



The Effect of Brown Seaweed Extract on Reducing the Effects of Water Stress in Sweet Pepper

Sadegh Askari Dehno¹ | Farzad Hassanpour² | Halimeh Piri³ | Eisa Khammari⁴

1. Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. Email: askari_sami@yahoo.com
2. Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. Email: hassanpourrir@uoz.ac.ir
3. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. Email: H_piri2880@uoz.ac.ir
4. Department of agriculture, Faculty of agricultural, University of Zabol, Zabol, Iran. Email: ikhammari@uoz.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 5 November 2024

Received in revised form

1 January 2025

Accepted 15 January 2025

Published online 17 May 2025

Keywords:

Crop growth rate

Leaf area index

Yield

Water productivity

ABSTRACT

This research was conducted in order to investigate the effect of seaweed extract on the yield and water use productivity of sweet pepper under water stress. So far, no research has been conducted in this field in the Sistan Plain. The present research was conducted in February 2024 in a research farm located in Zahak city in the form of a split plot design in the form of a randomized complete block in three replications. The treatments include 3 levels of irrigation water amount (I1, I2, I3, respectively equivalent to 60, 80 and 100% of the field capacity of the soil) and spraying different concentrations of seaweed extract (SE1, SE2, SE3 and SE4, respectively equivalent to 0, 0.5, 1.5 and 3 gr/lit). Foliar spraying of zero treatment (control treatment without seaweed) was done with distilled water. Sampling of the treatments was done in order to determine their appearance characteristics in time intervals once every two weeks and during the growth period of sweet pepper. These parameters included plant height and leaf area index. The first fruit harvest was done in the middle of May 2024 and a total of 8 harvests were done. The results showed that the effect of seaweed and irrigation water on the measured parameters was significant at the probability level of one and five percent. The highest yield and its components were obtained from the 100% water requirement treatment, which was not significantly different from the 80% water requirement treatment. The use of seaweed extract reduced the negative effects of drought stress. The most positive effect of seaweed extract was obtained from the treatment of 3 grams per liter of seaweed extract. The highest height (96.4 cm), fruit diameter (1.7 cm), fruit weight (92.5 gr), yield (32.8 ton/ha), root volume (105.6 cm³) cube) and root length (51.7 cm) was obtained from I3SE4 treatment, which was not significantly different from I2SE4 treatment. Considering that the highest water productivity (4.33 kg/m³) was obtained from I2SE4 treatment, therefore this treatment (consumption of 3 gr/lit of seaweed extract and the amount of irrigation water equal to 80% of the field capacity of the soil) is introduced as the best treatment.

Cite this article: Askari Dehno, S., Hassanpour, F., Piri, H., & Khammari, E. (2025). The Effect of Brown Seaweed Extract on Reducing the Effects of Water Stress in Sweet Pepper. *Journal of Water and Irrigation Management*, 15 (1), 147-164. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.384872.1188>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.384872.1188>

Publisher: University of Tehran Press.



تأثیر عصاره جلبک دریایی قهوه‌ای بر کاهش اثرات تنش آبی در فلفل دلمه‌ای

صادق عسکری دهنو^۱ | فرزاد حسن پور^۲ | حلیمه پیری^۳ | عیسی خمیری^۴۱. گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: askari_sami@yahoo.com۲. گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: hassanpourrir@uoz.ac.ir۳. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: H_piri2880@uoz.ac.ir۴. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: ikhammari@uoz.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷

این پژوهش به منظور بررسی تأثیر عصاره جلبک دریایی بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب فلفل دلمه‌ای در شرایط تنش آبی انجام شد. تاکنون پژوهشی در این زمینه در دشت سیستان انجام نشده است. پژوهش حاضر در بهمن‌ماه ۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی واقع در شهرستان زهک در قالب طرح کرت‌های خردشده به صورت بلوک کامل تصادفی در سه تکرار انجام گرفت. تیمارها شامل ۳ سطح مقدار آب آبیاری (I3، I2، I1) به ترتیب معادل ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک و محلول‌پاشی غلظت‌های مختلف عصاره جلبک دریایی (SE1، SE2، SE3، SE4 به ترتیب معادل صفر، ۰/۵، ۱/۵ و ۳ گرم در لیتر) بود. محلول‌پاشی برگ تیمار صفر (تیمار شاهد بدون جلبک دریایی) با آب مقطر انجام شد. نمونه‌برداری از تیمارها به منظور تعیین ویژگی‌های ظاهری آن‌ها در فواصل زمانی هر دو هفته یکبار و در طول دوره رشد فلفل دلمه‌ای انجام شد. این پارامترها شامل ارتفاع گیاه و شاخص سطح برگ بود. اولین برداشت میوه اواسط اردیبهشت‌ماه ۱۴۰۳ انجام و در مجموع هشت مرحله برداشت انجام گردید. نتایج نشان داد تأثیر جلبک دریایی و مقادیر آب آبیاری بر پارامترهای اندازه‌گیری‌شده در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بود. بیش‌ترین عملکرد و اجزای آن از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی به‌دست آمد که با تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی تفاوت معنی‌دار نداشت. استفاده از عصاره جلبک دریایی باعث کاهش اثرات منفی تنش خشکی شد. بیش‌ترین تأثیر مثبت جلبک دریایی از تیمار ۳ گرم در لیتر جلبک دریایی به‌دست آمد. بیش‌ترین ارتفاع (۹۶/۴ سانتی‌متر)، قطر میوه (۷/۱ سانتی‌متر)، وزن میوه (۹۲/۵ گرم)، عملکرد (۳۲/۸ تن در هکتار)، حجم ریشه (۱۰۵/۶ سانتی‌متر مکعب) و طول ریشه (۵۱/۷ سانتی‌متر) از تیمار I3SE4 به‌دست آمد که با تیمار I2SE4 تفاوت معنی‌دار نداشت. با توجه به این که بیش‌ترین بهره‌وری مصرف آب (۴/۳۳ کیلوگرم بر مترمکعب) از تیمار I2SE4 به‌دست آمد، لذا این تیمار (مصرف ۳ گرم در لیتر جلبک دریایی و مقدار آب آبیاری به اندازه ۸۰ درصد ظرفیت زراعی خاک) به‌عنوان تیمار برتر معرفی می‌گردد.

کلیدواژه‌ها:

بهره‌وری مصرف آب

سرعت رشد محصول

شاخص سطح برگ

عملکرد

استناد: عسکری دهنو، صادق؛ حسن پور، فرزاد؛ پیری، حلیمه و خمیری، عیسی (۱۴۰۴). تأثیر عصاره جلبک دریایی قهوه‌ای بر کاهش اثرات تنش آبی در فلفل دلمه‌ای. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۵ (۱)، ۱۴۷-۱۶۴. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.384872.1188>



۱. مقدمه

نیاز روزافزون به محصولات کشاورزی از یک سو و از سوی دیگر کمبود منابع آب در بیش تر نقاط کشور به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک سبب شده بهینه سازی مصرف آب در سرلوحه کار برنامه ریزان و سیاست گذاران قرار گیرد. یکی از راهبردهای مهم بهینه سازی مصرف آب، کاربرد روش های کم آبیاری می باشد. استفاده از روش های کم آبیاری می تواند باعث کاهش رطوبت خاک و عملکرد محصول شود. به همین دلیل در دهه های اخیر توجه زیادی به ترکیب های محرک زیستی به عنوان راه کاری برای غلبه بر تنش های زیستی و غیرزیستی شده است. استفاده از کودهای زیستی یکی از راه های رسیدن به کشاورزی پایدار و افزایش توان تولید گیاهان در شرایط تنش های محیطی است. کودهای زیستی به مجموعه مواد نگهدارنده با تعداد زیادی از ریزجانداران مفید گفته می شود که بیش تر به منظور تأمین عناصر غذایی مورد نیاز گیاه و ایجاد شرایط فیزیکی و شیمیایی مناسب خاک برای رشد و نمو آن استفاده می شوند. انواعی از کودهای زیستی با منشأ باکتری، قارچ، جلبک و یا دیگر موجودات خاکی در جهان قابل تولید است که سازوکار عمل تمامی آن ها قابل جذب نمودن عناصر غذایی توسط گیاه است (Bindhu, 2013). یکی از نهادهای مورد استفاده در کشاورزی ارگانیک، استفاده از عصاره جلبک دریایی است که می تواند جایگزین مناسبی برای کودهای شیمیایی صنعتی باشد (Javanmardi and Azadi, 2014). برخلاف کودهای شیمیایی، عصاره به دست آمده از جلبک دریایی از تخریب محیط زیست جلوگیری نموده، غیرسمی بوده و آلودگی خطرناک برای انسان، حیوانات و پرندگان ایجاد نمی کند (Del Poso et al., 2007). استفاده از جلبک دریایی تازه به عنوان منبع ماده آلی و کود در کشاورزی از زمان های قدیم شناخته شده است، اما به تازگی محرک رشد بودن آن ثابت شده است. طبق گزارش فائو مقدار قابل توجهی از عصاره جلبک های دریایی (۲۰ میلیون تن در سال) به عنوان محرک رشد، اصلاح کننده خاک و مکمل تغذیه ای در کشاورزی استفاده می شود. عصاره جلبک های دریایی ترکیب پیچیده ای از موادی است که ترکیب آن بسته به منبع جلبک، فصل جمع آوری و روش عصاره گیری متفاوت است (Sharma et al., 2012).

جلبک های دریایی قهوه ای (*Ascophyllum nodosum*) یکی از مهم ترین منابع پایدار با پتانسیل صنعتی به حساب می آیند. عصاره جلبک دریایی شامل تعدادی از فیتوهورمون ها مانند اکسین ها، سیتوکینین ها، جیبرلین ها، آبسزیک اسید و براسینواسترئوئیدهاست (Zodape et al., 2010). از جمله مزایای استفاده از کود جلبک دریایی در کشاورزی رشد و گسترش بیش تر ریشه ها، جوانه زنی بهتر و سریع تر بذرها، به تأخیر انداختن پیری میوه ها، افزایش عمر پس از برداشت محصولات، افزایش توان و مقاومت گیاهان در برابر تنش های زنده و غیرزنده و افزایش کمیت و کیفیت میوه ها می باشد (Hernández-Herrera et al., 2014).

