شده است. همانطورکه مشاهده می‌شود در دو سال آزمایش در محیط مزرعه تحقیقاتی، حداکثر و حداقل نیاز آبی *مورینگا اولیفرا* به‌ترتیب برابر ۱۱/۱۱ و ۱/۴۵ میلی‌متر بر روز و برای گیاه مرجع در محیط مزرعه تحقیقاتی برابر ۷/۲۰ و ۱/۰۳ میلی‌متر بر روز می‌باشد. شکل (۵) روند تغییرات روزانه تبخیر و تعرق مرجع (ET_o) را در طول دوره مطالعه نشان می‌دهد. این نمودار بیانگر ماهیت نوسانی تقاضای اتمسفر برای تبخیر است که به‌طور مستقیم تحت تأثیر پارامترهای هواشناسی (مانند تابش خورشیدی، دما، سرعت باد و رطوبت نسبی) در منطقه نیمه‌خشک کرمانشاه قرار دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر ET_o در طول ماه‌های گرم سال (بهار و تابستان) به حداکثر مقدار خود (بیش از ۷ میلی‌متر در روز) رسیده است که ناشی از شدت تابش خورشیدی و افزایش دمای محیط است. در مقابل، در طول فصول پاییز و زمستان، مقادیر ET_o به‌دلیل کاهش طول روز، کاهش دمای هوا و محدودیت انرژی تابشی، به حداقل مقدار خود (حدود ۱ میلی‌متر در روز) کاهش یافته است. این نوسانات شدید فصلی در ET_o نشان‌دهنده اهمیت مدیریت هوشمند آبیاری در مناطق نیمه‌خشک

است، به‌طوری‌که نیاز آبی گیاه مورینگا در طول فصل رشد به‌شدت به تغییرات پویای شرایط اقلیمی وابسته بوده و برنامه‌ریزی آبیاری باید براساس این تغییرات فصلی تنظیم گردد تا از تنش آبی در فصول پیک تقاضا جلوگیری شود.

Table 5. Minimum and maximum daily evapotranspiration rates for the reference plant (ETo) and *Moringa oleifera* (ETc) during the growth period (mm/day)

Year	Etc (mm/day)		Eto (mm/day)	
	MAX	MIN	MAX	MIN
1402	10.97	1.45	6.23	2.41
1403	11.26	1.46	6.82	1.76
Mean	11.11	1.45	6.53	2.08

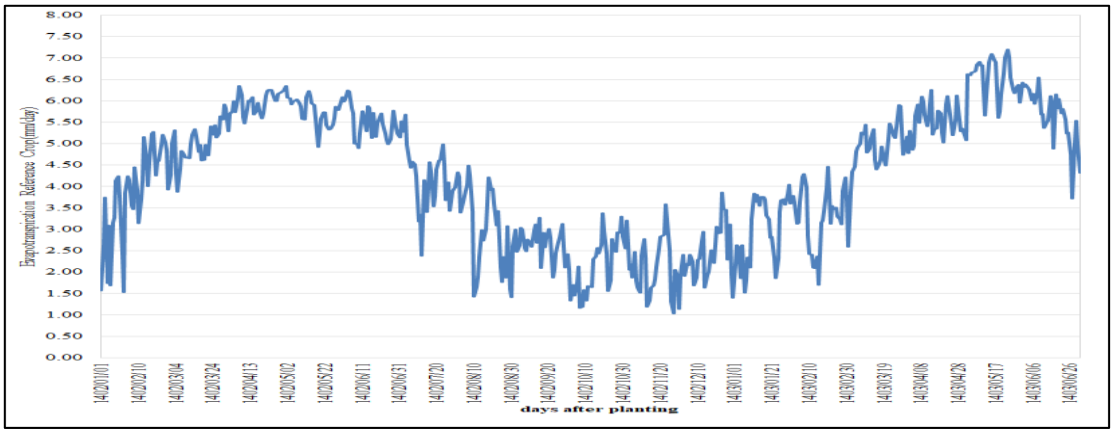


Figure 5. Changes in reference grass evapotranspiration over the growth period of *Moringa oleifera* in the research field environment, 1402 and 1403

