

## Research Paper

## Estimation of Evapotranspiration and Crop Coefficient for Bell Pepper using the Weighing Method and Empirical Models (Case Study: Hesargoli Greenhouse, Varamin)

MohammadReza AsliCharandabi<sup>1</sup>, Emad Mahjoobi<sup>2\*</sup>, Hamid Abdolabadi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> PhD Student, Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran



10.22125/iwe.2025.496217.1848

Received:

July 26, 2024

Accepted:

February 12, 2025

Available online:

April 25, 2025

### Keywords:

**Crop coefficient, Evapotranspiration, Water balance, FAO-Penman-Monteith, Greenhouse-grown bell peppers.**

### Abstract

This study examines the evapotranspiration and crop coefficient of greenhouse-grown bell peppers located in Varamin, Iran, using the weighing lysimeter based on water balance. Additionally, the results were compared with the FAO-Penman-Monteith and Droogers-Allen methods. The crop coefficients were also estimated for different growth stages of bell peppers, and the findings were evaluated against previous studies. Results indicated that the total evapotranspiration during the spring cultivation season for bell pepper and the reference crop was 3.53 mm/day and 5.58 mm/day, respectively. The annual evapotranspiration rate of bell peppers under greenhouse conditions was also estimated to be 761 mm, equivalent to 7612 m<sup>3</sup>/ha. The reference evapotranspiration calculated using the FAO-Penman-Monteith and Droogers-Allen methods inside the greenhouse was 5.15 mm/day and 4.41 mm/day, respectively, for the entire growth period. Furthermore, the average crop coefficients for the initial, middle, and final growth stages were determined as 0.13, 0.87, and 0.6, respectively. The highest and lowest crop coefficients were observed in the no-fog and no-cover conditions, and in the fog and cover conditions, respectively. Meanwhile, the average annual yield was 166 tons/hectare in this greenhouse. Given the scarcity of prior studies on greenhouse-grown bell peppers under hydroponic conditions, the findings of this research provide a foundation for water conservation, irrigation optimization, and effective irrigation planning.

## 1. Introduction

The agricultural sector, as the largest consumer of water in Iran, faces significant challenges due to increasing cultivated areas, reduced rainfall, and droughts. Greenhouse cultivation offers a high-efficiency solution by optimizing the use of water and soil resources in controlled environments. These

\* **Corresponding Author:** Emad Mahjoobi

**Address:** Assistant Professor, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

**Email:** emahjoobi@shahroodut.ac.ir  
**Tel:** +989129348103

systems enable water savings, reduced irrigation losses, and enhanced crop quality. Monitoring crop water requirements in greenhouses is essential, as it depends on factors such as temperature, humidity, and plant growth stages. While various models estimate evapotranspiration, precise regional calculations remain crucial. This study focuses on accurately estimating the water needs of greenhouse-grown bell peppers to address gaps in existing research and improve irrigation management.

## 2. Materials and Methods

Hesargoli village, located in Javadabad district, Varamin County, 35 km southeast of Tehran, has an altitude of 928 meters above sea level and features a warm and dry climate. The fertile lands host numerous greenhouses, including a target greenhouse for calculating crop coefficients and evapotranspiration of bell peppers. The greenhouse spans 1 hectare with two separate halls, each containing 72 hydroponic beds covering 1,386 m<sup>2</sup>, and uses a drip irrigation system. The hydroponic medium consists of 3 cm of mineral pumice at the base, followed by a mix of 50% cocopeat, 20% fine perlite, 20% medium perlite, and 10% coarse perlite. In the year ending summer 2022, the greenhouse produced 23 tons of bell peppers.

An experimental setup with 13 pots, including 12 for bell peppers and one for grass as a reference plant, was developed. The bell pepper pots were tested under four conditions: with and without misting and with and without surface coverings. Daily irrigation was adjusted based on soil field capacity, and evapotranspiration was measured using a continuous weighing method. The experiment spanned 130 days from March 14, 2023, to July 20, 2023. The water balance equation was used to calculate evapotranspiration, considering cumulative irrigation inputs and outputs alongside changes in pot weight.

Additionally, reference evapotranspiration was estimated using FAO Penman-Monteith and Droogers-Allen methods. Parameters such as temperature, wind speed, solar radiation, and geographic factors were used to calculate key variables, including net radiation, vapor pressure, and slope of the vapor pressure curve.

## 3. Results

In the spring cultivation, daily evapotranspiration (ET) was measured using the weighing method over 130 days, from transplanting seedlings into the greenhouse on 23/12/1401 to 29/04/1402. The total ET for each treatment (with/without misting and with/without covering) was 268.08, 246.7, 360.83, and 323.56 mm, respectively. Average daily ET was estimated at 2.9, 3.15, 4.25, and 3.81 mm/day. For the reference crop (sports grass), ET was measured under no-misting and no-covering conditions, yielding 5.58 mm/day. Using the FAO-Penman-Monteith method, reference ET inside and outside the greenhouse was 5.18 and 5.05 mm/day, respectively, while the Droogers-Allen method estimated 4.41 and 3.61 mm/day.

Results showed that misting reduced ET by preventing water stress, while covering reduced soil evaporation. The seasonal crop coefficient (K<sub>c</sub>) for bell peppers, calculated based on FAO-56 guidelines, was 0.13, 0.87, and 0.6 for initial, mid, and late growth stages, respectively. Lower K<sub>c</sub> values compared to open-field conditions are attributed to reduced ET in greenhouses. Yield performance was 166 t/ha annually, with three harvests totaling 23 tons. Annual water demand was 7612 m<sup>3</sup>/ha, higher than the national average (4000–6000 m<sup>3</sup>/ha). Variations in K<sub>c</sub> among studies highlight differences in climate, greenhouse structure, irrigation, and management practices.

## 4. Discussion and Conclusion

The main objective of this study was to evaluate the evapotranspiration (ET) of bell peppers in a greenhouse environment using the water balance method and compare it with empirical approaches.

The crop coefficient ( $K_c$ ) was also calculated for different conditions. Average daily ET for the crop and reference plant, measured using the weighing method, was 3.53 mm/day and 5.58 mm/day, respectively. Annual ET for the crop was estimated at 4.53 mm/day. These results align with the study by Mačkić et al. (2023), which reported ET values for bell peppers ranging from 2.5 to 4.06 mm/day during summer months.

The FAO-Penman-Monteith and Droogers-Allen methods were used to estimate reference ET, with results inside and outside the greenhouse of 5.15 mm/day and 5.05 mm/day, and 4.41 mm/day and 3.61 mm/day, respectively. The FAO-Penman-Monteith method showed the highest similarity to the weighing method, consistent with findings by Abianeh et al. (2011), who identified Penman-based methods as the most accurate for Iran. Additionally, the results align with Pirie and Pouzan (2019), who recommended Droogers-Allen for semi-humid climates.

ET and  $K_c$  values were lower under misting and covering treatments, highlighting their importance in reducing water loss and enhancing water use efficiency. These findings are consistent with studies showing misting reduces ET and improves crop yield. Limitations included the lack of lysimeters and solar radiation sensors, relying instead on FAO-56 data. Future studies should explore ET under varying climates and compare empirical and physical models in controlled environments. Calculating ET and  $K_c$  is crucial for sustainable water management, optimizing irrigation, and addressing climate challenges.

## 5.

## 6. Six important references

- 1) Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 56(97): p.e156.
- 2) Angaleeswari, M., Ravikumar, V. & Kannan, S.V. Evapotranspiration estimation by inverse soil water flow modelling. *Irrig Sci* 39, 633–649 (2021).
- 3) Ávila-Dávila, L., Molina-Martínez, J. M., Bautista-Capetillo, C., Soler-Méndez, M., Robles Roveló, C. O., Júnez-Ferreira, H. E., & González-Trinidad, J. (2021). Estimation of the evapotranspiration and crop coefficients of bell pepper using a removable weighing lysimeter: A case study in the southeast of Spain. *Sustainability*, 13(2), 747.
- 4) Baille, A. (1996). Principles and methods for predicting crop water requirement in greenhouse environments. *Cahier Options Méditerranéennes*, 31, 177-187.
- 5) Fazlil-Ilahil, W. F. (2009). Evapotranspiration models in greenhouse. MSc, Wageningen agricultural University, Wageningen, Netherlands.
- 6) Heinzl, M. (2022). International Bureaucrats and Organizational Performance. Country-Specific Knowledge and Sectoral Knowledge in World Bank Projects. *International Studies Quarterly*, 66(2), sqac013.

## Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest regarding the publication of this article. The research was conducted independently, and no external funding or personal relationships influenced the outcomes or interpretations presented in this study.

## Acknowledgments

We are grateful to Iran Meteorological Organization.



