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

Determining the Water Requirement and Applied Water of Bell Pepper in the Greenhouse and Comparing It with the Results of the Water Requirement System

Mohmmad Saeed Jafari[1], Arash Tafteh[2]✉, Niazali Ebrahimipak[3]

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: m.saeedjafari@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Irrigation and Soil Physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. Email: arash_tafteh@yahoo.com
3. Department of Irrigation and Soil Physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. Email: nebrahimipak@yahoo.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: July. 19, 2022

Revised: Sep. 6, 2022

Accepted: Sep. 13, 2022

Published online: Oct. 23, 2022

Keywords:
Deficit irrigation,
Fertigation,
Fertilizer requirement,
Greenhouse,
Pepper,
Soil salinity.

ABSTRACT

One of the important goals of the development of greenhouses in the country is to improve production efficiency and increase water and fertilizer efficiency. Bell pepper is also one of the most important greenhouse products around the world and has a high economic value. This research was carried out to provide irrigation and fert fertigation scheduling for greenhouse peppers through monitoring soil moisture and salinity in the root zone in 1400 in Alborz province, Chaharbagh city. The treatments include three irrigation treatments I1, I2 and I3 (100, 80 and 60% of the plant's water requirement) and three fertigation treatments F1, F2 and F3 (150, 100 and 50% of the plant's fertilizer requirement, respectively) in the form of a randomized complete block design in three replications. The total amount of irrigation measured for treatments I1, I2 and I3 was 397, 318 and 238 mm, respectively. The irrigation requirement values simulated by the irrigation requirement system of agricultural and garden plants were compared with the measured values, and the statistical indices RMSE, NRMSE, MBE, d and EF were calculated to be 38.55, 0.21, and -21.1, 0.99 and 0.95 respectively. The results showed that the effect of irrigation, fertigation and their mutual effect on the yield of greenhouse pepper was significant. The maximum yield of pepper in the I1F1 treatment was 114.38 tons/ha and the minimum in the I3F1 treatment was 40.96 tons/ha. Also, the maximum water productivity in the I2F2 treatment was 31.05 kg/m3 and the minimum in the I3F1 treatment was 17.19 kg/m3. Although the maximum yield was obtained in the I1F1 treatment, the maximum water productivity was obtained in the I2F2 treatment, and the product yield was not significantly different in these two treatments. The general conclusion shows that 20% deficit irrigation is recommended by monitoring the moisture of the root zone in greenhouse pepper production, but the fertilizer should be controlled by monitoring the salinity of the root zone.

Cite this article: Jafari, M.S., Tafteh, A., & Ebrahimipak, N. (2022). Determining the water requirement and Applied water of bell pepper in the greenhouse and comparing it with the results of the water requirement system. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (8), 1831-1848.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: http//doi.org/10.22059/ijswr.2022.345968.669321

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۳، شماره ۸ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

تعیین نیاز آبی و آب کاربردی فلفل‌دلمه‌ای در گلخانه و مقایسه آن با نتایج سامانه نیاز آب

محمد سعید جعفری[۱]، آرش تافته[۲]✉، نیاز علی ابراهیمی پاک[۳]

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. ایمیل: m.saeedjafari@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، بخش تحقیقات آبیاری و فیزیک خاک، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. ایمیل: arash_tafteh@yahoo.com

۳. بخش تحقیقات آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. ایمیل: nebrahimipak@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۴/۲۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۶/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۲۲
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۸/۱

واژه‌های کلیدی:
فلفل،
کم آبیاری،
کودآبیاری،
گلخانه،
شوری خاک،
نیاز کودی.

چکیده

یکی از اهداف مهم توسعه گلخانه‌ها در کشور ارتقای بهره‌وری تولید و بالابردن بهره‌وری آب و کود است. فلفل‌دلمه‌ای نیز از مهم‌ترین محصولات گلخانه‌ای در سراسر جهان بوده و دارای ارزش اقتصادی بالایی است. این پژوهش به‌منظور ارائه برنامه‌ریزی آبیاری و کودآبیاری برای فلفل گلخانه‌ای از طریق پایش رطوبت و شوری خاک ناحیه ریشه، در سال ۱۴۰۰ در استان البرز شهرستان چهارباغ انجام شد. برای این منظور سه تیمار آبیاری I1، I2 و I3 (۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه) و سه تیمار کودآبیاری F1، F2 و F3 (۱۵۰، ۱۰۰ و ۵۰ درصد نیاز کودی گیاه) در قالب طرح بلوک کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. مجموع آبیاری اندازه‌گیری شده برای تیمارهای I1، I2 و I3 به ترتیب برابر ۳۹۷، ۳۱۸ و ۲۳۸ میلیمتر بود. مقادیر نیاز آبیاری شبیه‌سازی‌شده توسط سامانه نیاز آبیاری گیاهان زراعی و باغی با مقادیر اندازه‌گیری شده مورد مقایسه قرار گرفت و شاخص‌های آماری RMSE، NRMSE، MBE، D و EF به ترتیب برابر ۳۸/۵۵، ۰/۲۱، ۲۱/۱-، ۰/۹۹ و ۰/۹۵ به دست آمد. نتایج نشان داد تأثیر تیمار آبیاری، کودآبیاری و اثر متقابل آنها بر عملکرد فلفل گلخانه‌ای معنادار بود. حداکثر عملکرد فلفل در تیمار I1F1 برابر ۱۱۴/۳۸ تن بر هکتار و حداقل آن در تیمار I3F1 برابر ۴۰/۹۶ تن بر هکتار به دست آمد. همچنین حداکثر بهره‌وری آب در تیمار I2F2 برابر ۳۱/۰۵ کیلوگرم بر مترمکعب و حداقل آن در تیمار I3F1 برابر ۱۷/۱۹ کیلوگرم بر مترمکعب رخ داد. گرچه بهترین عملکرد در تیمار I1F1 به دست آمد؛ اما بهترین بهره‌وری آب در تیمار I2F2 حاصل شد و عملکرد محصول در این دو تیمار تفاوت معناداری نداشت. نتیجه‌گیری کلی نشان می‌دهد که کم آبیاری ۲۰ درصد با پایش رطوبت ناحیه ریشه در تولید فلفل گلخانه‌ای توصیه می‌شود اما مصرف کود باید با پایش شوری ناحیه ریشه کنترل شود.

استناد: جعفری، محمدسعید؛ تافته، آرش؛ ابراهیمی پاک، نیازعلی. (۱۴۰۱). تعیین نیاز آبی و آب کاربردی فلفل‌دلمه‌ای در گلخانه و مقایسه آن با نتایج سامانه نیاز آب. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۸)، ۱۸۴۸-۱۸۳۱.

DOI: http//doi.org/10.22059/ijswr.2022.345968.669321

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

مقدمه

فلفل‌دلمه‌ای یکی از مهم‌ترین محصولات گلخانه‌ای در سراسر جهان است و دارای ارزش اقتصادی بالایی است. سطح زیر کشت فلفل در سال ۲۰۱۷ تقریباً دو میلیون هکتار بود که منجر به تولید حدود ۳۶ میلیون تن شد. چین بزرگ‌ترین تولیدکننده فلفل در جهان است و پس از آن مکزیک و ترکیه قرار دارند. در اروپا، اسپانیا، ایتالیا و رومانی تولیدکنندگان اصلی هستند و اسپانیا پس از مکزیک دومین صادرکننده فلفل است (FAOSTAT, 2018). بررسی‌ها نشان می‌دهد کـه ۸۸ درصد از سطح زیر کشت محصولات گلخانه‌ای به خیـار، هشت درصـد بـه گوجه‌فرنگی و چهار درصد به فلفل اختصـاص دارد (Sajadi *et al.*, 2017). فلفل سبز یک محصول مهم کشاورزی است که نه‌تنها به‌خاطر ارزش اقتصادی بلکه به‌خاطر ارزش میوه‌های آن و همچنـین منبـع عالی رنگ‌های طبیعی و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی بسیار موردتوجه قرار گرفته است (Heydari *et al.*, 2007).

لازم به ذکر است که ۸۰ درصد کشاورزی در بستر خاک و بقیه در سایر بسترهای کشت است. درکشت خاکی معمولاً از آبیاری قطره‌ای و سامانه‌های کودآبیاری خودکار که نیتروژن و سایر عناصر غذایی را هر یک تا سه روز یک‌بار تزریق می‌کنند استفاده می‌شود (Thompson *et al.*, 2007; Céspedes *et al.*, 2009). آبیاری قطره‌ای با دفعات زیاد با استفاده از غلظت‌های مشخص‌شده نیتروژن و سایر کودها در تمام آبیاری‌ها، به کشاورزان کمک می‌کند تا نیاز آبیاری و کودی گیاه را به‌دقت فراهم کند. کودآبیاری یکی از اصلی‌ترین فناوری‌ها در بخش تولید سبزی‌ها به‌ویژه در سبزی‌های میوه‌دار و کشت گلخانه‌ای است. پتاسیم (K) و نیتروژن (N) ازجمله عناصر غذایی پرمصرفی هستند که توسط گیاه فلفل جذب می‌شود (Marcussi *et al.*, 2004; Fontes *et al.*, 2005)، همچنین از عناصری هستند که به طور عمده از طریق کودآبیاری اعمال می‌شوند. به طور معمول برای دستیابی به عملکرد بالا در کشاورزی، مقادیر بیش‌ازحد کود استفاده می‌شود که منجر به هدررفتن کودها و افزایش شوری خاک و همچنین سبب هزینه‌های بالای تولید می‌شود (de Oliveira *et al.*, 2013). ازاین‌رو، کودآبیاری باید برای کنترل غلظت مناسب یون‌های محلول در آب خاک مدیریت شود. اخیراً، مطالعات مختلفی با استفاده از پایش غلظت محلول خاک از طریق پایش شوری خاک به روش هدایت الکتریکی (Medeiros & Duarte, 2012; da Silva *et al.*, 2013) یا پایش غلظت یون‌های خاص، به‌ویژه نیتروژن و پتاسیم (de Oliveira *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2015) انجام‌شده است و نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این فناوری بهبوددهنده است.

یکی از اهداف مهم توسعه گلخانه‌ها ارتقای بهره‌وری تولید و بالابردن بهره‌وری آب و کود است. برای مقادیر مشابه تولید، آب موردنیاز گیاهان در گلخانه‌ها به طور قابل‌توجهی کمتر از کشت باز است (FAO, 1991). بنابراین، محصولات گلخانه‌ای دارای بهره‌وری آب بسیار بالاتری هستند. برای تحقق افزایش بهره‌وری آب و کود که از اصلی‌ترین اهداف توسعه گلخانه‌ها در کشور است ضروری است برنامه‌ریزی آبیاری و کودآبیاری مناسب برای ارقام تجاری مرسوم در نقاط مختلف کشور تعیین گردد. افزایش بهره‌وری آب اصولاً از دو طریق امکان‌پذیر است، تثبیت سطح تولید محصول توأم با کاهش آب مصرفی و افزایش عملکرد محصول در واحد سطح. استفاده از روش‌های کم‌آبیاری و مدیریت صحیح کودآبیاری متناسب با آن درکشت گلخانه‌ای به‌منظور افزایش بهره‌وری آب امری اجتناب‌ناپذیر است.