شکل (۶) روند تغییرات تبخیر–تعرق واقعی (ET_c) گیاه مورینگا را در سه لایسیمتر زهکش‌دار در طول دو دوره رشد نشان می‌دهد. همان‌طورکه در نمودار مشهود است، همگرایی بسیار بالای داده‌های حاصل از سه لایسیمتر نشان‌دهنده دقت بالای اندازه‌گیری و پایداری شرایط آزمایشگاهی و محیطی است. روند تغییرات نشان می‌دهد که میزان ET_c هم‌زمان با رشد گیاه و توسعه شاخ و برگ، از مقادیر کم در ابتدای فصل (حدود ۱/۵ میلی‌متر در روز) به مقادیر حداکثری (بیش از ۱۱ میلی‌متر در روز) در اواسط فصل رشد افزایش یافته است. این روند صعودی به‌طور مستقیم با افزایش سطح تبخیرکننده گیاه و افزایش شاخص سطح برگ (LAI) مرتبط است که تقاضای آبی گیاه را برای فرایندهای فیزیولوژیکی به‌شدت افزایش می‌دهد. کاهش تدریجی مقادیر ET_c در پایان فصل نیز با تغییرات فنولوژیکی گیاه و کاهش فعالیت‌های متابولیک و فیزیولوژیکی در پاسخ به تغییرات اقلیمی فصل پاییز همخوانی دارد. این داده‌ها به‌عنوان ورودی‌های پایه برای محاسبه ضرایب گیاهی، اعتبار علمی لازم برای کاربردی‌سازی نتایج در برنامه‌ریزی آبیاری مناطق نیمه‌خشک را فراهم می‌کنند.

۴. ۱. محاسبه ضریب گیاهی (Kc)

دوره رشد *مورینگا اولیفرا* با نوجه به منابع علمی (نشریه فائو) و اینکه این گیاه درختچه است به سه مرحله (ابتدایی، توسعه و میانی) تقسیم شد. مرحله اول از تاریخ جوانه‌زدن بذر تا ۱۰ درصد رشد گیاه، مرحله توسعه از ۱۰ درصد رشد تا شروع گل‌دهی، مرحله میانی از آغاز گل‌دهی تا رسیدن محصول ادامه دارد. در جدول (۶) تاریخ و طول دوره رشد در طی دو سال آزمایش و متوسط دوره رشد در دو سال ارائه شده است. همانطورکه مشاهده می‌شود طول دوره رشد در دو سال آزمایش ۴۰۰ روز بود که ۲۱۵ روز مربوط به سال ۱۴۰۲ و ۱۸۵ روز مربوط به سال ۱۴۰۳ بوده است.

