



روابط خاک و گیاه

فهرست

- ۳..... کارایی فسفر ارقام گندم سیروان و سیوند در شرایط تنش خشکی در یک خاک آهکی
مریم موسوی، رضا خراسانی و رضا توکل افشاری
- ۲۳..... تراکم بوته مطلوب گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای در سیستم کشت بدون خاک در استان گلستان
شهربانو وکیلی بسطام
- ۴۱..... مقایسه عملکرد و ویژگی‌های کمی و کیفی دو رقم توت‌فرنگی در دو سامانه آب‌کشت
بهزاد بران شیخ مزاری، حمید حسن‌پور، پرویز نوروزی و سهیلا نوجوان
- تأثیر نوع محیط کشت بر زیست‌توده، غلظت عناصر غذایی و محتوی
پروتئین آزولا، و کاربرد عصاره آن در تغذیه فلفل دلمه‌ای.....
محمد فتاحی وانانی و بنفشه خلیلی
- ۷۵..... اثر محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید بر ویژگی‌های رشدی گوجه‌فرنگی
(*Lycopersicon esculentum* L.) در شرایط تنش سرب.....
حدیث کاکایی، علی اشرف امیری‌نژاد و مختار قبادی
- تأثیر سطوح مختلف دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول بر رشد و
برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی ریحان.....
۸۹..... عزت دارابی حسین‌آباد قاینی، محمد مقدم و فائزه آراسته

روابط خاک و گیاه

دانشگاه صنعتی اصفهان
سال چهاردهم، شماره سه، پاییز ۱۴۰۲
(شماره مسلسل ۵۵)
ISSN 2783-5014

صاحب امتیاز و ناشر : دانشگاه صنعتی اصفهان
مدیر مسئول : محمد علی حاج عباسی
سر دبیر : محمد رضا مصدقی

هیئت تحریریه:

استاد علوم باغبانی، دانشگاه صنعتی اصفهان	بهرام بانی نسب
استاد علوم خاک، دانشگاه صنعتی اصفهان	حسین خادمی
استاد علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه و دانشگاه کوپننلند، استرالیا	حبیب خداوردی لو
استاد علوم خاک، دانشگاه صنعتی اصفهان	حسین شریعتمداری
استاد مهندسی آب، موسسه فنی و مهندسی آب و خاک تهران	فریبرز عباسی
استاد علوم خاک، دانشگاه تبریز	ناصر علی اصغرزاد
دانشیار مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان	مهدی قیصری
استاد ژنتیک، به نژادی و بیوتکنولوژی گیاهی، دانشگاه صنعتی اصفهان	محمد مهدی مجیدی
دانشیار علوم خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران	محمد حسین محمدی
استاد علوم خاک، دانشگاه صنعتی اصفهان	محمد رضا مصدقی
استاد علوم خاک، دانشگاه صنعتی اصفهان	فرشید نوربخش
استاد علوم خاک، دانشگاه تبریز	محمد رضا نیشابوری
دانشیار علوم خاک، مرکز پژوهش و توسعه سامرلند، کانادا	مهدی شریفی
استاد علوم خاک و آب و گیاه، دانشگاه ایالتی کانزاس، آمریکا	مری بت کرخام
استاد فیزیک خاک، دانشگاه بایروت، آلمان	آندریا کارمیناتی
استاد فیزیک خاک، دانشگاه علوم کشاورزی، سوئد و مرکز پژوهشی آگرواسکوپ، سوئیس	توماس کلر
استاد علوم خاک، دانشگاه توتوری، ژاپن	آمرخ ممدوف
استاد علوم خاک، دانشگاه موریل نیوفوندلند، کانادا	آدریان یونگ

بنفشه خلیلی	:	دبیر اجرایی
محمد رضا مصدقی	:	ویراستار
فرحناز نصیری	:	امور کارشناسی
فرحناز نصیری	:	صفحه آرا
مرکز انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان	:	امور دفتری
چاپخانه دانشگاه صنعتی اصفهان	:	چاپ
دانشگاه صنعتی اصفهان	:	ناشر
اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دفتر نشریات علمی، نشریه روابط خاک و گیاه	:	نشانی مجله

کد پستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱ تلفکس ۳۳۹۱۲۷۹۷ (۰۳۱)

پست الکترونیک jspi@of.iut.ac.ir

پایگاه اینترنتی <http://jspi.iut.ac.ir>

فهرست

- ۳ کارایی فسفر ارقام گندم سیروان و سیوند در شرایط تنش خشکی در یک خاک آهکی مریم موسوی، رضا خراسانی و رضا توکل افشاری
- ۲۳ تراکم بوته مطلوب گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای در سیستم کشت بدون خاک در استان گلستان شهربانو وکیلی بسطام
- ۴۱ مقایسه عملکرد و ویژگی‌های کتی و کیفی دو رقم توت‌فرنگی در دو سامانه آب‌کشت بهزاد بران شیخ مزاری، حمید حسن‌پور، پرویز نوروزی و سهیلا نوجوان
- تأثیر نوع محیط کشت بر زیست‌توده، غلظت عناصر غذایی و محتوی پروتئین آزولا، و کاربرد عصاره آن در تغذیه فلفل دلمه‌ای محمد فتاحی وانانی و بنفشه خلیلی
- ۵۵ اثر محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید بر ویژگی‌های رشدی گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum* L.) در شرایط تنش سرب حدیث کاکایی، علی اشرف امیری‌نژاد و مختار قبادی
- ۷۵ تأثیر سطوح مختلف دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول بر رشد و برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی ریحان عزت دارابی حسین‌آباد قاینی، محمد مقدم و فائزه آراسته
- ۸۹

نشریه روابط خاک و گیاه

راهنمای نگارش مقاله

نشریه روابط خاک و گیاه، مقالات پژوهشی در زمینه‌های موضوعی زیر را به چاپ می‌رساند:

- روابط آب و گیاه
- فراهمی آب و عناصر غذایی خاک برای گیاه
- فرایندهای فیزیکی و شیمیایی ریزوسفر
- برهم‌کنش‌ها، ذخایر و جریان‌های زیستی در ریزوسفر
- ریزجانداران ریزوسفری محرک رشد گیاه
- برهم‌کنش‌های مولکولی گیاه-میکروب در ریزوسفر
- اثر پرایمینگ ریزوسفر تحت تأثیر ویژگی‌های خاک و گیاه
- ترسیب (ثبیت) کربن و ساختمان خاک در ناحیه ریشه و ریزوسفر
- اثر ریشه گیاهان بر ویژگی‌ها و فرایندهای بیوفیزیکی و بیوشیمیایی خاک
- بیوژنوشیمی آلاینده‌ها در سیستم خاک-گیاه
- رشد گیاهان در شرایط تنش
- مدل‌سازی روابط آب-خاک-گیاه و جذب آب توسط ریشه
- ارتباط سلامت خاک با برهم‌کنش‌های خاک-گیاه
- نقش ویژگی‌های کارکردی گیاه و خاک در تعدیل آثار تغییر اقلیم
- روابط خاک (بستر رشد) و گیاه در کشت‌های گلخانه‌ای

۱- ضروری است مقالات ارسالی پیش از این در سایر مجلات علمی به چاپ نرسیده و یا در سایر مجلات علمی تحت بررسی و داوری نباشند. البته پژوهش‌هایی که در سمینارها و کنفرانس‌های علمی ارائه شده و یا در چارچوب گزارش ماهیانه، سالیانه و مانند آن منتشر شده باشند نیز در این مجله قابل بررسی و چاپ خواهند بود. مقالات ارسالی داوری شده و در صورت تأیید، به ترتیب اولویت وصول و پذیرش، چاپ می‌شوند.

۲- مسئولیت مقاله و ترتیب نام نویسندگان (با داشتن موافقت کتبی آنان) بر عهده شخصی است که مقاله را برای مجله ارسال می‌کند (نویسنده مسئول) و کلیه مکاتبات با وی انجام خواهد شد.

۳- دانشجویان (دانش‌آموختگان) کارشناسی ارشد و دکتری نیز برای ارسال مقاله مستخرج از پایان‌نامه (رساله) باید موافقت کتبی استاد یا استادان راهنمای خود را کسب کرده باشند.

۴- مقالات باید به صورت الکترونیکی و از طریق وبگاه مجله (jspi.iut.ac.ir) ارسال شوند. این امر امکان ارسال سریع و آسان مقالات توسط نویسندگان، انجام مراحل داوری و مکاتبات بعدی بین نویسندگان، داوران، سرگروه‌ها و سردبیر مجله را فراهم می‌سازد. همچنین این امکان برای نویسندگان (گان) محترم وجود دارد که در هر مرحله با مراجعه به بخش مربوط از وضعیت مقاله خود آگاه شوند.

مراحل ارسال مقاله به صورت الکترونیکی، به شرح زیر است:

- ۱- پرکردن فرم ثبت نام و ورود به وبگاه با نام کاربری اختصاصی
 - ۲- ورود به بخش ارسال مقاله، دریافت کد اختصاصی برای هر مقاله و تعیین مشخصات مقاله
 - ۳- پرکردن فرم ارسال مقاله و اطلاعات و مشخصات مربوطه
 - ۴- بررسی مقاله در صفحه شخصی و افزودن ضمایم و اطلاعات مرتبط
 - ۵- تأیید نهایی مقاله برای آغاز بررسی آن.
- اگر مشکلاتی در ارسال مقاله از طریق وبگاه وجود داشته باشد، می توان فایل مقاله را به E-mail مجله jspi@of.iut.ac.ir ارسال کرد.

فایل های مورد نیاز در زمان ارسال مقاله:

- ۱- فایل های پیش نیاز مقاله: فرم واگذاری حق انتشار مقاله و فرم تعارض منافع است که پس از دریافت از صفحه اصلی سایت تکمیل شده و در قسمت فایل های پیوست بارگذاری می شود.
- ۲- فایل اصلی مقاله: کل مقاله همراه با برگه مشخصات مقاله (در ابتدای مقاله قبل از چکیده فارسی) مطابق با فرمت مجله است که در قسمت مربوطه بارگذاری می شود.
- ۳- فایل مقاله بدون نام نویسندگان: کل مقاله بدون هیچگونه مشخصاتی از نویسندگان مقاله است که در قسمت مربوطه بارگذاری می شود.

شرایط:

- ۱- نویسندگان پس از ثبت نام، به منظور پیشگیری از تخلفات احتمالی و حفظ حقوق و مالکیت معنوی، موظف هستند «فرم واگذاری حق نشر» را تکمیل و به صورت فایل پیش نیاز بارگذاری کنند.
- ۲- مسئولیت مقاله و ترتیب نام نویسندگان بر عهده شخص نویسنده مسئول است و کلیه مکاتبات با وی انجام خواهد شد. نویسنده مسئول (که با ستاره مشخص شده است) نمی تواند دانشجوی باشد و بایستی عضو هیئت علمی یا پژوهشگر مؤسسه های پژوهشی باشد.

تهیه مقاله:

- مقالات باید به صورت تک ستونی با تعداد ۱۲ تا ۱۶ صفحه با حفظ ۲/۵ سانتی متر حاشیه از هر طرف، و با درج شماره صفحه و سطر و فاصله سطور ۱/۵ سانتی متر در نرم افزار MS Word با فونت فارسی 12 B Lotus و فونت انگلیسی 10 Times New Roman تهیه شوند.
- در ارائه مطالب متن اصلی مقاله به غیر از پاراگراف اول در هر قسمت، تورفتگی به اندازه ۵/۵ سانتی متر اعمال شود.
- ترتیب قسمت های مختلف مقاله: مشخصات مقاله، عنوان، چکیده فارسی، واژه های کلیدی، مقدمه، مواد و روش ها، نتایج و بحث، نتیجه گیری، سپاسگزاری، منابع مورد استفاده و چکیده مبسوط انگلیسی (Extended abstract) است.

شرح قسمت‌های مختلف مقاله و راهنمای فنی:

برگ مشخصات مقاله: این قسمت در یک صفحه مجزا شامل عنوان مقاله، نام و نام خانوادگی، مرتبه علمی و نشانی نویسنده یا نویسندگان مقاله، پست الکترونیکی و شماره تماس و شماره اریکد (ORCID ID) نویسنده مسئول خواهد بود. پیشنهاد می‌شود شماره اریکد (ORCID ID) نویسندگان دیگر مقاله هم در این صفحه نوشته شود.

عنوان: عنوان مقاله حداکثر در ۲۰ کلمه و منعکس‌کننده محتوای مقاله است (فونت فارسی **16 B Lotus**).

چکیده فارسی: چکیده مقاله شامل ۲۰۰ تا ۲۵۰ کلمه، بیانگر مسئله، هدف، روش و نتایج به‌دست آمده و نتیجه‌گیری کلی از پژوهش است که به‌صورت پیوسته ارائه شود.

واژه‌های کلیدی: عبارت است از ۴ تا ۶ واژه مجزا که موضوع پژوهش بیش‌تر پیرامون آن‌ها بوده و در عنوان مقاله نیامده است.

مقدمه: در این بخش باید موضوع مورد پژوهش معرفی و فرضیه مورد نظر تعریف شود. به‌اهم کارهای پژوهشی انجام شده پیشین در این مورد اشاره شده و ضرورت و هدف پژوهش مورد نظر تبیین شود.

مواد و روش‌ها: شامل مواد مورد استفاده و شرح روش‌های جدید و فرمول‌های به‌کار رفته و یا ذکر مأخذ روش‌های متداول و شناخته شده است. معادله‌ها و فرمول‌ها شماره‌گذاری شده و نبایستی به‌صورت تصویر باشند بلکه با ابزار Math type 6 یا نسخه‌های جدیدتر آن آماده شوند.