دوره رشد فلفل به چهار مرحله تقسیم می‌شود. (۱) دوره رشد اولیه، از انتقال نشا تا استقرار گیاه، (۲) دوره رشد رویشی، از استقرار تا اوایل تشکیل میوه، (۳) اوایل تشکیل میوه و رشد زایشی تا زمان اولین برداشت و (۴) دوره برداشت که دوره برداشت تا انتهای فصل رشد ادامه می‌یابد. نتایج تحقیقات روی فلفل گلخانه‌ای نشان داد استراتژی آبیاری کامل، سودآورترین استراتژی فلفل بوده است (Jaimez *et al.*, 2000; Delfine *et al.*, 2001; Antony & Singandhupe, 2004; Gençoğlan *et al.*, 2006; Demirtas & Ayas, 2009; Ismail, 2012; Nagaz *et al.*, 2012; Sezen *et al.*, 2015, 2016; Koksal *et al.*, 2017; Santos *et al.*, 2020; de Almeida *et al.*, 2022). نتایج برخی تحقیقات روی گیاه فلفل نشان داد که این گیاه در طول دوره گلدهی و رشد میوه، به تنش آبی حساس بوده و تنش آبی معمولاً باعث سقط‌جنین گل و درنتیجه کاهش تعداد میوه می‌گردد (Katerji *et al.*, 1992; Jaimez *et al.*, 2000; Fernández *et al.*, 2005). همچنین تنش آبی باعث تفاوت معنی‌داری در وزن خشک و تر اندام هوایی گیاه فلفل می‌شود (Fernández *et al.*, 2005; Gençoğlan *et al.*, 2006; Abdelkhalik *et al.*, 2020). تنش آبی علاوه بر سقط‌جنین گل و کاهش تعداد میوه، باعث ایجاد میوه‌های کوچک‌تر و تغییر در شکل ظاهری و عدم بازارپسندی آن می‌گردد (Dalla Costa & Gianquinto, 2002; Fernández *et al.*, 2005; Khan *et al.*, 2008; Abdelkhalik *et al.*, 2020). تنش رطوبتی بیش از ۲۰ درصد نیاز آبی گیاه فلفل، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی روی ویژگی‌های اندام‌های هوایی و زمینی گیاه فلفل ایجاد کند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که کاهش آب مصرفی گیاه فلفل به‌عنوان راه‌حلی به‌منظور صرفه‌جویی در هزینه و میزان کاربرد آب، می‌تواند تا ۲۰ درصد نیاز آبی گیاه منظور گردد (Celebi,

2018; Fernández *et al*., 2005; Owusu-Sekyere *et al*., 2010; Tabatabayi *et al*., 2014; Wang *et al*., 2022).

تحقیقات کودآبیاری فلفل نشان داد، کودآبیاری کنترل‌شده، عملکرد و بهره‌وری آب فلفل را افزایش می‌دهد (Lodhi *et al*., 2014; Sezen *et al*., 2015) همچنین تعیین دقیق مقدار کودها درعین‌حال که باعث کاهش هزینه‌های تولید می‌شود می‌تواند عملکرد بالای فلفل را تضمین کند (del Amor & Gómez-López, 2009). در بررسی سه مدیریت کودآبیاری بر اساس (۱) پایش شوری محلول خاک، (۲) پایش غلظت عناصر نیتروژن و پتاسیم در محلول خاک و (۳) بدون کنترل صرفاً بر اساس برنامه ازپیش‌تعیین‌شده، با مقادیر مختلف نیتروژن و پتاسیم که برای فلفل انجام شد نتایج نشان داد در تیمار تأمین ۵۰ درصد نیاز کودی روش پایش شوری بهترین عملکرد را داشته است اما در مقادیر بالاتر کوددهی، بین روش پایش شوری و پایش غلظت عناصر تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (Nunes Júnior *et al*. 2017). پژوهشگران نتایج مشابهی در مورد گوجه‌فرنگی (Medeiros & Duarte, 2012; da Silva *et al*., 2013) و بادمجان (da Silva *et al*., 2013) گزارش کردند. نتایج آن‌ها نشان داد این مدیریت به افزایش تعداد میوه در هر بوته منجر شد. از سوی دیگر کاهش تعداد میوه ناشی از تیمار کودآبیاری با حداکثر مقادیر نیتروژن و پتاسیم بدون پایش محلول خاک می‌تواند ناشی از گلریزی ناشی از افزایش شوری خاک باشد (Leonardo *et al*., 2008).

فلفل گیاهی حساس به تنش خشکی و نیمه حساس به تنش شوری است. (Rubio *et al*., 2010) گزارش کردند عملکرد میوه و بایومس فلفل در مقایسه شاهد (شوری ۲/۶ دسی زیمنس بر متر) و تیمار شورتر (۴/۶ دسی زیمنس بر متر)، کاهش یافت و تنش شوری اثر منفی معنی‌داری بر رشد و بایومس گیاه فلفل داشت. افزایش سطوح مختلف شوری سبب کاهش ارزش اقتصادی میوه فلفل با کم‌شدن تعداد گل‌های کامل و میوه‌ها می‌شود (Grattan & Grieve, 1998). به نظر می‌رسد کاهش سطح برگ و رشد سایر اندام‌های گیاهی در اثر افزایش شوری به علت تغییر میزان هورمون رشد نیز باشد (Mane *et al*., 2011). نتایج بررسی تأثیر سطوح مختلف تنش شوری بر خصوصیات کیفی و عملکرد فلفل در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد نشان داد که تنش شوری در سطح احتمال ۱ درصد بر طول میوه، قطر میوه، طول ریشه، حجم ریشه، وزن تر و خشک ریشه، بوته اثر معنی‌داری نداشت و شیب کاهش عملکرد به‌ازای هر واحد افزایش شوری نسبت به آستانه تحمل فلفل (۱/۵ دسی زیمنس بر متر) ۱۰ درصد به دست آمد. نتایج نشان داد که فلفل در گلخانه نسبت به تنش شوری نسبتاً حساس است (Salarian *et al*., 2014). Fallik *et al*., (2019) گزارش کردند عملکرد فلفل با افزایش شوری آب کاهش یافت و شوری ۴/۵ دسی زیمنس بر متر باعث کاهش ۳۰ تا ۳۵ درصدی عملکرد صادراتی شد. همچنین آبیاری با شوری ۲/۸ دسی زیمنس بر متر باعث کاهش استحکام محصول و افزایش قند آن شد.

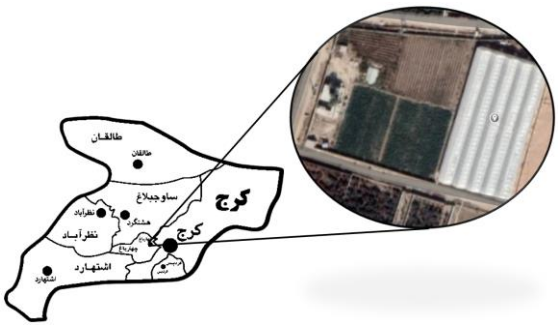
برای بهینه‌سازی تولید و سودآوری فلفل و اطمینان از استفاده کارآمد از منابع محدود آب، نیاز به اطلاعات جامع در مورد مصرف آب و کود توسط فلفل وجود دارد. نتایج به‌دست‌آمده در مطالعات مختلف و نبود تحقیقات بومی در ایران، اهمیت تحقیقات بیشتر در مورد برنامه غذایی تولید گیاهان را نشان می‌دهد، زیرا تأمین آب و کودهای موردنیاز گیاه به شکلی که منجر به تنش آبی و افزایش بیش از حد شوری (هدایت الکتریکی) خاک یا بستر نشود و تعادل بهینه بین تأمین آب، عناصر غذایی و شوری خاک ایجاد کند از اهمیت اساسی برخوردار است (Albuquerque *et al*., 2011).

باتوجه‌به تأثیر برنامه‌ریزی آبیاری، برنامه‌ریزی کودآبیاری و شوری محیط خاک بر عملکرد و شاخص‌های عملکرد فلفل‌دلمه‌ای و اثرپذیری آبیاری، کودآبیاری و شوری خاک از یکدیگر، ضروری است مطالعه‌ای جهت ارائه برنامه‌ریزی آبیاری و کودآبیاری قطره‌ای برای فلفل بر پایه پایش مداوم رطوبت و شوری در طول فصل رشد در گلخانه صورت گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

این پژوهش در استان البرز شهرستان چهارباغ تحت شرایط گلخانه انجام شد. گلخانه در موقعیت جغرافیایی با طول جغرافیایی ′۷۹ °۵۰ شرقی، عرض جغرافیایی ′۸۴ °۳۵ شمالی و ارتفاع ۱۲۶۰ متر از سطح دریا قرار داشت (شکل ۱). بر اساس آمار بلندمدت ایستگاه هواشناسی کرج، میانگین بارندگی سالیانه ۲۴۷/۳ میلی‌متر، میانگین سالیانه دمای هوا ۱۴/۴ درجه سانتی‌گراد، گرم‌ترین ماه، تیرماه با میانگین ۳۴/۶ درجه سانتی‌گراد و سردترین ماه، بهمن‌ماه با میانگین ۲/۹- درجه سانتی‌گراد بود. این منطقه با میانگین رطوبت نسبی ۵۳ درصد، میانگین سالیانه جمع ساعات آفتابی ۲۸۹۹ ساعت و تبخیر سالانه ۲۱۸۴ میلی‌متر، دارای اقلیم نیمه‌خشک با زمستان نسبتاً سرد و تابستان نسبتاً معتدل گزارش شد. سرعت متوسط باد روزانه ۲/۲ متر بر ثانیه و جهت غالب آن شمال غرب به جنوب شرق بود.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی گلخانه

محل انجام طرح از ۱۰ گلخانه به‌هم‌پیوسته به طول ۴۸ متر با عرض دهانه ۱۰ متر تشکیل شده بود. باتوجه‌به تراکم کشت فلفل (۲ تا ۳ بوته در مترمربع) هر دهانه ۱۰ متری به ۶ پشته به عرض ۷۵ سانتیمتر و فاصله ۱/۶۵ (مرکز تا مرکز پشته‌ها) تقسیم شد. در هر پشته دو ردیف فلفل به فاصله ۶۰ سانتی‌متر از هم کشت شد.

ویژگی‌های خاک و آب

برای اطلاع از شرایط خاک نیاز بود تا عمقی که احتمال نفوذ ریشه وجود دارد نمونه‌برداری صورت گیرد. باتوجه‌به اینکه فلفل دارای ریشه سطحی است از دو عمق ۰-۲۰ و ۲۰-۴۰ سانتی‌متر به‌صورت تصادفی از چند نقطه از محل طرح، نمونه خاک تهیه و باهم مخلوط شد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت خاک (درصد اندازه ذرات)، ماده آلی، شوری، pH، عناصر ماکرو به شرح جدول ۱ گزارش شد.