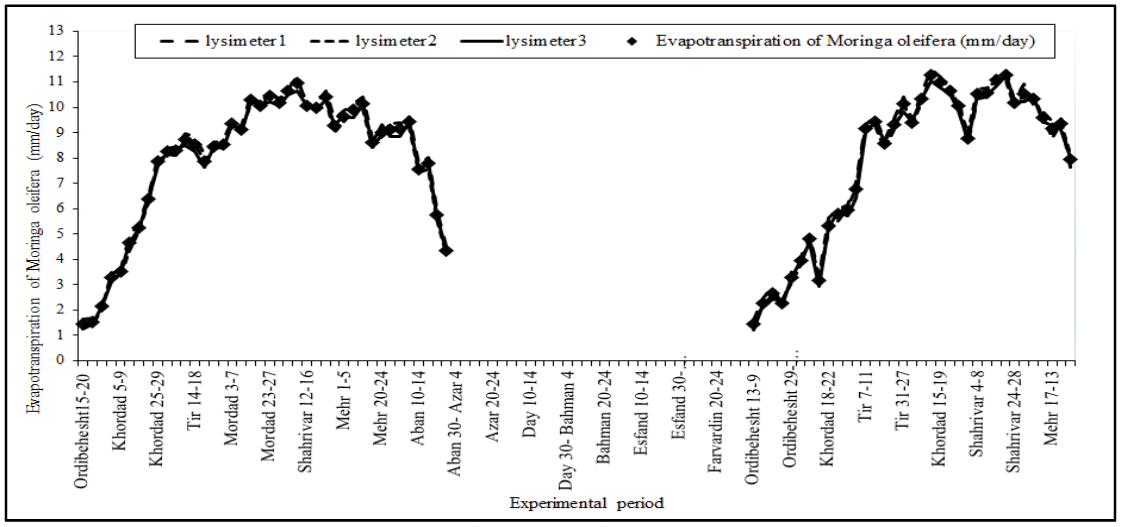


Figure 6. Changes in the daily evapotranspiration rate of *Moringa oleifera* (ETc) during the growth period in lysimeters 1, 2, and 3 under cultivation

Table 6. Length of the different growth stages of *Moringa oleifera* in the experimental years

Growth stages	1402	Duration (days)	Growth stages	1403	Duration (days)
Initial	15 Ordibehesht-9 Khordad	30	Initial	15 Ordibehesht-18 Khordad	34
Development	9 Khordad – 2 Mordad	50	Development	18 Khordad – 5 Mordad	49
Middle	2 Mordad – 29 Aban	118	Middle	5 Mordad – 30 Mehr	86

شکل (۷) تغییرات زمانی ضریب گیاهی (K_c) درخت *مورینگا اولیفرا* را در طول مراحل مختلف رشد نشان می‌دهد. این نمودار به‌خوبی فرایندهای فیزیولوژیکی گیاه را در واکنش به مراحل مختلف نموی منعکس می‌کند. در مرحله ابتدایی (Initial Stage)، مقادیر ضریب گیاهی پایین (حدود ۰/۵ تا ۰/۷) است که نشان‌دهنده غلبه تبخیر از سطح خاک نسبت به تعرق گیاه در این مرحله می‌باشد. با ورود به مرحله توسعه (Development Stage)، نمودار با شیب تندی صعود می‌کند که هم‌زمان با گسترش شاخص سطح برگ (LAI) و تبدیل‌شدن فرایند تعرق به عامل غالب در تبخیر و تعرق واقعی (ET_c) است. در مرحله میانی (Middle Stage)، مقادیر K_c به ثبات رسیده و به حداکثر خود می‌رسند که بیانگر توسعه کامل سایه‌انداز (کانوپی) و رسیدن گیاه به اوج نیاز آبی است.

همگرایی بالای نتایج حاصل از سه لایسیمتر و خط میانگین، بیانگر دقت و پایداری بالای داده‌های استخراج‌شده در این پژوهش است. مقادیر بالای K_c (بیش از ۱/۵ در مرحله میانی) نشان‌دهنده نیاز آبی قابل‌توجه گونه مورینگا در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک است. این یافته حاکی از آن است که ضرایب پیش‌فرض پیشنهادی در دستورالعمل‌های استاندارد (مانند FAO-56)، برای گونه‌هایی با قدرت تبخیر و تعرق بالا مانند مورینگا در اقلیم‌های گرم و خشک، نیاز به واسنجی محلی داشته و استفاده از ضرایب اختصاصی به‌دست‌آمده در این مطالعه، برای مدیریت بهینه منابع آب در این مناطق ضروری است.

نتایج تبخیر و تعرق مورینگا اولیفرا (ET_c) به‌دست‌آمده از لایسیمترها طی سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳و مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_o) و ضرایب گیاهی منفرد (K_c) محاسبه‌شده در دوره‌های ۲۰ طی دوره رشد *مورینگا اولیفرا* در محیط مزرعه تحقیقاتی در جدول (۶) ارائه شده است. مقدار ET_c در سال‌های انجام آزمایش در محیط مزرعه تحقیقاتی در مرحله ابتدایی پایین است و سپس در طی مرحله توسعه افزایش یافته است تا اینکه در مرحله میانی به حداکثر خود معادل ۶/۰۴ میلی‌متر بر روز در سال ۱۴۰۲ و ۶/۶۵ میلی‌متر بر روز در سال ۱۴۰۳ رسیده است.