جلبک ها به علت داشتن ساختار رشته ای و تولید مواد چسبنده، باعث افزایش تخلخل خاک و افزایش نگهداشت آب خاک می شوند (Sridhar & Rengasamy, 2011). نتایج پژوهش های مختلف، آثار مثبت عصاره جلبک دریایی را بر گیاهانی مانند انگور (Norrie & Keathley, 2006)، خیار (Sarhan et al., 2011) و کلم بروکلی (Mattner et al., 2013) نشان می دهد. عصاره جلبک دریایی به دلیل داشتن هورمون های رشد مانند اکسین و سیتوکینین، عناصری همچون نیتروژن، آهن، روی، مس، کبالت، مولیبدن، منگنز، منیزیم و نیکل، ویتامین ها و اسیدهای آمینه، تأثیر مفیدی بر رشد گیاهان و ایجاد مقاومت در برابر تنش های غیرزیستی مانند شوری، خشکی و دما دارد (Haghparsat et al., 2012). Ismailpour et al. (2019) در پژوهشی نشان دادند محلول پاشی با غلظت ۲ گرم در لیتر عصاره جلبک دریایی بر گیاه ریحان، با افزایش میزان پرولین، ایجاد تنظیم اسمزی، کاهش تجزیه کلروفیل و

کاهش نشت غشا، سبب بهبود رشد ریحان در شرایط تنش خشکی شد. پژوهشی توسط Xu et al. (2015) به منظور تعیین ارزیابی و تأثیر عصاره جلبک دریایی بر رشد، فیزیولوژی و تغذیه اسفناج تحت شرایط تنش خشکی انجام گرفت. نتایج بررسی نشان داد که کاربرد عصاره جلبک دریایی در تیمار آبیاری کامل تأثیری بر رشد اسفناج نداشت. اما این ماده با بهبود روابط آبی و کاهش محدودیت بازشدن روزنه‌ای گیاه سبب بهبود رشد اسفناج در شرایط تنش خشکی ملایم شد. محلول‌پاشی جلبک دریایی بر گیاه گوجه‌فرنگی باعث افزایش شاخص‌های رشدی مانند ارتفاع گیاه و تعداد شاخه و افزایش در شاخص‌های زایشی از جمله تعداد گل، تعداد میوه در بوته و وزن میوه شد (Kumari et al., 2011).

فلفل دلمه‌ای با نام علمی *Capsicum annuum* L. گیاهی علفی و یکساله متعلق به خانواده Solanaceae و یکی از سبزی‌های مهم در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری جهان است. میوه فلفل به دلیل داشتن ترکیبات آنتی‌اکسیدانی شامل فنول‌ها، ویتامین ث و کاروتنوئیدها دارای ارزش بالایی بوده و برای تنظیم فشارخون، افزایش اشتها و هضم غذا استفاده می‌شود (Tapus et al., 2007). سطح زیر کشت فلفل در سال ۲۰۱۷ تقریباً دو میلیون هکتار بود که منجر به تولید ۳۶ میلیون تن فلفل شد. چین بزرگ‌ترین تولیدکننده فلفل در دنیا است و مکزیک و ترکیه بعد از آن قرار دارد (FAOSTAT, 2018). در ایران، فلفل دلمه‌ای یکی از پرمصرف‌ترین سبزی‌ها در سبد غذایی خانوار است. استان‌های اصفهان، یزد و کرمان از مراکز اصلی تولید فلفل محسوب می‌شوند که به ترتیب بیش‌ترین سطح تولید را نسبت به سایر استان‌های کشور به خود اختصاص داده‌اند. فلفل گیاهی حساس به تنش خشکی است. پژوهش‌های روی این گیاه نشان داده است تنش آبی در مرحله گل‌دهی باعث ریزش گل و کاهش تعداد میوه و عملکرد گیاه می‌شود (Rubio et al., 2010).

همان‌طور که پژوهش‌ها نشان داد محلول‌پاشی عصاره جلبک دریایی تأثیر مثبت بر کاهش اثرات تنش آبی در گیاهان دارد. با توجه به این که در منطقه سیستان اراضی زیادی وجود دارد که قابل زرع می‌باشد، اما به‌خاطر کمبود منابع آب به‌صورت بایر رها شده‌اند. بنابراین، باید دنبال راه‌کاری بود که با حفظ شرایط پایدار در منابع آب و خاک منطقه از لحاظ اقتصادی موجب توسعه کشاورزی شود. یکی از کارهایی که در شرایط کمبود آب انجام می‌شود، کم‌آبیاری است. کم‌آبیاری باعث کاهش عملکرد محصول می‌شود. بنابراین با توجه به مزایایی که درباره جلبک دریایی گفته شد و با توجه به اهمیت مشکل کم‌آبی که در بسیاری از مناطق کشور و از جمله منطقه مورد مطالعه وجود دارد، هدف از این پژوهش استفاده از عصاره جلبک دریایی در کاهش اثرات تنش کم‌آبی بر فلفل دلمه‌ای در منطقه سیستان می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

پژوهش حاضر در بهمن‌ماه ۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی واقع در شهرستان زهک در قالب طرح کرت‌های خردشده به‌صورت بلوک کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. شهرستان زهک در منطقه سیستان در استان سیستان و بلوچستان در ۶۱ درجه و ۶۷ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۸۹ دقیقه عرض شمالی و ارتفاع ۴۸۰ متر از سطح دریا قرار دارد. منطقه مطالعاتی دارای اقلیم فراخشک بوده و میزان بارندگی آن در سال کم‌تر از ۶۰ میلی‌متر می‌باشد. شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

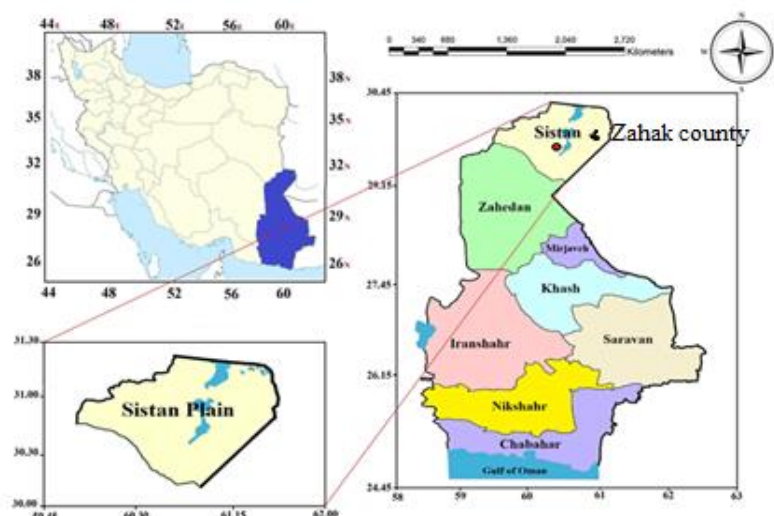


Figure 1. Geographical location of the study area

۲.۲. تیمارها و اجرای مراحل زراعی

به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک پیش از مراحل آماده‌سازی زمین نمونه‌های خاک از اعماق صفر-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متری خاک برداشت شد و برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تعیین شد. همچنین از آب مورد استفاده نیز جهت تعیین کیفیت آن نمونه‌برداری شد. نتایج تجزیه آب و خاک مورد استفاده در جدول‌های (۱) و (۲) آورده شده است.

Table 1. Some physical and chemical properties of the soil

Sampling depth (cm)	Soil texture	Silt (%)	Sand (%)	Clay (%)	pH	EC (dsm ⁻¹)	Absorbable potassium (ppm)	Organic carbon (ppm)	Absorbable phosphorus (ppm)
0-30	Loam sand	42	49	9	7.6	2.1	280	0.72	4.6
30-60	Loam sand	40	48	12	7.8	2.5	231	0.68	5.7

Table 2. Values of chemical properties of irrigation water

Anions (meqlit ⁻¹)			Cations (meqlit ⁻¹)				SAR	EC (dsm ⁻¹)	pH	water sample
SO ₄ ⁻	Cl	HCO ₃ ⁻	K	Na	Mg	Ca				
1.6	0.6	4.1	0.06	2.6	1.2	1.8	2.1	0.7	7.6	S1

تیمارها شامل سه سطح میزان آب آبیاری (I1، I2، I3 به‌ترتیب معادل ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ ظرفیت زراعی خاک) و محلول‌پاشی غلظت‌های مختلف عصاره جلبک دریایی (SE1، SE2، SE3 و SE4 به‌ترتیب معادل صفر، ۰/۵، ۱/۵ و ۳ گرم در لیتر) بود. محلول‌پاشی برگ‌ی تیمار صفر (تیمار شاهد بدون جلبک دریایی) با آب مقطر انجام شد. کاشت در ابتدای اسفندماه ۱۴۰۲ انجام شد. ابتدا زمین موردنظر شخم و دیسک زده و کرت‌بندی شد. طول هر کرت چهار متر و عرض آن سه متر بود. همچنین فاصله بین کرت‌های فرعی یک متر و فاصله بین کرت‌های اصلی دو متر در نظر گرفته شد. در هر کرت پنج ردیف کشت بود که دو ردیف کناری به‌عنوان حاشیه در نظر گرفته شد و داده‌های موردنیاز از ردیف‌های میانی برداشت شد. فواصل ردیف‌های کشت از هم ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها روی ردیف ۳۰ سانتی‌متر بود.