جدول ۱: نتایج آزمایش خاک

پارامتر	واحد	عمق نمونه خاک (سانتی‌متر) ۰-۲۰	عمق نمونه خاک (سانتی‌متر) ۲۰-۴۰
بافت خاک	–	لوم رسی	لوم رسی
برآورد ازت آزاد شده در فصل رشد	$kg.ha^{-1}$	۴۳/۷۴	۴۵/۲
فسفر قابل‌استفاده	p.p.m	۳۵/۸	۳۱/۳
پتاسیم قابل‌استفاده	p.p.m	۴۱۹/۲	۵۰۴/۲
آهن	$mg.kg^{-1}$	۶/۸	۵/۲
منگنز	$mg.kg^{-1}$	۹	۶/۵
مس	$mg.kg^{-1}$	۲	۱/۶۲
روی	$mg.kg^{-1}$	۱/۳۶	۱/۵۲
درصد ماده آلی	%	۳/۵	۱/۴۶
اسیدیته	–	۷/۴۳	۷/۶
شوری	$dS.m^{-1}$	۳/۴۶	۳/۱

برای تعیین چگالی ظاهری خاک، سه نمونه دست‌نخورده از عمق ۲۰ سانتی‌متر خاک محل انجام طرح تهیه و در آزمایشگاه، چگالی ظاهری به طور متوسط برابر ۱/۱۶ گرم بر سانتی مترمکعب و درصد رطوبت حجمی نقطه ظرفیت زراعی به طور متوسط برابر ۳۵/۶۳ سانتی متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد. تأمین آب از طریق حقابه از چاه عمیق صورت گرفت و کیفیت آب در طول فصل رشد ثابت بود و آب از نظر شوری مطلوب و باکیفیت گزارش شد (جدول ۲).

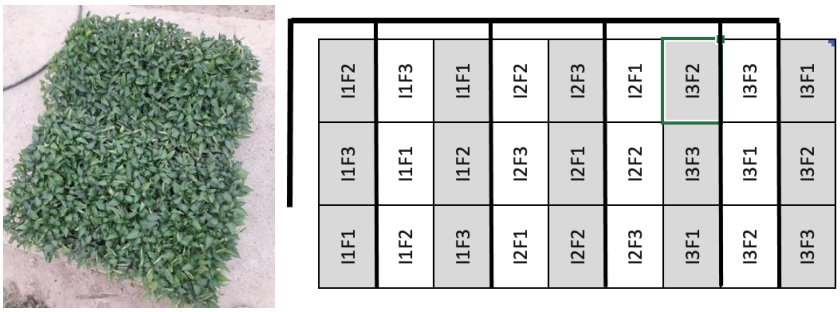
جدول ۲: مشخصات شیمیایی آب چاه

شوری	اسیدیته	سدیم	کلسیم	منیزیم	بی‌کربنات	کربنات	کلر	سولفات	نسبت سدیم قابل جذب
$dS.m^{-1}$		$meq.L^{-1}$	$meq.L^{-1}$	$meq.L^{-1}$	$meq.L^{-1}$	$meq.L^{-1}$	$meq.L^{-1}$	$meq.L^{-1}$	–
۰/۳۹۴	۷/۹۹	۱/۵	۱/۵	۱/۲	۲/۸	۰	۰/۴	۱	۱/۲۹

آبیاری و اعمال تیمار

باتوجه‌به آرایش پشته‌های کشت، نوارهای پلاک‌دار آبیاری (پلاک‌های آبده به فاصله ۲۰ سانتی‌متر با دبی ۲/۱ لیتر بر ساعت، معادل ۱۰/۵ لیتر بر ساعت بر متر) به‌صورت هر ردیف یک نوار آبیاری اجرا شد. برای مدیریت حجم آبیاری و کودآبیاری مخصوص هر تیمار، ابتدای خط آبده یک عدد کنتور آب حجمی ۱ اینچ با دقت اندازه‌گیری R160 و ابتدای نوارهای آبیاری شیر قطع و وصل نصب شد.

بذر فلفل‌دلمه‌ای رنگی از شرکت سپاهان رویش نماینده رسمی شرکت رکزوان هلند تهیه و در تاریخ ۱۳ اردیبهشت‌ماه در گلخانه نشا بذرریزی شد. انتقال نشا به گلخانه اصلی ابتدای تیرماه انجام شد. شکل (۲) آرایش کشت و محل قرارگیری تیمارها و تکرارهای مختلف را نشان می‌دهد. تیمارها شامل سه تیمار آبیاری ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز مصرفی گیاه (به ترتیب I_1، I_2 و I_3) و سه تیمار کودآبیاری ۱۵۰، ۱۰۰ و ۵۰ درصد برنامه کودی (به ترتیب F_1، F_2 و F_3) در قالب طرح بلوک کامل تصادفی در سه تکرار بود. کودهای مورداستفاده شامل نیترات پتاسیم، سولفات پتاسیم، نیترات کلسیم و مونو پتاسیم فسفات بود و جهت تأمین عناصر ریزمغذی از محلول‌پاشی دوره‌ای انجام شد. طرح در بخشی از گلخانه به مساحت حدود ۱۰۰ مترمربع انجام شد. ۹ تیمار به همراه ۳ تکرار مجموعاً ۲۷ کرت را شامل شد. هر کرت به مساحت ۳/۳ مترمربع شامل ۱۰ بوته بود. پس از گذشت یک هفته از کشت نشا، واکاری جهت جایگزینی نشاهای تلف شده صورت گرفت.



شکل ۲: نمایی از چیدمان تیمارها

اندازه‌گیری‌ها

حجم آبیاری کل طرح به کمک یک کنتور حجمی یک اینچ و مقدار آبیاری هر تیمار به‌صورت جداگانه از طریق شیرهای قطع و وصل نوارهای آبیاری کنترل شد (شکل ۳).

شکل ۳: کنتور آب حجمی (سمت راست) و نمایی از کرت‌های آزمایشی و شیرهای قطع و وصل هر نوار آبیاری (سمت چپ)

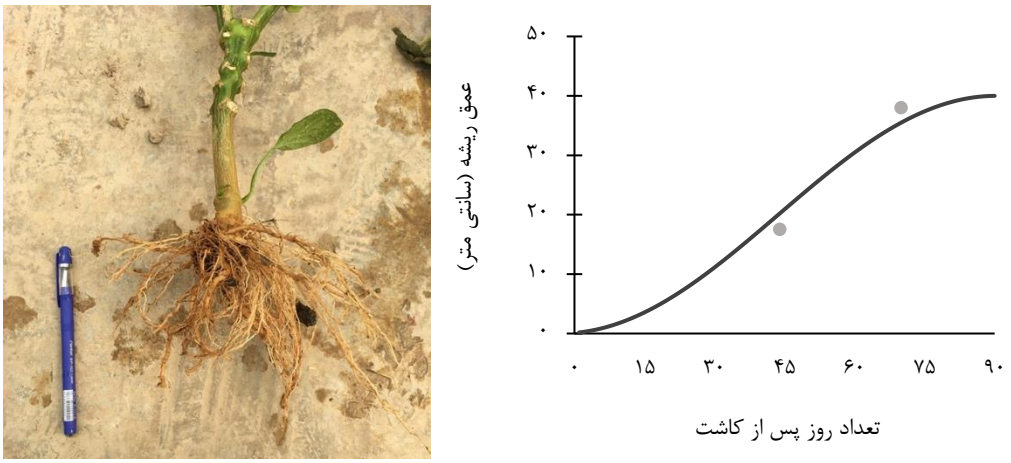
در هنگام کاشت، رطوبت تا عمق ۱۰ سانتی‌متر به میزان لازم جهت رسیدن به نقطه ظرفیت زراعی آبیاری شد. پس از آن به مدت ۲ هفته جهت اطمینان از استقرار نشاهای کشت شده و واکارشده و جلوگیری از هرگونه تنش به نشاها، آبیاری به‌صورت یک روز در میان انجام شد. پس از گذشت ۳ هفته از تاریخ کاشت و استقرار کامل بوته‌ها باتوجه‌به قرار داشتن در فصل تابستان و تبخیر–تعرق بالا، دور آبیاری ۳ روز اعمال شد، سپس با کاهش دما و ورود به فصل پاییز دور آبیاری به ۶ روز افزایش یافت. آبیاری بر اساس پایش رطوبت خاک در ناحیه ریشه گیاه در تیمارهای با آبیاری کامل صورت گرفت. بدین منظور قبل از آبیاری از محل توسعه ریشه نمونه تهیه شده و مقدار

رطوبت آن در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد.

برای تعیین عمق ناحیه ریشه (عمق نمونه‌برداری خاک) جهت پایش رطوبت خاک از معادله بورگ و گریمز (Borg & Grimes, 1986) به شکل زیر استفاده شد:

رابطه ۱)
$$Z_r = R_{DM}(0.5 + 0.5\sin\left(\frac{3.03D_{AS}}{D_{TM}}\text{-}1.47\right))$$

در رابطه (۳)، Z_r عمق ناحیه ریشه، R_{DM} حداکثر عمق موثر ریشه گیاه مورد نظر، D_{AS} تعداد روزهای گذشته از زمان کاشت و D_{TM} تعداد روز لازم برای رسیدن به حداکثر عمق موثر ریشه گیاه از زمان کاشت است. حداکثر عمق ریشه موثر برای فلفل دلمه گلخانه‌ای ۴۰ سانتیمتر است و حدود ۹۰ روز پس از کاشت بذر به حداکثر عمق ریشه رسید (شکل ۵).



شکل ٤: نمودار رشد ریشه فلفل و نمونه ریشه اندازه‌گیری شده

در ادامه تبخیر–تعرق گیاه از طریق بیلان آب خاک با استفاده از رابطه (۲) تعیین شد (James, 1988):

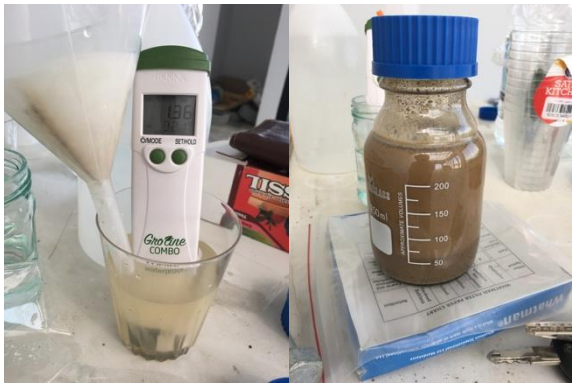
رابطه ۲)
$$ET = I + P + Cr - Dp - Rf \pm \Delta\theta$$

در این معادله ET تبخیر–تعرق گیاه (میلی‌متر)، I مقدار آب آبیاری (میلی‌متر)، P بارندگی مؤثر (میلی‌متر)، Cr صعود موئینه (میلی متر)، Dp نفوذ عمقی (میلی‌متر)، Rf رواناب (میلی‌متر) و $\Delta\theta$ تغییرات رطوبت خاک در یک بازه زمانی مشخص در ناحیه ریشه گیاه است. در این پژوهش بارندگی به دلیل شرایط گلخانه‌ای وجود نداشت. همچنین از صعود موئینه به دلیل پایین بودن سطح آب زیرزمینی در منطقه و از رواناب و نفوذ عمقی به دلیل آبیاری دقیق با سیستم آبیاری قطره ای، صرف‌نظر شد. با اعمال تغییرات فوق، رابطه بیلان آب خاک به شکل زیر درآمد:

رابطه ۳)
$$ET = I \pm \Delta\theta$$

باتوجه‌به رطوبت اندازه‌گیری شده قبل از آبیاری و رطوبت ظرفیت زراعی، میزان آب آبیاری موردنیاز در تیمارهای آبیاری کامل (I_1) تعیین شد. با گذشت حدود ۴۵ روز از کاشت نشا در گلخانه اصلی، کم آبیاری برای تیمارهای آبیاری ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی (به ترتیب I_2 و I_3) آغاز شد و در آبیاری آنها به ترتیب ۲۰ و ۴۰ درصد از عمق آبیاری کامل کاسته شد.