در نهایت میانگین مقادیر K_c در محیط مزرعه تحقیقاتی و در هر سال انجام آزمایش از سه لایسیمتر و منحنی

میانگین‌گیری‌شده آن برحسب روزهای رشد نشان داده شده است. در محیط مزرعه تحقیقاتی مقادیر K_c در سال ۱۴۰۲ در مراحل رشد ابتدایی، توسعه و میانی به‌ترتیب برابر ۰/۷۱۰، ۱/۵۹۰و ۱/۷۰۰و در سال ۱۴۰۳ در مراحل رشد به‌ترتیب برابر ۰/۸۵۰، ۱/۷۶۰و ۱/۷۱۵ به‌دست آمد. نتایج مربوط به ضرایب گیاهی منفرد سه مرحله رشد در دو سال آزمایش در جدول (۷) ارائه شده است.

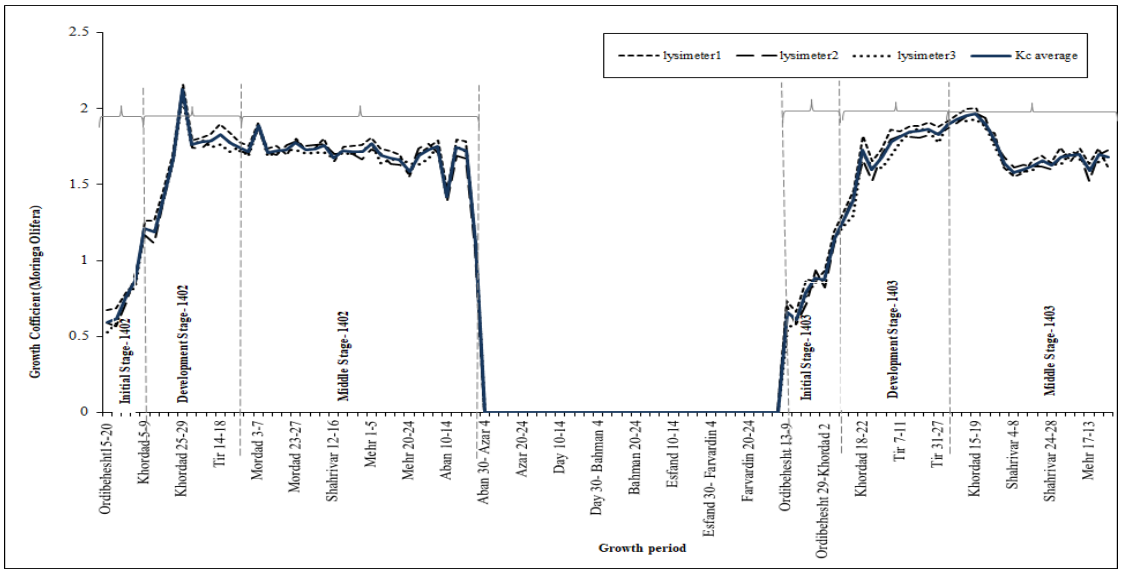


Figure 7. Daily variations in the individual crop coefficients of *Moringa oleifera* in three lysimeters in the research field environment

Table 7. Mean individual crop coefficients of *Moringa oleifera* during the three growth stages in 1402 and 1403, and their average over the two years

Year	Initial Stage	Development Stage	Middle Stage
1402	0.710	1.590	1.700
1403	0.850	1.760	1.710
Mean	0.750	1.710	1.715

۴. ۲. محاسبه ضریب گیاهی پایه (Kcb)