براساس نتایج آزمون اولیه خاک، نیاز کودی خاک شامل کمبود عناصر غذایی مهم نظیر پتاسیم، فسفر و ازت به ترتیب با مصرف کودهای سولفات پتاسیم و سوپرفسفات تریپل به مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار در ابتدای فصل کشت و کود اوره به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار به صورت سرک در دو مرحله ابتدای کشت و چهار هفته پس از کشت تأمین شد. جلبک دریایی در چهار مرحله به صورت محلول بر گیاه پاشیده شد. در هر مرحله مقدار صفر، ۰/۵، ۱/۵ و ۳ گرم در لیتر از کود اندازه گیری شده و در آب مقطر حل شده و به صورت محلول پاشی به برگ ها اعمال شد. تیمار شاهد (صفر) توسط آب مقطر آب پاشیده شد.

۳.۲. تعیین مقدار آب آبیاری

اندازه گیری رطوبت خاک در محدوده مورد نظر برای تعیین نیاز آبی گیاه، با استفاده از دستگاه TDR انجام گرفت. سپس مقدار عمق آب آبیاری با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد (Liue et al., 2006).

$$d = \sum_{i=1}^n (\theta_{fci} - \theta_i) \Delta Z_i \quad \text{رابطه (۱)}$$

در معادله فوق، d عمق آبیاری (متر)، θ_{fci} و θ_i به ترتیب رطوبت حجمی خاک ($m^3.m^{-3}$) در حالت ظرفیت زراعی و قبل از آبیاری در لایه نام است. هم چنین Δz ضخامت لایه بر حسب متر و n شماره لایه خاک می باشد.

سیستم آبیاری مورد استفاده آبیاری قطره ای شامل لوله های آبیاری قطره ای تیپ با فواصل قطره چکان ۲۰ سانتی متر روی لوله و دبی خروجی ۲ لیتر بر ساعت با فشار ۱۰۰ کیلو پاسکال بود. برای هر ردیف گیاهی یک نوار تیپ در نظر گرفته شد. دور آبیاری برای همه تیمارها ثابت و به صورت دو روز در میان و با هدف تأمین کمبود رطوبت خاک تا عمق ۶۰ سانتی متری در تیمار آبیاری کامل و رساندن به حد ظرفیت زراعی خاک در نظر گرفته شد. حجم آب محاسبه شده از رابطه (۱) با استفاده از کنتور به هر کرت داده شد. حجم آب سایر تیمارها براساس این حجم تعیین و اعمال شد. مقدار آب آبیاری تمامی تیمارها تا زمان سبزشدن (مرحله چهاربرگی) یکسان، بدون اعمال تیمارها انجام شد. پس از طی شدن مراحل رشد ابتدایی و استقرار کامل گیاه، تیمارهای کم آبی و جلبک دریایی اعمال شد. جلبک دریایی در چهار مرحله و هر دو هفته یکبار پس از استقرار کامل گیاه، محلول پاشی شد.

۴.۲. نمونه برداری گیاهی و اندازه گیری پارامترها

نمونه برداری از تیمارها به منظور تعیین ویژگی های ظاهری آنها در فواصل زمانی هر دو هفته یکبار و در طول دوره رشد فلفل دلمه ای انجام شد. این پارامترها شامل ارتفاع گیاه و شاخص سطح برگ بود. اولین برداشت میوه اواسط اردیبهشت ماه ۱۴۰۳ انجام شد. برداشت میوه هر هفته تا زمانی انجام گرفت که میوه از حالت بازارپسندی خارج شد. در مجموع هشت مرحله برداشت انجام گردید. در پایان فصل رشد نیز طول و حجم ریشه، تعداد، قطر و وزن میوه و عملکرد گیاه تعیین شد. برای اندازه گیری عملکرد کل هر یک از بوته ها، پس از برداشت میوه ها، به کمک یک ترازوی دیجیتالی، وزن میوه ها در برداشت های متوالی (هفته ای یکبار) ثبت و در پایان پس از جمع بندی عملکرد هر بوته محاسبه شد. برای محاسبه تعداد میوه در بوته، تعداد کل میوه های برداشت شده از هر بوته ثبت شد. از تقسیم عملکرد کل بر تعداد میوه در هر بوته، میانگین وزن میوه به دست آمد.

جهت تعیین پارامترهای مربوط به ریشه، ریشه گیاه از خاک در آورده شد. اندازه بزرگترین ریشه به عنوان طول ریشه گیاه در نظر گرفته شد. به منظور تعیین حجم ریشه از قانون ارشمیدس استفاده شد. بدین منظور با قراردادن ریشه ها در استوانه های مدرج و تعیین میزان تغییر سطح آب، حجم ریشه اندازه گیری شد.

۵.۲. بهره‌وری آب^۱ (WP)

بهره‌وری آب عبارت است از نسبت محصول تولیدشده به آب آبیاری که از رابطه (۲) محاسبه شد (Payero *et al.*, 2009).

$$WP = \frac{Y}{IR} \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه، WP بهره‌وری آب آبیاری (کیلوگرم بر مترمکعب)، Y مقدار محصول برداشت‌شده (کیلوگرم در هکتار) و IR مقدار آب آبیاری (مترمکعب) است.

در پایان داده‌های اندازه‌گیری‌شده با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 مورد تجزیه و تحلیل و میانگین‌ها با آزمون دانکن مورد مقایسه قرار گرفتند.

۶.۲. روند تغییرات سرعت رشد^۲ (CGR)

به‌منظور بررسی تأثیر عصاره جلبک دریایی بر کاهش اثرات تنش آبی بر فلفل دلمه، روند تغییرات سرعت رشد (CGR)، روند سرعت رشد نسبی^۳ (RGR) و شاخص سطح برگ^۴ (LAI) مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور نمونه‌های برداشت‌شده در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد و به‌مدت ۷۲ ساعت در آون خشک و سپس توزین گردیده و با استفاده از روابط (۳) تا (۵) روند تغییرات رشدی گیاه به‌دست آمد (Javadi *et al.*, 2007):

$$CGR = \frac{W_2 - W_1}{T_2 - T_1} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$RGR = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{T_2 - T_1} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$LAI = \frac{LA}{GA} \quad \text{رابطه ۵}$$

در این رابطه‌ها، CGR سرعت رشد محصول (گرم بر مترمربع در روز)، W₂ و W₁ وزن خشک برداشت‌شده (گرم)، T₂ و T₁ زمان‌های برداشت (روز)، LA سطح برگ (مترمربع) و GA سطح زمین (یک مترمربع در نظر گرفته شد) می‌باشد.

برای اندازه‌گیری سطح برگ گیاه، برگ‌های هر بوته جداشده، سطح هر برگ اندازه‌گیری و مجموع مساحت‌های به‌دست‌آمده به‌عنوان سطح برگ یک بوته در نظر گرفته شد. میانگین سطح برگ‌های یک بوته به‌عنوان سطح یک برگ در نظر گرفته شد. برای تعیین سطح هر برگ، طول برگ به‌عنوان طول یک مستطیل و میانگین سه عرض به‌عنوان عرض مستطیل در نظر گرفته و مساحت مستطیل حاصل به‌عنوان سطح برگ در نظر گرفته شد. سه عرض اندازه‌گیری‌شده برگ عبارت بودند از بزرگ‌ترین عرض برگ (اغلب در وسط طولی برگ قرار دارد)، متوسط عرض قسمت پایینی برگ و متوسط عرض قسمت بالایی برگ.

۳. نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری‌شده در جدول (۳) آورده شده است. نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که اثر مقدار آب آبیاری و جلبک دریایی بر پارامترهای اندازه‌گیری‌شده در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بود. اثر متقابل آب آبیاری و جلبک دریایی نیز در سطح احتمال یک و پنج درصد بر پارامترهای اندازه‌گیری‌شده معنی‌دار بود. اثر تکرار بر صفات اندازه‌گیری‌شده معنی‌دار نبود که نشان‌دهنده شرایط یکنواخت آزمایش برای همه تکرارها بوده است (جدول ۳).

Table 3. Results of analysis of variance (mean square and degrees of freedom) of the measured traits

Sources of change	Degrees of freedom	Water productivity	Yield	Fruit weight	Fruit diameter	Number of fruits per plant	Plant height	Root volum	Root length
R	2	74.3ns	89.3ns	156.4ns	10.2ns	6.5ns	102.42ns	124.6ns	11.5ns
I (irrigation)	2	267.2*	2186.5*	247.6**	22.4*	19.6*	1247.3**	258.4*	38.4*
R*I	4	158.1	106.3	185.2	9.5	7.9	146.7	294.2	21.6
SE (seaweed extract)	3	284.6*	154.8*	345.9*	26.7*	21.7*	859.1*	342.5*	45.7**
I*SE	6	349.5*	396.4*	412.8*	32.6*	10.3*	1002.7*	298.7*	52.7*
R*SE(I)	12	176.2	184.5	146.7	15.8	8.4	346.8	178.7	27.3
coefficient of variation (%)		14.8	11.7	13.5	12.4	14.5	14.3	12.3	11.4

* and **significance at the probability level of five percent and one percent, ns non-significance.