شوری خاک هر یک ماه یکبار به روش تهیه عصاره ۱:۲ که برای گلخانه‌های خاکی توصیه شده است (Sonneveld & Voogt, 2009)، اندازه‌گیری شد. نمونه‌برداری بر اساس میزان توسعه ریشه، از سطح خاک تا عمق ریشه توسط آگر انجام شد. در این روش ابتدا به خاکی که در شرایط رطوبتی حد ظرفیت زراعی قرار دارد به نسبت دوبرابر حجم آن، آب مقطر اضافه شد. سپس محلول به‌دست‌آمده به مدت ۲۰ دقیقه هم زده شد و در نهایت از کاغذ صافی عبور داده شد (Sonneveld, 1990). شوری عصاره به‌دست‌آمده به کمک دستگاه اندازه‌گیری شوری پرتابل هانا مدل HI98131 اندازه‌گیری شد (شکل ۷).



شکل ۵: نمایی از نمونه‌های خاک و نحوه آماده‌سازی و اندازه‌گیری شوری به روش عصاره ۱:۲

هرس بوته فلفل

پس از گذشت حدود ۴۵ روز از کاشت نشا و نمایان شدن شاخه‌های بارده در فلفل، در هر بوته دو شاخه اصلی قوی انتخاب و سایر شاخه‌ها هرس شدند. سپس دو عدد نخ برای هر بوته که هرکدام یک شاخه را نگه می‌دارند به کمک گیره مخصوص نخ بوته به ساقه اصلی متصل شدند. در هرس‌های بعدی علاوه بر هرس برگ، هرس گل نیز انجام شد. در هرس دوم، گل بین دو شاخه اصلی (Crown flower) و گل‌های گره اول در هر شاخه اصلی به جهت کمک به رشد رویشی بهتر و اجتناب از ورود سریع به فاز زایشی هرس شد و شاخه‌ها به‌صورت ساعت‌گرد دور نخ نگه دارنده تابیده شدند. در هرس سوم به بعد در هر شاخه اصلی از گره‌های دوم به بعد در هر گره یک گل روی شاخه اصلی نگه داشته شد و گل‌های شاخه فرعی آن گره هرس شدند. در صورت عدم تشکیل گل روی شاخه اصلی در هر گره، اولین گل روی شاخه فرعی آن گره نگه داشته شد و مابقی گل‌ها هرس شد. همچنین تمام شاخه‌های فرعی هر گره، از گره اول خودشان سر برداری شدند تا از رشد شاخه فرعی جلوگیری شود (شکل ۸).

شکل ٦: نمایی از بستن دو نخ با کمک گیره نخ بوته به ساقه اصلی و پیچیدن هر شاخه دور یک نخ

سامانه نیاز آب

به دنبال انتشار کتاب نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی در سال ۱۳۷۶، پیشرفت‌های حاصل در زمینه تعیین دقیق مراحل فنولوژی گیاهان، افزایش تعداد ایستگاه‌های هواشناسی در سطح کشور و تقاضای جامعه علمی- فنی و اجرایی کشور، مؤسسه تحقیقات خاک و آب را بر آن داشت تا با ایجاد سامانه نیاز آبی گیاهان به‌عنوان یک سامانه تصمیم‌ساز در اصلاح سطح کشت، مدیریت و ارتقا بهره‌وری آب برآورد مناسب‌تری از نیاز آبی گیاهان برای کمک به حل مسائل مربوط به آب مصرفی در سطح کلان کشور ارائه نماید. سامانه تعیین نیاز آبی گیاهان کشور در مؤسسه تحقیقات خاک و آب در اداره مالکیت معنوی اختراعات ثبت شد. این سامانه تحت وب، منحصربه‌فرد و در مقایسه با نمونه‌های خارجی از دقت مناسبی برخوردار است.

مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور به‌عنوان مرجع تعیین نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی با مطالعات و تحقیقات گسترده در سطح کشور نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی کشور را به هنگام نموده است. سامانه نیاز آبیاری گیاهان زراعی و باغی کشور دارای بانک‌های اطلاعاتی منحصربه‌فرد در مقیاس ملی است. این سامانه توانایی دارد بر اساس جدیدترین روش‌های علمی آب مصرفی را در سطوح مختلف کشت تخمین زده و اطلاعات را در اختیار بهره‌برداران قرار دهد. سامانه برآورد نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی به‌اختصار سامانه نیاز آب نامیده می‌شود.

معیارهای ارزیابی

از نرم‌افزار آماری SPSS به‌منظور تجزیه‌وتحلیل استفاده گردید. میانگین عملکرد و بهره‌وری آب با آزمون دانکن مورد مقایسه قرار گرفت. برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌شده توسط سامانه نیاز آبیاری گیاهان زراعی و باغی کشور با مقادیر اندازه‌گیری شده از آماره‌های ریشه مربعات خطای استاندارد (RMSE[۱])، ریشه مربعات خطای استاندارد نرمال شده (NRMSE[۲])، متوسط خطای اریبی (MBE[۳])، شاخص توافق (d[۴]) و کارایی مدل (EF[۵]) به شرح روابط زیر استفاده شد (Nash & Sutcliffe, 1970; Willmott, 1982; Jacovides & Kontoyiannis, 1995):

رابطه ۴)
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Xi\text{-}Yi)^2}$$

رابطه ۵)
$$NRMSE = \frac{RMSE}{\overline{X}}$$

رابطه ۶)
$$MBE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Yi\text{-}Xi)$$

رابطه ۷)
$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Xi\text{-}Yi)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|Yi\text{-}\overline{X}|+|Xi\text{-}\overline{Y}|)^2}$$

رابطه ۸)
$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Xi\text{-}Yi)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Xi\text{-}\overline{X})^2}$$

n تعداد داده‌ها، X و Y به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده و $\overline{X}$ و $\overline{Y}$ به ترتیب میانگین مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده است.

نتایج و بحث

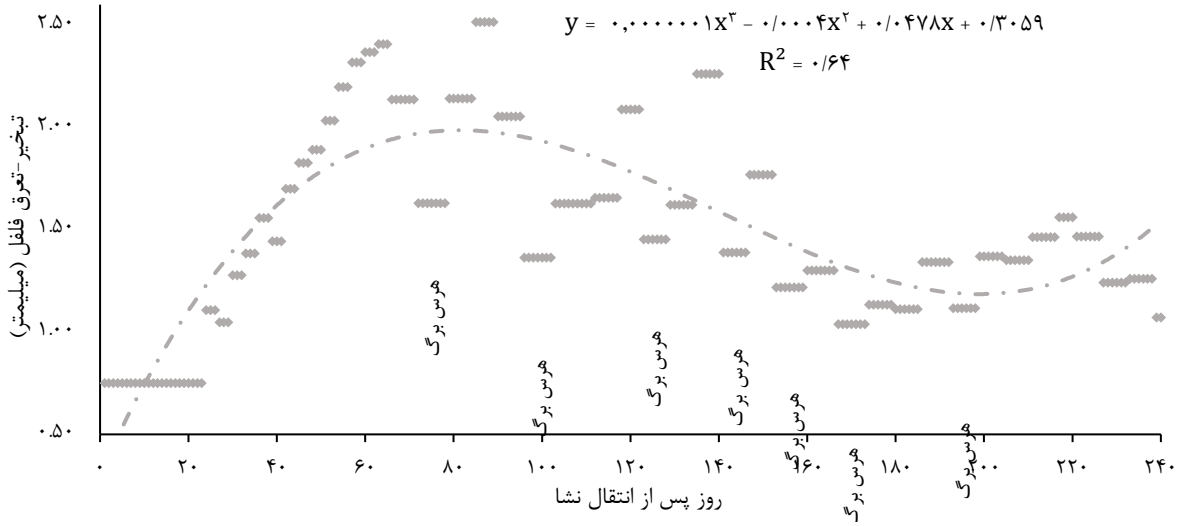
تبخیر–تعرق روزانه گیاه فلفل در گلخانه از طریق پایش رطوبت ناحیه ریشه و بیلان آب خاک محاسبه شد. شکل (۷) نتایج تبخیر–تعرق روزانه فلفل در گلخانه را نشان می‌دهد. مراحل مختلف رشد و تغییر تبخیر–تعرق ناشی از آن روی نمودار مشخص شد. ابتدا به دلیل قرارگرفتن در مرحله رشد سریع رویشی و گرم‌تر شدن روزها در فصل تابستان میزان تبخیر–تعرق افزایش یافت اما با ورود به شهریورماه و کاهش دمای شب و لزوم بسته نگه‌داشتن دریچه‌ها در شب و کنترل رطوبت در گلخانه جهت جلوگیری از بروز بیماری‌های قارچی، تبخیر کاهش یافت. همچنین افت‌های ناگهانی در میزان تبخیر–تعرق ناشی از انجام عملیات هرس برگ روی نمودار مشخص شد. هرس برگ علاوه بر کاهش سطح تعرق باعث ایجاد تنش مختصری در گیاه شد که نتایج آن در افت مقطعی تبخیر–تعرق قابل‌مشاهده بود.

مقادیر تبخیر–تعرق مرجع از سامانه نیاز آبیاری گیاهان زراعی و باغی کشور تهیه شد و برای محاسبه ضریب گیاهی روزانه فلفل در گلخانه مورداستفاده قرار گرفت (شکل ۸). مقادیر ضریب گیاهی فلفل گلخانه‌ای به طور متوسط برابر ۰/۲، ۰/۹۴ و ۰/۶۲ برای دوره‌های رشد ابتدایی، میانی و انتهایی به دست آمد.