## برآورد تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی فلفل دلمه‌ای با مقایسه روش وزنی و مدل‌های تجربی (مطالعه موردی: گلخانه حصارگلی ورامین)

محمد رضا اصلی چرندابی<sup>۱</sup>، عماد محجوبی<sup>۲</sup>، حمید عبدالآبادی<sup>۳</sup>

تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۰۵/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۴

مقاله پژوهشی

### چکیده

در این مطالعه، به بررسی تبخیر و تعرق و ضریب گیاهی فلفل دلمه‌ای در شرایط گلخانه‌ای واقع در شهرستان ورامین و در فصل کشت بهاره با استفاده از روش وزنی مبتنی بر بیلان آب پرداخته شده است. نتایج حاصل، با روش‌های فائو-پنمن-مانتیت و دروگرز-آلن نیز مقایسه گردید. در ادامه، مقدار ضریب گیاهی در مراحل مختلف رشد این محصول برآورد گردید و نتایج آن نسبت به سایر مطالعات بررسی گردید. نتایج نشان داد که مقادیر متوسط روزانه تبخیر و تعرق در کشت بهاره برای فلفل دلمه‌ای و گیاه مرجع به ترتیب برابر با  $3/53$  و  $5/58$  میلی‌متر در کل دوره رشد محصول است. همچنین میزان تبخیر و تعرق سالانه فلفل دلمه‌ای در شرایط گلخانه برابر با  $761$  میلی‌متر معادل با  $7612$  مترمکعب بر هکتار برآورد شد. مقادیر تبخیر و تعرق مرجع روزانه محاسبه شده داخل گلخانه به روش فائو-پنمن-مانتیت و دروگرز-آلن به ترتیب  $5/15$  و  $4/41$  میلی‌متر در کل دوره رشد به دست آمد. همچنین، نتایج مطالعه نشان داد که میانگین ضریب گیاهی در طول مراحل اولیه، میانی و پایانی به ترتیب برابر با  $0/13$ ،  $0/17$  و  $0/6$  می‌باشد. بیشترین و کمترین ضریب گیاهی نیز به ترتیب در حالت‌های بدون مه‌پاش و بدون روکش و با مه‌پاش و روکش مشاهده شد. ضمن اینکه متوسط عملکرد سالانه معادل  $166$  تن بر هکتار در این گلخانه به ثبت رسید. با توجه به کمبود مطالعات پیشین درباره محصول فلفل دلمه‌ای در شرایط گلخانه‌ای و کشت هیدروپونیک، نتایج این تحقیق می‌تواند مبنایی برای صرفه‌جویی در مصرف آب، بهینه‌سازی آبیاری، و ایجاد برنامه‌ریزی مناسب برای آبیاری باشد.

واژه‌های کلیدی: بیلان آب، تبخیر-تعرق، ضریب گیاهی، فائو-پنمن-مانتیت، فلفل دلمه‌ای گلخانه‌ای

۱- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، ایمیل: [m.aslicharandabi@shahroodut.ac.ir](mailto:m.aslicharandabi@shahroodut.ac.ir)

۲- استادیار گروه مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، ایمیل: [emahjoobi@shahroodut.ac.ir](mailto:emahjoobi@shahroodut.ac.ir)

۳- استادیار گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، ایمیل: [h.abdolabadi@scu.ac.ir](mailto:h.abdolabadi@scu.ac.ir)

## مقدمه

بخش کشاورزی در ایران به‌عنوان اصلی‌ترین مصرف‌کننده آب با توجه به افزایش سطح زیرکشت و کاهش قابل‌توجه بارندگی و خشک‌سالی، با مشکلات زیادی روبرو است. بنابراین، استفاده از فناوری‌های جدید در بخش تخصیص منابع آب موجود ضروری است (ابراهیمی‌پور و همکاران، ۱۴۰۰). کشت‌های گلخانه‌ای از روش‌ها و فناوری‌هایی است که استفاده از منابع آب‌وخاک را با کارایی بالا و در شرایط مختلف آب و هوایی در محیط‌های کنترل‌شده میسر می‌سازد (رضوانی و همکاران، ۱۳۹۹). گلخانه‌ها با امکان استقرار در اراضی غیرقابل کشت و با کنترل بهتر شرایط محیطی مانند دما، رطوبت و نور، زمینه صرفه‌جویی در مصرف آب و کاهش تلفات آبیاری و افزایش تولید محصول با کیفیت در واحد سطح را فراهم می‌کند. ضمن اینکه تولید انواع محصولات با ارزش افزوده بالا نظیر گیاهان دارویی، زینتی و استوایی را حتی در خارج از فصل کشت و با استفاده از تکنیک‌های جدید مانند کشت طبقاتی و هیدروپونیک امکان‌پذیر می‌سازد. به‌صورت میانگین بین سال‌های ۱۳۹۰ الی ۱۳۹۹، ۸۳۱/۵ هکتار به سطح زیرکشت گلخانه‌های کشور اضافه شده است؛ به‌صورتی که در پایان سال ۱۳۹۹ سطح زیرکشت گلخانه‌ای در ایران به ۱۳۴۹۵ هکتار رسیده است (احمدی و همکاران، ۱۴۰۰). در فاصله زمانی ذکرشده، رشد سالانه سطح گلخانه‌ای استان تهران نیز حدود ۱۱/۵ درصد بوده؛ به طوری که سهم گلخانه‌های استان تهران از لحاظ مساحت به ۲۰/۷ درصد و از لحاظ تعداد سالن‌ها به ۲۸/۳ درصد افزایش یافته است (سامانه جامع گلخانه‌های ایران، ۱۴۰۰).

آگاهی از میزان نیاز آبی گیاه در طول دوره رشد از الزامات کنترل مصرف آب در گلخانه است. نیاز آبی گیاه معادل میزان تبخیر و تعرق بوده و تحت تأثیر عوامل محیطی مانند دما، رطوبت، نور، باد، نوع خاک، نوع گیاه و مرحله رشد قرار دارد (سجودی و میرزایی، ۱۳۹۹). اندازه‌گیری تبخیر و تعرق گیاه برای مدیریت بهینه آبیاری در گلخانه‌ها اهمیت زیادی دارد. در این خصوص، نسبت تبخیر و تعرق گیاه به تبخیر و تعرق گیاه مرجع تحت عنوان

ضریب گیاهی، در مراحل ابتدایی، میانی و پایانی رشد مورد توجه است. البته به‌طور معمول گیاه مرجع (چمن یا یونجه) در محیط گلخانه کشت نمی‌شود (رضوانی و همکاران، ۱۴۰۱). ضمن اینکه شرایط آب و هوایی کنترل شده در محیط گلخانه بر ضریب گیاهی تأثیرگذار خواهد بود. بر این اساس، پایش رفتار واقعی گیاه در شرایط خاص گلخانه بر روش‌های تجربی محاسبه ضریب گیاهی ترجیح داده می‌شود (رضوانی و همکاران، ۱۴۰۱). این در حالی است که روش‌های برآورد نیاز آبی محصولات گلخانه‌ای همگام با توسعه روزافزون این کشت‌ها گسترش نیافته‌اند.

عابدی کوهپایی و همکاران (۱۳۹۰) در یک گلخانه شیشه‌ای در اصفهان ضریب گیاهی را برای محصول خیار در مراحل ابتدایی، توسعه گیاه، میانی و پایانی به ترتیب، ۰/۴۱، ۰/۶۹، ۰/۹۸ و ۰/۷۷ محاسبه کردند. فتحعلیان و همکاران (۱۳۹۱) برای محاسبه تبخیر و تعرق و همچنین ضریب گیاهی محصول خیار در شرایط گلخانه‌ای، دو میکرولاسیسمتر را برای کشت خیار و چمن در گلخانه تحقیقاتی در شمال تهران تعبیه کردند. آن‌ها با استفاده از داده‌های هواشناسی ثبت شده داخل گلخانه، تبخیر و تعرق گیاه مرجع را با سه روش فائو پنمن-مانتیث، هارگریوز-سامانی و ماکینگ محاسبه نمودند. نتایج نشان داد که تبخیر و تعرق محصول خیار در طول دوره رشد چهارماهه برابر ۲۷۳/۲ میلی‌متر بوده و میانگین مقادیر ضریب گیاهی در مراحل ابتدایی، توسعه، میانی و انتهایی رشد به ترتیب برابر با ۰/۱۴، ۰/۷۸، ۱/۰ و ۰/۸۶ می‌باشد. ضمناً مقادیر ضرایب گیاهی محاسبه شده با استفاده از روش‌های هارگریوز - سامانی و ماکینگ به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر بودند. شبانیان اصل (۱۳۹۲) به اندازه‌گیری و مدل‌سازی تبخیر و تعرق روزانه محصولات خیار و گوجه-فرنگی در کشت گلخانه‌ای با استفاده از لاسیسمتر پرداخت. برای مدل‌سازی تبخیر و تعرق در گلخانه، انواع مدل‌های خطی و غیرخطی را در نظر گرفته و پارامترهای اقلیمی مؤثر شامل دما، رطوبت، فشار هوا، کمبود فشار بخار اشباع و تشعشع داخل گلخانه را اندازه‌گیری کرد. در نهایت متوسط تبخیر و تعرق روزانه خیار و گوجه‌فرنگی را به ترتیب برابر ۴/۲۷ و ۶/۳۶ میلی‌متر محاسبه نمودند.



Cropwat در منطقه راجستان کشور هند پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که حداکثر و حداقل تبخیر و تعرق گیاه مرجع برابر با ۴/۵۹ و ۱/۷۲ میلی‌متر در روز می‌باشد. همچنین مقدار کل آب موردنیاز را برای رشد کامل گیاه در بازه زمانی ۱۸۰ روز دوره رشد برابر با ۳۸۰ میلی‌متر برآورد کردند.