نتایج: دربرگیرنده نتایج حاصل از پژوهش به‌صورت متن، جدول، شکل و تصویر است. از تکرار نتایج به‌صورت چندگانه (جدول و شکل و غیره) باید خودداری شود.

بحث: در این قسمت علل و روابط بین آن‌ها در ایجاد نتایج حاصل، با استفاده از منابع علمی دیگر، مورد بحث، تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در صورت لزوم می‌توان قسمت‌های نتایج و بحث را همزمان تحت عنوان «نتایج و بحث» ارائه کرد.

نتیجه‌گیری: این قسمت شامل یک استنتاج نهایی از پژوهش و ذکر کاربرد (یا کاربردهای) احتمالی آن است.

سپاسگزاری: سپاسگزاری از افراد، کمک‌های مالی و طرح‌های پژوهشی با شماره رسمی، یکی از بخش‌های ضروری مقاله است. اسامی سازمان‌های تأمین‌کننده باید به‌طور کامل و مطابق با معیارهای سازمان مورد نظر ذکر شود. وابستگی سازمانی حامی مالی مقاله (در صورت وجود) در این بخش باید نوشته شود.

در صورت نبود حامی یا تأمین‌کننده مالی اعتبار پژوهشی، به جای متن تشکر عیناً از عبارت زیر استفاده شود:

"در انجام این پژوهش، حمایت مالی خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نشده است."

تضاد منافع: در صورت نبود تضاد منافع از عبارت زیر استفاده شود:

"نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منفعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند."

منابع مورد استفاده: منابع اشاره شده در متن مقاله باید قبلاً به‌صورت کتاب یا مقاله مندرج در یکی از مجلات علمی یا مقاله علمی در کنفرانس‌ها و کنگره‌های معتبر درآمده و قابل دسترسی به‌وسیله خواننده باشند. فهرست منابع مورد استفاده در انتهای مقاله باید صرفاً از منابع اشاره شده در متن بوده و بر اساس شیوه **Elsevier - Harvard (with titles)** تهیه شود. تمامی منابع فارسی و انگلیسی مورد ارجاع در متن مقاله، باید در لیست منابع به زبان انگلیسی نوشته شوند. بنابراین تمامی سال شمسی منابع فارسی به سال میلادی تبدیل شوند و در برگردان اسامی افراد اطمینان حاصل شود که املاي آن‌ها و سال انتشار درست باشد.

ارجاع به منابع در متن از طریق اسم نویسنده و سال (و در صورت لزوم شماره صفحه ارجاع داده شده) به انگلیسی داخل پرانتز

انجام شود. برای مثال: (Glinski and Lipiec, 1990; Holloway et al., 1991; Kirkham, 2014; Northup, 2013).

در فهرست منابع، انواع منابع علمی مورد استفاده مطابق مثال‌های زیر نشان داده می‌شوند:

کل کتاب به ترتیب نویسنده(گان)، سال، عنوان کتاب، دوره، ناشر، و شهر محل چاپ:

1. Kirkham, M.B., 2014. Principles of Soil and Plant Water Relations, Second ed. Elsevier Academic Press, Amsterdam.
2. Glinski, J., Lipiec, J., 1990. Soil Physical Conditions and Plant Roots, CRC Press, Boca Raton, Florida.

فصل کتاب به ترتیب نویسنده(گان) فصل، سال، عنوان فصل، ویراستار(ان)، عنوان کتاب، شماره ویراست و دوره (در صورت وجود)، ناشر، شهر یا کشور محل چاپ، و صفحات فصل:

1. Jungk, A.O., 2002. Dynamics of nutrient movement at the soil-root interface. In: Waisel, Y., Eshel, A., Kafkafi, U. (Eds.), Plant Roots: The Hidden Half. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 455-481.
2. Dastogeer, K.M.G., Wylie, S.J., 2017. Plant-fungi association: role of fungal endophytes in improving plant tolerance to water stress. In: Singh, D. P., Singh, H.B., Prabha, R. (Eds.), Plant-Microbe Interactions in Agro-Ecological Perspectives. Springer, Singapore, pp. 143-159.

مقاله در مجله علمی به ترتیب نویسنده(گان)، سال، عنوان مقاله، نام مجله به صورت مخفف، شماره مجله، دوره و صفحات، درج شناسه DOI (در صورت وجود) در انتهای هر مقاله الزامی است:

1. Hallett, P.D., Young, I., 1999. Changes to water repellence of soil aggregates caused by substrate-induced microbial activity. Eur. J. Soil Sci. 50(1), 35-40. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.1999.00214.x>.
2. Hinsinger, P., Bengough, A.G., Vetterlein, D., Young, I.M., 2009. Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. Plant Soil 321(1-2), 117-152. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9885-9>.

پایان‌نامه کارشناسی ارشد و رساله دکتری به ترتیب نام دانشجو، سال دفاع، عنوان، نوع پایان‌نامه، نام دانشگاه، شهر و کشور:

1. Northup, J.I., 2013. Biochar as a Replacement for Perlite in Greenhouse Soilless Substrates. MSc Thesis, Iowa State University, USA.
2. Broilma, K.M., 2014. Linkages between Plant Traits and Soil Ecology in The Rhizosphere and Through Litter Decomposition. PhD Thesis, Wageningen University, The Netherlands.

مقاله‌های کامل کنفرانس‌ها به ترتیب نویسنده(گان)، سال کنفرانس، عنوان مقاله، نام همایش، تاریخ، شهر و کشور برگزاری کنفرانس:

1. Holloway, R.E., Alston, A.M., Dexter, A.R., 1991. Mechanical and chemical factors limiting rooting depth of wheat in a semi-arid environment. In: Proceedings of 12th Conference of International Soil & Tillage Research Organization, July 8-12, Ibadan, Nigeria.
2. Lynch, D.H., Sharifi, M., Clegg, E., Owen, J., Hammermeister, A.M., Burton, D.L., 2009. Management-induced changes in nitrous oxide emission from organic potato rotations in Eastern Canada. In: 29th Guelph Organic Conference, January 22-25, Guelph, Canada.

مقاله یا مدرک اینترنتی به ترتیب نویسنده(گان)، سال، آخرین زمان به‌روزرسانی (در صورت وجود)، عنوان، زمان دسترسی (در صورت وجود) و آدرس سایت:

FAO. 2008. Land and Plant Nutrition Management Service [Online]. Available: <http://www.fao.org/ag/agl/agll/spush/>.

چنانچه به چندین منبع از یک نویسنده ارجاع داده شود، ترتیب درج آن‌ها بر اساس سال انتشار از قدیم به جدید خواهد بود. اگر از نگارنده‌ای چندین منبع با سال انتشار یکسان وجود داشته باشد، با گذاشتن حروف a, b و c در جلو سال انتشار از یکدیگر متمایز خواهند شد. در صورتی که مقالات منفرد و مشترک از یک نویسنده ارائه شود، ابتدا مقالات منفرد و سپس مقاله‌های مشترک به ترتیب حروف الفبای نام نویسندگان بعدی مرتب می‌شوند. لازم است از لیست کردن منابع به سایر زبان‌ها به غیر از انگلیسی (مثلاً فرانسوی، عربی، روسی و ...) اجتناب شود.

منابع به زبان فارسی: منابع فارسی بر اساس عنوان اصلی و اولیه منبع و مقاله (و نه ترجمه شما از آن منبع) مانند نمونه زیر باید به صورت انگلیسی نوشته شود. در مورد منابع فارسی دارای چکیده انگلیسی، عبارت (In Persian with English abstract) و در مورد منابع فارسی

بدون چکیده انگلیسی، عبارت (In Persian) در انتهای منبع و در داخل پراکنش آورده شود. مثال:

Akbari, M., Afshari, H.R., 2014. Comparison of synthetic chelates and compost for phytoremediation of Cd, Ni and Pb from contaminated soil. J. Water Soil 28(4), 217–230. <https://doi.org/10.22067/JSW.V0I0.1694>. (In Persian with English abstract)

چکیده مبسوط به زبان انگلیسی (Extended abstract): بر اساس رویکرد دانشگاه صنعتی اصفهان مبنی بر لزوم توجه به نظام‌های رتبه‌بندی و علم‌سنجی رسمی و بین‌المللی، از نویسندگان مقاله‌ها درخواست می‌شود که چکیده انگلیسی آن را به صورت چکیده مبسوط (Extended abstract) با فرمت زیر تهیه کرده و در انتهای مقاله پس از منابع قرار دهند. چکیده مبسوط (از عنوان تا پایان منابع) باید شامل ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ کلمه به صورت متن روان و گویای انگلیسی تنظیم شده باشد. توصیه اکید می‌شود پیش از ارسال مقاله، عنوان و چکیده مبسوط انگلیسی آن توسط افرادی که تسلط و اشراف کافی به زبان انگلیسی دارند به دقت ویرایش و بازبینی شود:

Extended abstract should be written using the following structure and in a form that is shorter than the full text (i.e., the original text in Persian). Extended abstract of the full paper should be written with Times New Roman font (11 pt) and single-line spacing.

Paper Title Should be Arial, Font Size 14 pt, Bold, First Caps, Centered (The Scientific Name in the Title Should be *Italic*)

Author's Name and Surname¹, Author's Name and Surname^{2,*} (font size 12 pt)

Authors' affiliations should be given as footnotes. Corresponding author should be shown by asterisk (*) and his/her E-mail should be provided in the footnote as well.

Abstract: Abstract should be written in 200–250 words; objectives, methods and findings are summarized in this section.

Keywords: The authors should provide 4 to 6 keywords which are consistent with those in Persian and separated with comma.

Background and Objective: Current literature regarding the work subject should be examined and the differences the said work from the past, similar works and the aim of present study should be presented clearly in this section.

Methods: All methods that have been used in the work must be stated clearly.

Results: Results of the study should be presented and discussed in a clear and concise manner.

Conclusions: Please conclude your work incorporating your most important findings. The information conveyed by the extended abstract should not be different from that conveyed by the original paper (in Persian).

References: A number of important references (maximum 5) are listed according to the above-mentioned format.

(لازم به ذکر است که واژه‌های کلیدی برگردان کامل «واژه‌های کلیدی فارسی» به زبان انگلیسی است و به ترتیب حروف الفبا ارائه شوند.)

راهنمای فنی

۱- ساختار متن: فونت عنوان مقاله و عناوین اصلی ساختار مقاله (شامل مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج، بحث، نتیجه‌گیری کلی و فهرست منابع مورد استفاده) باید توپر (Bold) باشد. استفاده از زیرعنوان‌ها (عنوان‌های فرعی) مانعی ندارد اما از به‌کارگیری زیرعنوان‌های متعدد خودداری شود. دستورهای نقطه‌گذاری (Punctuation) در نوشتار متن رعایت شود. برای مثال نقطه (.) پایان یک جمله (Full stop)، کاما (،) و علامت سوال (؟) به جمله یا کلمات قبل چسبیده باشد و یک فاصله با جمله یا عبارت بعدی لازم است. رعایت نیم‌فاصله در کلمات ترکیبی و جمع مانند اندازه‌گیری، شده‌اند، می‌شود، می‌توان و ... ضروری است.

۲- تا جایی که امکان دارد از کاربرد واژه‌های خارجی در متن مقاله خودداری کرده و در صورت لزوم معادل انگلیسی اسامی و واژه‌های علمی، مکان‌ها، مواد و سایر واژه‌های خارجی به صورت پاورقی (Footnote) نوشته شود. اسامی علمی جانداران نیز به صورت انگلیسی (لاتین) و ایتالیک در پاورقی ذکر شود.

۳- تمامی مطالب و عنوان جداول و شکل‌ها هم به صورت فارسی و هم به صورت انگلیسی (زیر مطالب فارسی) ارائه شوند.