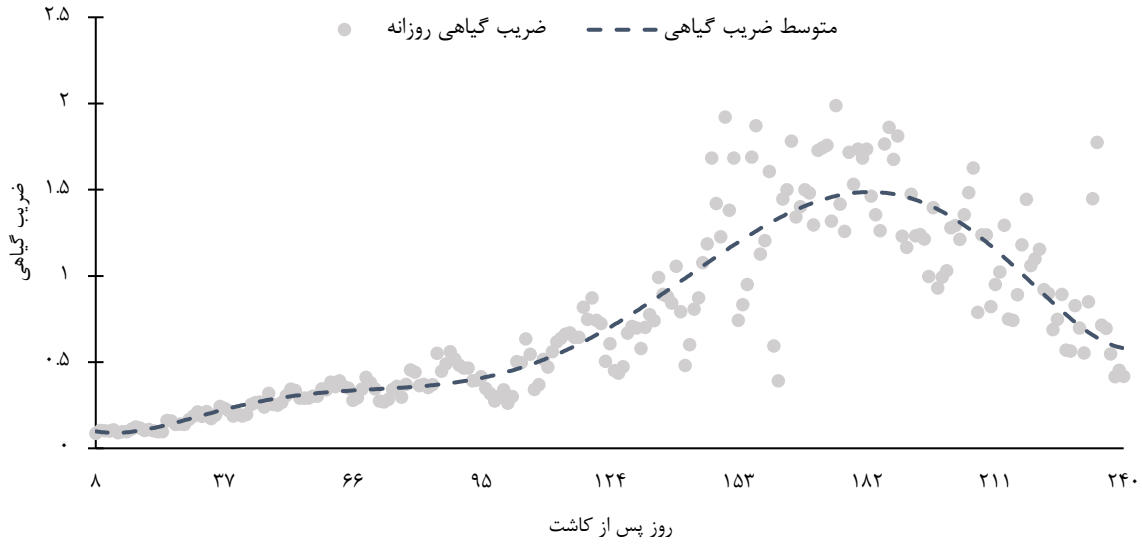
همچنین مقادیر نیاز آبیاری شبیه‌سازی‌شده توسط سامانه نیاز آبیاری گیاهان زراعی و باغی کشور با مقادیر اندازه‌گیری شده مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۹). نتایج نشان داد شاخص‌های آماری RMSE، NRMSE، MBE، D و EF به ترتیب برابر ۳۸/۵۵، ۰/۲۱، ۲۱/۱–، ۰/۹۹ و ۰/۹۵ به دست آمد. مقدار NRMSE نشان داد سامانه نیاز آب برآورد خوبی از نیاز آبی فلفل گلخانه‌ای ارائه کرد و مقدار EF و d بیانگر تطابق و توافق عالی بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری شده آب آبیاری بود.

---

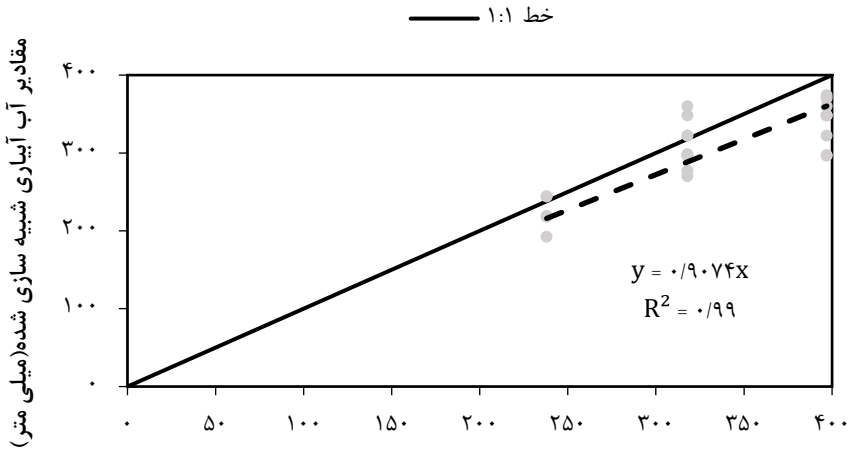
[1] Root Mean Square Error
[۲] Normalized Root Mean Square Error
[۳] Mean Bias Error
[۴] Index of agreement
[۵] Efficiency of model



شکل ۷: تبخیر-تعرق روزانه فلفل در گلخانه

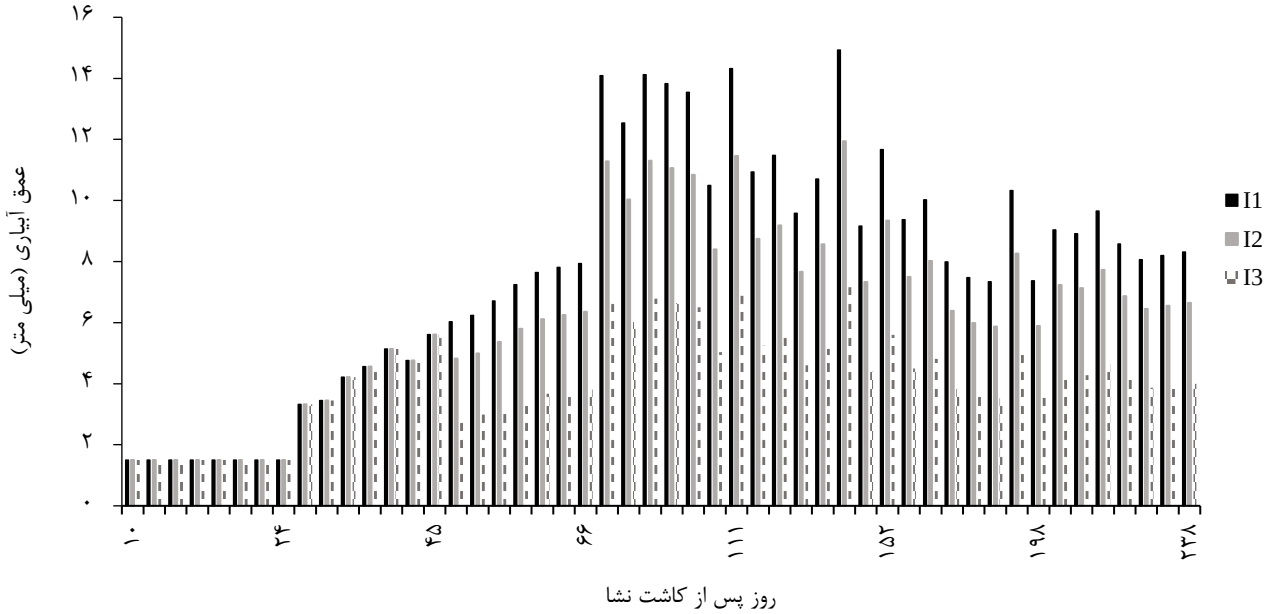


شکل ۸: ضرایب گیاهی روزانه فلفل در گلخانه



شکل ۹: مقایسه مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری شده آب آبیاری

شکل (۱۲) عمق آبیاری تیمارهای آبیاری کامل (I_1)، آبیاری ۸۰ درصد نیاز گیاه (I_2) و آبیاری ۶۰ درصد نیاز گیاه (I_3) را در هر رخداد آبیاری نشان می‌دهد. تیمارهای تنش آبی و کودی تا ۴۵ روز پس از انتقال نشا، جهت اطمینان از استقرار گیاه اجرا نشد. از روز ۴۵ به بعد تیمارهای آبی و کودی اجرا شد. مجموع آبیاری انجام شده در طول فصل برای تیمارهای I_1، I_2 و I_3 به ترتیب برابر ۳۹۷، ۳۱۸ و ۲۳۸ میلیمتر بود. نتایج تحقیق Fernández *et al*. (2005) در بررسی میزان تبخیر–تعرق در گلخانه‌های واقع در سواحل مدیترانه‌ای جنوب شرقی اسپانیا نشان داد تبخیر–تعرق فلفل در طول فصل رشد بین ۳۴۶ تا ۳۶۲ میلی‌متر متغیر بوده است. در بررسی (Celebi, 2018) روی تأثیر کم‌آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد فلفل کاپی قرمز در کشت باز در ترکیه، مقدار آبیاری موردنیاز در طول فصل برای تیمار آبیاری کامل بین ۷۲۶ تا ۸۰۶ میلی‌متر متغیر بود.



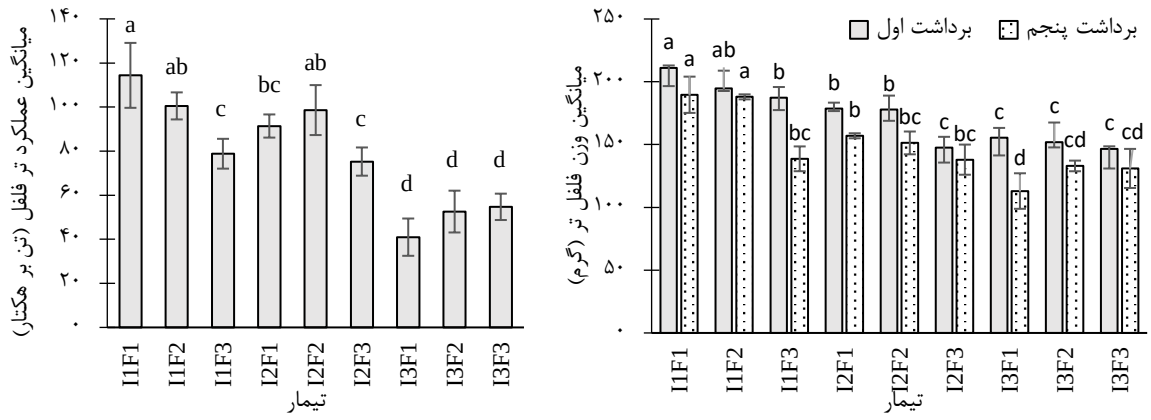
شکل ۱۰: عمق آبیاری تیمارهای ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه فلفل (به ترتیب I_1، I_2 و I_3)

عملکرد فلفل

برداشت فلفل در پنج نوبت انجام شد. در هر برداشت تعداد فلفل، وزن فلفل (وزن تر میوه) و ابعاد متوسط فلفل اندازه‌گیری شد. باتوجه‌به تجهیزات گلخانه و شرایط اقلیمی منطقه و فصل کشت، ابتدای فصل برنامه‌ریزی کشت جهت رسیدن به تناژ حدودی ۹۰ تن بر هکتار انجام شد. حداکثر عملکرد فلفل در تیمار I_1F_1 برابر ۱۱۴/۳۸ تن بر هکتار و حداقل آن در تیمار I_3F_1 برابر ۴۰/۹۶ تن بر هکتار به دست آمد که کاهش حدود ۶۴ درصدی ناشی از کم آبیاری ۴۰ درصد را نشان داد (شکل ۱۳). محققان بسیاری در نتایجی مشابه نتیجه گرفتند که استراتژی آبیاری کامل سودآورترین استراتژی آبیاری فلفل بود (Jaimez *et al*., 2000; Delfine *et al*., 2001; Antony & Singandhupe, 2004; Gençoğlan *et al*., 2006; Demirtas & Ayas, 2009; Ismail, 2012; Nagaz *et al*., 2012; Sezen *et al*., 2015, 2016; Koksal *et al*., 2017; Santos *et al*., 2020; de Almeida *et al*., 2022). همچنین نتایج نشان داد کم آبیاری ۲۰ و ۴۰ درصد به طور متوسط منجر به کاهش ۱۰ و ۵۰ درصدی عملکرد نسبت به تیمار آبیاری کامل شد. در بررسی‌های Fernández *et al*. (2005)، کم‌آبیاری ۵۰ و ۸۰ درصد به ترتیب کاهش ۳۳ و ۶۲ درصدی در عملکرد فلفل و کاهش ۴۷ و ۶۷ درصدی در عملکرد فلفل بازارپسند داشتند. Abdelkhalik *et al*. (2020) در بررسی سه تیمار آبیاری ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه دریافتند کم‌آبیاری به‌طورکلی منجر به افزایش پوسیدگی گلگاه و کاهش بازارپسندی فلفل نسبت به تیمار آبیاری کامل شد و عملکرد را کاهش داد. کاهش ۲۵ درصدی آبیاری در دوره برداشت گرچه کاهش ۱۹ درصدی عملکرد را به همراه داشت اما باعث صرفه‌جویی قابل‌توجه ۲۱ درصدی شد.