۳.۱. ارتفاع بوته

براساس جدول (۴) با کاهش عمق آب آبیاری ارتفاع گیاه کاهش یافت. بیشترین مقدار ارتفاع در تیمار ۱۰۰ درصد آب آبیاری (۹۳/۴ سانتی متر) مشاهده شد که از این نظر با تیمار ۸۰ درصد آب آبیاری تفاوت معنی دار نداشت. کمترین مقدار آن در تیمار ۶۰ درصد آب آبیاری (۷۲/۵ سانتی متر) بود. Ghahremani et al. (2023) با اعمال تکنیک کم آبیاری در طی روند تولید و پرورش فلفل دلمه‌ای گزارش دادند که کاهش میزان آبیاری به ۷۵ درصد نیاز آبی موجب کاهش معنی دار ارتفاع بوته‌ها و سطح برگ شد. کاهش ارتفاع ناشی از تنش خشکی می‌تواند به دلیل کاهش پتانسیل آب بافت‌های مریستمی در طول روز و نقصان پتانسیل فشاری باشد که در نتیجه مانع بزرگ شدن سلول‌ها شده و ارتفاع کاهش می‌یابد (Hosseinzadeh et al., 2017). مطالعات انجام شده نشان داده است، اولین مرحله دفاع گیاه در برابر تنش خشکی کاهش سطح برگ و طول ساقه است که به علت اختلاف پتانسیل آب در مدت دوره تنش خشکی و در نتیجه کاهش آب بافت‌های گیاه اتفاق می‌افتد (Hassan et al., 2013). استفاده از جلبک دریایی باعث افزایش ارتفاع بوته شد. کاربرد ۳، ۱/۵ و ۰/۵ گرم در لیتر جلبک دریایی باعث افزایش ۳۹/۲۶، ۲۲/۸۵ و ۱۱/۶۶ درصدی ارتفاع بوته نسبت به تیمار شاهد (عدم مصرف جلبک دریایی) شد. بیشترین ارتفاع بوته (۹۷/۸ سانتی متر) با مصرف ۳ گرم در لیتر جلبک دریایی به دست آمد. در پژوهش‌های مشابهی، محلول پاشی عصاره جلبک دریایی سبب افزایش رشد رویشی، تعداد شاخه جانبی و سطح برگ در توت‌فرنگی (El-miniawy et al., 2014) و افزایش ارتفاع در گلرنگ شد (Sibi et al., 2016). محرک‌های رشد موجود در جلبک دریایی مانند سایتوکینین‌ها و مواد اکسینی سبب افزایش تقسیم و طول شدن سلولی و توسعه برگ و رشد رویشی گیاه می‌شوند (Xu & Leskovar, 2015). اثرات متقابل آب آبیاری و جلبک دریایی (جدول ۵) نشان داد در همه تیمارهای آبیاری با افزایش عمق آب آبیاری و افزایش مصرف جلبک دریایی، ارتفاع بوته افزایش یافت. تیمار I3SE4 بیشترین ارتفاع بوته (۹۶/۴ سانتی متر) را داشت، اما از این نظر با تیمارهای I3SE3 (۹۱/۷ سانتی متر) و I2SE3 (۹۵/۷ سانتی متر) تفاوت معنی داری نداشت. پژوهش‌گران با بررسی جلبک آزولا بر بادربو در شرایط کم آبی بیان کردند که عصاره جلبک دریایی اثرات تنش خشکی را تا حد زیادی کاهش داد و سبب افزایش میزان متابولیت‌های ثانویه، حفظ ساختار سلولی، افزایش ارتفاع و دیگر صفات مورفولوژیک گیاه شد (Ghasemi Maham et al., 2018).

۳.۲. قطر، وزن و تعداد میوه در بوته

همان‌طور که از جدول (۴) مشاهده می‌شود با کاهش عمق آب آبیاری تعداد میوه گیاه کاهش یافت. بیشترین مقدار آن از تیمار ۱۰۰ درصد آب آبیاری (۹/۳ عدد) به دست آمد که تفاوت معنی دار با تیمار ۸۰ درصد آب آبیاری (۸/۴ عدد) نداشت. پژوهش‌ها روی گیاه فلفل نشان داده است این گیاه در طول دوره گل‌دهی و رشد میوه به تنش آبی حساس می‌باشد و تنش آبی باعث سقط جنین گل و کاهش تعداد میوه گیاه می‌شود (Fernández et al., 2005; Jaimez et al., 2000). کاربرد جلبک دریایی باعث افزایش تعداد میوه شد. بیشترین افزایش تعداد میوه (۶۸/۹۶ درصد) با مصرف ۳ گرم در لیتر جلبک دریایی (تیمار SE4)

مشاهده شد. اثرات متقابل آب آبیاری و جلبک دریایی (جدول ۵) نشان داد با افزایش آب آبیاری و افزایش مصرف جلبک دریایی تعداد میوه افزایش یافت. با کاهش عمق آب آبیاری وزن و قطر میوه کاهش یافت (جدول ۴). قطر و وزن میوه در تیمارهای ۱۰۰ و ۸۰ درصد آب آبیاری تفاوت معنی‌داری نداشتند. کاهش عمق آب تا ۶۰ درصد باعث کاهش ۲۱/۲ و ۳۰/۵ درصدی قطر و وزن میوه نسبت به تیمار آبیاری کامل شد. کاهش قطر و وزن میوه در اثر تنش آبی می‌تواند به علت کاهش محتوای آب سلول‌های میوه باشد. این کاهش در محصولات مشابه همچون خیار، بادمجان و گوجه‌فرنگی نیز گزارش شده است (Piri *et al.*, 2022; Parkash *et al.*, 2021; Cantürk *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2014). فرایندهای مرتبط با آسمیلاسیون و تولید فرآورده‌های مرتبط با آن در گیاه به شدت تحت تأثیر مقدار آب در دسترس سلول قرار دارد و در شرایط کمبود آب، کاهش نرخ آسمیلاسیون سلولی به‌طور مستقیم بر میزان تولید ماده خشک در سلول‌ها و وزن نهایی محصول تولیدشده تأثیرگذار است (Khazaei *et al.*, 2020). استفاده از جلبک دریایی قطر و وزن میوه را افزایش داد. بیش‌ترین قطر (۶/۸ سانتی‌متر) و وزن میوه (۹۲/۲ گرم) از تیمار SE4 (مصرف ۳ گرم در لیتر جلبک دریایی) به‌دست آمد. محلول‌پاشی برگ‌ی جلبک دریایی در طول دوره رشد توت‌فرنگی، باعث افزایش اندازه، طول، قطر، وزن و عملکرد میوه شد و این افزایش به حضور تنظیم‌کننده‌های رشدی همچون اکسین، جبرلین، کینتین و زاتین در عصاره جلبک دریایی نسبت داده شده است (Eshghi *et al.*, 2017). اثرات متقابل آب آبیاری و جلبک دریایی نشان داد با افزایش آب آبیاری و افزایش مصرف مقدار جلبک دریایی قطر و وزن میوه افزایش یافت (جدول ۵). قطر میوه از ۷/۱ تا ۴/۱ سانتی‌متر و وزن میوه از ۹۲/۵ تا ۴۵/۳ گرم در تیمارهای I3SE4 و I1SE1 متغیر بود. در تمامی سطوح آبیاری کاربرد جلبک دریایی باعث افزایش قطر و وزن میوه شد. عصاره جلبک دریایی سبب تسریع گل‌دهی، افزایش تشکیل میوه و تولید میوه زودرس در برخی گیاهان می‌شود. افزایش عملکرد در اثر استفاده از عصاره جلبک دریایی احتمالاً به‌دلیل حضور هورمون‌های رشد مانند سائتوکینین در آن‌ها است. سائتوکینین در مرحله رشد رویشی سبب توزیع بهتر عناصر غذایی و در مرحله زایشی سبب تحرک عناصر غذایی می‌شود (Khan *et al.*, 2009). پژوهش‌ها نشان داده است جلبک‌های دریایی حاوی ۱۹-۱۸ آمینواسید هستند که اثرات ترکیبی آن‌ها سبب بهبود عملکرد و جذب عناصر غذایی می‌شود. این اثرات در پاپایا سبب افزایش تعداد میوه (Morales-Payan & Stall, 2003) و در کارلا سبب افزایش تعداد میوه و وزن تر و خشک میوه (Amini Fard & Khandan, 2019) شد.

Table 4. Average comparison of the measured parameters

Experimental treatments	Height (cm)	Number of fruits (number)	Fruit diameter (cm)	Fruit weight (g)	Yield (ton/ha)	Wp (kg/m ³)
The amount of irrigation water (%)						
I3 (100)	93.4a	9.3a	6.6a	90.3a	31.5a	3.81b
I2 (80)	89.3a	8.4a	6.1a	82.4a	27.6a	4.18a
I1 (60)	72.5b	6.7b	5.2b	62.7b	15.4b	3.11bc
Seaweed extract (gr/lit)						
SE1 (0)	70.3c	5.8d	4.8c	51.7d	11.7d	1.42d
SE2 (0.5)	78.5bc	7.2c	5.4b	66.5c	16.7c	2.03c
SE3 (1.5)	86.4b	8.3b	6.2ab	81.3b	24.6b	2.98b
SE4 (3)	97.8a	9.8a	6.8a	92.2a	32.3a	3.91a

Averages with the same letters do not have significant differences based on Duncan's test at the 5% probability level.

Table 5. Comparison of the average mutual effects of the amount of irrigation water and the amount of seaweed

Treatment	Height (cm)	Number of fruits (number)	Fruit diameter (cm)	fruit weight (gram)	Yield (ton/ha)	Wp (kg/m ³)
I1SE1	60.4d	5.1e	4.1e	45.3d	8.3e	1.67ef
I1SE2	65.3d	5.7e	4.5e	50.6d	9.6e	1.94e
I1SE3	70.2c	6.2d	4.9d	56.4c	13.7d	2.76d
I1SE4	76.7c	7.8bc	5.6bc	66.5bc	17.5bc	3.53c
I2SE1	70.6c	6.3d	4.5d	46.6d	10.5	1.59f
I2SE2	74.5c	7.4c	5.2c	60.8c	15.3c	2.32d
I2SE3	81.3b	8.2b	5.8b	74.4b	20.7b	3.13c
I2SE4	95.7a	9.8a	6.9a	85.2a	28.6a	4.33a
I3SE1	80.2b	7.8bc	5.7bc	54.3c	15.7c	1.91e
I3SE2	84.6b	8.1b	6.1b	70.5bc	18.4bc	2.23de
I3SE3	91.7a	9.4ab	6.7ab	83.7ab	26.5ab	3.21bc
I3SE4	96.4a	10.5a	7.1a	92.5a	32.8a	3.97b

Averages with the same letters do not have significant differences based on Duncan's test at the 5% probability level.