مقادیر ضریب گیاهی پایه (K_{cb}) از معادلات ارائه‌شده در فصل دوم برای هر روز در طی دو سال پژوهش در محیط مزرعه تحقیقاتی برای گیاه *مورینگا اولیفرا* محاسبه شد. مقادیر ضریب گیاهی پایه (K_{cb}) در مراحل رشد *مورینگا اولیفرا* در دو سال پژوهش در محیط مزرعه تحقیقاتی و متوسط آن در جدول (۸) ارائه شده است. شکل (۸) تغییرات ضریب گیاهی K_c و K_{cb} را برای *مورینگا اولیفرا* نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر جدول و شکل ارائه‌شده، مشاهده می‌شود که مقدار ضریب گیاهی پایه به‌تدریج اضافه شده و در مرحله میانی به حداکثر مقدار می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد. طبق نتایج به‌دست‌آمده مقدار ضریب گیاهی پایه (K_{cb}) در تمامی مراحل رشد از ضریب گیاهی منفرد (K_c) کم‌تر بوده است.

Table 8. Mean crop coefficients of *Moringa oleifera* during the three growth stages over the years 1402 and 1403 in the research field environment

Year	Initial Stage	Development Stage	Middle Stage
1402	0.500	0.900	0.780
1403	0.470	0.940	0.830
Average	0.485	0.92	0.805

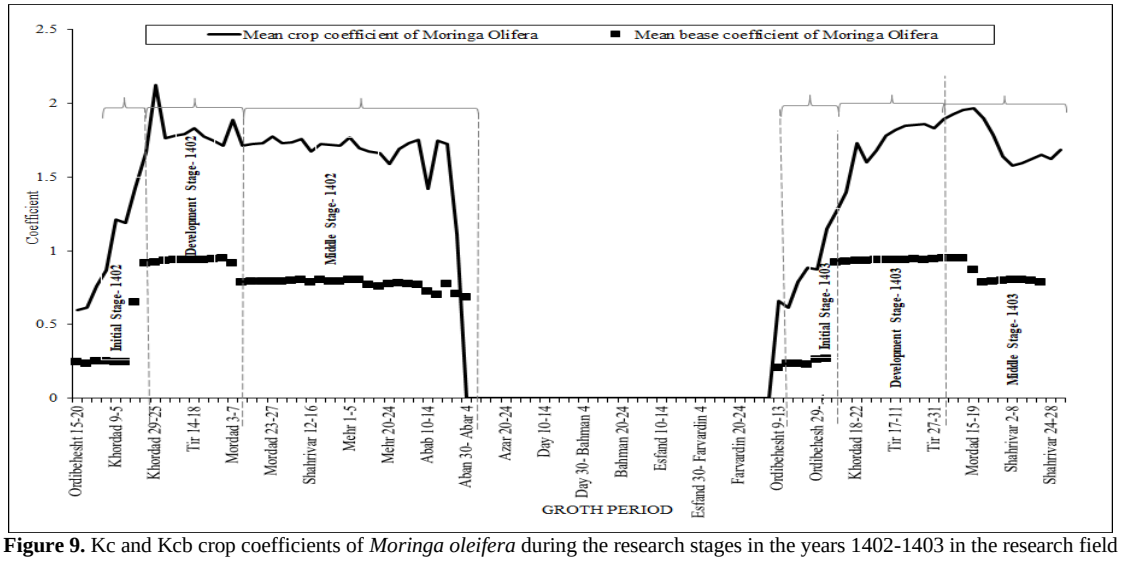


Figure 9. Kc and Kcb crop coefficients of *Moringa oleifera* during the research stages in the years 1402-1403 in the research field environment

در شکل (۹) تفاوت قابل‌توجه میان ضرایب گیاهی کل (K_c) و ضرایب پایه (K_{cb}) در مراحل ابتدایی و توسعه، نشان‌دهنده سهم بالای تبخیر مستقیم از سطح خاک است. با این حال، با حرکت به سمت مرحله میانی (Middle Stage)، همگرایی این دو ضریب مشهود است که نشان‌دهنده کاهش سهم تبخیر از خاک و غلبه کامل تعرق گیاهی به‌دلیل توسعه سایه‌انداز است. این رفتار، دقت مدل‌سازی در تفکیک اجزای تبخیر و تعرق را تأیید کرده و لزوم تنظیم دقیق دوره‌های آبیاری در فازهای مختلف رشد براساس K_{cb} را برای صرفه‌جویی در مصرف آب نشان می‌دهد.