همچنین متوسط تعداد فلفل از برداشت اول تا پنجم افزایش یافت اما متوسط وزن فلفل و ابعاد آن کاهش یافت. پیش‌ازاین نتایج برخی تحقیقات دیگر روی گیاه فلفل نشان داد که این گیاه در طول دوره گلدهی و رشد میوه، به تنش آبی حساس بوده است و تنش آبی معمولاً باعث سقط‌جنین گل و درنتیجه کاهش تعداد میوه می‌گردد (Katerji *et al*., 1992; Jaimez *et al*., 2000; Fernández *et al*., 2005). تنش آبی علاوه بر سقط‌جنین گل و کاهش تعداد میوه، باعث ایجاد میوه‌های کوچک‌تر، تغییر در شکل ظاهری و عدم

بازارپسندی آن می‌گردد (Dalla Costa & Gianquinto, 2002; Fernández *et al*., 2005; Khan *et al*., 2008). در نتایج Fernández *et al*. (2005) کم‌آبیاری تأثیر کمی بر تعداد فلفل داشت اما نسبت فلفل نامناسب برای بازار مصرف را بالا برد که علت آن اندازه فلفل‌ها، آفتاب‌سوختگی و پوسیدگی گلگاه در آن‌ها بود.



شکل ۱۱: میانگین عملکرد و متوسط وزن فلفل تر در تیمارهای مختلف آبیاری و کودآبیاری

*** میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن فاقد اختلاف معنادار است.**

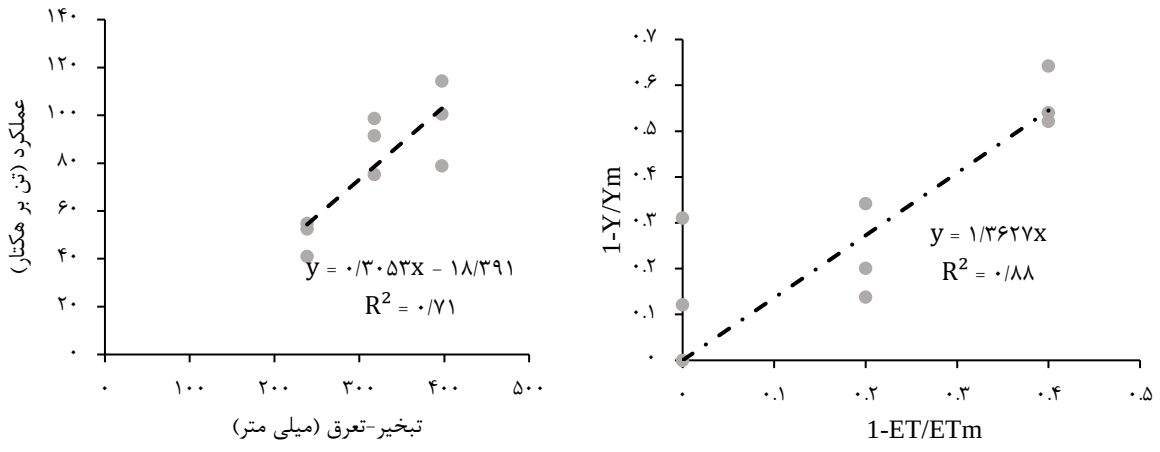
به‌طورکلی نتایج نشان داد تنش رطوبتی بیش از ۲۰ درصد نیاز آبی گیاه فلفل، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی روی ویژگی‌های اندام‌های هوایی و زمینی گیاه فلفل ایجاد کند اما گرچه کم آبیاری به کاهش عملکرد فلفل منجر شد، کم آبیاری تا ۲۰ درصد کاهش معناداری روی عملکرد گیاه نداشت (Fernández *et al*., 2005; Owusu-Sekyere *et al*., 2010; Tabatabayi *et al*., 2014; Celebi, 2018; Wang *et al*., 2022). بررسی‌ها نشان داد که کاهش آب مصرفی گیاه فلفل به‌عنوان راه‌حلی به‌منظور صرفه‌جویی در هزینه و میزان کاربرد آب، نباید بیش از ۲۰ درصد نیاز آبی گیاه منظور گردد (Owusu-Sekyere *et al*., 2010).

توابع تولید

برای ارزیابی اثر تنش آبی بر کاهش عملکرد گیاه می‌توان از ضریب پاسخ تبخیر–تعرق– عملکرد (Ky_{ET}) استفاده کرد Doorenbos & Kassam (1979) ضریب تجربی پاسخ تبخیر–تعرق– عملکرد (Ky_{ET}) را به شکل رابطه (۹) ارائه دادند.

$$[1 - Y_a / Y_m)] = Ky_{ET} [1 - (ET_a / ET_m)]$$ رابطه ۹)

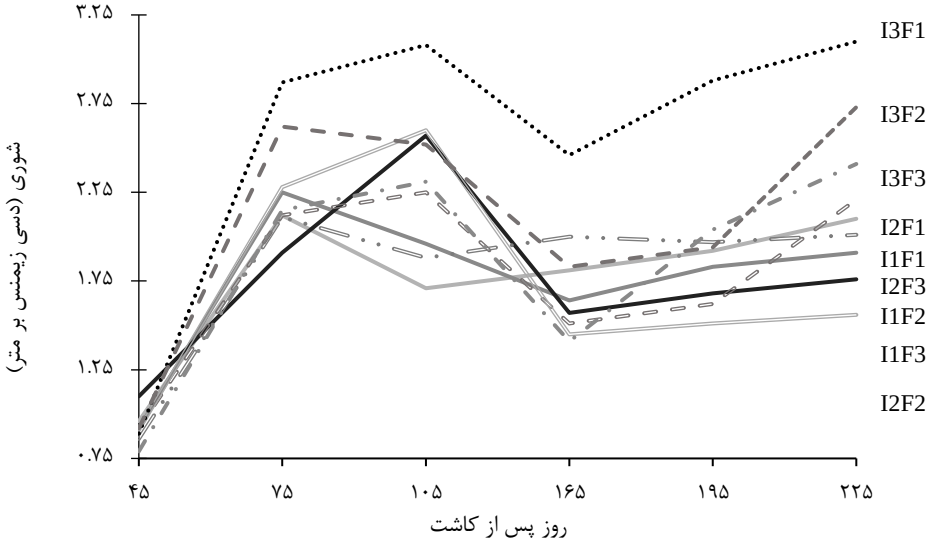
ضریب تجربی پاسخ تبخیر–تعرق– عملکرد (Doorenbos & Kassam, 1979) برابر ۱/۳۶ به دست آمد (شکل ۱۴). همچنین تابع تولید فلفل به‌ازای مقادیر مختلف تبخیر–تعرق از نوع معادله خطی به دست آمد که با نتایج Fernández *et al*. (2005) همخوانی دارد.



شکل ۱۲: رابطه عملکرد فلفل و تبخیر–تعرق

شوری و عملکرد فلفل

اندازه‌گیری شوری خاک در مردادماه قبل از شروع تیمارهای آبیاری و کودآبیاری بود و به طور میانگین شوری ناحیه ریشه در تمام تیمارها حدود ۰/۹۲ دسی زیمنس بر متر به دست آمد. در ادامه و با اعمال تیمارهای آبیاری و کودآبیاری، نتایج نشان داد در ابتدای فصل رشد و در دوره رشد رویشی تجمع املاح در ناحیه ریشه افزایش یافته و با شروع دوره رشد زایشی و با رسیدن اولین فلفل‌ها شوری ناحیه ریشه کاهش یافت که ناشی از نیاز بالای گیاه برای تولید بود. در ادامه با ورود به فصل سرد و کاهش تبخیر–تعرق، تجمع املاح مجدداً سیر صعودی گرفت به‌طوری‌که بیشترین تجمع املاح در تیمار I_3F_1 برابر ۳/۱ دسی زیمنس بر متر و کمترین در تیمار I_2F_2 برابر ۱/۵۶ دسی زیمنس بر متر مشاهده شد (شکل ۱۵).



شکل ۱۳: تغییرات شوری ناحیه ریشه در تیمارهای مختلف طی دوره رشد

افزایش شوری در تیمار I_3F_1 به دلیل کم آبیاری و کودآبیاری بیش از حد و عدم توانایی جذب توسط گیاه رخ داد که منجر به کمترین میزان عملکرد فلفل در بین تیمارها شد. Fallik *et al*., (2019) گزارش کردند عملکرد فلفل با افزایش شوری آب کاهش یافت. همچنین نتایج Fallik *et al*. (2019) نشان داد کیفیت صادراتی در آبیاری با شوری ۱/۶ و ۲/۸ دسی زیمنس بر متر تفاوت معنی‌داری نداشت، اما شوری ۴/۵ دسی زیمنس بر متر باعث کاهش ۳۰ تا ۳۵ درصدی عملکرد صادراتی شد و آبیاری با شوری ۲/۸ دسی زیمنس بر متر باعث کاهش استحکام محصول و افزایش قند آن شد. در بررسی Patil *et al*., (2014) شوری، عملکرد بازارپسند را کاهش داد. آبیاری ۸۰ درصد تا انتهای دوره رشد رویشی و آبیاری ۱۰۰ درصد در ادامه تا انتهای فصل رشد به‌شدت عملکرد را افزایش داد و آبیاری با آب‌شور باعث افزایش شوری خاک در طول فصل رشد و کاهش ۷۲ درصدی عملکرد تازه فلفل شد.

در قبرس، Papadopoulos (1993) عملکرد ۷۹ تن در هکتار برای فلفل‌دلمه‌ای سبز گلخانه‌ای با استفاده از آب‌شور با شوری ۳/۱ دسی زیمنس بر متر به دست آورد. بااین‌حال، Rubio *et al*. (2010) گزارش کردند عملکرد فلفل و بایومس در مقایسه شاهد (شوری ۲/۶ دسی زیمنس بر متر) و تیمار شورتر (۴/۶ دسی زیمنس بر متر)، کاهش یافت.