۴- جداول به ترتیب ارجاع داده شده در متن شماره‌گذاری شوند. عنوان جداول در بالا و با فرمت وسط‌چین نوشته شده و بیانگر نتایج ارائه شده در آن‌ها باشد. جداول بدون خطوط افقی و عمودی ارائه شوند و تنها ردیف بالایی در جداول دارای خطوط بالا و پایین باشد. پایین‌ترین ردیف جدول نیز دارای خط زیرین باشد. واحدهای هر ویژگی یا صفت در داخل پراکنش ذکر شود. در جداول و شکل‌ها مضامین آماری رعایت شده و حروف، علائم، واحدها و غیره مبین مقایسه‌های آماری در زیر جدول یا در عنوان شکل نوشته شود. حروف و علائم آماری در سمت راست اعداد به صورت بالانویس (Superscript) نوشته شود. این حروف و علائم باید در زیر جدول به روشنی بیان و تعریف شوند. نمونه ارائه جدول در مقاله به صورت زیر است:

جدول ۱. مقایسه میانگین اثر مقدار کاربرد بقایای گیاهی (Residue) بر کربن آلی (SOC)، تنفس میکروبی پایه (BSR)، درصد خاکدانه‌های پایدار در آب (WSA)، رس قابل پراکنش در آب (WDC) و شاخص آب‌گریزی (RI) خاک

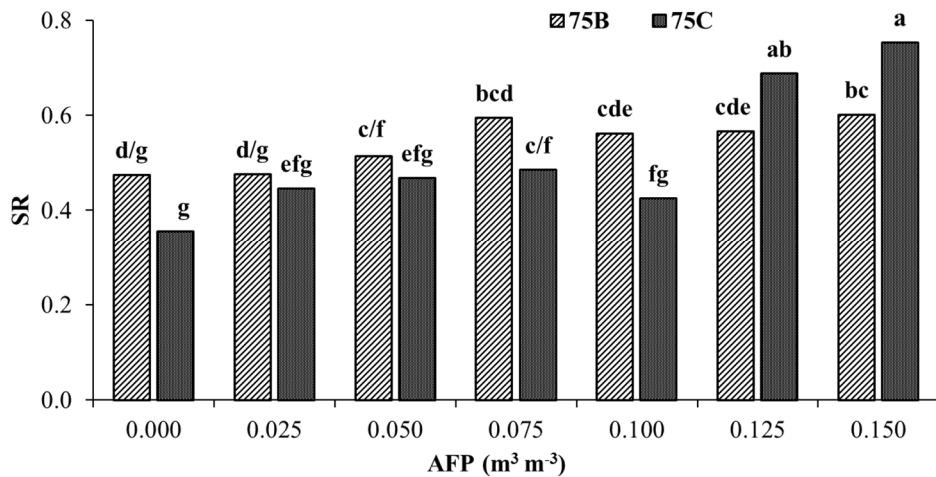
Table 1. Mean comparisons of soil organic carbon (SOC), basal soil respiration (BSR), percent of water-stable aggregates (WSA), water dispersible clay (WDC) and water repellency index (RI) as affected by application rate of plant residues

Residue (%w/w)	SOC (g kg ⁻¹)	BSR (mg CO ₂ kg ⁻¹ soil)	WSA (%)	WDC (g kg ⁻¹ clay)	RI (-)
0.5	8.2 ^b	208 ^b	30 ^c	60 ^a	3.54 ^c
1	11.0 ^b	390 ^{ab}	40 ^b	49 ^{ab}	4.67 ^b
2	13.3 ^a	445 ^a	55 ^a	44 ^b	6.25 ^a

در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

In each column, numbers with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

۵- شکل‌ها به ترتیب ارجاع داده شده در متن شماره‌گذاری شوند. عنوان شکل‌ها در زیر آن‌ها و با فرمت وسط‌چین نوشته شده و بیانگر نتایج ارائه شده در آن‌ها باشد. شکل‌ها بدون خطوط کادر بوده و وضوح کافی داشته باشند. تا حد امکان شکل‌ها به صورت دو بعدی و با الگوهای سیاه و سفید نشان داده شوند. حروف و علائم آماری حتماً باید در زیر شکل به روشنی بیان و تعریف شوند. واحد مربوط به محورها در هر نمودار در داخل پراکنش ذکر شود. نمودارها به صورتی در فایل مقاله کپی شوند که قابل ویرایش باشند. محورهای شکل‌ها از صفر شروع شود و از اعداد انگلیسی در درجه‌بندی محورهای افقی و عمودی استفاده شود. نمونه ارائه شکل در مقاله به صورت زیر است:



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر برهم کنش تخلخل تهویه‌ای خاک (AFP) و ژنوتیپ فسکیوی بلند (75C و 75B) بر نسبت پایداری خاک (SR)؛ ستون‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

Fig. 1. Mean comparisons of interaction effect of soil air-filled porosity (AFP) and tall fescue genotype (75B and 75C) on soil stability ratio (SR); Bars with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

۶- تعداد اعشار مربوط به داده‌های هر یک از ویژگی‌های اندازه‌گیری شده مطابق با دقت روش اندازه‌گیری و دستگاه مورد استفاده باشد. در مورد یک ویژگی، اعداد با تعداد اعشار یکسان و یکنواخت در تمامی مقاله ارائه شود. اعداد بزرگ‌تر از ۱۰۰ بدون اعشار ارائه شوند. اعداد بین ۱۰-۱۰۰ با یک رقم اعشار و اعداد کوچک‌تر از ۱۰ با حداکثر دو رقم اعشار ارائه شوند. تا حد امکان از به‌کارگیری بیش از دو رقم اعشار خودداری شود.

۷- در صورت استفاده از علائم ریاضی (مانند \times ، $+$ ، $-$ ، $>$ ، $<$ ، و $=$)، بین این علائم و اعداد یا کلمات مجاور یک فاصله قرار داده شود.

۸- در صورتی که جمله‌ای با «عدد» شروع شود، از حروف به جای عدد استفاده شود. در این صورت واحد اندازه‌گیری نیز باید با حروف نوشته شود. مثال: «بیست میلی‌گرم در لیتر روی به محلول افزوده شد».

۹- برای بیان واحد کمیت‌ها، صفات و پارامترها از واحدهای سیستم بین‌المللی SI استفاده شود که در زیر نمونه‌های از آن‌ها آورده شده است:

طول: متر (m)، میلی‌متر (mm)، میکرومتر یا میکرون (μm)، نانومتر (nm)

سطح: هکتار (ha)، مترمربع (m^2)

حجم: مترمکعب (m^3)، لیتر (L)

جرم: کیلوگرم (kg)، گرم (g)، میلی‌گرم (mg)، میکروگرم (μg)، نانوگرم (ng)

عملکرد: کیلوگرم در هکتار (kg ha^{-1})

انرژی: ژول (J)

فشار و پتانسیل آب: هکتوپاسکال (hPa)، کیلوپاسکال (kPa)، مگاپاسکال (MPa)

دما: درجه سلسیوس ($^{\circ}\text{C}$)

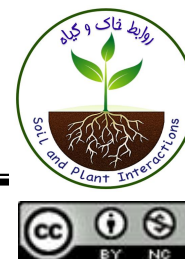
تعرق: میلی‌مول (آب) در مترمربع در ثانیه ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

فتوسنتز: میکرومول (CO_2) در مترمربع در ثانیه ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

غلظت: گرم در لیتر (g L^{-1})، مول در لیتر (mol L^{-1})، میلی مول در لیتر (mmol L^{-1})، میکرومول در لیتر ($\mu\text{mol L}^{-1}$)، نانومول در لیتر (nmol L^{-1})

یادآوری:

- ۱- مسئولیت آراء و نظریات مندرج در مقاله به عهده نویسنده(گان) آن است.
- ۲- نشریه روابط خاک و گیاه در ویرایش مطالب آزاد است.
- ۳- مقالات رسیده توسط هیأت تحریریه مجله با همکاری متخصصان داوری شده و در صورت پذیرش با رعایت نوبت به چاپ می‌رسند .



Phosphorus Efficiency of Sirvan and Sivand Wheat Cultivars Under Drought Stress Conditions in a Calcareous Soil

M. Moosavi¹, R. Khorassani^{1*}  and R. Tavakkol Afshari²

(Received: 9 May 2023; Accepted: 15 July 2023)

Abstract

Phosphorus deficiency and drought stress are limiting factors in wheat yield. Drought stress has different effects on the uptake, utilization and use efficiency of soil phosphorus in wheat cultivars. The purpose of this study is to investigate the response of growth and development, uptake and efficiency of phosphorus in Sirvan and Sivand wheat cultivars at three moisture stress levels of 50, 70 and 95% of soil field capacity (FC) and two phosphorus levels of 0 and 25 mg kg⁻¹. The results showed that addition of phosphorus increased shoot dry weight, phosphorus utilization efficiency, root length and area, and soluble sugars by 42, 61, 84, 47, and 66%, respectively, and decreased electrolyte leakage by 64% under stress conditions of 50%FC. Besides, the phosphorus application of 25 mg kg⁻¹ under drought stress conditions of 50%FC increased the shoot dry weight of the Sirvan variety by 75% compared to the Sivand variety. This increase can be due to the effect of phosphorus on metabolic activities inside the plant, which has led to an increase in root growth, soluble sugar production and cell wall resistance, and a decrease in electrolyte leakage. Therefore, the positive changes observed in different traits and indices due to the use of phosphorus increased the resistance of the Sirvan cultivar compared to Sivand under drought stress conditions. According to the results of phosphorus efficiency and some root morphological and physiobiochemical characteristics, Sirvan cultivar showed a good response to phosphorus fertilizer in modulating the effect of drought stress.

Keywords: Moisture stress, Phosphorus uptake, Phosphorus use efficiency, Plant dry matter.

Background and Objective: Drought is one of the most widespread abiotic stresses which has a negative effect on the growth and yield of plants in most areas of the world. Drought stress reduces plant yield by decreasing the uptake of water and nutrients. The arid and semi-arid climate conditions of Iran have caused many problems in the production of plants, including wheat (*Triticum aestivum* L.). Phosphorus, as one of the essential nutritional elements for plants, can be effective in alleviating drought stress (Kang et al., 2014). In recent years, the use of plants and cultivars efficient in uptake nutrients, including phosphorus, as an appropriate strategy to increase crop yield in water-limited environments has been the focus of researchers. Phosphorous efficient cultivars are important due to their special physiological and morphological characteristics in drought stress conditions (Neji et al., 2019). Therefore, it is necessary to pay attention to

1- Department of Soil Science, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad.

2- Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad.

* Corresponding author, Email: khorasani@um.ac.ir

the mechanism of efficient cultivars against drought stress for accurate fertilizer recommendations.

Methods: To evaluate Sirvan and Sivand wheat cultivars, in phosphorus uptake and efficiency and growth and development at different levels of moisture stress and phosphorus, a factorial experiment was performed based on a completely randomized design with three factors and three replications during the vegetative growth period in the greenhouse. The factors included phosphorus from $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (0, and 25 mg P kg soil⁻¹), three moisture regimes including 50, 70 and 95% of field capacity (FC) and two spring wheat varieties (*Triticum aestivum* L.) of Sivand as a drought-sensitive variety and Sirvan as a drought-resistant variety.

Results: According to the results, it was observed that the application of phosphorus (25 mg kg⁻¹) was effective on the growth and development of the studied wheat cultivars under non-stress and drought stress conditions. Application of phosphorus increased shoot dry weight, phosphorus utilization efficiency, root length and area, and soluble sugars by 42, 61, 84, 47, and 66%, respectively, and decreased electrolyte leakage by 64% under drought stress conditions of 50%FC. Also, the phosphorus application of 25 mg kg⁻¹ under drought stress conditions of 50%FC increased the shoot dry weight of Sirvan variety by 75% compared to Sivand variety. This finding can be due to higher root growth and its characteristics (root area and cumulative length), uptake and utilization of soil phosphorus and physiobiochemical characteristics in Sirvan variety. The application of phosphorus with a positive effect on the growth and development of the Sirvan variety in the vegetative growth stage made it adapt to drought stress conditions.

Conclusions: The application of phosphorus at the level of 25 mg kg⁻¹ under drought stress conditions increased the shoot dry weight, root area and length, phosphorus uptake and efficiency, and soluble sugars and decreased electrolyte leakage. These changes were more noticeable in Sirvan variety. The use efficiency of phosphorus in the stages of vegetative growth can play an important role in determining the resistance of cultivars to drought stress. It is considered a good feature for a suitable fertilizer recommendation in order to improve the yield of agricultural products. Also, using the appropriate level of phosphorus can play an effective role in the efficiency of drought-resistant cultivars.

References:

1. Kang, L.y., Yue, S.C., Li, S.Q., 2014. Effects of phosphorus application in different soil layers on root growth, yield, and water-use efficiency of winter wheat grown under semi-arid conditions. *J. Integr. Agric.* 13(9), 2028–2039. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(14\)60751-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60751-6).
2. Neji, M., Kouas, S., Gandour, M., Aydi, S., Abdelly, C., 2019. Genetic variability of morpho-physiological response to phosphorus deficiency in Tunisian populations of *Brachypodium hybridum*. *Plant Physiol. Biochem.* 143, 246–256. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.09.006>.



کارایی فسفر ارقام گندم سیروان و سیوند در شرایط تنش خشکی در یک خاک آهکی

مریم موسوی^۱، رضا خراسانی^{۱*} و رضا توکل افشاری^۲

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۲۴)

چکیده

کمبود فسفر و تنش خشکی از عوامل محدودکننده در عملکرد گندم است. تنش خشکی آثار متفاوتی بر کارایی‌های جذب، مصرف و استفاده فسفر خاک در ارقام گندم می‌گذارد. هدف از این پژوهش بررسی پاسخ رشد و نمو، جذب و کارایی فسفر در ارقام گندم سیروان و سیوند در سه سطح تنش رطوبتی ۵۰، ۷۰ و ۹۵ درصد گنجایش مزرعه خاک و دو سطح فسفر ۰ و ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود. نتایج نشان داد که کاربرد فسفر در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد گنجایش مزرعه وزن خشک شاخساره، کارایی مصرف فسفر، طول و سطح ریشه و قندهای محلول کل را به ترتیب ۴۲، ۶۱، ۸۴، ۴۷ و ۶۶ درصد افزایش داده و نشت الکترولیت را به میزان ۶۴ درصد کاهش داد. هم‌چنین افزودن فسفر به مقدار ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم در شرایط تنش خشکی (۵۰ درصد گنجایش مزرعه)، وزن خشک شاخساره را در رقم سیروان ۷۵ درصد نسبت به رقم سیوند افزایش داد. این افزایش می‌تواند به دلیل تأثیر فسفر در فعالیت‌های سوخت‌وساز درون گیاه باشد که منجر به افزایش رشد ریشه، تولید قندهای محلول و مقاومت دیواره سلولی و کاهش نشت الکترولیت شده است. بنابراین تغییرات مثبت مشاهده شده در اثر استفاده فسفر در شاخص‌های مختلف باعث افزایش مقاومت رقم سیروان نسبت به سیوند در شرایط تنش خشکی شد. با توجه به نتایج کارایی‌های فسفر و برخی ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه و فیزیوبیوشیمیایی، رقم سیروان توانست پاسخ خوبی نسبت به کود فسفر در تعدیل اثر تنش خشکی نشان دهد.