Orgaz et al. (2005) مقادیر ضریب گیاهی را با استفاده از لایسیمترهای زهکش‌دار برای چهار محصول خربزه، لوبیا سبز، هندوانه و فلفل در یک گلخانه با پوشش پلاستیکی و بدون سیستم گرمایشی در منطقه المیرا در اسپانیا برآورد کردند. نتایج نشان داد که در محصول‌های هندوانه و خربزه هنگامی که پوشش گیاهی به صورت افقی (خوابیده) قرار داشته باشد، بالاترین مقدار ضریب گیاهی (مقدار پیک ضریب گیاهی) در تمام مراحل رشد بین ۱ و ۱/۱ است و با مقدار آن در شرایطی که کشت در فضای آزاد انجام شود، برابر است. در مورد محصولات خربزه، لوبیا سبز و فلفل هنگامی که با نخ‌های متصل به بوته، پوشش گیاهی به صورت ایستاده (عمودی) قرار گیرد، بالاترین ضریب گیاهی در تمام مراحل رشد بین ۱/۳ الی ۱/۴ می‌باشد که بالاتر از مقادیر به دست آمده برای زمانی است که کشت در فضای باز است. جعفری و همکاران (۱۳۹۲) به اندازه‌گیری تبخیر و تعرق محصول فلفل دلمه‌ای گلخانه‌ای در شهرستان سنجید با استفاده از میکرو لایسیمتر پرداختند. آن‌ها مقدار ضرایب گیاهی در مراحل رشد اولیه، میانی و انتهایی را به ترتیب ۰/۵، ۱/۵ و ۰/۸ برآورد کردند. همچنین نشان دادند که معادله ماکینگ بهترین معادله برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع در شرایط این مطالعه است. Shukla et al. (2013) به بررسی تلفات تبخیر و تعرق برای محصول فلفل دلمه‌ای در شرایط مالچ پلاستیکی و آب کم‌عمق در منطقه فلوریدا در ایالات متحده آمریکا پرداختند. منظور از شرایط مالچ پلاستیکی و آب کم عمق این است که گیاهان در خاکی کشت می‌شوند که روی آن پوششی از پلاستیک گسترده شده است و آبیاری آن‌ها با مقدار کمی آب و در عمق کمی از خاک انجام می‌شود. این روش کشت برای افزایش عملکرد و کارایی مصرف آب و کنترل علف‌های هرز در برخی از محصولات مانند پنبه، گوجه‌فرنگی و فلفل دلمه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد.

Rahimikhoob et al. (2020) به مقایسه نه روش تجربی برآورد تبخیر و تعرق مرجع در دو وضعیت اعمال پارامترهای محیط باز و گلخانه با اندازه‌گیری‌های لایسیمتر پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که دقت و عملکرد معادلات مختلف برآورد تبخیر و تعرق مرجع اعمال شده برای محیط باز با معادلات تحت شرایط گلخانه متفاوت است. در این میان، بهترین رابطه تجربی برآورد تبخیر و تعرق مرجع در شرایط گلخانه مربوط به روش پنمن-مانتیت است. Khafajeh et al. (2021) نشان دادند مدل AquaCrop تبخیر و تعرق گیاه مرجع را با کمترین خطا در گلخانه‌ای که به وسیله منطق فازی کنترل می‌شود، تخمین می‌زند. آن‌ها بیان کردند که مقدار تبخیر در مرحله ابتدایی رشد، سهم بالاتری از تبخیر و تعرق را دارد. همچنین میانگین تعرق در چهار مرحله ابتدایی، توسعه، میانی و انتهایی رشد به ترتیب ۱/۲۴، ۲/۱۱، ۲/۱۵ و ۲/۰۵ میلی‌متر بر روز بوده است.

گیاه فلفل دلمه‌ای یکی از مهم‌ترین محصولات گلخانه‌ای در سرتاسر دنیا به حساب می‌آید که علاوه بر ارزش اقتصادی، ارزش تغذیه‌ای بالایی هم دارد و منبعی سرشار از آنتی‌اکسیدان، فیبر و مواد معدنی می‌باشد. سطح زیر کشت این محصول در گلخانه‌های سراسر جهان در سال ۲۰۱۹ تقریباً دو میلیون هکتار با تولید حدود ۳۶ میلیون تن بوده است که نسبت به سال ۲۰۱۸، حدود ۳ درصد افزایش را نشان می‌دهد. کشورهای چین، مکزیک، اندونزی، ترکیه و ایران به ترتیب با ۱۸/۴، ۳/۴، ۲/۵، ۲/۲ و ۱/۹ میلیون تن تولید که سهمی معادل ۶۰ درصد تولیدات جهانی می‌باشد، بزرگ‌ترین تولیدکنندگان این محصول در جهان به شمار می‌آیند. در مقابل، کشورهای اسپانیا، هلند، مکزیک، کانادا و ایالات متحده بزرگ‌ترین صادرکنندگان این محصول هستند (FAOSTAT, 2020). به طور متوسط ۸۸ درصد از سطح زیر کشت محصولات گلخانه‌ای در ایران به خیار، هشت درصد به گوجه‌فرنگی و چهار درصد به فلفل دلمه‌ای اختصاص دارد (Sajadi et al., 2017). Arya et al. (2017) به تخمین نیاز آبیاری فلفل دلمه‌ای تحت آبیاری قطره‌ای و ارزیابی میزان تبخیر و تعرق این محصول با استفاده از روش فائو-پنمن-مانتیت و نرم‌افزار

برابر با ۰/۵۷، ۱/۰۶ و ۰/۸ می‌باشد. همچنین، برای کشت ۱۹۵ روزه، تبخیر و تعرق گیاه فلفل دلمه‌ای در کل دوره رشد در سال ۲۰۱۹ برابر با ۸۷۴/۴ میلی‌متر و در سال ۲۰۲۰ برابر ۸۵۴/۶ میلی‌متر بوده است. (Öztürk, 2023). به بررسی تاثیر استفاده از سیستم خنک‌کننده مه‌پاش در گلخانه‌ای واقع در ینیچه‌آدانا کشور ترکیه پرداخت. او نشان داد که سیستم مه‌پاش، دمای داخل گلخانه را به طور متوسط ۶/۶ درجه سانتی‌گراد کمتر از دمای خارج نگه می‌دارد. همچنین، در حضور مه‌پاش، رطوبت نسبی داخل گلخانه به طور متوسط ۲۵ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین سیستم مه‌پاش می‌تواند به عنوان یک روش موثر برای خنک‌سازی و افزایش رطوبت در گلخانه‌ها مورد استفاده قرار گیرد، به ویژه در شرایطی که نیاز به توزیع یکنواخت دما و رطوبت در محیط گلخانه وجود دارد.

مطالعات گذشته نشان می‌دهد که تبخیر و تعرق محصولات گلخانه‌ای به طور محسوسی با شرایط کشت در فضای باز تفاوت دارد و نمی‌توان به طور مستقیم از منابع موجود برای ارزیابی تبخیر و تعرق این محصولات استفاده کرد. ضمن اینکه نتایج به دست آمده با مطالعه (Allen et al. 1998) در نشریه FAO56، تفاوت قابل توجهی دارد و لزوم محاسبه ضریب گیاهی و بررسی پارامترهای تأثیرگذار در تبخیر و تعرق در هر منطقه به صورت مجزا تأکید شده است.

پژوهش حاضر با هدف پاسخ دادن و بررسی یک نیاز مهم در زمینه برآورد تبخیر و تعرق محصول فلفل دلمه‌ای در شرایط گلخانه‌ای طراحی شده است. در حالی که مطالعات متعددی به بررسی نیاز آبی گیاهان گلخانه‌ای پرداخته‌اند، اکثر این مطالعات معطوف به محصولات دیگری مانند خیار و گوجه‌فرنگی بوده و اطلاعات دقیقی را درباره فلفل دلمه‌ای در شرایط گلخانه‌ای ارائه ننموده‌اند. همچنین، بسیاری از این تحقیقات به روش‌های تجربی متکی هستند که ممکن است به دلیل تفاوت‌های اقلیمی و محیطی، نتایج قابل تعمیمی نداشته باشند. این پژوهش با استفاده از روش وزنی و تخمین مقادیر ضریب گیاهی در مراحل مختلف رشد، به دنبال ارائه برآورد دقیق‌تری از نیاز آبی فلفل دلمه‌ای است. مقایسه نتایج با مدل‌های مرجع فائو-پنمن-مانتیث و آلن-دروگرز نیز به ارزیابی دقت این مدل‌ها در شرایط خاص