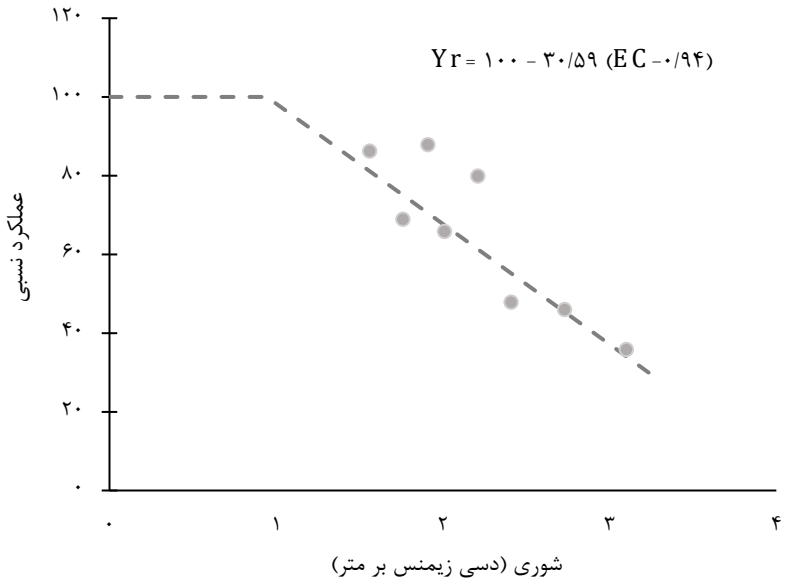
باید به این نکته توجه داشت که تأثیر نیتروژن بر شوری خاک دوگانه است و همین واکنش گیاه را در تیمارهای مختلف متفاوت کرد. Shayesteh *et al*. (2012) به بررسی تأثیر شوری آب آبیاری و نیتروژن بر شاخص‌های رشد و عملکرد گیاه فلفل در گلخانه پرداختند. نتایج نشان داد که شوری بر عملکرد تأثیر معنی‌داری داشت و با افزایش سطوح شوری این عوامل کاهش یافتند. اما با افزایش سطوح نیتروژن، عملکرد و شاخص‌های رشد گیاه افزایش یافتند اگرچه نیتروژن بر طول و قطر میوه تأثیر معنی داری نداشت. اثر متقابل شوری و نیتروژن بر میزان عملکرد فلفل تأثیر معنی‌داری در سطح یک درصد ایجاد کرد، به‌طوری که در شوری‌های ۰/۷ و ۱/۵ دسی زیمنس بر متر با افزایش سطوح نیتروژن مصرفی عملکرد افزایش یافت، ولی در شوری ۳ دسی زیمنس بر متر با افزایش سطوح نیتروژن مصرفی تا سطح ۱۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، عملکرد افزایش و با مصرف بیش‌تر آن کاهش یافت. در شوری ۶ دسی زیمنس بر متر نه‌تنها عملکرد با مصرف نیتروژن افزایش نیافت؛ بلکه این صفت

نسبت به تیمار شاهد کاهش قابل‌توجهی داشت. بیش‌ترین عملکرد از شوری ۰/۷ دسی زیمنس بر متر همراه با مصرف ۳۰۰ میلی‌گرم نیتروژن در کیلوگرم به دست آمد و نتایج این تحقیق ضرورت مصرف متعادل نیتروژن در شرایط شور را نشان داد.

نتایج نشان داد پایش شوری خاک در طول فصل رشد جهت کنترل کودآبیاری ضروری است. برای ارزیابی تأثیر شوری بر عملکرد فلفل‌دلمه‌ای گلخانه‌ای از رابطه (۱۰) که توسط Maas & Hoffman (1977) ارائه شد استفاده شد. رابطه عملکرد نسبی و شوری به‌قرار زیر است:

$$Y_a / Y_m = 100 - B\,(EC - A)$$ رابطه ۱۰)

در رابطه بالا، EC شوری خاک (دسی زیمنس بر متر)، A حد آستانه شوری خاک (دسی زیمنس بر متر)، B درصد کاهش عملکرد ناشی از هر واحد افزایش شوری خاک است. نتایج نشان داد با حد آستانه شوری ۰/۹۴ (برای شوری به‌دست‌آمده به روش ۱:۲)، درصد کاهش عملکرد ناشی از هر واحد افزایش شوری حاصل از کودهای شیمیایی برابر ۳۰/۶ درصد بود (شکل ۱۶). نتایج بررسی تأثیر سطوح مختلف تنش شوری بر خصوصیات کیفی و عملکرد فلفل در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد نشان داد که تنش شوری در سطح احتمال ۱ درصد بر طول میوه، قطر میوه، طول ریشه، حجم ریشه، وزن تر و خشک ریشه، بوته اثر معنی‌داری نداشت و شیب کاهش عملکرد به‌ازای هر واحد افزایش شوری نسبت به آستانه تحمل فلفل (۱/۵ دسی زیمنس بر متر) ۱۰ درصد به دست آمد. نتایج نشان داد که فلفل در گلخانه نسبت به تنش شوری نسبتاً حساس است (Salarian *et al.*, 2014).



شکل ۱٤: حد آستانه تحمل به شوری در فلفل دلمه گلخانه‌ای

بهره‌وری آب

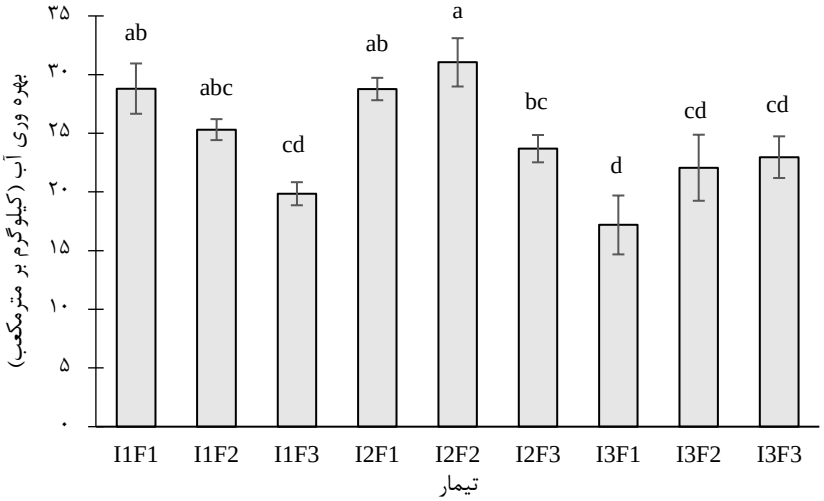
بهره‌وری آب از رابطه (۱۱) محاسبه شد (Ertek, 2014).

$$WUE = Y_a / ET_a$$ رابطه ۱۱)

نتایج نشان داد حداکثر بهره‌وری آب در تیمار I_2F_2 برابر ۳۱/۰۵ کیلوگرم بر مترمکعب و حداقل آن در تیمار I_3F_1 برابر ۱۷/۱۹ کیلوگرم بر مترمکعب رخ داد. Fernández *et al.*, (2005) بهره‌وری آب فلفل تازه را ۲۴ تا ۳۳ (کیلوگرم بر مترمکعب) و بهره‌وری آب فلفل بازارپسند تازه را ۱۶/۹ تا ۲۵/۹ (کیلوگرم بر مترمکعب) گزارش کرد. در نتایجی مشابه Celebi, (2018) در بررسی تأثیر کم‌آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد فلفل کاپی قرمز در کشت باز در ترکیه، حداکثر بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب را در کم‌آبیاری ۲۰ درصد گزارش کردند اما حداکثر عملکرد متعلق به تیمار آبیاری کامل بود. نتایج نشان داد آبیاری کامل بهترین استراتژی است اما در شرایط کم‌آبی می‌توان تا ۲۰ درصد کم‌آبیاری اعمال کرد. Tabatabayi *et al.* (2014) در بررسی تأثیر تیمارهای آبیاری به میزان ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی بر عملکرد و کارایی مصرف آب برای گیاه فلفل قلمی در گلخانه دانشگاه شهرکرد نتیجه گرفتند تأثیر میزان آب آبیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب (WUE) در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. حداکثر عملکرد محصول و حداکثر کارایی مصرف آب در تیمار

۱۰۰ درصد نیاز آبی به دست آمد.

به‌طورکلی نتایج حاکی از آن بود که کم آبیاری تا ۲۰ درصد باعث افزایش بهره‌وری آب شد اما با بیشتر شدن کم آبیاری بهره‌وری به طور معناداری کاهش یافت (شکل ۱۷).



شکل ۱۵: بهره‌وری آب فلفل گلخانه‌ای

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد اثر کم آبیاری و کودآبیاری هرکدام به‌تنهایی بر عملکرد فلفل و بازارپسندی محصول معنی‌دار بود. همچنین اثر متقابل این دو عامل باعث تغییر معنی‌دار در عملکرد فلفل شد. کودآبیاری در تعامل با میزان آبیاری باعث تغییر در شوری محیط ریشه شد که بر جذب آب، عناصر غذایی و تنش به گیاه مؤثر بود. کم آبیاری توأم با مقادیر بالای کود باعث شد شوری ناحیه ریشه به دلیل کاهش جذب عناصر افزایش یافته و عملکرد کاهش یابد. بنابراین مدیریت هم‌زمان آبیاری و کودآبیاری با پایش مداوم رطوبت و شوری ناحیه ریشه می‌تواند به عملکرد بالاتر منجر شود و هرگونه کم آبیاری باید با پایش هم‌زمان شوری ناحیه ریشه صورت گیرد.

مجموع آبیاری اندازه‌گیری شده برای تیمارهای I_1، I_2 و I_3 به ترتیب برابر ۳۹۷، ۳۱۸ و ۲۳۸ میلیمتر بود. مقادیر نیاز آبیاری شبیه‌سازی‌شده توسط سامانه نیاز آبیاری گیاهان زراعی و باغی کشور با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داد سامانه نیاز آب برآورد خوبی از نیاز آبی فلفل گلخانه‌ای ارائه کرد و تطابق و توافق عالی بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری شده آب آبیاری بود. همچنین نتایج نشان داد گرچه بهترین عملکرد در تیمار I_1F_1 به دست آمد اما بهترین بهره‌وری آب در تیمار I_2F_2 حاصل شد و این تیمار در کنترل شوری نیز موفق بود. همچنین عملکرد محصول در این دو تیمار تفاوت معنی‌داری نداشت. به‌طورکلی کم آبیاری ۲۰ درصد با پایش رطوبت ناحیه ریشه در تولید فلفل در گلخانه توصیه می‌شود که مصرف کود باید با پایش شوری ناحیه ریشه کنترل شود و به میزان نیاز گیاه و متناسب با جذب املاح توسط ریشه صورت گیرد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Abdelkhalik, A., Pascual, B., Nájera, I., Domene, M. A., Baixauli, C., & Pascual‐Seva, N. (2020). Effects of deficit irrigation on the yield and irrigation water use efficiency of drip‐irrigated sweet pepper (Capsicum annum L.) under Mediterranean conditions. *Irrigation Science*, 17.

Albuquerque, F. da S., Silva, Ê. F. de F., de Albuquerque Filho, J. A., & Nunes, M. F. (2011). Crescimento e rendimento de pimentão fertigado sob diferentes lâminas de irrigação e doses de potássio. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *15*, 686–694.

Antony, E., & Singandhupe, R. B. (2004). Impact of drip and surface irrigation on growth, yield and WUE of capsicum (Capsicum annum L.). *Agricultural Water Management*, *65*(2), 121–132.

Borg, H., & Grimes, D. W. (1986). Depth development of roots with time: An empirical description. *Transactions of the ASAE*, *29*(1), 194–0197.