واژه‌های کلیدی: تنش رطوبتی، جذب فسفر، کارایی استفاده فسفر، ماده خشک گیاهی.

مقدمه

می‌توان تا حد زیادی آثار منفی خشکی را تعدیل کرد (da Silva et al., 2011; Zahoor et al., 2017; Salim and Reza, 2020). فسفر یکی از عناصر غذایی است که برای جبران صدمات ناشی از تنش خشکی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (Jun et al., 2017; Tariq et al., 2017; Zhang et al., 2018).

طی سال‌های اخیر در سرتاسر جهان، کاهش بارندگی میزان تولید گندم را به شدت تحت تأثیر قرار داده است. در شرایط تنش خشکی، جذب عناصر غذایی دچار تغییر و اختلال می‌شود. پژوهشگران عقیده دارند با مدیریت تغذیه‌ای مناسب

۱- گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: khorasani@um.ac.ir

2019). برخی از پژوهشگران نشان دادند که دو نکته در کاربرد میزان مناسب کودهای فسفردار در کشت گیاه گندم مورد اهمیت است که عبارتند از: ۱- افزایش فسفر قابل استفاده^۲ و ۲- افزایش کارایی جذب، مصرف و استفاده فسفر (Ortiz-Monasterio et al., 2002; Zhu et al., 2012; Kang et al., 2018; Bilal et al., 2018; Zhang et al., 2018). ارقام فسفر کارا برای اهداف مختلف از جمله افزایش در جذب عناصر غذایی، کاهش آثار تنش خشکی، و تغییر در ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه، کارایی متفاوتی دارند و معیارهایی که در انتخاب این ارقام به کار می‌روند با توجه به اهداف ذکرشده، شرایط محیط رشد، نوع گیاه و رقم، نیاز آن‌ها به فسفر متفاوت می‌باشند (Korkmaz and Altıntaş, 2016; Ding et al., 2017; Neji et al., 2019; Bilal et al., 2018; Deng et al., 2018). تعاریف و مفاهیم متفاوتی برای کارایی فسفر وجود دارد. کارایی استفاده فسفر^۳ ترکیبی از کارایی جذب^۴ و کارایی مصرف فسفر^۵ (مصرف بهینه از فسفر درون گیاه) است که باعث رشد و توسعه گیاه می‌شود (Gourley et al., 1993; Sandaña, 2016). بهبود در کارایی جذب و مصرف باعث افزایش کارایی استفاده فسفر در گیاهان می‌شود (Moll et al., 2016; Wang et al., 2010; Sandaña, 2016). کارایی جذب و مصرف در تولید ماده خشک اهمیت دارد و هم‌چنین ویژگی‌های فیزیوشیمیایی و مورفولوژیک گیاه از جمله رشد ریشه نقش مؤثری در کارایی جذب و مصرف فسفر دارد (Wang et al., 2010). افزایش کارایی‌های جذب و مصرف فسفر می‌توانند در افزایش عملکرد گیاه نقش داشته باشند (Ortiz-Monasterio et al., 2002). تفاوت در توانایی‌های گیاهان فسفر کارا در جذب و استفاده از فسفر خاک حداقل به دلیل وجود سه مشخصه است: ۱- توانایی فیزیولوژیک برای جذب فسفر از خاک، ۲- فعالیت‌های سوخت و ساز گیاه که منجر به افزایش حلالیت فسفر می‌گردد و ۳- توانایی سیستم

در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمبود آب به دلیل خشکسالی‌های به وجود آمده، باعث کاهش تحرک فسفر در خاک و در نتیجه رشد گیاه شده است که می‌توان با تغییر در میزان توصیه کودی فسفر در شرایط تنش خشکی تا حدی در رشد و نمو گیاه بهبود ایجاد کرد (Kang et al., 2014; Zhang et al., 2018). مصرف زیاد کودهای فسفردار باعث آلودگی خاک و آب می‌شود و افزایش بی‌رویه این کودها در تولید گازهای گلخانه‌ای نیز نقش مؤثری دارند. بنابراین به‌منظور کاهش آثار منفی بر عملکرد اکوسیستم باید در مصرف کودهای فسفردار دقت شود (Salim and Raza, 2020; Gebremichael et al., 2022). از آنجایی که نیاز به فسفر گیاه گندم نسبت به سایر غلات بیش‌تر است، کارایی استفاده از کودهای فسفردار در کشت گندم اهمیت قابل توجهی پیدا می‌کند (Zhu et al., 2019; de Souza Campos et al., 2012). پژوهش‌ها نشان دادند که مدیریت و اصلاح ارقام گندم باعث افزایش کارایی جذب و مصرف فسفر در گیاه گندم شده و مصرف کودهای فسفاته را نیز کاهش می‌دهد (Campos et al., 2018)، بنابراین شناسایی و استفاده از ارقام کارا و مقاوم به شرایط کمبود فسفر می‌تواند یک راه‌کار مؤثر و مقرون به صرفه در سیستم‌های کشاورزی پایدار باشد (Sidhu et al., 2018). کارایی گیاهان در جذب فسفر با توجه به سیستم محیط کشت و چگونگی مدیریت زراعی اعمال‌شده متفاوت است (Ozturk et al., 2005; Kang et al., 2014; Korkmaz and Altıntaş, 2016; Deng et al., 2018; Tariq et al., 2018). گیاهان فسفرکارا^۱ به دلیل داشتن ویژگی‌های فیزیوشیمیایی و مورفولوژیک خاص در شرایط خشکی از جمله تولید متابولیت‌های ثانویه، سنتز فنل و قندهای محلول، افزایش رشد ریشه (طول و سطح ریشه)، و تولید تارهای کشنده مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. بنابراین افزایش کارایی استفاده فسفر و شناسایی راه‌کارها و مسیرهایی که به افزایش آن در ارقام منتج می‌شود بسیار مهم است (Korkmaz and Altıntaş, 2016; Tariq et al., 2017; Bilal et al., 2018; Deng et al., 2018; Neji et al.,

2. Available phosphorus

3. Phosphorus use efficiency (PUE)

4. Phosphorus uptake efficiency (PU_pE)5. Phosphorus utilization efficiency (PU_tE)

1. Phosphorus efficient plants

فسفر توسط گیاه می‌شوند (Korkmaz and Altıntaş, 2016; Abbadi, 2017). با توجه به نتایج پژوهشگران مختلف در همین راستا، مشاهده شد که کاربرد کود فسفر در شرایط تنش خشکی غالباً از طریق افزایش طول و سطح ریشه باعث بهبود رشد و نمو در ارقام گندم می‌شود (Zhu et al., 2012; Kang et al., 2014; Deng et al., 2018).

سؤالی که در این پژوهش مورد کنکاش قرار می‌گیرد این است که آیا کاربرد فسفر در شرایط تنش خشکی می‌تواند آثار ناشی از خشکی را تعدیل کند و وضعیت گیاه را بهبود بخشد؟، هم‌چنین جذب و کارایی فسفر به چه میزان در کاهش تنش خشکی در ارقام گندم مؤثر است؟. در پژوهش‌های انجام شده بر روی ارقام سیروان (مقاوم به خشکی) و سیوند (حساس به خشکی) به ویژگی‌ها و عملکرد این ارقام در آخر فصل اشاره شده است (Seed and Plant Breeding Research Institute, 2015) و کم‌تر مکانیسم‌های مورفولوژیک و فیزیوشیمیایی، جذب و کارایی فسفر در شرایط تنش خشکی و مرحله رشد رویشی بررسی شده است. به همین منظور این پژوهش با هدف بررسی پاسخ این دو رقم گندم به تنش خشکی در حضور فسفر و ارزیابی ویژگی‌های رشدی، جذب و کارایی فسفر و تأثیر آن‌ها بر تعدیل تنش خشکی انجام شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در گلخانه پژوهشی واقع در دانشکده کشاورزی در دانشگاه فردوسی مشهد به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه فاکتور و سه تکرار در طی دوره رشد رویشی بر روی گیاه گندم انجام شد. فاکتورها شامل ارقام گندم بهاره^۱ سیروان به‌عنوان رقم مقاوم به خشکی (C2) و سیوند به‌عنوان رقم حساس به خشکی (C1)، فسفر از منبع منو کلسیم فسفات منویدرات^۲ به میزان ۰ (P0) و ۲۵ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک (P1) و سه رژیم رطوبتی شامل ۵۰، ۷۰ و ۹۵

ریشه در توزیع گسترده در خاک (Hinsinger et al., 2011). معماری ریشه به‌عنوان یکی از ویژگی‌های مهم گیاه برای سازگاری با محیط خاک محسوب می‌شود که گیاهان را قادر می‌سازد با کمبود عناصر غذایی مقابله کنند. افزودن فسفر به خاک‌های با کمبود فسفر باعث گسترش سیستم ریشه گیاه می‌شود که این امر دسترسی گیاه به آب و عناصر غذایی به‌ویژه در شرایط آب و هوای خشک و نیمه‌خشک را بیش‌تر می‌کند (Kang et al., 2014; Razaq et al., 2017)؛ هم‌چنین پژوهش‌ها نشان دادند که پاسخ برخی گیاهان به کمبود فسفر ایجاد تغییرات مورفوفیزیولوژیک (از جمله افزایش و توسعه ریشه، تارهای کشنده، طول، سطح، و نسبت ریشه به شاخساره) است که باعث افزایش جذب و کارایی فسفر می‌شوند (Mori et al., 2019; Deng et al., 2018; de Souza Campos et al., 2016). میزان وزن خشک گیاه می‌تواند مبنایی برای تعیین پاسخ‌های فیزیولوژیک به شرایط محیطی و فرآیندهای رشدی مورد توجه قرار گیرد و شاخص خوبی برای عملکرد نهایی باشد. بنابراین اختلاف در وزن خشک شاخساره به‌عنوان معیار قابل قبول و مورد اعتماد برای ارقام مقاوم و کارا به کمبود فسفر اهمیت بسزایی دارد (Abbadi, 2017). از آنجایی که فراهمی فسفر برای گیاه با رطوبت خاک در ارتباط است، بنابراین تنش خشکی می‌تواند باعث افزایش کمبود فسفر در گیاه شود (Kang et al., 2014). هم‌چنین کمبود فسفر با کاهش رشد و توسعه برگ و هدایت روزنه‌ها منجر به کاهش میزان فتوسنتز در گیاه می‌شود و در نتیجه آثار نامطلوبی بر رشد و عملکرد گیاهان به‌ویژه گندم می‌گذارد. در صورتی که پژوهش‌ها نشان دادند که کاربرد فسفر در شرایط خشکی با بهبود در ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیوشیمیایی باعث افزایش رشد گیاه می‌شود. هم‌چنین ویژگی‌های خاکی و گیاهی در مقاومت به کمبود فسفر و تنش خشکی در گیاهان نقش مؤثری دارند (Tariq et al., 2017, 2018). پژوهش‌ها نشان دادند که ویژگی‌های خاک از جمله بافت، میزان رس و pH و شاخص‌های گیاهی از جمله طول و سطح ریشه باعث تغییر در میزان جذب

1. *Triticum aestivum* L.

2. $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

بذرها، رطوبت خاک گلدان‌ها با آب مقطر در حدود FC نگره‌داری شد. پس از ظهور گیاهچه‌ها برای حفظ تراکم مطلوب تعداد گیاهان به ۴ گیاهچه کاهش یافت. حدود یک هفته پس از رشد گیاهچه‌ها با توزین روزانه گلدان‌ها با توجه به FC، سطوح تنش خشکی با آب مقطر به روش وزنی اعمال شد. برای جلوگیری از تاثیر نایک‌نواختی شرایط محیطی و آثار حاشیه‌ای، گلدان‌ها هر ۵ روز بر اساس یک الگوی مشخص در طی آزمایش جابجا شدند.