آن‌ها ضریب گیاهی فلفل دلمه‌ای را در مراحل ابتدایی، میانی و پایانی برابر با ۰/۸۶، ۱/۲۱ و ۱/۲۸ تخمین زدند. ضمن اینکه میزان تبخیر و تعرق این محصول برای بازه زمانی ۱۰۰ روزه دوره کشت را برابر با ۲۶۷ میلی‌متر اندازه‌گیری کردند. (Muniandy et al. 2016) به ارزیابی مدل‌های تبخیر و تعرق و ضریب گیاهی برای محصولات فلفل دلمه‌ای و خیارچنبر تلخ در منطقه کلوانگ در مالزی پرداختند. نتایج نشان داد که ضریب گیاهی فلفل دلمه‌ای در محیط باز برای مراحل ابتدایی، میانی و پایانی رشد به ترتیب ۰/۶۷، ۰/۹۵ و ۰/۷۶ است. (Raphael et al, 2018) به محاسبه ضریب گیاهی فلفل دلمه‌ای چینی در فضای باز و مقایسه نتایج آن با نشریه FAO56 و همچنین نتایج نرم‌افزار CropWAT8 در دو سال ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که ضریب گیاهی برای مراحل اولیه، میانی و پایانی رشد به ترتیب برابر با ۰/۳۲ تا ۰/۷، ۱/۰۲ تا ۱/۴۵ و ۰/۷۶ تا ۰/۹ است که تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای با نشریه FAO56 و نرم‌افزار CropWAT8 داشته و لزوم محاسبه مجدد ضریب گیاهی برای هر منطقه را بیان می‌کند. (Lorenzoni et al 2019) به محاسبه ضریب گیاهی فلفل دلمه‌ای در شرایط گلخانه و برآورد آب مصرفی این محصول در کل دوره رشد در برزیل پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که ضریب گیاهی فلفل دلمه‌ای در مراحل ابتدایی، میانی و پایانی به ترتیب برابر با ۰/۸۶، ۱/۵۵ و ۱/۴ است. ضمن اینکه میزان آب مصرفی در کل دوره رشد برابر با ۲۸۲ میلی‌متر بوده است. (Nikolaou et al. 2020) در مطالعه خود بیان کردند که استفاده از گلخانه‌ها امکان استفاده کارآمدتر از آب در مقایسه با کشت در مزرعه و فضای آزاد را فراهم می‌کند؛ زیرا پوشش پلاستیکی، میزان تبخیر خاک را کنترل کرده و نیاز آبی فلفل دلمه‌ای را تا ۳۸ درصد کاهش می‌دهد. (Dávila et al., 2021) به بررسی میزان تبخیر و تعرق و همچنین ضریب گیاهی محصول فلفل دلمه‌ای با استفاده از لایسیمترهای وزنی قابل تعویض در دو فصل کشت مختلف در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ در فضای باز در منطقه جنوبی اسپانیا پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب گیاهی فلفل دلمه‌ای در مرحله ابتدایی، میانی و پایانی به ترتیب

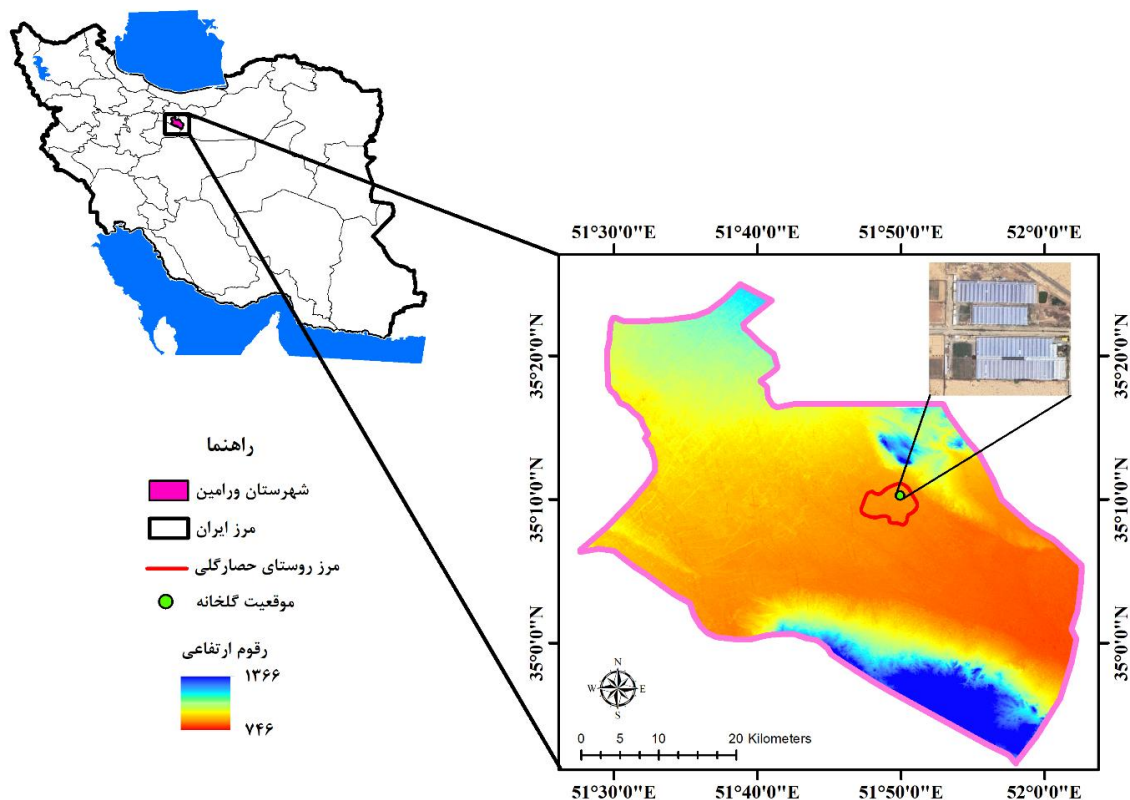
با مساحت کل ۱۳۸۶ مترمربع و با سیستم آبیاری قطره‌ای می‌باشد. هیدروپونیک یا کشت بدون خاک یک فناوری برای پرورش گیاهان در محلول غذایی است که تمام عناصر موردنیاز گیاه را با یا بدون نیاز به یک بستر در اختیار گیاه قرار می‌دهد. از جمله مزایای این نوع بستر کشت می‌توان به تخلخل هوایی مناسب، ظرفیت خوب نگهداری آب و آبیاری بهینه آن اشاره کرد. در این گلخانه ۳ سانتی‌متر کف بستر از پوکه‌های معدنی، باقیمانده آن از مخلوط ۵۰ درصد کوکوپیت و ۲۰ درصد پرلیت ۳ تا ۵، ۲۰ درصد پرلیت ۵ تا ۷ درصد و ۱۰ درصد نیز پرلیت شکری می‌باشد. میزان تولید این گلخانه در سال منتهی به تابستان ۱۴۰۱ برابر با ۲۳ تن از اولین برداشت تا پایان آن بوده است. شکل ۱ موقعیت این گلخانه در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

در این مطالعه، طرح آزمایشی شامل سیزده گلدان با بستر مشابه کشت گلخانه در حاشیه سالن اصلی توسعه یافت. دوازده گلدان به فلفل دلمه‌ای و یک گلدان به چمن به عنوان گیاه مرجع اختصاص داده شد.

گلخانه‌ای کمک خواهد کرد. بنابراین، این تحقیق می‌تواند به پر کردن خلا اطلاعاتی موجود در زمینه تبخیر و تعرق و ضرایب گیاهی فلفل دلمه‌ای در کشت‌های گلخانه‌ای کمک شایانی نماید.

## مواد و روش‌ها

روستای حصارگلی از توابع بخش جوادآباد دهستان بهنام عرب جنوبی در محدوده شهرستان ورامین و در ۳۵ کیلومتری جنوب شرقی تهران در موقعیت جغرافیایی ۳۵ درجه شمالی و ۵۱ درجه شرقی قرار دارد. محدوده این روستا با ارتفاع حدود ۹۲۸ متر از سطح دریا دارای آب‌وهوای گرم و خشک با تابستان‌های گرم و کم بارش و زمستان‌های سرد و پر بارش است. اراضی این محدوده حاصلخیز بوده و گلخانه‌های متعددی دارد. گلخانه هدف برای محاسبه ضرایب گیاهی و میزان تبخیر و تعرق محصول فلفل دلمه‌ای دارای دو سالن مجزا به مساحت کلی یک هکتار است. هر سالن دارای ۷۲ بستر کشت هیدروپونیک



شکل (۱): موقعیت گلخانه مورد مطالعه در روستای حصارگلی از توابع شهرستان ورامین

دوره کشت بهاره و زمان انتقال نشاء به گلخانه از تاریخ ۱۴۰۲/۰۴/۲۹ تا پایان مرحله رشد در تاریخ ۱۴۰۲/۰۴/۲۹ به مدت ۱۳۰ روز ادامه یافت. در نهایت بیلان کلی در طول دوره رشد به صورت زیر محاسبه گردید:

$$\Delta S = Q_{in} - Q_{out} - ET \quad (۱)$$

$\Delta S$ ، تفاوت وزن روز اول و آخر بعد از آبیاری (گرم)،  
 $Q_{in}$ ، مجموع میزان آبیاری تجمعی روزانه ورودی (گرم)،  
 $Q_{out}$ ، مجموع میزان آبیاری تجمعی روزانه خروجی (گرم)،  
 $ET$ ، مجموع تبخیر و تعرق در دوره رشد گیاه (گرم) است.  
 علاوه بر این، از روش‌های فائو-پنمن-مانتیت (مرجع) و روش دروگرز-آلن (مرجع) نیز برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع استفاده شد (جدول ۱).