۴. ۳. مقایسه تبخیر و تعرق اندازه‌گیری‌شده *مورینگا اولیفرا* با مقدار محاسبه‌شده

بین ETc به‌دست‌آمده از طریق داده‌های برداشت‌شده از لایسیمترها و ETc برآوردی با اعمال ضریب گیاهی منفرد در تبخیر و تعرق گیاه مرجع به‌دست‌آمده از ایستگاه لایسیمتری، شاخص های آماری ضریب همبستگی (r)، ریشه میانگین مربعات‌خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAD) محاسبه شد. نتایج در جدول (۹) و شکل (۱۰) ارائه شده است.

Table 9. Statistical indices comparing lysimeter-measured crop evapotranspiration (ETc) with ETc recalculated using the crop coefficient (Kc) and reference evapotranspiration (ETo)

Growing medium	r	RMSE	MAD
laysimer	0.97	0.60	0.61

همانطورکه مشاهده می‌شود تبخیر و تعرق به‌دست‌آمده برای *مورینگا اولیفرا* با استفاده از ضرب ضریب گیاهی منفرد در تبخیر و تعرق گیاه مرجع نسبت به محاسبه تبخیر و تعرق مورینگا اولیفرا با استفاده از لایسیمتر، ضریب همبستگی (r) بیش‌تر و مجذور میانگین مربعات خطای (RMSE) و MAD کم‌تری دارد که می‌توان نتیجه گرفت روش ضرب ضریب گیاهی در تبخیر و تعرق گیاه مرجع مقدار ETc را نسبت به مقدار برآوردی از طریق لایسیمتر بیش‌تر برآورد کرده است. با توجه به نتایج آماری به‌دست‌آمده و بالابودن ضریب همبستگی (۰/۹۴) ETc بر آوردی با اعمال ضریب گیاهی، اختلاف کم‌تری با مقادیر تبخیر و تعرق لایسیمتری داشت و به‌علت سادگی کار و حجم محاسباتی کم‌تر نسبت به برداشت‌های لایسیمتری استفاده از ضریب گیاهی کارایی بیش‌تری دارد.

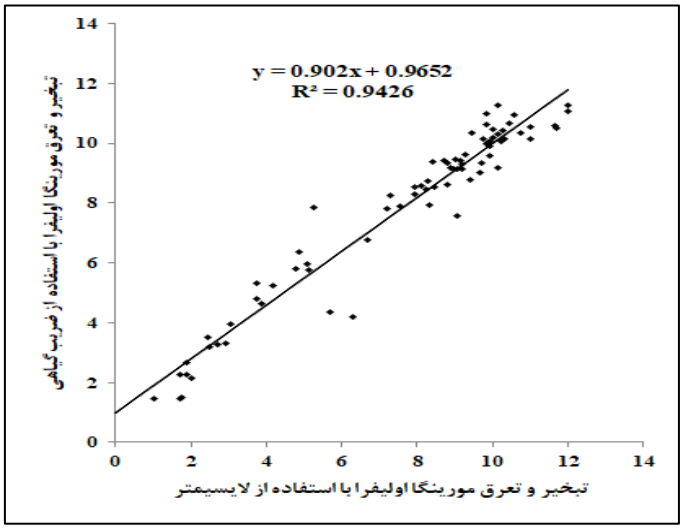


Figure 10. Correlation coefficient for the comparison between lysimeter-estimated crop evapotranspiration (ETc) and ETc calculated using the crop coefficient (Kc) and reference evapotranspiration (ETo) in the field lysimeters of the experimental farm