تعیین شاخص‌های گیاهی

گیاهان ۶۹ روز پس از زمان کشت و در پایان مرحله رشد رویشی برداشت شدند. سپس وزن خشک و تازه، صفات مورفولوژیک، غلظت، جذب و کارایی فسفر در شاخساره و ریشه گیاهان اندازه‌گیری شدند. پس از توزین ریشه‌ها، سطح و طول ریشه‌ها با دستگاه اسکتر ریشه Delta-T و نرم‌افزار WinRHIZO (مدل: Regent Instruments, Quebec Canada) تعیین شدند (Deng et al., 2018; Neji et al., 2019). عصاره‌گیری نمونه‌ها به روش هضم خشک انجام شد (Shabani et al., 2021; Karimzadeh et al., 2018) و غلظت فسفر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر با روش وانادیوم مولیبدات اندازه‌گیری شد (Chapman and Pratt, 1961). هم‌چنین غلظت فسفر قابل استفاده در عصاره‌های محلول خاک نیز به روش اولسن اندازه‌گیری شد (Olsen, 1954). جذب فسفر (Jun et al., 2021; Karimzadeh et al., 2018; Deng et al., 2017) و کارایی‌های مصرف (Osborne and Rengel, 2002; Bilal et al., 2019; Neji et al., 2018; Deng et al., 2018) و جذب و استفاده فسفر در شاخساره (Moll et al., 1982) با استفاده از روابط زیر محاسبه گردید:

$$\text{Uptake (mg)} = \text{CP (mg kg}^{-1}\text{)} \times \text{SDW (kg)} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، Uptake، جذب، SDW، وزن خشک شاخساره و CP، غلظت فسفر شاخساره است.

$$\text{PUtE (kg)} = \frac{\text{SDW (mg)}}{\text{CP (mg kg}^{-1}\text{)}} \quad (2)$$

درصد گنجایش مزرعه (T0, T1, T2) بود. در این آزمایش پس از جمع‌آوری خاک از لایه ۰-۳۰ سانتی‌متری محوطه دانشگاه فردوسی مشهد با مشخصات جغرافیایی $36^{\circ}18'19''\text{N}$, $59^{\circ}31'41''\text{E}$ و هوا-خشک کردن، از الک دو میلی‌متری عبور داده شد. سپس بافت و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش قرار گرفت (جدول ۱). اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک گزارش شده در جدول (۱) بر اساس روش‌های استاندارد تجزیه خاک انجام شد. گنجایش مزرعه (FC) نیز با استفاده از دستگاه صفحه فشار تعیین شد (Black et al., 1965; Page et al., 1982). بذرهای ارقام گندم مورد نظر (سیروان و سیوند) از مرکز تحقیقات کشاورزی خراسان رضوی، بخش نهال و بذر تهیه شدند؛ میزان فسفر بذر ارقام سیروان و سیوند به ترتیب برابر ۰/۴۰ و ۰/۲۴ درصد بود. پس از بررسی درصد و سرعت جوانه‌زنی بذر در ژرminatور بذرهای سالم و هم‌اندازه انتخاب شدند. بذرها با محلول هیپوکلریت سدیم ۵ درصد (v/v) به مدت ۴ دقیقه ضدعفونی شده و پس از شستشو با آب مقطر به گلدان‌های پلاستیکی محتوی خاک به میزان ۵ کیلوگرم منتقل شدند. عناصر غذایی شامل نیتروژن از منبع نترات آمونیوم به میزان ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم به میزان ۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، آهن از منبع سکوسترین (Fe-EDDHA) (۶ درصد آهن) به میزان ۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم و روی از منبع سولفات روی به میزان ۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم (میزان اولیه روی و آهن قابل استخراج با DTPA در خاک به ترتیب ۰/۴ و ۲/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) پیش از کشت به خاک هر گلدان افزوده شد. عناصر نیتروژن، پتاسیم، روی و آهن بر اساس آزمون خاک به مقدار ثابت به تمام گلدان‌ها داده شد (Atarodi et al., 2018; Zandi, 2021). در هر گلدان، ۱۰ بذر در عمق ۲ سانتی‌متری خاک کاشته شد. شرایط کنترل شده گلخانه شامل دامنه تغییرات دمای روز و شب به ترتیب ۳۲ و ۲۲ درجه سلسیوس، میزان رطوبت نسبی ۳۱ تا ۶۱ درصد و طول مدت روز و شب به ترتیب ۱۴ و ۱۰ ساعت بود. تا زمان سبز شدن

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده.
Table 1. Some physical and chemical properties of the studied soil.

رسانایی الکتریکی عصاره اشباع	کربنات کلسیم معادل	کربنات کلسیم قابل استفاده	پتاسیم قابل استفاده	فسفر قابل استفاده	نیترژن	کربن آلی	سیلت	رس	شن	گنجایش مزرعه	بافت
Electrical conductivity of saturated extract (dS m ⁻¹)	Calcium carbonate equivalent (%)	Available potassium (mg kg ⁻¹)	Available phosphorus (mg kg ⁻¹)	Nitrogen (%)	Organic carbon (%)	pH (soil:water, 1:2.5)	Silt (%)	Clay (%)	Sand (%)	Field capacity (%aw/w)	Texture
1.46	13.8	147.5	8.57	0.07	0.35	8.13	49.3	25.3	25.4	19.0	Clay loam

۱- تأثیر فسفر و تنش خشکی بر وزن خشک شاخساره ارقام

گندم

با توجه به نتایج این آزمایش برهم‌کنش فسفر و تنش خشکی، فسفر و رقم و رقم و تنش خشکی تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک شاخساره داشتند (جدول ۲). همان‌طور که در شکل (۱-الف) مشاهده می‌شود وزن خشک شاخساره تحت تأثیر کمبود فسفر و تنش خشکی کاهش یافت. در صورتی که کاربرد فسفر در سطح ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم در شرایط بدون تنش خشکی (سطح ۹۵ درصد) وزن خشک شاخساره را به میزان ۱۳/۱۵ گرم در گلدان افزایش داد. هم‌چنین کاربرد فسفر نیز در سطح تنش خشکی ۵۰ درصد باعث افزایش در وزن خشک شاخساره به میزان ۵/۳۰ گرم در گلدان در مقایسه با سطح بدون فسفر شد. با توجه به برهم‌کنش‌های فسفر و تنش خشکی، کاربرد فسفر در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد، وزن خشک در شاخساره را ۴۲ درصد نسبت به سطح بدون فسفر در همین سطح تنش افزایش داد (شکل ۱-الف). هم‌چنین نتایج نشان داد که در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد، رقم سیروان نسبت به رقم سیوند وزن خشک بیش‌تری داشت (شکل ۱-ب).

۲- تأثیر فسفر و تنش خشکی بر ویژگی‌های ریشه ارقام گندم

تغییرات سطح ریشه تحت تأثیر رقم و برهم‌کنش فسفر و تنش خشکی معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج آثار ساده نشان داد که میزان سطح ریشه در رقم سیروان ۲۲/۲۹ درصد در مقایسه با رقم سیوند بیش‌تر بود (میزان سطح ریشه رقم سیروان ۰/۱۸۱ و رقم سیوند ۰/۱۴۸ متر مربع) هم‌چنین بیش‌ترین میزان سطح ریشه در شرایط بدون تنش خشکی و کاربرد فسفر به میزان ۰/۲۸۹ متر مربع بود (شکل ۲-الف). کمبود فسفر و تشدید تنش خشکی (۵۰ درصد FC) باعث کاهش سطح ریشه به میزان ۰/۰۹۱ متر مربع شد، در صورتی که کاربرد فسفر در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد FC، سطح ریشه را به میزان ۴۶/۱۵ درصد نسبت به سطح بدون کاربرد فسفر افزایش داد (شکل ۲-الف).

تأثیر برهم‌کنش‌های فسفر و تنش خشکی، رقم و تنش

در رابطه (۲)، PUE، کارایی مصرف فسفر است.

$$PUE = \frac{CP \left(\text{mg kg}^{-1} \right)}{Nt \left(\text{mg kg}^{-1} \right)} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، PUE، کارایی جذب فسفر و Nt، غلظت فسفر خاک است.

$$PUE \text{ (kg)} = P \text{ uptake efficiency (PUE)} \times P \text{ utilization efficiency (PUE)} \text{ (kg)} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، کارایی استفاده فسفر (PUE) از حاصل‌ضرب کارایی‌های مصرف (PUE) و جذب (PUE) فسفر محاسبه شد.

غلظت قند محلول کل در برگ به روش فنل - سولفوریک در طول موج ۴۸۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Dubois et al., 1956). برای اندازه‌گیری نشت الکترولیت (EL) از برگ‌های پرچمی استفاده شد و EL بر اساس رابطه زیر محاسبه شد (Jambunathan et al., 2010):

$$EL \% = \frac{R1 : EC \text{ (before autoclaving)}}{R2 : EC \text{ (after autoclaving)}} \times 100 \quad (5)$$

در رابطه (۵)، R1، میزان رسانایی الکتریکی نمونه‌ها پیش از اتوکلاو و R2، میزان رسانایی الکتریکی نمونه‌ها پس از اتوکلاو است.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با نرم‌افزار SAS انجام شده و برای مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد. نمودارهای مربوطه با نرم‌افزار MS Excel رسم شدند.

نتایج

جدول تجزیه واریانس نشان داد که آثار رقم، فسفر و تنش خشکی در تمام ویژگی‌ها و شاخص‌های مورد بررسی به‌جز کارایی جذب و کارایی استفاده فسفر در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲).

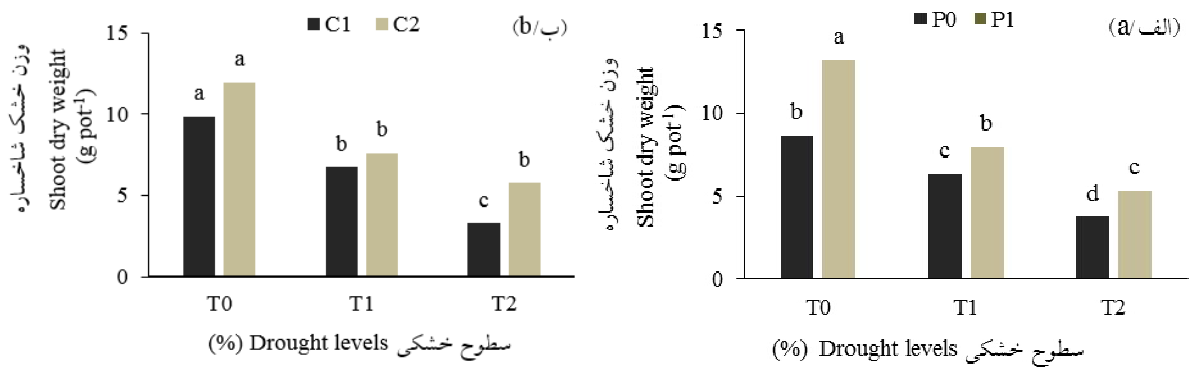
جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس تائیر رقم، تنش خشکی، فسفر و برهمکنش آنها بر ویژگی‌های مورفولوژیک، جذب و کارایی فسفر در ارقام گندم.

Table 2. The results of variance analysis of the effect of cultivar, drought stress, phosphorus and their interactions on morphological characteristics, uptake and efficiency of phosphorus in wheat cultivars.

سطح ریشه	طول تجمعی ریشه	جذب فسفر	کارایی استفاده فسفر	کارایی جذب فسفر	کارایی مصرف فسفر	وزن خشک	درجه	منبع تغییرات
Root area	Root cumulative length	P Shoot uptake	P Use efficiency	P Uptake efficiency	P Utilization efficiency	Shoot dry weight	df	Source of variation
0.0098**	252005.67**	126.76**	137039.9**	65.72 ^{ns}	5.15**	29.46**	1	Cultivar (C)
0.0405**	255248.85**	1308.3**	373680.8**	5813.81**	7.36**	123.01**	2	Drought Stress (T)
0.0381**	424276.97**	196.38**	4408.46 ^{ns}	44368.85**	18.03**	60.19**	1	Phosphorus (P)
0.0002 ^{ns}	1871.81 ^{ns}	11.19 ^{ns}	9666.95 ^{ns}	641.46 ^{ns}	0.27 ^{ns}	1.98*	1	P × C
0.0001 ^{ns}	7861.02*	43.46 ^{ns}	2550.97 ^{ns}	1925.32**	0.04 ^{ns}	2.18*	2	T × C
0.0076**	40425.17**	**87.41	30461.6**	1113.30*	0.58*	8.59**	2	T × P
0.0016 ^{ns}	13162.71**	0.06 ^{ns}	933.31 ^{ns}	279.87 ^{ns}	0.07 ^{ns}	0.30 ^{ns}	2	P × T × C
0.0005	2035.04	12.88	4786.28	254.68	0.16	0.44		Error
13.50	10.90	19.60	13.68	9.84	12.50	8.90		%CV

** و * به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال یک و پنج درصد

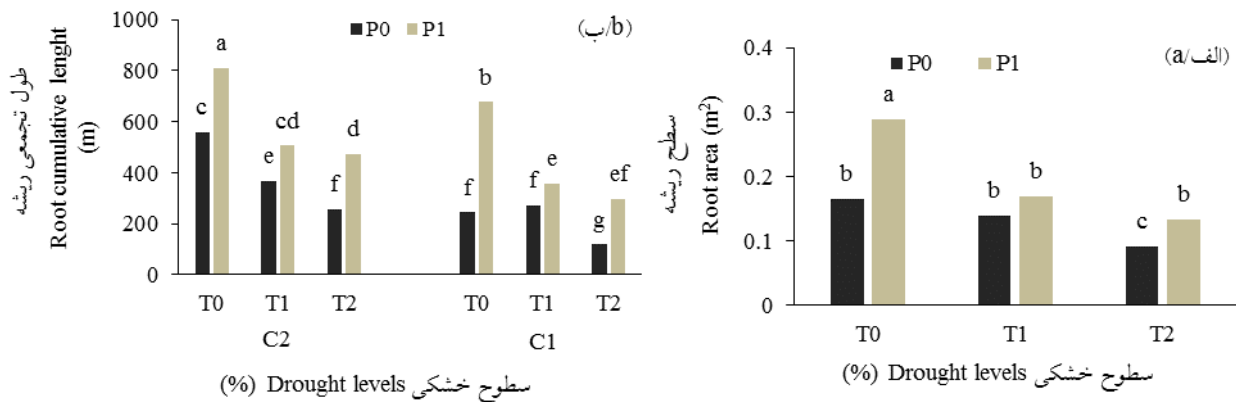
* and ** Significant at the 0.05 and 0.01 levels of probability, respectively



شکل ۱. تأثیر سطوح خشکی و فسفر (الف) و سطوح خشکی و رقم (ب) بر وزن خشک شاخساره

Fig. 1. Effect of drought levels and phosphorus (a) and drought level and cultivar (b) on shoot dry weight.

T0: 95%FC, T1: 70%FC, T2: 50%FC, P0: 0, P1: 25 mg kg⁻¹, C1: Sivand, C2: Sirvan.