Celebi, M. (2018). The effects of water stress on yield performance of drip-irrigated pepper (Capsicum annum L. cv. Capya var. Yalova yağlık 28) in the Central Anatolian region of Turkey. *Arab J Geosci*, 8.

da Silva, E. M., Lima, J. G. S., Duarte, S. N., da Silva Barbosa, F., & Maschio, R. (2013). Levels of salinity and fertigation management on the characteristics of the eggplant when grown in a protected environment. *Revista Ciência Agronômica*, *44*(1), 150.

Dalla Costa, L., & Gianquinto, G. (2002). Water stress and water table depth influence yield, water use efficiency, and nitrogen recovery in bell pepper: Lysimeter studies. *Australian Journal of Agricultural Research*, *53*(2), 201–210.

de Almeida, C. D. G. C., Gordin, L. C., dos Santos Almeida, A. C., Júnior, J. A. S., de Almeida, B. G., & Provenzano, G. (2022). Assessing different methodologies for irrigation scheduling in protected environment: A case study of green bell pepper. *Irrigation Science*, 1–14.

del Amor, F. M., & Gómez-López, M. D. (2009). Agronomical response and water use efficiency of sweet pepper plants grown in different greenhouse substrates. *HortScience*, *44*(3), 810–814.

Delfine, S., Loreto, F., & Alvino, A. (2001). Drought-stress effects on physiology, growth and biomass production of rainfed and irrigated bell pepper plants in the Mediterranean region. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *126*(3), 297–304.

Demirtas, C., & Ayas, S. (2009). Deficit irrigation effects on pepper (Capsicum annuum L. Demre) yield in unheated greenhouse condition. *Journal of Food Agriculture & Environment*, *7*.

Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). Yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper*, *33*, 257.

Ertek, A. (2014). The application for fertilizer–yield relationships of the ET–yield response factor equation. *Turkish Journal Of Agriculture And Forestry*, *38*, 732–738. https://doi.org/10.3906/tar-1310-110

Fallik, E., Alkalai-Tuvia, S., Chalupowicz, D., Zaaroor-Presman, M., Offenbach, R., Cohen, S., & Tripler, E. (2019). How Water Quality and Quantity Affect Pepper Yield and Postharvest Quality. *Horticulturae*, *5*(1), 4. https://doi.org/10.3390/horticulturae5010004

FAO. (1991). Protected cultivation in the Mediterranean climate. *Plant Protection Paper 90, FAO, Rome, Italy*.

FAOSTAT, F. (2018). statistical Databases, Fisheries Data, 2001. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Fernández, M. D., Gallardo, M., Bonachela, S., Orgaz, F., Thompson, R. B., & Fereres, E. (2005). Water use and production of a greenhouse pepper crop under optimum and limited water supply. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, *80*(1), 87–96. https://doi.org/10.1080/14620316.2005.11511897

Fontes, P. C. R., Dias, E. N., & Graça, R. N. (2005). Acúmulo de nutrientes e método para estimar doses de nitrogênio e de potássio na fertirrigação do pimentão. *SciELO Brasil*.

Gençoğlan, C., Akinci, İ. E., Uçan, K., Akinci, S., & Gençoğlan, S. (2006). Response of red hot pepper plant (Capsicum annuum L.) to the deficit irrigation. *Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, *19*(1), 131–138.

Grattan, S. R., & Grieve, C. M. (1998). Salinity–mineral nutrient relations in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, *78*(1–4), 127–157.

Heydari, N. (2007). Water use efficiency in greenhouse production. *Iranian National Committee on Irrigation and Drainage*, 180.

Ismail, S. M. (2012). Water use efficiency and bird pepper production as affected by deficit irrigation practice. *Int. J. Agric. For*, *2*, 262–267.

Jacovides, C. P., and Kontoyiannis, H. (1995). Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. *Agricultural Water Management*, 27, 365–371.

Jaimez, R. E., Vielma, O., Rada, F., & García-Núñez, C. (2000). Effects of water deficit on the dynamics of flowering and fruit production in Capsicum chinense Jacq in a tropical semiarid region of Venezuela. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *185*(2), 113–119.

James, L. (1988). Principles of farm irrigation system design. *John Willey and Sons Inc., United Kingdom.*

Katerji, N., Mastrorilli, M., & Hamdy, A. (1992). Effects of water stress at different growth stages on pepper yield. *International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops 335*, 165–172.

Khan, M. A. I., Farooque, A. M., Haque, M. A., Rahim, M. A., & Hoque, M. A. (2008). Effects of water stress at various growth stages on the physio-morphological characters and yield in chili. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, *33*(3), 353–362.

Koksal, E. S., Tasan, M., Artik, C., & Gowda, P. (2017). Evaluation of financial efficiency of drip-irrigation of red pepper based on evapotranspiration calculated using an iterative soil water-budget approach. *Scientia Horticulturae*, *226*, 398–405.

Leonardo, M., Broetto, F., Villas Boas, R. L., Marchese, J. A., Tonin, F. B., & Regina, M. (2008). Estado nutricional e componentes da produção de plantas de pimentão conduzidas em sistema de fertirrigação durante indução de estresse salino em cultivo protegido. *Bragantia*, *67*, 883–889.

Lodhi, A. S., Kaushal, A., & Singh, K. G. (2014). Impact of irrigation regimes on growth, yield and water use efficiency of sweet pepper. *Indian Journal of Science and Technology*, *7*(6), 790.

Maas, E. V., & Hoffman, G. J. (1977). Crop salt tolerance—Current assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, *103*(2), 115–134.

Mane, A. V., Deshpande, T. V., Wagh, V. B., Karadge, B., & Samant, J. S. (2011). A critical review on physiological changes associated with reference to salinity. *International Journal of Environmental Sciences*, *1*(6), 1192.

Marcussi, F. F. N., de Godoy, L. J. G., & Bôas, R. L. V. (2004). Fertirrigação nitrogenada e potássica na cultura do pimentão baseada no acúmulo de nek pela planta. *Irriga*, *9*(1), 41–51.

Medeiros, P. R., & Duarte, S. N. (2012). Eficiência do uso de água e de fertilizantes no manejo de fertirrigação no cultivo do tomateiro sob condições de salinidade do solo. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, *7*(2), 344–351.

Nagaz, K., Masmoudi, M. M., & Mechlia, N. B. (2012). Effects of deficit drip-irrigation scheduling regimes with saline water on pepper yield, water productivity and soil salinity under arid conditions of Tunisia. *Journal of Agriculture and Environment for International Development (JAEID)*, *106*(2), 85–103.

Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970).River flow forecasting through conceptual models' part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290.

Nunes Júnior, E. S., Medeiros, J. F. de, Oliveira, F. de A. de, Lima, L. A., Bezerra, F. M. S., & Alves, R. de C. (2017). Nitrogen and potassium fertigation in bell pepper cultivated in greenhouse using fertigation managements. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *21*(3), 186–190. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n3p186-190

Oliveira, F. A., Duarte, S. N., Medeiros, J. F., Dias, N. S., Oliveira, M. K., Silva, R. C., & Lima, K. S. (2015). Mineral nutrition of sweet pepper under different fertigation management. *Horticultura Brasileira*, *33*, 216–223.

Oliveira, F. de A. de, Duarte, S. N., Medeiros, J. F. de, Dias, N. da S., da Silva, R. C., & Lima, C. J. de S. (2013). Manejos da fertirrigação e doses de N e K no cultivo de pimentão em ambiente protegido. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *17*, 1152–1159.

Owusu-Sekyere, J. D., Asante, P., & Osei-Bonsu, P. (2010). Water requirement, deficit irrigation and crop coefficient of hot pepper (Capsicum frutescens) using irrigation interval of four (4) days. *Journal of Agricultural and Biological Science*, *5*(5), 72–78.

Papadopoulos, A. P. (1993). Seasonal fertigation schedules for greenhouse tomatoes-concepts and delivery systems. *International Symposium on Water Quality & Quantity-Greenhouse 458*, 123–140.

Patil, V. C., Al-Gaadi, K. A., Wahb-Allah, M. A., Saleh, A. M., Marey, S. A., Samdani, M. S., & Abbas, M. E. (2014). Use of saline water for greenhouse bell pepper (capsicum annuum) production. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 10.

Rubio, J. S., García-Sánchez, F., Flores, P., Navarro, J. M., & Martínez, V. (2010). Yield and fruit quality of sweet pepper in response to fertilisation with Ca2+ and K+. *Spanish Journal of Agricultural Research*, *8*(1), 170–177.

Sajadi, F., Sharifan, H., & Jamali, S. (2017). Evaluation the use of Caspian Seawater for Irrigation Green pepper under Greenhouse Conditions. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *11*(2), 274–285.

Salarian, M., Alizadeh, A., Davari, K., & Ansari, H. (2014). The effect of deficit irrigation and water salinity on the root and performance of bell pepper in a smart drip irrigation system. *National Conference of Water, Man and Earth*. https://civilica.com/doc/319118

Santos, H. C. A., Lima junior, J. A. D., Silva, A. L. P. D., Castro, G. L. S. D., & Gomes, R. F. (2020). Yield of fertigated bell pepper under different soil water tensions and nitrogen fertilization. *Revista Caatinga*, *33*, 172–183.

Sezen, S. M., Tekİn, S., & Şengül, H. (2016). Effects of various irrigation levels applied with drip method on processing pepper yield and economical analysis. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Doğa Bilimleri Dergisi*, *19*(3), 310–318.

Sezen, S. M., Yazar, A., Şengül, H., Baytorun, N., Daşgan, Y., Akyildiz, A., Tekin, S., Onder, D., Ağçam, E., & Akhoundnejad, Y. (2015). Comparison of drip-and furrow-irrigated red pepper yield, yield components, quality and net profit generation. *Irrigation and Drainage*, *64*(4), 546–556.

Shayesteh, N., Golchin, A., & Shafiei, S. (2012). The Effects of Irrigation Water Salinity, Nitrogen and Foliar

Application of Calcium Chloride on Yield and Growth Indices of Pepper. *Journal of Agricultural Engineering Soil Science and Agricultural Mechanization, (Scientific Journal of Agriculture)*, *34*(2), 69–84.

Sonneveld, C. (1990). Estimating quantities of water-soluble nutrients in soils using a specific 1: 2 by volume extract. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *21*(13–16), 1257–1265.

Sonneveld, C., & Voogt, W. (2009). Plant nutrition in future greenhouse production. In *Plant nutrition of greenhouse crops* (pp. 393–403). Springer.

Tabatabayi, H., Mardani nejad, S., & Zare abyaneh, H. (2014). Effects of Water Stress on Growth Indices, Yield, and Water Use Efficiency of Pepper Plant in Greenhouse Condition. *Journal of Water Research in Agriculture*, *28*(1), 63–71. https://doi.org/10.22092/jwra.2015.101165

Wang, H., Xiang, Y., Zhang, F., Tang, Z., Guo, J., Zhang, X., Hou, X., Wang, H., Cheng, M., & Li, Z. (2022). Responses of yield, quality and water-nitrogen use efficiency of greenhouse sweet pepper to different drip fertigation regimes in Northwest China. *Agricultural Water Management*, *260*, 107279.

Willmott, C. J. (1982). Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bulletin American Meteorological Society*, 63, 1309–1313.