گلدان‌های فلفل دلمه‌ای در ۴ حالت مختلف، برای بررسی اثرات مختلف تبخیر و تعرق مورد آزمایش قرار گرفتند. گلدان‌های ۱ الی ۶ در شرایط با مه‌پاش و گلدان‌های ۷ الی ۱۲ در شرایط بدون مه‌پاش قرار گرفتند. همچنین برای بررسی تغییرات تبخیر و تعرق، روکش بر روی سطح گلدان‌های ۴ الی ۶ و ۱۰ الی ۱۲ قرار داده شد. برای محاسبه میزان تبخیر و تعرق از روش اندازه‌گیری مستمر وزنی استفاده شد. برای اندازه‌گیری روزانه تغییر وزن، از ترازوی دیجیتالی با قابلیت حمل بار تا ۵۰ کیلوگرم و دقت اندازه‌گیری ۵ گرم استفاده شد. به این ترتیب که میزان آبیاری روزانه هر گلدان بر اساس ظرفیت زراعی خاک و با هدف جلوگیری از ایجاد تنش آبی انجام شده و توزین صورت گرفت. اندازه‌گیری‌ها برای فلفل دلمه‌ای همزمان با

جدول (۱): روابط تجربی محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع

شماره	رابطه	روش
(۲)	$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left( \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a) \right)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$	
(۳)	$R_s = K_{RS} * \sqrt{T_{max} - T_{min}} * R_a$	
(۴)	$R_{s0} = 0.75 * R_a$	
(۵)	$R_{ns} = 0.77 * R_a$	
(۶)	$R_{nl} = 4.903 * 10^{-9} * \left[ \frac{(T_{max} + 273)^4 + (T_{min} + 273)^4}{2} \right] * (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) * \left( 1.35 * \frac{R_s}{R_{s0}} - 0.35 \right)$	فائو پنمن مانیتیت
(۷)	$R_n = R_{ns} - R_{nl}$	
(۸)	$\Delta = \frac{4098 * e(T)}{(T + 237.3)^2}$	
(۹)	$e(T) = 0.6108 \exp \left[ \frac{17.27 * T}{T + 237.3} \right]$	
(۱۰)	$e_s = \frac{e(T_{max}) + e(T_{min})}{2}$	
(۱۱)	$e_a = e(T_{dew})$	
(۱۲)	$ET_0 = 0.408 * 0.003 * R_a * (T + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5}$	دروگرز-آلن

مترمربع بر روز،  $\gamma$  ضریب ثابت سایکومتری برحسب کیلوپاسکال بر درجه سانتیگراد،  $T$  میانگین روزانه دما برحسب درجه سانتیگراد،  $u_2$  میانگین روزانه سرعت باد در

$ET_0$  میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع برحسب میلی‌متر بر روز،  $R_n$  تابش خالص ورودی به سطح گیاه برحسب مگاژول بر مترمربع بر روز،  $G$  شار گرمای خاک برحسب مگاژول بر



تعرق گیاه مرجع (چمن اسپرت) با استفاده از روش وزنی انجام شده برای فلفل دلمه‌ای، از حالت بدون مه‌پاش و بدون روکش استفاده شد. بدین ترتیب، میزان متوسط تبخیر و تعرق روزانه گیاه مرجع معادل ۵/۵۸ میلی‌متر بر روز برآورد گردید. همچنین، این مقدار با استفاده از روش فائو-پنمن-مانتیت در داخل و خارج از گلخانه محاسبه شد و نتایج به ترتیب برابر با ۵/۱۸ و ۵/۰۵ میلی‌متر بر روز به دست آمد. تبخیر و تعرق گیاه مرجع در داخل گلخانه به روش دروگرز-آلن نیز برابر با ۴/۴۱ و خارج از گلخانه برابر با ۳/۶۱ میلی‌متر بر روز برآورد شد. نسبت تبخیر و تعرق خارج به داخل گلخانه برای روش‌های فائو-پنمن-مانتیت و دروگرز-آلن به ترتیب برابر با ۰/۹۷ و ۰/۸۱ می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که میزان تبخیر و تعرق در شرایطی که از مه‌پاش استفاده شود به دلیل اینکه مانع از ایجاد تنش آبی در گیاه می‌شود، کمتر از شرایطی است که از مه‌پاش استفاده نمی‌شود. همچنین، استفاده از روکش برای گلدان-ها به این دلیل که مانع تبخیر و تعرق از سطح آزاد خاک می‌شود، موجب کاهش مقدار تبخیر و تعرق نسبت به حالتی می‌شود که گلدان‌ها روکش نداشته باشند. بر اساس مطالعه کوپایی و همکاران (۱۳۹۰)، مقدار تبخیر و تعرق روزانه فلفل دلمه‌ای برابر ۳/۱۸ میلی‌متر برآورد گردید که در مقایسه با نتایج تحقیق حاضر، این مقدار به طور متوسط حدود ۱۰ درصد کمتر می‌باشد. از عوامل اصلی این اختلاف می‌توان به تفاوت در محل و ساختار گلخانه، نوع بستر کشت مورد استفاده و روش اندازه‌گیری اشاره کرد. جدول ۲ نتایج تبخیر-تعرق در دوره رشد فلفل دلمه‌ای و گیاه مرجع را نشان می‌دهد

ارتفاع دو متری بر اساس متر بر ثانیه،  $e_s$  و  $e_a$  به ترتیب متوسط فشار بخار اشباع در دمای حداکثر و حداقل و فشار بخار واقعی (معادل فشار بخار اشباع در دمای نقطه شبنم) برحسب کیلوپاسکال، و  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار برحسب کیلوپاسکال بر درجه سانتیگراد است. مقدار عددی  $K_{RS}$  برای نواحی دور از ساحل برابر با ۰/۱۶ می‌باشد و همچنین مقادیر  $R_a$  برابر با تابش فرازمینی روزانه و متناسب با عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریای منطقه مورد نظر تعیین می‌شود. پارامترهای  $R_{nl}$ ،  $R_{ns}$ ،  $R_{s0}$ ،  $R_s$  به ترتیب برابر با تابش خورشیدی کل، تابش خورشیدی فراجوی، تابش طول موج کوتاه محاسبه شده و تابش طول موج بلند خالص می‌باشند.  $e(T)$  فشار بخار اشباع،  $T_{min}$ ،  $T_{max}$  و  $T_{dew}$  به ترتیب حداکثر و حداقل دمای روزانه هوا و دمای نقطه شبنم است. (سلامتی و همکاران، ۱۴۰۱).

## نتایج و بحث

در کشت بهاره تبخیر و تعرق روزانه از زمان انتقال نشاء به گلخانه در تاریخ ۱۴۰۱/۱۲/۲۳ تا تاریخ ۱۴۰۲/۰۴/۲۹ به مدت ۱۳۰ روز به روش وزنی محاسبه شد. این مقدار به صورت میانگین برای هر سه گلدان برای هر حالت شامل گلدان‌های با مه‌پاش بدون روکش، با مه‌پاش با روکش، بدون مه‌پاش بدون روکش و بدون مه‌پاش با روکش به ترتیب برابر با ۲۶۸/۰۸، ۲۴۶/۷، ۳۶۰/۸۳، ۳۲۳/۵۶ میلی‌متر در کل دوره رشد به دست آمد. بر این اساس، مقدار متوسط تبخیر و تعرق روزانه میانگین برای هر حالت در کل دوره رشد به ترتیب برابر با ۲/۹، ۳/۱۵، ۴/۲۵ و ۳/۸۱ میلی‌متر بر روز تخمین زده شد. برای محاسبه تبخیر و

جدول (۲): مقادیر تبخیر و تعرق فلفل دلمه‌ای و چمن اسپرت در طول دوره رشد.

نوع و شماره گلدان	مجموع وزن آبیاری (گرم)	مجموع وزن زهکشی (گرم)	تفاوت وزن روز پایانی و ابتدایی (گرم)	تبخیر و تعرق (گرم)	تبخیر و تعرق (میلی‌متر بر روز)
۱	۱۱۹۳۵	۱۲۸۰	۴۳۵	۱۰۲۲۰	۲/۸۹
۲	۱۳۱۷۰	۹۳۵	۴۵۵	۱۱۷۸۰	۳/۳۴
۳	۱۳۲۱۵	۱۲۴۰	۳۴۵	۱۱۹۷۵	۳/۳۹
میانگین	۱۲۷۷۳/۳۳	۱۱۵۱/۶۶	۴۱۱/۶۶	۱۱۳۲۵	۳/۱۵
۴	۱۲۰۱۵	۱۱۱۵	۲۲۵	۱۰۶۷۵	۳/۰۲
۵	۱۱۴۷۵	۱۲۹۰	۲۳۵	۹۹۵۰	۲/۸۲
۶	۱۱۶۹۰	۱۲۳۵	۲۸۵	۱۰۱۷۰	۲/۸۸
میانگین	۱۱۷۲۶/۶۶	۱۲۱۳/۳۳	۲۴۸/۳۳	۱۰۲۶۵	۲/۹۱
۷	۱۵۸۹۵	۱۲۷۰	۵۳۰	۱۴۰۹۵	۳/۹۹
۸	۱۷۳۱۰	۱۱۴۰	۶۳۰	۱۵۵۴۰	۴/۴۰
۹	۱۷۳۳۵	۱۱۷۰	۴۵۰	۱۵۷۱۵	۴/۴۴
میانگین	۱۶۸۴۶/۶۶	۱۱۹۳/۳۳	۵۳۶/۶۶	۱۵۱۱۶/۶۶	۴/۲۳
۱۰	۱۵۱۶۰	۱۳۵۵	۳۱۰	۱۳۴۹۵	۳/۸۲
۱۱	۱۵۲۹۰	۱۲۸۵	۴۰۰	۱۳۶۰۵	۳/۸۵
۱۲	۱۵۰۹۵	۱۱۲۰	۴۸۰	۱۳۴۹۵	۳/۸۲
میانگین	۱۵۱۸۱/۶۶	۱۲۵۳/۳۳	۳۹۶/۶۶	۱۳۵۳۱/۶۶	۳/۸۱
چمن اسپرت	۱۱۶۲۰	۰	۲۰	۱۱۶۰۰	۵/۵۸