شکل ۲. تأثیر فسفر، رقم و تنش خشکی بر روی سطح ریشه (الف) و طول تجمعی ریشه (ب).

Fig. 2. Effect of phosphorus, cultivar and drought stress on root area (a) and cumulative root length (b).

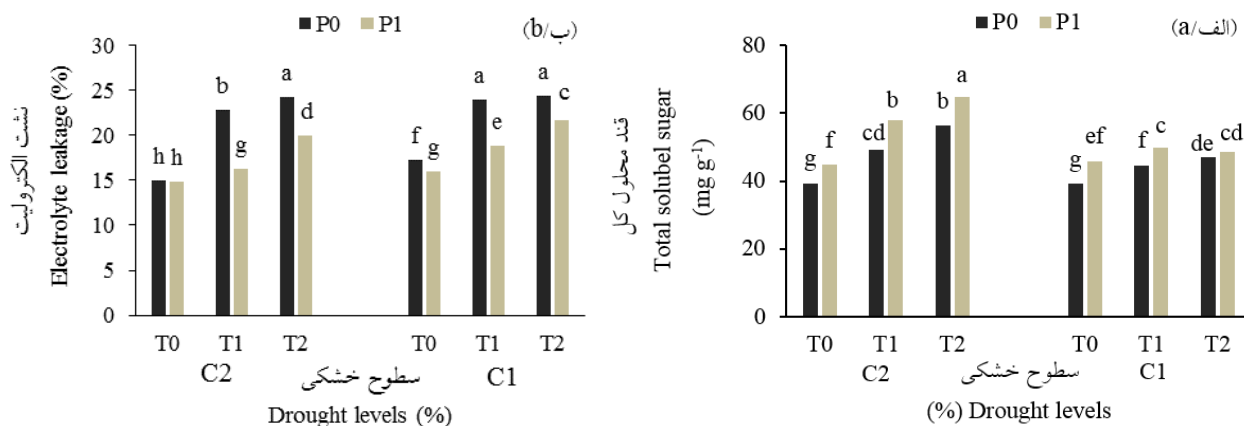
T0: 95%FC, T1: 70%FC, T2: 50%FC, P0: 0, P1: 25 mg kg⁻¹, C1: Sivand, C2: Sirvan.

تنش افزایش داده است (شکل ۲-ب). با توجه به نتایج مشاهده شد که کمبود فسفر و افزایش تنش خشکی تأثیر بیش‌تری در کاهش رشد (طول و سطح) ریشه رقم سیوند داشته است و هم‌چنین افزایش رشد ریشه در رقم سیروان می‌تواند از دلایل مقاومت آن در مقایسه با رقم سیوند باشد.

۳- تأثیر فسفر و تنش خشکی بر برخی از ویژگی‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی ارقام گندم

برهم‌کنش‌های دوگانه رقم و تنش و فسفر و برهم‌کنش سه‌گانه رقم، تنش و فسفر تأثیر معنی‌داری بر میزان قند محلول

خشکی و فسفر، رقم و تنش خشکی بر طول تجمعی ریشه معنی‌دار بود (جدول ۲). همان‌طور که نتایج در شکل (۲-ب) نشان می‌دهد، کمبود فسفر و افزایش تنش خشکی (۵۰ و ۷۰ درصد FC)، طول ریشه را در رقم سیوند در مقایسه با رقم سیروان به ترتیب حدود ۱/۵ برابر و ۳۴ درصد کاهش داد. هم‌چنین بیش‌ترین طول تجمعی ریشه به میزان ۸۰۸/۲ میلی‌متر در سطح ۹۵ درصد FC به همراه کاربرد فسفر در رقم سیروان مشاهده شد. نتایج نشان داد که کاربرد فسفر در سطح تنش خشکی ۵۰ درصد FC، طول تجمعی ریشه رقم سیروان را به میزان ۸۴ درصد نسبت به بدون کاربرد فسفر در همین سطح



شکل ۳. تأثیر فسفر، رقم و تنش خشکی بر قند محلول کل (الف) و نشت الکترولیت (ب).

Fig. 3. Effect of phosphorus, cultivars and drought stress on total soluble sugar (a) and electrolyte leakage (b)

T0: 95%FC, T1: 70%FC, T2: 50%FC, P0: 0, P1: 25 mg kg⁻¹, C1: Sivand, C2: Sirvan.

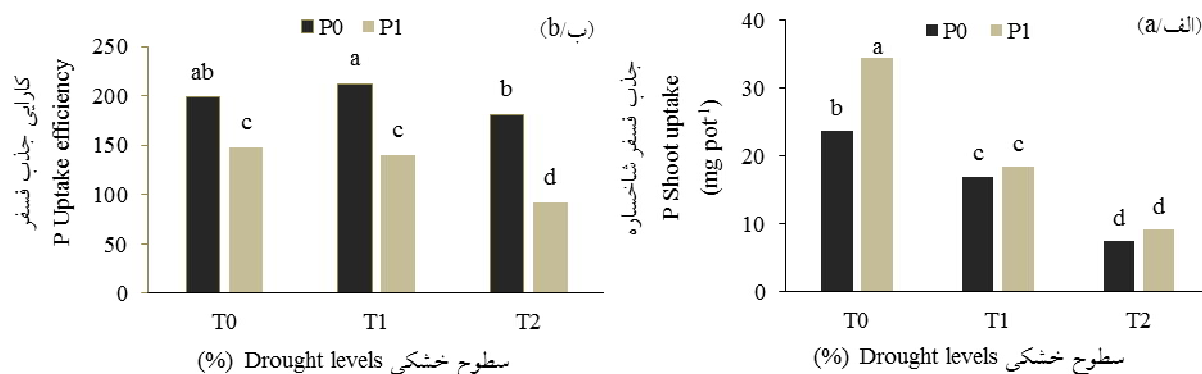
بود که می‌تواند در افزایش مقاومت رقم سیروان در شرایط تنش خشکی نقش مؤثری داشته باشند.

۴- تأثیر فسفر و تنش خشکی بر جذب و کارایی فسفر در

ارقام گندم (کارایی جذب، مصرف و استفاده فسفر)

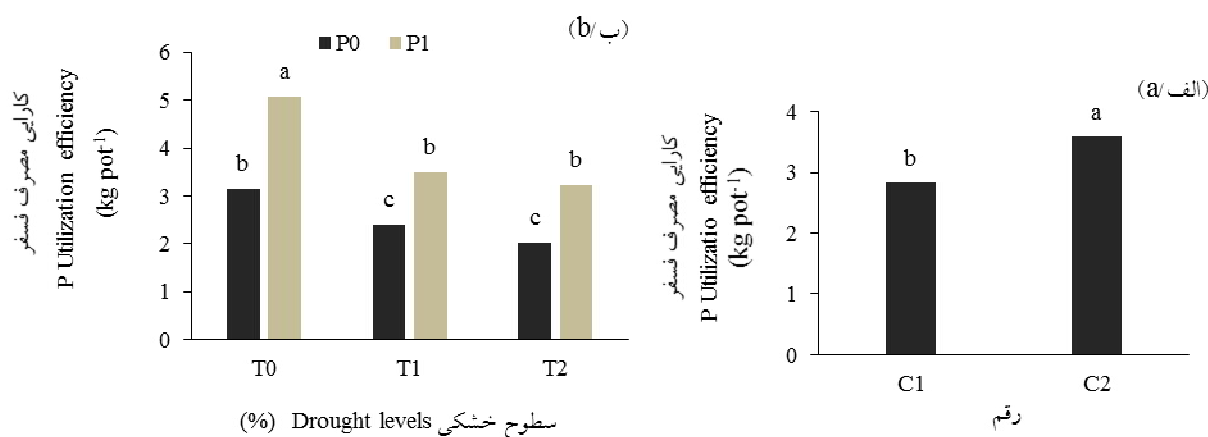
نتایج نشان داد که رقم و برهم‌کنش دوگانه تنش خشکی و فسفر تأثیر معنی‌داری بر میزان جذب فسفر شاخساره داشتند (جدول ۲). همان‌طور که در نتایج مشاهده می‌شود جذب فسفر در شاخساره تحت تأثیر کمبود فسفر و تنش خشکی کاهش یافت (شکل ۴-الف). در صورتی که با افزایش سطح فسفر و کاهش تنش خشکی بیش‌ترین میزان جذب فسفر مشاهده گردید ولی کاربرد فسفر با افزایش تنش خشکی در سطح ۵۰ و ۷۰ درصد FC تأثیر معنی‌داری بر میزان جذب فسفر نداشت. کاربرد فسفر در شرایط بدون تنش خشکی (سطح ۹۵ درصد FC)، میزان جذب این عنصر در شاخساره را نسبت به سطح بدون کاربرد فسفر در شرایط تنش خشکی (سطح ۹۵ درصد FC) حدود چهار برابر افزایش داد (شکل ۴-الف). نتایج کارایی جذب فسفر نشان داد که این شاخص تحت تأثیر برهم‌کنش تنش خشکی و فسفر و برهم‌کنش تنش خشکی و رقم قرار گرفت (جدول ۲). نتایج در شکل (۴-ب) نشان داد که

کل داشتند. نتایج نشان داد که میزان قند محلول در رقم سیروان در شرایط تنش و بدون تنش خشکی به همراه کاربرد فسفر بیش‌تر از رقم سیوند بود. کاربرد فسفر در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد FC، میزان قند محلول را در رقم سیروان به میزان ۳۳/۲۷ درصد نسبت به رقم سیوند افزایش داد. هم‌چنین نتایج نشان داد که کاربرد فسفر در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد FC تأثیر بیش‌تری در افزایش میزان قند محلول رقم سیروان داشت (۶۴/۶۸ درصد نسبت به بدون کاربرد فسفر در شرایط بدون تنش خشکی) (شکل ۳-الف). تغییرات در میزان نشت الکترولیت تحت تأثیر برهم‌کنش‌های دوگانه تنش خشکی و فسفر و برهم‌کنش سه‌گانه رقم، تنش و فسفر معنی‌دار بود. با توجه به نتایج پژوهش حاضر مشاهده شد که کمبود فسفر و افزایش تنش خشکی ۵۰ درصد FC باعث افزایش نشت الکترولیت در رقم سیروان و سیوند به میزان ۲۴/۲ و ۲۴/۴ درصد شد. در صورتی که کاربرد فسفر بر روی ارقام سیروان و سیوند در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد FC، نشت الکترولیت را به میزان ۲۱ و ۱۲/۴۴ درصد نسبت به بدون کاربرد فسفر در همین سطح تنش کاهش داد (شکل ۳-ب). همان‌طور که نتایج نشان داد کاربرد فسفر در افزایش میزان قند محلول و کاهش نشت الکترولیت در رقم سیروان در مقایسه با رقم سیوند بیش‌تر



شکل ۴. تأثیر فسفر و تنش خشکی بر جذب فسفر شاخساره (الف) و کارایی جذب فسفر (ب).

Fig. 4. Effect of phosphorus and drought stress on P shoot uptake (a) and uptake efficiency (b)
T0: 95%FC, T1: 70%FC, T2: 50%FC, P0: 0, P1: 25 mg kg⁻¹.

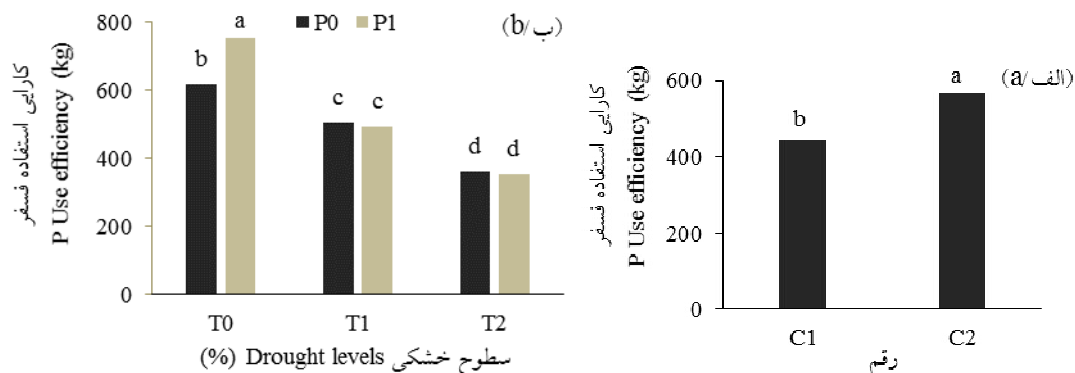


شکل ۵. تأثیر رقم (الف) فسفر و تنش خشکی (ب) بر کارایی مصرف فسفر.

Fig. 5. Effect of cultivars (a) and phosphorus and drought stress (b) on P utilization efficiency.
T0: 95%FC, T1: 70%FC, T2: 50%FC, P0: 0, P1: 25 mg kg⁻¹, C1: Sivand, C2: Sirvan.