۳.۳. عملکرد

کاهش مقدار آب آبیاری از ۱۰۰ درصد به ۸۰ و ۶۰ درصد به ترتیب باعث کاهش ۱۲/۴ و ۵۱/۱ درصدی عملکرد شد (جدول ۴). بیشترین مقدار عملکرد (۳۱/۵ تن در هکتار) از تیمار I3 (تیمار ۱۰۰ درصد آب آبیاری) به دست آمد که با تیمار I2 (۸۰ درصد آب آبیاری) تفاوت معنی دار مشاهده نشد. کاهش عملکرد می تواند به دلیل کاهش جذب عناصر غذایی مورد نیاز گیاه از خاک و همچنین کاهش جذب دی اکسید کربن به دلیل بسته شدن روزنه ها در شرایط خشکی و در نتیجه کاهش میزان فتوسنتز و کربوهیدرات های تولید شده طی فرایند فتوسنتز باشد که در نهایت موجب کاهش عملکرد گیاه شده است (Mir et al., 2023). همچنین همان طور که توضیح داده شد، کاهش مقدار آب آبیاری قطر، وزن و تعداد میوه را کاهش داد که در نتیجه مقدار عملکرد نیز کاهش می یابد. کاهش عملکرد تحت تأثیر شرایط خشکی شدید می تواند تحت تأثیر رشد رویشی، سیستم فتوسنتزی، جذب عناصر غذایی، متابولیسم نیتروژن و فشار آماس سلولی ناشی از کاهش سطح باشد (Bandurska, 2022). کاربرد مقادیر مختلف جلبک دریایی باعث افزایش مقدار عملکرد شد. بیشترین افزایش عملکرد (۱۷۶/۱ درصد) در تیمار SE4 (مصرف ۳ گرم در لیتر جلبک دریایی) مشاهده شد. پژوهش ها نشان داد مصرف ۲۰ درصد جلبک دریایی باعث افزایش معنی داری در جوانه زنی بذر و عملکرد گیاه بامیه داشت (Jothinayagi & Anbazhagan, 2009). استفاده از جلبک دریایی به علت وجود هورمون های رشد در آن و اثر آن ها بر روند جذب و حرکت مواد غذایی در برگ شده که موجب افزایش عملکرد می شود (Sunarpi et al., 2010). اثرات متقابل آب آبیاری و جلبک دریایی باعث افزایش عملکرد فلفل شد (جدول ۵). با توجه به جدول (۵) می توان بیان کرد در تیمار آبیاری کامل (I3) تفاوت معنی داری بین کاربرد ۳ و ۱/۵ گرم در لیتر جلبک دریایی برای افزایش عملکرد مشاهده نشد. همچنین تفاوت معنی داری بین تیمارهای I3SE4 و I2SE4 مشاهده نشد. پژوهش گران بیان داشتند استفاده از عصاره جلبک دریایی سبب افزایش تحمل به تنش های خشکی، شوری و دمایی می شود (Craigie, 2011; Afaf et al., 2022). جلبک های دریایی مخلوطی از مواد آلی و معدنی هستند. مواد معدنی آن ها در درجه اول پتاسیم و مواد آلی شامل اسیدهای آمینه و آلژینک اسید می باشد. در عصاره جلبک دریایی ۱۶ تا ۱۷ نوع اسید آمینه وجود دارد که مهم ترین آن ها بتائین یا گلايسین بتائین است. این اسید آمینه دارای خواص اسمولیتی است که باعث تنظیم فشار اسمزی داخل سلول می شود. گلايسین بتائین باعث افزایش تحمل گیاهان به تنش سرما و خشکی می شود (Ghaffari Nejad et al., 2020).

۳.۴. بهره وری مصرف آب آبیاری

مطابق جدول (۴) با کاهش آب آبیاری تا سطح ۸۰ درصد بهره وری مصرف آب آبیاری افزایش یافت. کاهش بیش تر آب آبیاری تا سطح ۶۰ درصد باعث کاهش بهره وری مصرف آب آبیاری شد. علت آن به دلیل کاهش عملکرد در این تیمار می باشد. هر عاملی که بر روی عملکرد و میزان ماده خشک گیاه تأثیر منفی بگذارد، بر روی بهره وری آن نیز تأثیر منفی دارد. بنابراین کاهش مقدار آب آبیاری تا سطح ۶۰ درصد با توجه به این که عملکرد را تحت تأثیر قرار داده و باعث کاهش بیش تر آن شده است، بهره وری مصرف آب را نیز کاهش می دهد. نتایج پژوهش با نتایج سایر پژوهش گران همخوانی دارد (Ferrara et al., 2011; Sajadi et al., 2020). محلول پاشی جلبک دریایی باعث افزایش بهره وری مصرف آب آبیاری شد. بیشترین بهره وری مصرف آب (۳/۹۱ کیلوگرم در هکتار) با کاربرد ۳ گرم در لیتر جلبک دریایی به دست آمد (جدول ۴). مطابق جدول (۵) مقادیر بهره وری مصرف آب آبیاری از ۱/۶۷ کیلوگرم در هکتار در تیمار I1SE1 تا ۴/۳۳ کیلوگرم در هکتار در تیمار I2SE4 متغیر بود. در تمامی تیمارها محلول پاشی جلبک دریایی بهره وری مصرف آب را نسبت به تیمار شاهد (عدم محلول پاشی) افزایش داد.

به‌طور کلی، نتایج نشان داد اگر چه کم‌آبیاری تا سطح ۸۰ درصد موجب کاهش عملکرد گیاه فلفل دلمه شد، اما با توجه به این که این کاهش معنی‌دار نبوده است و باعث افزایش بهره‌وری مصرف آب آبیاری شده است، می‌توان به‌منظور صرفه‌جویی در مصرف آب و هزینه کاربرد آن، مقدار آب مصرفی را به مقدار ۲۰ درصد کاهش داد. نتایج سایر محققین نیز نشان داده است با توجه به حساس بودن گیاه فلفل دلمه به تنش آبی، می‌توان مقدار آب را به اندازه ۲۰ درصد کاهش داد بدون آن که کاهش معنی‌داری در عملکرد مشاهده شود (Celebi, 2018; Owusu-Sekyere et al., 2010; Wang et al., 2022; Jafari et al., 2022).

۳.۵. طول و حجم ریشه

نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه واریانس صفات ریشه (جدول ۳) نشان داد بین صفات ریشه در تیمارهای مختلف در سطح احتمال یک و پنج درصد تفاوت معنی‌دار وجود دارد. شکل‌های (۲) و (۳) مقایسه میانگین اثرات ساده و متقابل مقدار آب آبیاری و عصاره جلبک دریایی را بر اندازه طول و حجم ریشه فلفل دلمه‌ای نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۲) مشاهده می‌شود با کاهش مقدار آب آبیاری طول ریشه کاهش یافت. تفاوت معنی‌داری بین تیمار آبیاری کامل و آبیاری ۸۰ درصد مشاهده نشد. اعمال تنش آبیاری باعث تغییرات آناتومیکی مضر در سامانه ریشه مانند از بین رفتن اپیدرم، کورتکس و شادابی ریشه می‌شود که در نهایت کاهش جذب آب و مواد مغذی را به دنبال دارد (Sepaskhah & Ahmadi, 2010). پژوهش‌ها نشان داده است که کاهش رشد ریشه در شرایط کم‌آبیاری ممکن است به‌علت از دست رفتن اتساع سلولی و کاهش فعالیت میتوزی یا مهار طولی شدن سلول‌ها باشد (Shah et al., 2008). در شرایط تنش خشکی، تغییرات فشار آماس در سلول‌های ریشه در توقف رشد طولی آن‌ها نقش به‌سزایی دارد، به‌طوری که با کمبود آب پیوندهای موجود در دیواره سلول‌های ریشه سخت‌تر شده و در نتیجه توسعه‌پذیری، رشد طولی و تجمع ماده خشک ریشه محدود می‌شود (Hosseinzadeh et al., 2016). اسدی و همکاران (۱۳۹۷) بیان داشتند کم‌آبیاری باعث کاهش حجم و طول ریشه رزماری گردید. محلول‌پاشی عصاره جلبک دریایی باعث افزایش طول و حجم ریشه شد. بیش‌ترین طول (۵۱/۶ سانتی‌متر) و حجم (۱۰۳/۵ سانتی‌مترمکعب) ریشه با محلول‌پاشی ۳ گرم در لیتر عصاره جلبک دریایی به‌دست آمد. اثرات متقابل آب آبیاری و عصاره جلبک دریایی (شکل ۳) نشان داد مصرف جلبک دریایی در تمامی تیمارها باعث افزایش طول و حجم ریشه نسبت به تیمار شاهد شد و اختلاف معنی‌دار بین تیمارها وجود داشت. با افزایش مصرف عصاره جلبک دریایی و افزایش مقدار آب آبیاری طول و حجم ریشه گیاه افزایش یافت. بیش‌ترین مقدار طول (۵۱/۷ سانتی‌متر) و حجم (۱۰۵/۶ سانتی‌مترمکعب) ریشه از تیمار I3SE4 به‌دست آمد. پژوهش‌گران بیان داشتند هورمون‌های گیاهی موجود در عصاره جلبک دریایی (اکسین و سیتوکینین) عامل اصلی در افزایش معنی‌دار طول، وزن و حجم ریشه گیاهان می‌باشد (Ramarjan et al., 2012). یکی از ترکیبات موجود در عصاره جلبک دریایی آلجیناز می‌باشد که نقش مستقیم در ژله‌ای شدن دیواره سلولی و افزایش توسعه‌پذیری آن دارد. بنابراین استفاده از عصاره جلبک دریایی در شرایط تنش آبی می‌تواند منجر به کاهش اثرات منفی تنش در جهت سخت شدن دیواره سلولی و کاهش رشد طولی گردد (Zodape et al., 2001).