۵. نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که در دوره کشت *مورینگا اولیفرا*، تبخیر–تعرق واقعی این گیاه در دو سال مطالعه در بازه‌ای نسبتاً گسترده از ۱/۴۵ تا ۱۱/۱۱ میلی‌متر در روز متغیر بوده است. در همین دوره، تبخیر–تعرق گیاه مرجع بین ۰/۸۲ تا ۶/۵۳ میلی‌متر در روز نوسان داشته است. این تفاوت بیانگر آن است که *مورینگا اولیفرا* در برخی مراحل رشد، به‌ویژه در دوره‌های توسعه و میانی، تبخیر–تعرق بیش‌تری نسبت به گیاه مرجع دارد که می‌توان آن را به افزایش سطح برگ، تراکم تاج‌پوشش و تشدید تعرق نسبت داد. براساس میانگین دو سال، مقادیر ضریب گیاهی منفرد (K_c) در مراحل ابتدایی، توسعه و میانی به‌ترتیب ۰/۷۵، ۱/۷۱ و ۱/۷۱۵ برآورد شد که روند افزایشی آن نشان‌دهنده افزایش نیاز آبی گیاه هم‌زمان با رشد است. در جدول (۱۰) نتایج به‌دست آمده برای ضرایب گیاهی به‌دست‌آمده در هر ماه در دوسال پژوهش ارائه شده است.

Table 10. Crop coefficient (Kc) values obtained during the two-year study for each month

Growth Month	Kc - 1402	Kc - 1403
Ordibehesht	0.658	0.738
Khordad	1.523	1.385
Tir	1.785	1.833
Mordad	1.766	1.905
Shahrivar	1.722	1.620
Mehr	1.680	1.674
Aban	1.580	*

هم‌چنین ضریب گیاهی پایه (K_{cb}) در مراحل ابتدایی، توسعه و میانی به‌ترتیب ۰/۴۸۵، ۰/۹۲ و ۰/۸۰۵ به‌دست آمد. مقدار نسبتاً بالای K_{cb} در مرحله توسعه بیانگر سهم برجسته گیاه در تبخیر–تعرق و ضرورت مدیریت دقیق آبیاری در دوره حساس رشد است. بررسی داده‌های دو سال ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ نیز نشان داد که با وجود تغییرات دما و رطوبت نسبی، ضرایب گیاهی در محدوده‌ای نسبتاً پایدار باقی مانده‌اند. در مجموع، نتایج بیانگر آن است که *مورینگا اولیفرا* با اتکا به ضرایب گیاهی استخراج‌شده، قابلیت برنامه‌ریزی آبیاری قابل‌اتکایی داشته و می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای مدیریت مصرف آب در مناطق نیمه‌خشک باشد. لازم به ذکر است که به‌دلیل عدم وجود مطالعاتی شبیه به این مطالعه در اقلیم کرمانشاه و سایر نقاط کشور و جهان امکان مقایسه با مطالعات مشابه در پژوهش حاضر وجود ندارد. هرچند که تنها مرجع

قابل‌مقایسه پژوهش Santos *et al.* (2017) در برزیل است که محدوده به‌دست‌آمده برای Kc مورینگا را ۰/۷۳ الی ۱/۷۳ عنوان نموده است.

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

Alizadeh, A. (2002). Design of irrigation systems. *Imam Reza University Press*. (In Persian).

Allen, R. G. (1996). Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 122*(2), 97–106.

Asli Cherandabi, M. R., Mahjoobi, A., & Abdolabadi, H. (2025). Estimation of evapotranspiration and crop coefficient of bell pepper by comparing weighing method and empirical models (Case study: Hesar Koli greenhouse, Varamin). *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering, 15*(3), 151–167. (In Persian).

Bayisa, G. D., Ayana, M., Mekonnen, B., Hordofa, T., & Dinka, M. O. (2024). Drainage lysimeter based measurement of water requirement and crop coefficient of bread wheat under semi-arid climate of Melkassa, Ethiopia. *Heliyon, 10*(17), e36969.

Beyrami, H., Rahimian, M. H., Salehi, M., Yazdani Biouki, R., Pirasteh Anousheh, H., & Shiran Tafti, M. (2023). Estimation of crop coefficient and water requirement of quinoa (Titicaca cultivar) under lysimetric conditions. *Proceedings of the National Conference on Civil Engineering*. (In Persian).

Ghamarnia, H., Jalili, Z., & Rezvani, S. V. (2021). Investigation of different deficit irrigation levels on yield and water use efficiency of stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) under greenhouse and field conditions. *Iranian Journal of Soil and Water Research, 51*(12), 3115–3125. (In Persian).