تنش خشکی ۵۰ درصد FC، کارایی مصرف فسفر را ۶۰/۱۹ درصد نسبت به سطح بدون کاربرد فسفر در همین سطح تنش افزایش داد (شکل ۵-ب). همان‌طور که نتایج نشان داد جذب و کارایی مصرف فسفر در شرایط تنش خشکی بیش‌تر، کاهش یافت ولی این روند کاهشی در شاخص کارایی مصرف فسفر با شیب کم‌تری بود، این نتایج بیان‌گر اهمیت رطوبت در افزایش جذب و کارایی فسفر است ولی ارقام گندم مورد بررسی توانسته‌اند از میزان فسفر جذب شده بیش‌ترین استفاده را داشته باشند. نتایج مربوط به کارایی استفاده فسفر نشان داد که این شاخص تحت تأثیر رقم و برهم‌کنش فسفر و تنش

بیش‌ترین کارایی جذب فسفر در سطح بدون تنش خشکی و بدون کاربرد فسفر مشاهده شد. با افزایش تنش خشکی (سطح ۵۰ درصد FC) و سطح فسفر، کارایی جذب فسفر به میزان ۶۰/۲۶ درصد در مقایسه با سطح کاربرد فسفر و بدون تنش خشکی کاهش یافت (شکل ۴-ب). کارایی مصرف فسفر تحت تأثیر رقم و برهم‌کنش تنش خشکی و فسفر قرار گرفت (جدول ۲). همان‌طور که نتایج مربوط به آثار ساده رقم نشان می‌دهد، بیش‌ترین کارایی مصرف در رقم سیروان مشاهده شده است (شکل ۵-الف). هم‌چنین مشاهده شد که بیش‌ترین کارایی مصرف در شرایط بدون تنش بود و کاربرد فسفر در شرایط



شکل ۶. تأثیر رقم (الف) فسفر و تنش خشکی (ب) بر کارایی استفاده فسفر.

Fig. 6. Effect of cultivars (a) and phosphorus and drought stress (b) on P use efficiency.

T0: 95%FC, T1: 70%FC, T2: 50%FC, P0: 0, P1: 25 mg kg⁻¹, C1: Sivand, C2: Sirvan.

همچنین با توجه به نقش مهمی که فسفر در افزایش میزان فتوسنتز، تقسیم و طویل شدن سلول ها و رشد ریشه دارد منجر به افزایش وزن خشک شده است. همان طور که در شکل (۱-۱) مشاهده می شود، وزن خشک رقم سیروان نسبت به رقم سیوند افزایش یافت که احتمالاً افزایش وزن خشک در رقم سیروان در شرایط تنش خشکی می تواند به دلیل افزایش رشد ریشه و سطح تماس بیشتر با ذرات خاک و جذب عناصر غذایی از جمله فسفر و در نتیجه استفاده بهینه این رقم از فسفر جذب شده باشد که با یافته های (Tariq et al., 2017; Razaq et al., 2018) و (Neji et al., 2019) همخوانی دارد.

معماری سیستم ریشه یک ویژگی تکاملی است که نقش اساسی در سازگاری گیاه در بهروری جذب عناصر در شرایط تنش خشکی دارد. سیستم ریشه ای گسترده و عمیق یکی از ویژگی های ضروری برای تحمل به خشکی به منظور دسترسی به رطوبت خاک است (Duangpan et al., 2018; Ye et al., 2018; Neji et al., 2019). نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد فسفر باعث افزایش سطح و طول ریشه شد (شکل ۲). از آنجایی که فسفر در افزایش گنجایش کاتیون تبادل^۱ (CEC) ریشه و جذب عناصر غذایی نقش مؤثری دارد (Sharma et al., 2008) می تواند از دلایل افزایش رشد ریشه در ارقام گندم مورد

خشکی قرار گرفته است (جدول ۲). نتایج آثار ساده تیمارها نشان داد که کارایی استفاده در رقم سیروان نسبت به رقم سیوند به میزان ۲۷/۸۰ درصد بیش تر بود (شکل ۶-الف). هم چنین همان طور که در نتایج شکل (۶-ب) مشاهده می شود افزایش تنش خشکی باعث کاهش میزان کارایی استفاده فسفر شد.

بحث

تأثیر فسفر بر ارقام گندم در شرایط تنش خشکی و کمبود فسفر بستگی به زمان کاربرد، منبع و میزان فسفر، شدت تنش خشکی و نیاز گیاهان به فسفر دارد (Ozturk et al., 2005; Zhu et al., 2012; Kang et al., 2014; Deng et al., 2018; Zhang et al., 2018). در این پژوهش مشاهده شد که وزن خشک ارقام گندم در شرایط کمبود فسفر و تنش خشکی کاهش یافت. در حالی که کاربرد فسفر در شرایط ۵۰ درصد FC و بدون تنش خشکی در مقایسه با سطح بدون فسفر در همین سطوح رطوبتی به ترتیب به میزان ۴۲ و ۵۲ درصد باعث افزایش وزن خشک در ارقام گندم شد (شکل ۱-الف). نتایج بیان گر این مطلب است که فراهمی فسفر به شدت با رطوبت خاک در ارتباط است، بنابراین هنگامی که میزان مناسب رطوبت خاک در اختیار گیاه قرار گیرد رشد ریشه و پخشیدگی این عنصر از خاک به سمت ریشه افزایش می یابد که در نتیجه باعث افزایش وزن خشک می شود.

1. Cation exchange capacity

که نتایج نشان داد رقم سیروان بیشترین استفاده را از فسفر جذب شده در شرایط تنش خشکی داشته، بنابراین از فسفر در ویژگی‌های فیزیوشیمیایی خود از جمله سنتز قند و کاهش نشت الکتروولیت استفاده کرده و مقاومت خود را در این شرایط افزایش داده است. قندهای محلول در شرایط تنش خشکی با تنظیم اسمزی درون برگ از تعرق گیاه کاسته و با افزایش رشد ریشه و جذب آب باعث بهبود در رشد گیاه می‌شود (Serraj et al., 2002) که با یافته‌های پژوهش حاضر همخوانی دارد. پژوهش‌ها نشان دادند که برخی عناصر غذایی از جمله فسفر منجر به کاهش نشت الکتروولیت و افزایش پایداری غشاء در شرایط تنش خشکی می‌شوند؛ بنابراین کاربرد فسفر باعث افزایش مقاومت به خشکی در گیاه می‌شود (Tariq et al., 2018; Tariq et al., 2017) که با یافته‌های پژوهش حاضر همسو است.

با توجه به نتایج اثر برهم‌کنش فسفر و تنش خشکی بر جذب فسفر مشاهده شد که کاربرد فسفر در سطح بدون تنش خشکی منجر به بیشترین مقدار این شاخص شد که این افزایش می‌تواند به دلیل افزایش رشد ریشه و سطح تماس بیش‌تر ریشه با خاک باشد. در صورتی که با افزایش تنش خشکی به سطوح ۵۰ و ۷۰ درصد FC، میزان جذب فسفر کاهش یافت (شکل ۴-الف). پژوهش‌های انجام شده در این زمینه نشان دادند که کارا بودن ارقام گندم در شرایط تنش خشکی مرتبط با افزایش رشد ریشه و تولید یک سیستم ریشه‌ای کارآمد نسبت به ارقام حساس بوده و کاربرد کود فسفر باعث افزایش طول، تراکم و وزن ریشه و در نتیجه جذب فسفر می‌شود (Kang et al., 2014; Du et al., 2020). کاهش جذب فسفر در ارقام مورد بررسی در سطوح تنش زیاد می‌تواند به دلیل صرفه‌جویی انرژی گیاه در شرایط تنش باشد. بنابراین گیاه از میزان فسفر جذب شده در درون سلول‌های خود بهترین استفاده را داشته و مانع کاهش بیش‌تر رشد در شرایط تنش‌های بیش‌تر شده است که به‌عنوان یکی از راه‌کارهای مؤثر خود را با تنش سازگار می‌کنند این نتیجه با یافته‌های (Ding et al., 2017) هم‌مانگی دارد.

بررسی در این پژوهش باشد. هم‌چنین میزان طول ریشه در رقم سیروان در شرایط تنش خشکی نسبت به رقم سیوند بیش‌تر بود، در صورتی که با افزایش تنش خشکی به سطح ۵۰ درصد FC، رشد ریشه کاهش یافت ولی کاهش رشد ریشه در رقم سیروان کم‌تر بود. (Mollier and Pellerin, 1999) و (Tariq et al., 2018) اشاره کردند که رشد ریشه در شرایط تنش خشکی تحت تأثیر میزان کربن گیاه است. کمبود فسفر در شرایط خشکی به دلیل تثبیت فسفر توسط ذرات خاک تأثیر منفی بر توسعه برگ و میزان فتوسنتز دارد، و در نتیجه میزان آن را کاهش می‌دهد. رشد ریشه گیاه در شرایط تنش خشکی و کمبود فسفر ابتدا افزایش جزئی دارد ولی در شرایط کمبود فسفر و تنش خشکی زیاد، پس از چند روز به دلیل کاهش میزان فتوسنتز و تولید کربوهیدرات‌ها رشد ریشه نیز کاهش می‌یابد که با یافته‌های پژوهش حاضر هم‌مانگی دارد. بنابراین ارقام مورد بررسی در این پژوهش برای کاهش صرف هزینه انرژی در شرایط تنش خشکی زیاد، افزایشی در رشد ریشه نشان ندادند. هم‌چنین یکی از سازوکارهای ارقام مقاوم به خشکی، تولید قند در برگ‌ها و انتقال آن به ریشه است که باعث افزایش رشد ریشه می‌شود (Du et al., 2020) که با یافته‌های پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد. همان‌طور که در شکل (۳-الف) مشاهده شد افزایش میزان قند محلول در برگ و احتمالاً انتقال آن به ریشه می‌تواند از دلایل افزایش رشد ریشه در رقم سیروان به‌عنوان رقم مقاوم به خشکی باشد.

در این پژوهش مشاهده شد که کاربرد فسفر باعث افزایش میزان قند محلول کل و کاهش نشت الکتروولیت در ارقام گندم شد (شکل ۳). پژوهش‌ها نشان دادند که فسفر نقش مؤثری در افزایش ویژگی‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیک از جمله تولید قند محلول در گیاه دارد (Ding et al., 2017; Tariq et al., 2018). میزان قندهای محلول به‌عنوان محافظت‌کننده‌های اسمزی، نقش مهمی در افزایش مقاومت گیاهان در شرایط تنش خشکی داشته و تعیین این شاخص از صفات بیوشیمیایی خوبی در شناسایی مقاومت ارقام است (Du et al., 2020). همان‌طور

کارا به عنوان معیاری معتبر در ارزیابی کارایی فسفر برای این ارقام در مراحل رشد رویشی است که این نتایج بر روی رقم سیروان به خوبی مشاهده شد. افزایش فسفر خاک در سطح ۲۵ میلی گرم بر کیلوگرم، به عنوان مقدار مناسب و متعادل در افزایش رشد و نمو، کارایی فسفر و ویژگی های فیزیوشیمیایی این رقم مؤثر بوده است که با یافته های (Korkmaz and Altıntaş, 2016) بر روی ارقام کارا هماهنگی دارد. بنابراین از نظر اقتصادی در شرایط تنش خشکی رقم سیروان مناسب تر بوده و کارا بودن این رقم به دلیل کارایی استفاده از میزان فسفر خاک است.

میزان و استاندارد مشخصی برای کاربرد فسفر در مقاومت به خشکی هنوز قابل دسترس نیست ولی وجود برخی شاخص ها با توجه به شرایط منطقه، می تواند میزان کارایی فسفر و تأثیر این عنصر را در کاهش آثار خشکی نشان دهد. هم چنین جذب فسفر توسط گیاه در طول فصل رشد به دلیل تثبیت فسفر در خاک و میزان رطوبت خاک کاهش پیدا می کند؛ بنابراین تغذیه مناسب فسفر در طول فصل رشد، این امکان را برای گیاه فراهم می کند که علاوه بر دوره رشد رویشی، مرحله رشد زایشی هم به خوبی انجام شود. از آنجایی که فسفر در مراحل مختلف رشدی گندم تأثیر گذار است، بنابراین بررسی جذب و کارایی این عنصر در مرحله رشد رویشی اهمیت بسزایی دارد.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش بیان می کند که افزایش میزان فسفر و سطوح رطوبت مناسب باعث افزایش وزن خشک شاخساره، سطح و طول ریشه، جذب، کارایی مصرف و استفاده فسفر و ویژگی های فیزیوشیمیایی (قند محلول کل و نشت الکترولیت) در ارقام گندم شد که در رقم سیروان مقدار این شاخص ها افزایش بیش تری داشت. در سطح بدون تنش خشکی، نتایج نشان دهنده نقش مثبت فسفر در اکثر شاخص های مورد بررسی بود. حرکت، جذب و استفاده فسفر به وسیله گیاه در خاک تحت تأثیر رطوبت و ویژگی های خاک است.