و پایان مرحله میانی رشد است) محاسبه می‌شود. سپس برای محاسبه تبخیر و تعرق در دو دوره بعدی، یعنی تا روز ۱۲۶ (برداشت دوم) و روز ۱۶۸ (برداشت سوم)، از دوره ۴۲ روز پایانی ۸۴ روز اول (یعنی از روز ۴۳ تا روز ۸۴) استفاده شده و مقدار تبخیر و تعرق این دوره‌ها به مجموع تبخیر و تعرق ۸۴ روز اول افزوده می‌شود تا میزان تبخیر و تعرق سالانه محصول محاسبه گردد. جدول ۴-۹ خلاصه نتایج تبخیر و تعرق سالانه فلفل دلمه‌ای در گلخانه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بر این اساس، متوسط تبخیر و تعرق و نیاز آبی سالانه فلفل دلمه‌ای در این گلخانه به ترتیب برابر حدود ۷۶۱ میلی‌متر و ۷۶۱۲ مترمکعب بر هکتار است. باید توجه

در گلخانه مورد مطالعه در طول یکسال، در سه مرحله به ترتیب در روزهای ۸۴م، ۱۲۶م و ۱۶۸م مجموعاً به میزان ۲۳ تن محصول فلفل دلمه‌ای برداشت شده است که با توجه به سطح زیر کشت ۱۳۸۶ مترمربعی و با فرض یکبار کشت در سال، عملکردی معادل ۱۶۶ تن بر هکتار را نشان می‌دهد. بنابراین، متوسط مقدار عملکرد در هر نوبت محصول دهی حدود ۵۵ تن بر هکتار می‌باشد. برای برآورد و ارزیابی آب مجازی محصول، لازم است میزان تبخیر و تعرق سالانه آن تخمین زده شود تا عملکرد سالانه محصول تحلیل و بررسی گردد. به این منظور، ابتدا متوسط تبخیر و تعرق محصول در ۸۴ روز ابتدایی (که زمان اولین برداشت



متوسط میزان تبخیر و تعرق در مراحل اولیه، میانی و پایانی برای فلفل دلمه‌ای و گیاه مرجع در جدول ۴ نشان داده شده است.

داشت که طبق اطلاعات موجود در سازمان هواشناسی و وزارت جهاد کشاورزی، نیاز آبی محصول فلفل دلمه‌ای در ایران بسته به شرایط منطقه مورد مطالعه، بین ۴۰۰۰ الی ۶۰۰۰ مترمکعب در هکتار گزارش شده است (صالح‌نیا و همکاران، ۱۳۹۶).

جدول (۳): مقادیر سالانه تبخیر و تعرق فلفل دلمه‌ای گلخانه‌ای در شرایط مختلف بر حسب میلی‌متر

حالت	با مه‌پاش بدون روکش	با مه‌پاش با روکش	بدون مه‌پاش بدون روکش	بدون مه‌پاش با روکش	میانگین
تبخیر و تعرق (میلی‌متر)	۶۵۳/۵۲	۶۵۰/۱۶	۸۹۸/۸	۸۴۲/۵۲	۷۶۱/۲۵

جدول (۴): تبخیر و تعرق مراحل مختلف دوره رشد فلفل دلمه‌ای و گیاه مرجع بر حسب میلی‌متر بر روز

حالت	فلفل دلمه‌ای				گیاه مرجع
	با مه‌پاش بدون روکش	با مه‌پاش با روکش	بدون مه‌پاش بدون روکش	بدون مه‌پاش با روکش	
مرحله اولیه	۰/۹۱	۰/۳۳	۱/۱۵	۰/۵۷	۵/۵۱
مرحله میانی	۴/۳۱	۴/۲۴	۵/۸۵	۵/۴۸	۵/۶۳
مرحله پایانی	۲/۶۱	۲/۲۹	۳/۵	۳/۰۳	۴/۷۲

مربوط به حالت بدون مه‌پاش بدون روکش و با مه‌پاش با روکش است. مقایسه نتایج مربوط به گلدان‌های بدون مه‌پاش و با روکش و گلدان‌های بدون مه‌پاش و بدون روکش نشان می‌دهد که تبخیر از سطح مرطوب بستر حدود یک نهم تعرق گیاه بوده و وجود مه‌پاش و روکش می‌تواند باعث کاهش میزان تبخیر و تعرق گیاه شود. بی‌شک وجود مه‌پاش با تأمین رطوبت لازم برای رشد گیاه باعث کاهش احتمال ایجاد شرایط تنش آبی و به تبع آن کاهش نیاز آبیاری در گیاه می‌شود.

بر اساس نشریه فائو ۵۶، ضریب گیاهی پایه محصولات مشابه فلفل دلمه‌ای در شرایط استاندارد و بدون تنش تحت مدیریت زراعی مطلوب و در اقلیم نیمه مرطوب در فضای باز به ترتیب ۰/۱۵، ۱/۱ و ۰/۷ گزارش شده است.

در این پژوهش، ضریب گیاهی محصول در طی دوره کشت ۱۳۰ روزه بهاره مطابق تقسیم‌بندی نشریه فائو ۵۶ برای مرحله اولیه (مرحله ابتدایی و رشد)، مرحله میانی و پایانی محاسبه شد. بازه‌های زمانی اندازه‌گیری شده در این تحقیق برای هر مرحله از دوره رشد به صورت حدودی برابر با بازه‌های نشریه فائو ۵۶ در نظر گرفته شد. مرحله اول معادل ۲۹ روز که از زمان انتقال نشاء به گلخانه تا زمانی است که گیاه حدوداً ۶ برگ داشته باشد؛ مرحله میانی برابر با ۵۶ روز، و مرحله پایانی از زمان اولین برداشت محصول تا زمان پژمردگی گیاه برابر ۴۵ روز است. جدول ۵ ضریب گیاهی میانگین هر حالت در مراحل رشد را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، ضریب گیاهی به صورت میانگینی از چهار حالت گلدان در شرایط مختلف برای مرحله اولیه، میانی و پایانی به ترتیب برابر با ۰/۸۷ و ۰/۱۳ است. بیشترین و کمترین ضرایب گیاهی مراحل رشد

جدول (۵): ضریب گیاهی میانگین حالت‌ها در هر مرحله از دوره رشد

ضریب گیاهی	با مه‌پاش بدون روکش	با مه‌پاش با روکش	بدون مه‌پاش بدون روکش	بدون مه‌پاش با روکش	میانگین
K <sub>c</sub> (ini)	۰/۱۷	۰/۰۶	۰/۲۱	۰/۱	۰/۱۳۵
K <sub>c</sub> (mid)	۰/۷۷	۰/۷۵	۱/۰۴	۰/۹۷	۰/۸۸۳
K <sub>c</sub> (end)	۰/۵۳	۰/۵	۰/۷۱	۰/۶۸	۰/۶۰۵

یکسان هستند. همچنین، لازم به ذکر است که این مطالعه در یک گلخانه با مساحت حدودی ۰/۵ هکتار انجام شده است که نتایج را به دنیای واقعی نزدیک تر می کند.

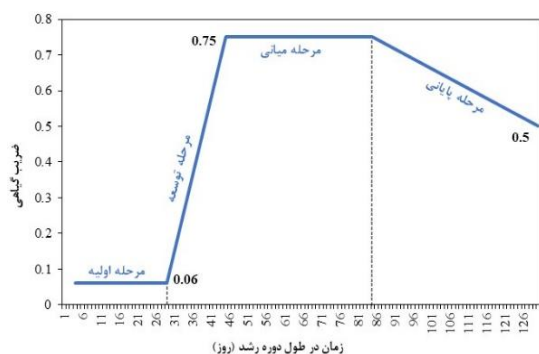
جدول ۶ مقادیر محاسبه شده ضریب گیاهی در طول دوره رشد، برای گیاه مرجع با استفاده از روش های تجربی فائو-پنمن-مانتیث (FPM) و دروگرز-آلن (DA) را نمایش می دهد. نتایج نشان می دهد که در شرایط استفاده از روش های تجربی، ضرایب گیاهی بالاتری نسبت به روش اندازه گیری شده به دست می آید.

از دلایل اصلی تفاوت در میزان ضریب گیاهی محاسبه شده در بین مطالعات می توان به شرایط محیطی مختلف، نوع مدیریت آب و خاک، تنوع گونه های کشت فلفل دلمه ای، اختلاف در روش های اندازه گیری، تراکم و الگوی کشت متفاوت و تأثیرات انسانی در مدیریت گلخانه ها اشاره کرد. برای مثال تفاوت در تراکم بوته ها و چینش گیاهان در گلخانه می تواند بر میزان سایه اندازی و تبخیر و تعرق از سطح خاک تأثیر بگذارد. تفاوت و تنوع ضرایب گیاهی در مطالعات مختلف بیانگر لزوم انجام محاسبات در مناطق مختلف است. تغییرات ضریب گیاهی فلفل دلمه ای در حالت های مختلف در شکل های ۲ تا ۵ و نمودار مقایسه ای آن ها در شکل ۶ به روش پیشنهادی فائو نشان داده شده است. لازم به توضیح است که طبق تعریف نشریه فائو ۵۶ مرحله میانی به صورت کلی به مجموع مراحل رشد و توسعه (توسعه و میانی) گفته می شود (میرچولی و همکاران، ۱۳۹۵).