Ghamarnia, H., Mousabeygi, F., & Rezvani, S. V. (2021). Water requirement, crop coefficients of peppermint (*Mentha piperita* L.) and realizing of SIMDualKc model. *Agrotechniques in Industrial Crops, 1*(3), 110–121.

Ghavam Saeidi Nougabi, S., Shahidi, A., & Hamami, H. (2020). Estimation of water requirement and crop coefficient of hemp at different growth stages in Birjand Plain. *Water and Soil in Agriculture, 34*(4), 563–573. (In Persian).

Gonçalves, I. Z., Mendonça, F. C., Sanches, A. C., & Marin, F. R. (2024). Optimizing evapotranspiration and crop irrigation requirements of tropical forages cropping systems in Southern Brazil. *International Journal of Biometeorology, 68*(1), 57–67.

Jafari, M., Kamali, H., Keshavarz, A., & Momeni, A. (2021). Estimation of evapotranspiration and crop coefficient of drip-irrigated orange trees under a semi-arid climate. *Agricultural Water Management, 248*, 106766.

Marzban, H., Sadraei Javaheri, A., Zibaei, M., Nazem Alsadat, S. M. J., & Karimi, L. (2019). Investigation of water resources and consumption status in Iran and strategies for improving the situation. *Water and Wastewater Journal, 30*(4), 16–32. (In Persian).

Morshedi, A., Haghighati, B., Sayadi Shahreki, A., & Mohammadi Kia, R. (2024). Estimation of crop coefficient and evapotranspiration of quinoa (Case study: Chehartakhteh Research Station, Chaharmahal and Bakhtiari Province). *The 5th National Conference on Farm Water Management (Smart Irrigation)*, Karaj, Iran. (In Persian).

Oroojian Mashhadi, A., Mirlatifi, S. M., & Dehghani Sanij, H. (2022). Estimation of water requirement, crop coefficient, and water productivity of grapevine under two trellis and creeping cultivation systems in Malekan region. *Iranian Journal of Soil and Water Research, 53*(2), 355–366. (In Persian).

Ramos, T. B., Darouich, H., & Pereira, L. S. (2024). Mulching effects on soil evaporation, crop evapotranspiration and crop coefficients: A review aimed at improved irrigation management. *Irrigation Science, 42*, 525–539.

Reta, B. G. (2025). Evaluating the accuracy of machine learning models in predicting soil moisture, actual evapotranspiration, and biomass: Developing normalized difference vegetation index-adjusted crop coefficient regression model for watermelon. *Journal of Agriculture and Food Research, 24*, 102334.

Santos, C. S. d., Montenegro, A. A. d. A., dos Santos, M. A., & Pedrosa, E. M. (2017). Evapotranspiration and crop coefficients of *Moringa oleifera* under semi-arid conditions in Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *21*, 840–845.

Shukla, S., Jaber, F., Srivastava, S., & Knowles, J. (2007). Water use and crop coefficient for watermelon in Southwest Florida. *Agricultural and Biological Engineering Department*.

Tian, F., Yang, P., Hu, H., & Dai, C. (2016). Partitioning of cotton field evapotranspiration under mulched drip irrigation based on a dual crop coefficient model. *Water*, *8*(3), 72.

Vaziri, J., Salamat, A., Entesari, M., Maschi, M., Heydari, N., & Dehghani Sanij, H. (2008). *Evapotranspiration of crops (Guidelines for calculating crop water requirements)*. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage. (In Persian).

Zandparsa, S., Sepaskhah, A., & Didari, S. (2023). Gradual reduction of agricultural water consumption as an effective step toward adaptation to water scarcity in Iran. *Strategic Research Journal in Agricultural and Natural Resources Sciences*, *9*(1), 19–34. (In Persian).

[Author information missing]. Coefficient of bell pepper by comparing weighing method and empirical models (Case study: Hesar Koli greenhouse, Varamin). *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, *15*(3), 151–167. (In Persian).