۳.۶. سرعت رشد محصول (CGR)

پارامتر سرعت رشد یکی از شاخص‌هایی است که با عملکرد گیاهان زراعی همبستگی بالایی دارد و عبارت است از افزایش وزن ماده خشک یک جامعه گیاهی در واحد سطح و در واحد زمان و معمولاً برحسب گرم بر مترمربع در روز بیان می‌شود (Javadi et al., 2007). شکل (۴) تغییرات سرعت رشد محصول را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تیمارهایی که آبیاری کامل و جلبک دریایی استفاده شده است، سرعت رشد گیاه بیش‌تر است.

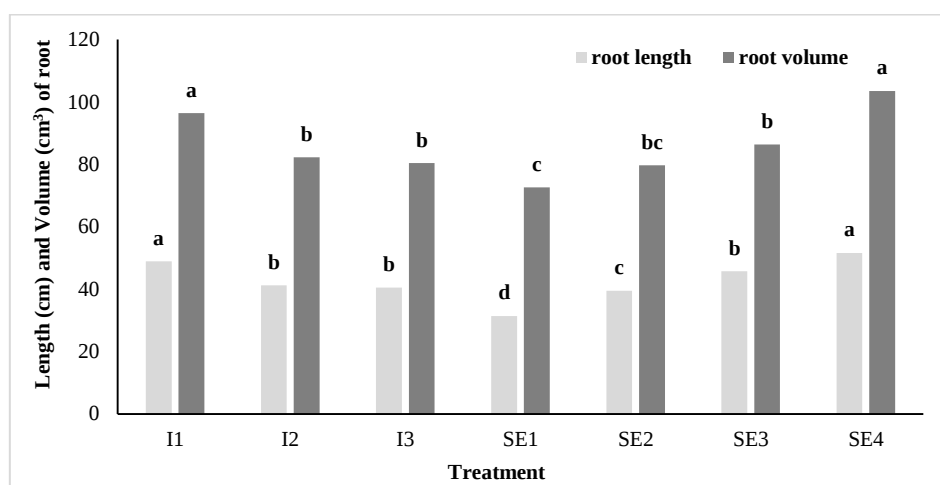


Figure 2. Simple effects of irrigation water amount and seaweed extract on pepper plant root length and volume

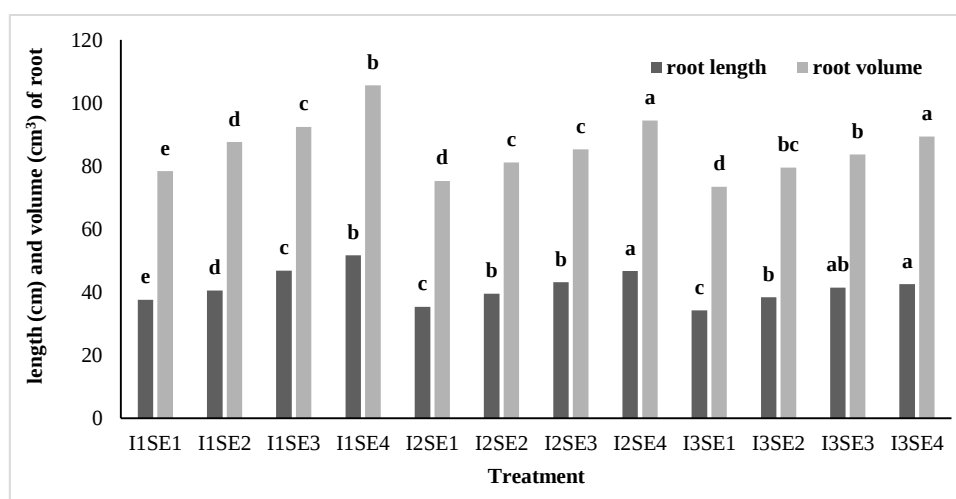


Figure 3. The mutual effects of irrigation water and seaweed extract on the length and volume of pepper plant roots

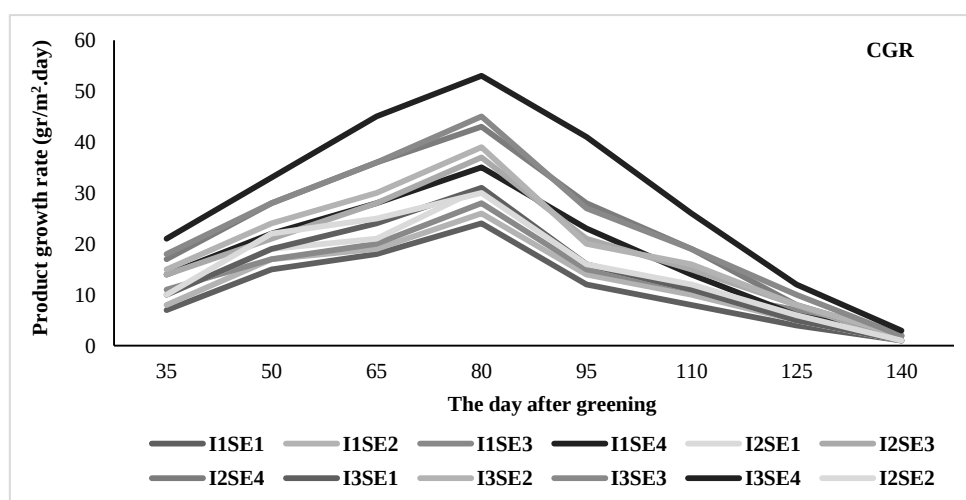


Figure 4. Changes in crop growth rate in different treatments

بیش‌ترین سرعت رشد گیاه در تیمار I3SE4 (۵۰ گرم بر مترمربع در روز) و ۸۰ روز بعد از سبزشدن گیاه مشاهده شد. مطالعات در زمینه استفاده از عصاره جلبکی نشان داد که کاربرد این عصاره باعث افزایش معنی‌دار شاخص‌های جوانه‌زنی، رشدی و عملکردی گندم شد (Kumar & Sahoo, 2011). در مطالعه‌ای دیگر، گزارش شد که تلقیح جلبک‌ها در محیط‌های غذایی کشت گیاهان منجر به افزایش معنی‌دار خصوصیات رشدی گیاه می‌شود (Caffagni et al., 2015). سرعت رشد محصول زیاد، به معنی تجمع ماده خشک زیاد و عملکرد بیش‌تر می‌باشد. در مورد منحنی سرعت رشد محصول به‌دست‌آمده می‌توان گفت در اوایل رشد به‌دلیل کامل‌نبودن پوشش گیاهی و درصد کم جذب نور توسط گیاه سرعت رشد محصول پایین است و با نمو گیاه و توسعه سطح برگ و جذب بیش‌تر نور افزایش سریعی در سرعت رشد محصول حاصل می‌شود. بعد از این سیر صعودی و وقتی سرعت رشد محصول به حداکثر رشد خود رسید، روند نزولی می‌شود. این روند نزولی در ابتدا با شیب ملایم و سپس با سرعت بیش‌تری ادامه می‌یابد تا با رسیدن به پایان عمر گیاه به صفر نزدیک می‌شود. در پژوهشی در خصوص بررسی اثرات شوری آب بر شاخص‌های رشدی سوگوم نتایج مشابه به‌دست آمد (Piri et al., 2018).

۳.۷. سرعت رشد نسبی محصول (RGR)

سرعت رشد نسبی بیان‌کننده میزان افزایش وزن خشک گیاه نسبت به وزن خشک اولیه آن در واحد زمان می‌باشد. معمولاً برحسب گرم در گرم در روز بیان می‌شود. هرگاه لگاریتم طبیعی وزن نسبت به زمان رسم شود، سرعت نسبی رشد شیب آن خط خواهد بود. شکل (۵) تغییرات سرعت نسبی رشد محصول در تیمارهای مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۵) مشاهده می‌شود عصاره جلبک دریایی باعث افزایش سرعت رشد نسبی گیاه شده است. در هر سه سطح آبیاری تیمار شاهد که از عصاره جلبک دریایی استفاده نکرده است، سرعت رشد نسبی کم‌تری داشته است. Basimfar et al. (2016) بیان داشتند محلول‌پاشی عصاره جلبک دریایی باعث افزایش شاخص سطح برگ، سرعت رشد محصول و عملکرد گیاه ماش شد. همچنین ملاحظه می‌شود سرعت نسبی رشد محصول با گذشت زمان به‌صورت خطی کاهش یافته است. علت کاهش سرعت رشد نسبی محصول این است که هرچند مقدار وزن ماده خشک گیاه با گذشت زمان افزایش می‌یابد، اما سرعت افزایش به‌دلیل افزایش بافت‌های بالغ به بافت‌های مریستمی کاهش می‌یابد. از طرفی بخش از این کاهش می‌تواند مربوط به در سایه قرارگرفتن و افزایش سن برگ‌های پایینی گیاه باشد، که باعث کاهش فتوسنتز می‌شود (Piri et al., 2018). Moghimi & Imam (2013) در پژوهش‌های خود به نتیجه مشابه‌دست یافتند و بیان داشتند سرعت نسبی رشد با گذشت زمان به‌صورت خطی کاهش می‌یابد.

۳.۸. شاخص سطح برگ (LAI)

سطح برگ یکی از شاخص‌های مهم رشد است که از آن به‌عنوان معیار اندازه‌گیری سیستم فتوسنتزی استفاده می‌کنند. سطح برگ با عملکرد بیولوژیک و اقتصادی مرتبط بوده و افزایش آن باعث دستیابی به عملکرد بالا می‌شود (Moradi et al., 2018). تغییرات شاخص سطح برگ در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند شاخص سطح برگ در همه تیمارها مشابه است. حداکثر شاخص سطح برگ در هر چهار تیمار تقریباً ۸۰ روز بعد از سبزشدن حاصل گردید. کاهش مقدار آب آبیاری و عدم مصرف جلبک دریایی کاهش شاخص سطح برگ را در پی داشت. با افزایش مقدار آب آبیاری و افزایش مصرف عصاره جلبک دریایی شاخص سطح برگ افزایش یافت. افزایش سطح برگ با افزایش مصرف جلبک دریایی می‌تواند به‌دلیل وجود هورمون سیتوکینین باشد. اثر مثبت محلول‌پاشی جلبک دریایی در افزایش سطح برگ تاج‌خروس در پژوهش Sridhar et al. (2011) نیز گزارش شده است.