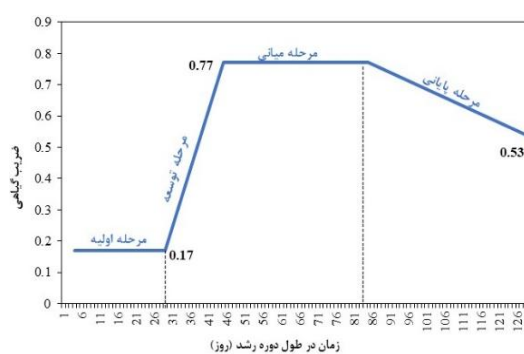
جعفری و همکاران (۱۳۹۲) در مطالعات خود ضریب گیاهی محصول فلفل دلمه ای در شرایط گلخانه ای را (با مراحل رشد ۶۱، ۳۱ و ۳۷ روزه) به ترتیب ۰/۵، ۱/۵ و ۰/۸ محاسبه کردند که نتایج تحقیق حاضر با مطالعات ذکر شده همخوانی ندارد. در مقابل، Dávila et al. (2021) ضریب گیاهی را برای محصول فلفل دلمه ای در سه مرحله ابتدایی، میانی و پایانی به ترتیب ۰/۵۷، ۱/۰۶ و ۰/۸ به دست آوردند که با نتایج حاصل از این مقاله همخوانی دارد. از جمله دلایل این موضوع می تواند تفاوت در منطقه مورد مطالعه، انجام مطالعه در فضای باز، وجود بارش، عمق نفوذ بیشتر آب در خاک، تفاوت در میزان رطوبت و همچنین تفاوت در فواصل زمانی آبیاری باشد. به طور کلی در مقایسه با سایر مطالعات پیشین نتایج این تحقیق مقادیر کمتری از ضریب گیاهی را گزارش می دهد که اصلی ترین و مهم ترین علت آن، کشت در فضای گلخانه است؛ چرا که میزان تبخیر و تعرق در گلخانه ها کمتر از فضای باز است. باید توجه داشت مقادیر ضرایب گیاهی در گلخانه به دلیل حجم فتوسنتز بیشتر و تراکم بالاتر با فضای باز تفاوت دارد (Gallardo et al., 2013). به صورت کلی تفاوت در مقادیر ضریب گیاهی برای مراحل مختلف در طول دوره رشد با مطالعات موجود می تواند به عوامل متنوعی مانند تقسیم بندی متفاوت طول دوره رشد، متفاوت بودن زمان کشت، طول دوره رشد محصول با توجه به وضعیت آبیاری و تغذیه گیاه، سازه و تهویه گلخانه و اقلیم منطقه بستگی داشته باشد؛ اما به طور کلی بازه های مقادیر ارائه شده و روندهای آن ها حدوداً

جدول (۶): مقادیر ضرایب گیاهی فلفل دلمه ای با استفاده از روش های فائو-پنمن-مانتیث و دروگرز-آلن

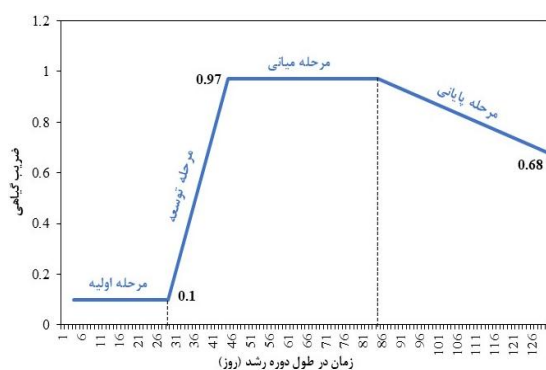
میانگین		بدون مه پاش با روکش		بدون مه پاش بدون روکش		با مه پاش با روکش		با مه پاش بدون روکش		ضریب گیاهی
DA	FPM	DA	FPM	DA	FPM	DA	FPM	DA	FPM	
۰/۱۸	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۱	۰/۲۸	۰/۱۹	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۲۲	۰/۱۵	K <sub>c</sub> (ini)
۱/۵۵	۱/۱۱	۱/۷۱	۱/۲۲	۱/۸۲	۱/۳۰	۱/۳۲	۰/۹۴	۱/۳۴	۰/۹۶	K <sub>c</sub> (mid)
۰/۸۴	۰/۶۲	۰/۹۱	۰/۶۹	۱/۰۲	۰/۷۷	۰/۶۹	۰/۴۹	۰/۷۶	۰/۵۵	K <sub>c</sub> (end)



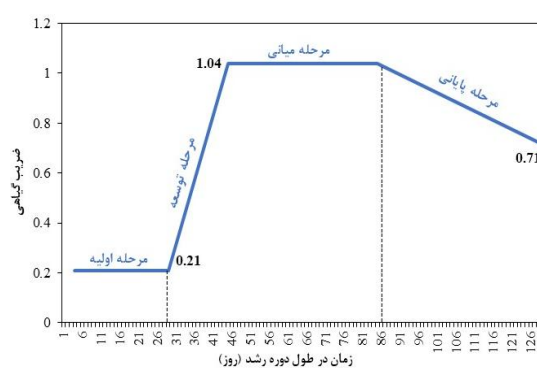
شکل (۳): نمودار ضریب گیاهی برای حالت با مه پاش با روکش



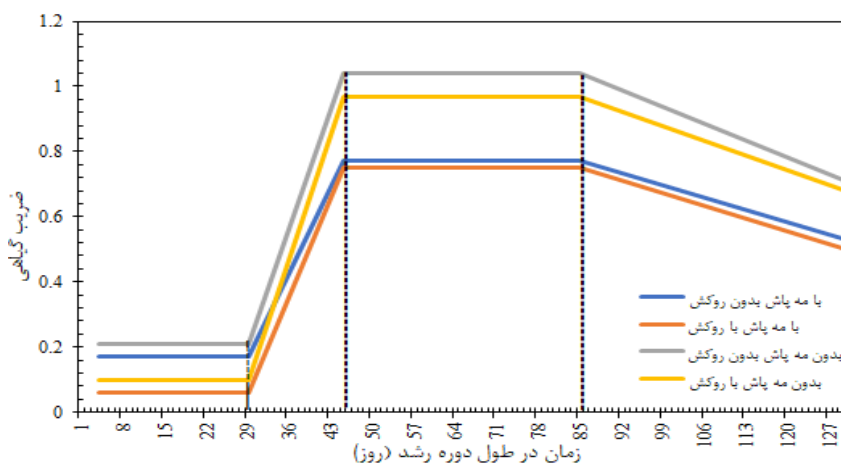
شکل (۲): نمودار ضریب گیاهی برای حالت با مه پاش بدون روکش



شکل (۵): نمودار ضریب گیاهی برای حالت بدون مه پاش با روکش



شکل (۴): نمودار ضریب گیاهی برای حالت بدون مه پاش بدون روکش



شکل (۶): مقایسه کلی میانگین ضریب گیاهی هر حالت آزمایش

بوده است. همچنین ضریب گیاهی محصول در حالت‌های مختلف و به صورت میانگین محاسبه شد. مقدار تبخیر و تعرق گیاه و گیاه مرجع در طول دوره رشد با روش اندازه-

## نتیجه گیری

هدف اصلی انجام این پژوهش بررسی و ارزیابی تبخیر و تعرق محصول لفلل دلمه‌ای در محیط گلخانه با استفاده از روش مبتنی بر بیلان آب و مقایسه آن با روش‌های تجربی

استفاده شده بود، از حالت‌های بدون مه‌پاش و روکش کمتر بود که این امر نشان‌دهنده لزوم استفاده از مه‌پاش و در صورت امکان استفاده از روکش بر روی بسترهای کشت می‌باشد. نتایج این پژوهش با مطالعه رقیب و همکاران (۱۳۹۲) که به بررسی اثر مه‌پاش و مواد کاهش‌دهنده تبخیر و تعرق بر زنده‌مانی و مواد موثره گیاه زیتون پرداختند و نتایج آن‌ها نشان داد که وجود مه‌پاش باعث کاهش میزان تبخیر و تعرق و علمکرد بالاتر زیتون می‌شود همخوانی دارد.

محاسبه تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی، نقش کلیدی در مدیریت منابع آب و کشاورزی پایدار دارد. تبخیر-تعرق برای تعیین نیاز آبی گیاهان، پیشگیری از خشکسالی، کنترل شوری خاک، و بهبود بهره‌وری آبی ضروری است. ضریب گیاهی، با تطبیق تبخیر-تعرق به مراحل رشد گیاه، امکان تعیین دقیق نیاز آبی هر گیاه را فراهم می‌کند و با کاهش هدررفت آب و هزینه‌های آبیاری، بهره‌وری محصولات کشاورزی را افزایش می‌دهد. این دو عامل چالش‌های اقلیمی و زیست‌محیطی هستند. عدم وجود لایسیمتر، میکرو لایسیمتر و یا تشت تبخیر در جهت آسان‌سازی اندازه‌گیری و همچنین عدم وجود دستگاه سنجش میزان تابش خورشیدی و استفاده داده‌های موجود در نشریه فائو ۵۶ محدودیت‌های انجام این مطالعه بودند. مطالعات آتی می‌تواند در ارتباط با اثر اقلیم‌های مختلف بر تبخیر و تعرق با توجه به وابستگی فلفل دلمه‌ای به شرایط اقلیمی و مقایسه جامع‌تر و دقیق‌تر روش‌های تجربی و مدل‌های فیزیکی در محیط‌های کنترل‌شده تمرکز داشته باشد.

گیری وزنی به طور متوسط به ترتیب ۳/۵۳ و ۵/۵۸ میلی-متر بر روز برآورد شد. همچنین میزان تبخیر و تعرق سالانه گیاه ۴/۵۳ میلی‌متر بر روز برآورد شد. نتایج این مطالعه با پژوهش (Mačkić et al (2023) که به ارزیابی عملکرد و تبخیر و تعرق برای فلفل دلمه‌ای با استفاده از لایسیمتر پرداختند و میزان تبخیر و تعرق را در ماه‌های ژوئن، جولای، آگوست و سپتامبر به ترتیب ۲/۵، ۴/۶، ۴/۰۶ و ۳/۲ برآورد کردند نسبتاً همخوانی دارد. برای مقایسه روش‌های تجربی با روش مبتنی بر بیلان آب برای ارزیابی تبخیر و تعرق مرجع از روش‌های فائو-پنمن-مانتیث و دروگرز-آلن استفاده شد و نتایج آن در محیط گلخانه و پیرامون آن برای این دو روش به ترتیب برابر با ۵/۱۵ و ۵/۰۵، ۴/۴۱ و ۳/۶۱، میلی‌متر در روز برآورد شد. نتایج نشان‌دهنده بیشترین شباهت روش فائو-پنمن-مانتیث با روش وزنی بود. این یافته پژوهش حاضر، با نتایج پژوهش ایبانه و همکاران (۱۳۹۰) که نشان دادند روش‌های با پایه پنمن بهترین روش‌های برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مناطق ایران می‌باشند همسو است. نتایج این مطالعه با Arya et al. (2017) که میزان تبخیر و تعرق فلفل دلمه‌ای را ۲/۱۱ میلی‌متر در روز برآورد کردند همخوانی ندارد و نیاز به اندازه‌گیری و ارزیابی در هر منطقه را نشان می‌دهد. همچنین یافته‌های این پژوهش با نتایج پژوهش پیری و پوزان (۱۳۹۸) که به ارزیابی و مقایسه ۲۴ مدل تبخیر و تعرق گیاه مرجع با روش فائو-پنمن-مانتیث در اقلیم‌های مختلف ایران پرداختند و بهترین روش برای اقلیم‌های نیمه مرطوب و مرطوب را دروگرز-آلن و مک‌کینگ به دست آوردند همخوانی دارد. به صورت کلی میزان تبخیر و تعرق و ضریب گیاهی در حالت‌هایی که از مه‌پاش و روکش

## منابع

- احمدی، ک.، عابدزاده، ح.، حاتمی، ف.، محمدنیا افروزی، ش.، عباس طالقانی، ر.، یاری، ش. و کلانتری، م. ۱۴۰۰. آمارنامه کشاورزی سال ۱۳۹۹، جلد سوم: محصولات باغبانی. وزارت جهاد کشاورزی، معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات. ۱۵۷ صفحه.
- مرجع اطلاعاتی گلخانه‌های ایران، سامانه جامع گلخانه‌های ایران، آمار گلخانه‌های سراسر ایران در سال ۱۴۰۰.
- عابدی کوپایی، جهانگیر، اسلامیان، و زارعیان. (۲۰۱۱). اندازه‌گیری و مدل‌سازی نیاز آبی و ضریب گیاهی خیار، گوجه‌فرنگی و فلفل با استفاده از میکرو لایسیمتر در گلخانه. مجله روابط خاک و گیاه، ۲(۳)، ۵۱-۶۴.



- فتحعلیان، نوری امامزاده‌ای. (۲۰۱۳). تعیین تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی خیار با استفاده از میکرو لایسیمتر در شرایط گلخانه. مجله روابط خاک و گیاه، ۳(۴)، ۱۲۵-۱۳۴.
- هاشمی نسب خبیصی، فریده السادات، موسوی بایگی، و بختیاری. (۲۰۱۵). اندازه‌گیری تبخیر - تعرق و برآورد مقاومتهای آئرو دینامیکی و سطحی گیاه دارویی همیشه‌بهار در اقلیم خشک. آب و هواشناسی کاربردی، ۲(۲)، ۸۳-۱۰۰.
- رضاوودی نژاد، شبانیان اصل، بشارت، سینا، حسنی، و عباس. (۲۰۱۷). تعیین نیاز آبی، ضریب گیاهی و کارایی مصرف آب محصولات خیار و گوجه‌فرنگی در شرایط گلخانه (مطالعه موردی: منطقه ارومیه). مجله روابط خاک و گیاه، ۸(۳)، ۲۷-۴۰.
- سلامتی، معیری، منصور، و عباسی. (۲۰۲۳). ارزیابی عملکرد و بهره‌وری آب کاربردی در سامانه‌های آبیاری سطحی و بارانی کلزا (مطالعه موردی بهبهان). علوم آب و خاک، ۲۷(۲)، ۱-۱۸.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 56(97): p.e156.
- Angaleeswari, M., Ravikumar, V. & Kannan, S.V. Evapotranspiration estimation by inverse soil water flow modelling. Irrig Sci 39, 633-649 (2021).
- Arya, C. K., Purohit, R. C., Dashora, L. K., Singh, P. K., & Kothari, M. (2017). Estimation of irrigation water requirement of drip irrigated bell pepper (*Capsicum annum* l. var. Grossum) in Jhalawar District of Rajasthan. Chemical science review and letters, 6(21), 225-230.
- Ávila-Dávila, L., Molina-Martínez, J. M., Bautista-Capetillo, C., Soler-Méndez, M., Robles Rovelo, C. O., Júnez-Ferreira, H. E., & González-Trinidad, J. (2021). Estimation of the evapotranspiration and crop coefficients of bell pepper using a removable weighing lysimeter: A case study in the southeast of Spain. Sustainability, 13(2), 747.
- Baille, A. (1996). Principles and methods for predicting crop water requirement in greenhouse environments. Cahier Options Méditerranéennes, 31, 177-187.
- Fazlil-Ilahil, W. F. (2009). Evapotranspiration models in greenhouse. MSc, Wageningen agricultural University, Wageningen, Netherlands.
- Gerosa, G. (Ed.). (2011). Evapotranspiration - From Measurements to Agricultural and Environmental Applications. InTech. doi: 10.5772/991.
- Heinzel, M. (2022). International Bureaucrats and Organizational Performance. Country-Specific Knowledge and Sectoral Knowledge in World Bank Projects. International Studies Quarterly, 66(2), sqac013.
- Itier, B. (1996). Measurement and Estimation of Evapotranspiration. In: Pereira, L.S., Feddes, R.A., Gilley, J.R., Lesaffre, B. (eds) Sustainability of Irrigated Agriculture. NATO ASI Series, vol 312. Springer, Dordrecht.
- Khafajeh, H., Banakar, A., Minaei, S., & Delavar, M. (2020). Evaluation of AquaCrop model of cucumber under greenhouse cultivation. The Journal of Agricultural Science, 158(10), 845-854.
- Lorenzoni, M. Z., Rezende, R., Santos, F. A., de Souza, Á. H., Seron, C. D. C., & do Nascimento, J. M. (2019). Estimation of the crop coefficient (kc) for bell pepper under greenhouse conditions. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 23, 741-746.
- Mpusia, P. T. O. (2006, March). Comparison of water consumption between greenhouse and outdoor cultivation. Enschede: ITC.
- Muniandy, J. M., Yusop, Z., & Askari, M. (2016). Evaluation of reference evapotranspiration models and determination of crop coefficient for *Momordica charantia* and *Capsicum annum* Agricultural Water Management, 169, 77-89.
- Nikolaou, G., Neocleous, D., Christou, A., Kitta, E., & Katsoulas, N. (2020). Implementing sustainable irrigation in water-scarce regions under the impact of climate change. Agronomy, 10(8), 1120.
- Orgaz F., Fernández M. D., Bonachela S., Gallardo M. and Fereres, E. 2005. Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. Agricultural Water Management. Vol. 72, No. 2: 81-96.



Öztürk, H. H. (2003). Evaporative cooling efficiency of a fogging system for greenhouses. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 27(1), 49-57.

Rahimikhoob, H., Sohrabi, T. & Delshad, M. Assessment of reference evapotranspiration estimation methods in controlled greenhouse conditions. *Irrig Sci* 38, 389–400 (2020).

Raphael, O. D., Ogedengbe, K., Fasinmirin, J. T., Okunade, D., Akande, I., & Gbadamosi, A. (2018). Growth-stage-specific crop coefficient and consumptive use of *Capsicum chinense* using hydraulic weighing lysimeter. *Agricultural water management*, 203, 179-185.

Stanghellini, C. (1987). *Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management*. Wageningen University and Research.

Shukla, S., Jaber, F. H., Goswami, D., & Srivastava, S. (2013). Evapotranspiration losses for pepper under plastic mulch and shallow water table conditions. *Irrigation Science*, 31, 523-536.

World Bank. 2022a. Arable land (hectares per person) - Iran, Islamic Rep. <https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.ARB>.

World Bank. 2022b. Arable land (hectares per person) - Iran, Islamic Rep. <https://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.INTR>.

Yan, H., Acquah, S. J., Zhang, C., Wang, G., Huang, S., Zhang, H. and Wu, H. 2019. Energy partitioning of greenhouse cucumber based on the application of Penman-Monteith and Bulk Transfer models. *Agricultural Water Management*. 217: 201-211.