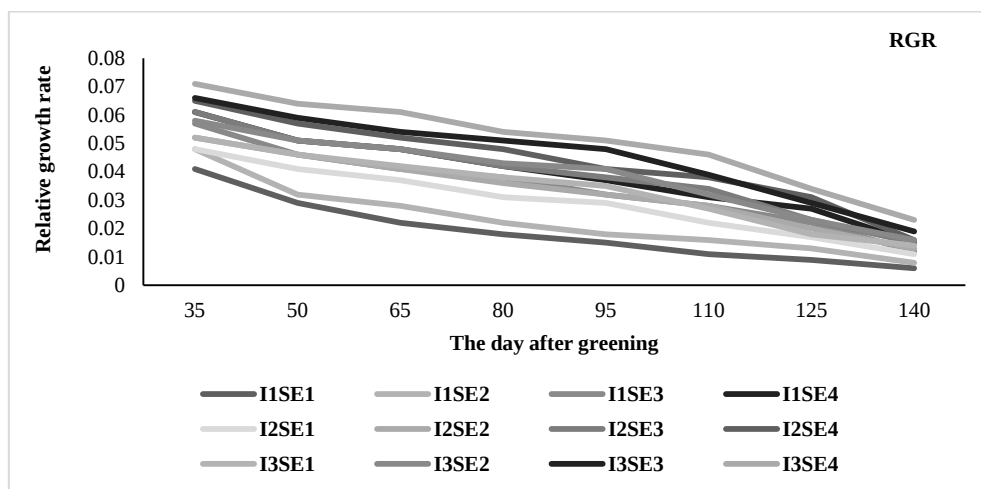


Figure 5. Changes in the relative speed of crop growth in different treatments

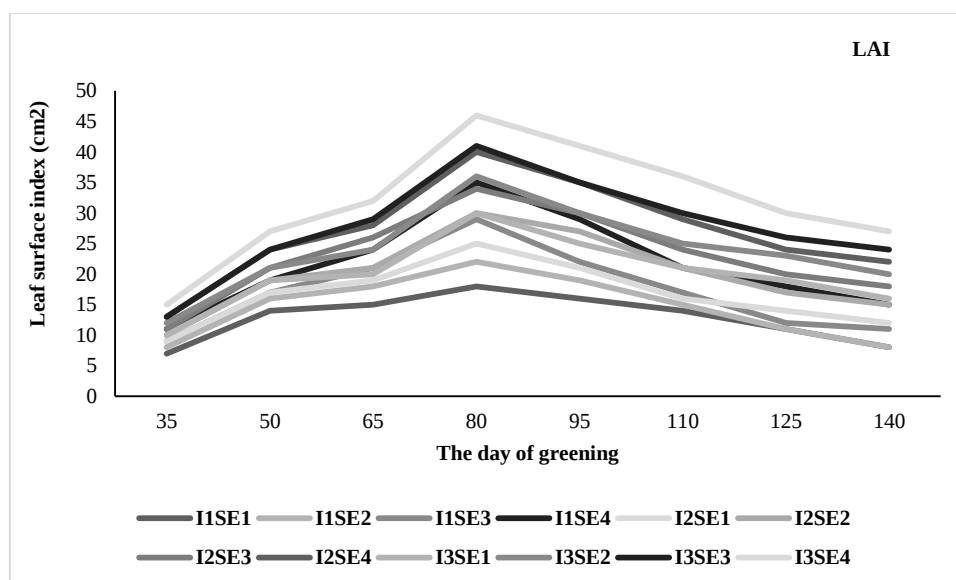


Figure 6. Changes in leaf surface index in different treatments

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش ویژگی‌های مورفولوژیک نظیر ارتفاع بوته، قطر، طول و وزن میوه، طول و حجم ریشه، شاخص سطح برگ، عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاه فلفل دلمه تحت تأثیر عصاره جلبک دریایی در شرایط تنش آبی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اثرات متقابل تنش و عصاره جلبکی بر صفات مورد بررسی در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بود. عصاره جلبک دریایی به‌تنهایی موجب افزایش معنی‌دار پارامترهای مورد اندازه‌گیری. کاربرد عصاره جلبکی در سطوح ۰/۵، ۱/۵ و ۳ گرم در لیتر نسبت به تیمار شاهد تأثیر معنی‌داری بر ارتفاع بوته، قطر، طول و وزن میوه، طول و حجم ریشه، شاخص سطح برگ، عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاه فلفل دلمه داشت. در بررسی اثرات تنش کم‌آبی مشاهده شد که کاهش مقدار آب آبیاری باعث کاهش پارامترهای مذکور شد، اما تفاوت معنی‌داری بین تیمار ۱۰۰ و ۸۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده نشد. با افزایش شدت تنش از ۸۰ درصد ظرفیت زراعی به ۶۰ درصد ظرفیت زراعی تمامی صفات مورد بررسی کاهش معنی‌داری

داشتند. بنابراین با توجه به بالاتر بودن بهره‌وری مصرف آب در تیمار ۸۰ درصد ظرفیت زراعی نسبت به تیمار ۱۰۰ درصد این تیمار به عنوان تیمار آبیاری برتر انتخاب می‌گردد. محلول‌پاشی با عصاره جلبک دریایی با بهبود روابط آبی، جلوگیری از تجزیه کلروفیل، حفظ آماس برگ و حفظ پایداری غشا سبب افزایش رشد گیاه فلفل دلمه در شرایط تنش خشکی شد. عصاره جلبک دریایی حاوی ترکیب پیچیده‌ای از پلی‌ساکاریدها، عناصر غذایی کم‌مصرف، هورمون‌های گیاهی است که سبب تحریک رشد گیاه و مقاومت در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی می‌شود. با توجه به این که بیش‌ترین عملکرد و پارامترهای رشدی و بهره‌وری مصرف آب از تیمار ۳ گرم در لیتر عصاره جلبک دریایی به دست آمد، این تیمار برای محلول‌پاشی انتخاب می‌گردد. پیشنهاد می‌گردد با توجه به وجود تنش خشکی در اکثر نقاط کشور، از عصاره جلبک دریایی برای کاهش اثرات تنش خشکی بر گیاهان استفاده گردد. همچنین پیشنهاد می‌شود تأثیر انواع و غلظت‌های مختلف عصاره جلبک دریایی طی پژوهش‌های چندساله و در زمان‌های مختلف رشد گیاهان مورد بررسی قرار گیرد. از موارد دیگری که می‌تواند در پژوهش‌های آینده مورد توجه قرار گیرد، بررسی اقتصادی محلول‌پاشی عصاره جلبک دریایی می‌باشد.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Water productivity
2. Crop growth rate
3. Relative growth rate
4. Leaf area index

۶. تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه زابل انجام شده است. کد پژوهانه IR-UOZ-GR-1837.

۷. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۸. منابع

- Afaf, H., Eglal, M., & Abdelgawa, Z.A. (2022). The role of seaweed extract on improvement drought tolerance of wheat revealed by osmoprotectants and DNA (cpDNA) markers. *Brazilian Journal of Botany*, 45, 857-867.
- Amani Andabili, M., Hassanpour Asil, M., Olfati, J. A., & Navabian, M. (2024). Effect of Regulated Irrigation Levels on Yield of Greenhouse Bell Pepper (*Capsicum annuum* cv. Nirvin). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 4(18), 683-698. (In Persian)
- Amini Fard, M. H., & Khandan, S. (2019) Investigation of the effect of different concentrations of seaweed extract (*Ascophyllum nodosum*) on growth, yield and biochemical traits of bitter melon (*Momordica charantia* L.). *Journal of Plant Environmental Physiology*. 13, 56-66. (In Persian)
- Asadi. R., Hassan Pour, F., Mehrabani, M., Baghizadeh, A., & Karandish, F. (2018). Investigation the effect of deficit irrigation on root distribution and vegetative growth of *Rosmarinus officinalis* L. *Water and Irrigation Management*, 289-301. (In Persian)
- Bandurska, H. (2022). Drought stress responses: Coping strategy and resistance. *Plants*, 11, 922.
- Basimfar, R., Nasri, M., & Zargari, K. (2016). Effect of sea alga extract and vermicompost on yield and plant growth indices of mung bean. *Journal Crop Production Research*, 8(1), 55-71.
- Bindhu, K.B. (2013). Effect of Azolla extract on growth performance of *Pisum sativum*. *Journal of Biological Sciences*, 2(10), 88-90.

- Caffagni, d.e., Camargo, E., Casali, C.A., Lombardi, A.T., & Lima, M.I.S. (2015). Coupling microalgal cultures with hydroponics: Prospection for clean biotechnology processes. *Journal of Algal Biomass and Utilization*, 6, 88-94.
- Cantürk, A., Cemek, B., Taşan, M., & Taşan, S. (2023). Effect of deficit irrigation on yield, water productivity, energy indices and economic productivity in eggplant cultivation. *Gesunde Pflanzen*, 75, 1579-1589.
- 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 Journal Geoscience*, 8.
- Craigie, J.S. (2011). Seaweed extract stimuli in plant science and agriculture. *Journal of Applied Phycology*, 23, 371-393.
- Del Poso, A., Perez, P., Gutierrez, D., Alonso, A., Morcuende, R., & Martinez Carrasco, R. (2007) Gas exchange acclimation to elevated CO₂ in upper-sunlit and lower-shaded canopy leaves in relation to nitrogen acquisition and partitioning in wheat grown in field chambers. *Environmental and Experimental Botany*, 53, 371-380.
- El-Miniawy, S. M., Ragab, M. E., Youssef, S. M., & Metwally, A. A. (2014) Influence of foliar spraying of seaweed extract on growth, yield and quality of strawberry plants. *Journal of Applied Sciences Research*, 10, 88-94.
- Eshghi, S., Moharami, S., & Jamali, B. (2017). Effect of salicylic acid on growth, yield and quality of strawberry Fruit of Parus cultivar under salinity conditions. *Soil Plant Interac*, 7(28), 163-173.
- FAOSTAT, F. (2018). statistical Databases, Fisheries Data, 2001. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Fateh, M., Barzegar, T., & Razavi, F. (2016). The effect of foliar spraying of ascorbic acid and calcium lactate on the growth, yield and quality of sweet pepper fruit. *Horticultural sciences (agricultural sciences and industries)*, 33(1), 87-79.
- Ghaffari Nejad, S. A., Nourghooli Pour, F., & Gheibi, Gheibi. (2020). Biostimulants and their Roles in Plant Physiology, Nutrient Absorption, and Tolerance to Abiotic Stresses. *Journal of land Management*, 8(1), 48-67. (In Persian)
- Ghahremani, Z., Alizadeh, B., Barzegar, T., Nikbakht, J., Ranjbar, M. E., & Nezamdoost, D. (2023). The mechanism of enhancing drought tolerance threshold of pepper plant treated with putrescine and salicylic acid. *Plant Stress*, 9, 100199.
- Haghighparast, M., Maleki-Farahani, S., Sinaki, J.M., & Zarei, G. (2012). Mitigation of drought stress in chickpea through application of humic acid and seaweed extract. *Crop Production and Regulation under Environmental Stress*, 4, 59-71.
- Hassan, F., Ali, E. F., & El-Zahrany, O. M. (2013) Effect of amino acids application and different water regimes on the growth and volatile oil of *Rosmarinus officinalis* L. plant under Taif region conditions. *European Journal of Scientific Research*, 101, 346 -359.
- Hernández-Herrera, R. M., Santacruz-Ruvalcaba, F., Ruiz-López, M. A., Norrie, J., & Hernández-Carmona, G. (2014). Effect of liquid seaweed extracts on growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of applied phycology*, 26, 619-628.
- Hosseinzadeh, S.R., Amiri, H., & Ismaili, A. (2017). Nutrition and biochemical responses of chickpea (*Cicer arietinum* L.) to vermicompost fertilizer and water deficit stress. *Journal of Plant Nutrition*, 40, 2259-2268.
- Hosseinzadeh, S.R., Amiri, H., & Ismaili, A. (2016). Effect of vermicompost extract on germination characteristics of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under drought stress. *Journal of Plant Research*, 29, 589-598.
- Ismailpour, B., Fatemi, H., & Moradi, M. (2019). The effect of seaweed extract on the physiological and biochemical parameters of basil (*Ocimum basilicum* L.) under water stress conditions. *Science and techniques of greenhouse crops*, 11(1), 59-69. (In Persian)
- 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. (In Persian)
- Javadi, H., Rashed Mohasel, M.H., Zamani, Gh.R., Azari Nasr Abadi, E., & Musavi, Gh.R. (2007). Effect of plant density on growth indices in four grain sorghum cultivars. *Iranian Journal of Field Crops Research*. 4, 265 – 253. (In Persian)
- Jothinayagi, N., & Anbazhagan, C. (2009) Effect of seaweed liquid fertilizer of *Sargassum wightii* on the growth and biochemical characteristics of *Abelmoschus esculentus* (L.) Medikus. *Recent Research in Science and Technology*, 1, 155-158.

- Khan, W., Rayirath, U. P., Subramanian, S., Jithesh, M. N., Rayorath, P., Hodges, D. M., Critchley, A. T. J. Craigie, S., Norrie, J., & Prithiviraj, B. (2009). Seaweed extracts asbiostimulants of plant growth and development. *Journal of Plant Growth Regulations*, 28, 386-399.
- Khazaei, Z., Esmailpour, B., & Estaji, A. (2020). Ameliorative effects of ascorbic acid on tolerance to drought stress on pepper (*Capsicum annuum* L.) plants. *Physiology & Molecular Biology of Plants*, 26(8), 1649.
- Kumar, G., & Sahoo, D. (2011). Effect of seaweed liquid extract on growth and yield of Triticum aestivum var. Pusa Gold. *Journal of Applied Phycology*, 23, 251-255.
- Kumari, R., Kaur, I., & Bhatnagar, A. K. (2011). Effect of aqueous extract of Sargassum johnstonii Setchell and Gardner on growth, yield and quality of *Lycopersicon esculentum* Mill. *Journal of Applied Phycology*, 23 (3), 623-633.
- Mattner, S. W., Wite, D., Riches, D. A., Porter, I. J., & Arioli, T. (2013). The effect of kelp extract on seedling establishment of broccoli on contrasting soil types in southern Victoria, Australia. *Biological agriculture & horticulture*, 29(4), 258-270.
- Moghimi, N., & Imam, Y. (2013). Investigating the morphophysiological characteristics and yield of two forage sorghum cultivars under water stress and nitrogen levels. *Journal of Environmental Stresses in Agricultural Sciences*, 6(1), 36-27. (In Persian)
- Moradi F., Najafi, Sh., & Esmaeilzadeh Bahabadi, S. (2018). The effect of green algae (*Ulva fasciata* L.) extract on growth and physiological parameters of sesamum indicu. 8(33),1-14.
- Morales Payan, J. P., & Stall, W. M. (2003) Papaya (*Carica papaya*) response to foliar treatments with organic complexes of peptides and amino acids. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 116, 30-32.
- Norrie, J., & Keathley, J. (2006). Benefits of Ascophyllum nodosum marine-plant extract applications to 'Thompson seedless' grape production. *Acta Horticultural*, 727, 243-245.
- 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.
- Parkash, V., Singh, S., Deb, S. K., Ritchie, G. L., & Wallace, R. W. (2021). Effect of deficit irrigation on physiology, plant growth, and fruit yield of cucumber cultivars. *Plant Stress*, 1,100004.
- Payero J.O., Melvin S.R., Irmak S., & Tarkalson D. (2009). Yield response of corn to deficit irrigation in a semiarid climate. *Agricultural Water Managent*, 84, 101-112.
- Piri, H., Ansari, H., & Faridhosseini, A.R. (2018). Investigation of the Irrigation Management with Saline Water on Sorghum Yield and Growth Indices. *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(4), 31-46. (In Persian)
- Piri, H., Naserin, A., & Albalasmeh, A.A. (2022). Interactive effects of deficit irrigation and vermicompost on yield, quality, and irrigation water use efficiency of greenhouse cucumber. *Journal of Arid Land*, 14, 1274-1292.
- 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 Ca^{2+} and K^{+} . *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(1), 170-177.
- Sajadi, F., Hezarjaribi, A., & Jamali, S. (2020). The effects of different irrigation regimes on yield and yield components Of Sweet pepper (*Capsicum annum*) under greenhouse conditions. *Irrigation and water engineering of Iran*, 11(41), 21-332. (In Persian)
- Sarhan, T.Z., Ali, S.T., & Rasheed, S.M.S. (2011). Effect of bread yeast application and seaweed extract on cucumber (*Cucums sativus* L.) plant growth, yield and fruit quality. *Journal Agriculture*, 39, 26-34.
- Sepaskhah, AR., & Ahmadi, SH. (2010) A review on partial root-zone drying irrigation. *Plant Production*, 4(4), 241-258. (In Persian)
- Shah, FR., Ahmad, N., Masood, KR., & Zahid, DM. (2008) The influence of cadmium and chromium on the biomass production of shisham (*Dalbergia sissoo roxb.*) seedlings. *Pakistan Botany*, 40 (4), 1341-1348.
- Sharma, S. H. Lyons, G., Mc Roberts, C., Swan, D., McCormack, R., & Mellon, R. (2012). Biostimulant activity of brown seaweed species from Strangford Lough: compositional analyses of polysaccharides and bioassay of extracts using mung bean (*Vigno mungo* L.) and pak choi (*Brassica Rapa chinensis* L.). *Journal of Applied Phycology*, 24, 1081-1091.
- Sibi, M., Khazaei, H. R., & Nezami, A. (2016) Effect of concentration, time and method of consumption of seaweed extract on some morphological characteristics of safflower root and shoot. *Journal of Plant Physiology*, 8, 5-21.

- Sridhar, S., & Rengasamy, R. (2011). Potential of seaweed liquid fertilizers (SLFS) on some agricultural crop with special reference to protein profile of seedlings. *International Journal of Development Research*, 7, 55-57.
- Sridhar, S., & Rengasamy, R. (2011) Effect of seaweed liquid fertilizer on growth, pigment concentration and yield of *Amaranthus rosburghinus* and *Amaranthus tricolor* under field trial. *Journal of Current Research*, 3, 131-134
- 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.
- Xu, C., & Leskovar, D. (2015) Effects of *A. nodosum* seaweed extracts on spinach growth, physiology and nutrition valued under drought stress. *Scientia Horticulturae*, 183, 39-47.
- Xu, C., & Leskovar, D. I. (2014). Growth, physiology and yield responses of cabbage to deficit irrigation. *Horticultural Science*, 41 (3), 138-146.
- Zodape, S.T. (2001). Seaweeds as a biofertilizer. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 60, 378-382.
- Zodape, S.T., Mukhopadhyay, S., Eswaran, K., Reddy, M.P., & Chikara, J. (2010). Enhanced yield and nutritional quality in green gram (*Phaseolus radiata* L.) treated with seaweed (*Kappaphycus alvarezii*) extract. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 69, 468-471.