همان طور که نتایج در شکل های (۴-ب) و (۵-ب) نشان می دهد کارایی جذب با کمبود فسفر در شرایط بدون تنش افزایش یافت و کارایی مصرف با کاربرد فسفر در شرایط بدون تنش افزایش یافت و در هر دو شاخص با افزایش تنش خشکی روند کاهشی مشاهده شد. در صورتی که این روند کاهشی در کارایی مصرف شدت کمتری داشت. نتایج پژوهش حاضر نشان داد یک ارتباط منفی بین کارایی جذب و مصرف فسفر وجود دارد. کارایی جذب فسفر در شرایط کمبود فسفر خاک و کارایی مصرف فسفر در شرایط عرضه کافی فسفر خاک افزایش می یابد که این نتایج هماهنگ با یافته های (Campos et al., 2018) است. کاهش کم تر کارایی مصرف نسبت به کارایی جذب می تواند در ارتباط با میزان متفاوت توزیع و مصرف فسفر در فعالیت های متابولیکی درون گیاه از جمله سنتز قند برای مقاومت گیاه به تنش های بیش تر باشد. هم چنین میزان نیاز گیاه به فسفر و انرژی که گیاه صرف تولید ماده خشک می کند باعث تغییر در میزان کارایی مصرف می شود. تفاوت در کارایی جذب بین ارقام در این پژوهش را می توان مرتبط به ویژگی های ریشه از جمله سطح و طول ریشه در محیط ریزوسفر دانست. افزایش این شاخص در شرایط کمبود فسفر به دلیل افزایش میزان فسفر گیاه در اثر رقت فسفر و کاهش مقدار فسفر محلول خاک در اثر تثبیت فسفر توسط ذرات خاک و آهکی بودن خاک مورد بررسی است که این نتایج با یافته های (Sandaña, 2016) همخوانی دارد. کارایی استفاده فسفر در گیاه ممکن است ناشی از توانایی در جذب بیش تر فسفر از خاک تحت شرایط کمبود فسفر یا توانایی در تولید بیش تر وزن خشک در ازای واحد فسفر در درون بافت گیاه یا متاثر از هر دو باشد (Korkmaz and Altıntaş, 2016). نتایج مربوط به کارایی استفاده فسفر نیز نشان داد (شکل ۶-الف) که رقم سیروان در شرایط تنش خشکی در مقایسه با رقم سیوند کارایی استفاده بیش تری داشت که ناشی از ویژگی های خوب رشد ریشه (طول تجمعی و سطح ریشه) و افزایش تولید ماده خشک آن در شرایط تنش و بدون تنش خشکی است. تأثیر فسفر بر وزن خشک شاخساره ارقام

پژوهش تعیین کارایی استفاده فسفر در مراحل رشد رویشی می‌تواند نقش مهمی در میزان مقاومت ارقام گندم در برابر تنش خشکی داشته باشد و برای یک توصیه کودی مناسب به‌منظور بهبود عملکرد گندم شاخص خوبی محسوب شود.

تشکر و سپاسگزاری

از معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد برای حمایت مالی از این طرح پژوهشی (کد ۳/۴۸۶۹۶) تشکر و قدردانی می‌شود.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ گونه تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

همان‌طور که مشاهده شد با افزایش سطوح تنش خشکی به دلیل کاهش جذب فسفر در خاک آهکی، همه ویژگی‌ها و شاخص‌ها به‌جز قند محلول روند کاهشی داشتند. نتایج هم‌چنین نشان داد که تفاوت رشد و نمو ارقام گندم در شرایط تنش خشکی به دلیل میزان متفاوت کارایی استفاده فسفر، ویژگی‌های ریشه، ویژگی‌های ژنوتیپی در جذب و مصرف فسفر، ویژگی‌های فیزیوبیوشیمیایی (قند محلول کل و نشت الکترولیت) و تولید ماده خشک است. رقم سیروان در مقایسه با رقم سیوند با رشد بیش‌تر ریشه و افزایش وزن خشک، جذب و کارایی فسفر (جذب، مصرف و استفاده)، مقاومت بیش‌تری در برابر شرایط تنش خشکی داشت و از میزان فسفر جذب شده بهترین استفاده را در رشد و نمو خود داشت؛ بنابراین به‌عنوان رقم فسفر کارا شناخته شد. با توجه به نتایج این

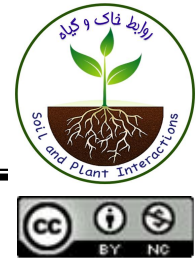
منابع مورد استفاده

1. Abbadi, J., 2017. Evaluation of mechanisms of phosphorus use efficiency in traditional wheat cultivars for sustainable cropping. *J. Food Secur.* 5, 197–211. <https://doi.org/10.12691/jfs-5-6-1>
2. Atarodi, B., Fotovat, A., Khorassani, R., Keshavarz, P., Hammami, H., 2018. Interaction of selenium and cadmium in wheat at different salinities. *Toxicol. Environ. Chem.* 100(3), 348–360. <https://doi.org/10.1080/02772248.2018.1524472>.
3. Bajji, M., Kinet, J.M., Lutts, S., 2002. The use of the electrolyte leakage method for assessing cell membrane stability as a water stress tolerance test in durum wheat. *Plant Growth Regul.* 36(1), 61–70. <https://doi.org/10.1023/A:1014732714549>.
4. Black, C.A., 1965. *Methods of Soil Analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Properties.* ASA/SSSA, Madison, WI, USA, 1122 p.
5. Bilal, H.M., Aziz, T., Maqsood, M.A., Farooq, M., Yan, G., 2018. Categorization of wheat genotypes for phosphorus efficiency. *Plo.S One* 13(10), e0205471. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205471>.
6. Bohnert, H.J., Jensen, R.G., 1996. Strategies for engineering water-stress tolerance in plants. *Trends Biotechnol.* 14(3), 89–97. [https://doi.org/10.1016/0167-7799\(96\)80929-2](https://doi.org/10.1016/0167-7799(96)80929-2).
7. Campos, P., Borie, F., Cornejo, P., López-Ráez, J.A., López-García, Á., Seguel, A., 2018. Phosphorus acquisition efficiency related to root traits: is mycorrhizal symbiosis a key factor to wheat and barley cropping?. *Front. Plant Sci.* 9, 752. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00752>.
8. Chapman, H.D., Pratt, P.F., 1961. *Methods of Analysis for Soils, Plants and Waters.* Division of Agricultural Sciences, University of California, USA.
9. Christopher, J., Christopher, M., Jennings, R., Jones, S., Fletcher, S., Borrell, A., Manschadi, A.M., Jordan, D., Mace, E., Hammer, G., 2013. QTL for root angle and number in a population developed from bread wheats (*Triticum aestivum*) with contrasting adaptation to water-limited environments. *Theor. Appl. Genet.* 126(6), 1563–1574. <https://doi.org/10.1007/s00122-013-2074-0>.
10. da Silva, E. C., Nogueira, R.J.M.C., da Silva, M.A., de Albuquerque, M.B., 2011. Drought stress and plant nutrition. *Plant Stress* 5(1), 32–41.
11. de Souza Campos, P.M., Cornejo, P., Rial, C., Borie, F., Varela, R.M., Seguel, A., López-Ráez, J.A., 2019. Phosphate acquisition efficiency in wheat is related to root: shoot ratio, strigolactone levels, and PHO2 regulation. *J. Exp. Bot.* 70(20), 5631–5642. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz349>.
12. Deng, Y., Teng, W., Tong, Y.P., Chen, X.P., Zou, C.Q., 2018. Phosphorus efficiency mechanisms of two wheat cultivars as affected by a range of phosphorus levels in the field. *Front. Plant Sci.* 9, 1614. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01614>.
13. Ding, Z., Jia, S., Wang, Y., Xiao, J., Zhang, Y., 2017. Phosphate stresses affect ionome and metabolome in tea plants. *Plant Physiol. Biochem.* 120, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.09.007>.

14. Du, Y., Zhao, Q., Chen, L., Yao, X., Zhang, W., Zhang, B., Xie, F., 2020. Effect of drought stress on sugar metabolism in leaves and roots of soybean seedlings. *Plant Physiol. Biochem.* 146, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.11.003>.
15. Duangpan, S., Buapet, P., Sujitto, S., Eksomtrame, T., 2018. Early assessment of drought tolerance in oil palm D×P progenies using growth and physiological characters in seedling stage. *Plant Genet. Resour.* 16(6), 544–554. <https://doi.org/10.1017/S1479262118000151>.
16. Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.T., Smith, F., 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Anal. Chem.* 28(3), 350–356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>.
17. Forster, B., Thomas, W., Chloupek, O., 2005. Genetic controls of barley root systems and their associations with plant performance. *Asp. Appl. Biol.* 73, 199–204.
18. Gebremichael, A.W., Wall, D.P., O'Neill, R.M., Krol, D.J., Brennan, F., Lanigan, G., Richards, K.G., 2022. Effect of contrasting phosphorus levels on nitrous oxide and carbon dioxide emissions from temperate grassland soils. *Sci. Rep.* 12(1), 2602. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06661-2>.
19. Gourley, C.J.P., Allan, D.L., Russelle, M.P., 1993. Defining phosphorus efficiency in plants. *Plant Soil* 155(1), 289–292. <https://doi.org/10.1007/BF00025039>.
20. Hinsinger, P., Brauman, A., Devau, N., Gérard, F., Jourdan, C., Laclau, J.P., Le Cadre, E., Jaillard, B., Plassard, C., 2011. Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? *Plant Soil* 348(1), 29–61. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0903-y>.
21. Jambunathan, N., 2010. Determination and detection of reactive oxygen species (ROS), lipid peroxidation, and electrolyte leakage in plants. In: Sunkar, R. (Ed.), *Plant Stress Tolerance. Methods in Molecular Biology*, Humana Press, USA, pp. 291–297.
22. Jun, W., Ping, L., Zhiyong, L., Zhansheng, W., Yongshen, L., Xinyuan, G., 2017. Dry matter accumulation and phosphorus efficiency response of cotton cultivars to phosphorus and drought. *J. Plant Nutr.* 40(16), 2349–2357. <https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1346123>.
23. Karimzadeh, J., Alikhani, H.A., Etesami, H., Pourbabaie, A.A., 2021. Improved phosphorus uptake by wheat plant (*Triticum aestivum* L.) with rhizosphere fluorescent *Pseudomonads* strains under water-deficit stress. *J. Plant Growth Regul.* 40, 1. 162–178. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10087-3>.
24. Kang, L.Y., Yue, S.C., Li, S.Q., 2014. Effects of phosphorus application in different soil layers on root growth, yield, and water-use efficiency of winter wheat grown under semi-arid conditions. *J. Integr. Agric.* 13(9), 2028–2039. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(14\)60751-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60751-6).
25. Korkmaz, K., Altıntaş, C., 2016. Phosphorus use efficiency in canola genotypes. *Turkish J. Agri. Food Sci. Tech.* 4(6), 424–430. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v4i6.424-430.726>.
26. Manske, G., Ortiz-Monasterio, J., Van Ginkel, M., González, R., Fischer, R., Rajaram, S., Vlek, P., 2001. Importance of uptake efficiency versus P utilization for wheat yield in acid and calcareous soils in Mexico. *Eur. J. Agron.* 14, 261–274. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00099-X](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00099-X).
27. Moll, R.H., Kamprath, E.J., Jackson, W.A., 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agron. J.* 74, 562–564. <https://doi.org/10.2134/agronj1982.00021962007400030037x>.
28. Mollier, A., Pellerin, S., 1999. Maize root system growth and development as influenced by phosphorus deficiency. *J. Exp. Bot.* 50, 487–497. <https://doi.org/10.1093/jxb/50.333.487>.
29. Mori, A., Fukuda, T., Vejchasarn, P., Nestler, J., Pariasca-Tanaka, J., Wissuwa, M., 2016. The role of root size versus root efficiency in phosphorus acquisition in rice. *J. Exp. Bot.* 67(4), 1179–1189. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv557>.
30. Neji, M., Kouas, S., Gandour, M., Aydi, S., Abdelly, C., 2019. Genetic variability of morpho-physiological response to phosphorus deficiency in Tunisian populations of *Brachypodium hybridum*. *Plant Physiol. Biochem.* 143, 246–256. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.09.006>.
31. Olsen, S.R., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate: USDA Circular, US Government Printing Office, Washington DC.
32. Ortiz-Monasterio, J.I., Pena, R.J., Pfeiffer, W.H., Hede, A.H., 2002. Phosphorus use efficiency, grain yield, and quality of triticale and durum wheat under irrigated conditions. In: *Proceedings of the 5th International Triticale Symposium June 30, 1–6, Radzików, Poland.*
33. Osborne, L., Rengel, Z., 2002. Genotypic differences in wheat for uptake and utilisation of P from iron phosphate. *Aust. J. Agric. Res.* 53(7), 837–844. <https://doi.org/10.1071/AR01101>.
34. Ozturk, L., Eker, S., Torun, B., Cakmak, I., 2005. Variation in phosphorus efficiency among 73 bread and durum wheat genotypes grown in a phosphorus-deficient calcareous soil. *Plant Soil* 269(1), 69–80. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-0469-z>.
35. Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R., 1982. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties.* ASA/SSSA, Madison, WI, USA, 1142 p.
36. Poiré, R., Chochois, V., Sirault, X.R.J., Vogel, P., Watt, M., Furbank, R.T., 2014. Digital imaging approaches for

- phenotyping whole plant nitrogen and phosphorus response in *Brachypodium distachyon*. J. Integr. Plant Biol. 56(8), 781–796. <https://doi.org/10.1111/jipb.12198>.
37. Ramaekers, L., Remans, R., Rao, I.M., Blair, M.W., Vanderleyden, J., 2010. Strategies for improving phosphorus acquisition efficiency of crop plants. Field Crops Res. 117, 169–176. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.03.001>.
38. Razaq, M., Zhang, P., Shen, H.L., 2017. Influence of nitrogen and phosphorus on the growth and root morphology of *Acer mono*. PloS One 12(2), e0171321. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171321>.
39. Rose, T.J., Wissuwa, M., 2012. Rethinking internal phosphorus utilization efficiency: a new approach is needed to improve PUE in grain crops. Adv. Agron. 116, 185–217.
40. Ruark, M.D., Kelling, K.A., Ward Good, L., 2014. Environmental concern of phosphorus management in potato production. Amer. J. Potato Res. 91, 132–144. <https://doi.org/10.1007/s12230-014-9372-1>.
41. Salim, N., Raza, A., 2020. Nutrient use efficiency (NUE) for sustainable wheat production: a review. J. Plant Nutr. 43(2), 297–315. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1676907>.
42. Sandaña, P., 2016. Phosphorus uptake and utilization efficiency in response to potato genotype and phosphorus availability. Eur. J. Agron. 76, 95–106. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.02.003>.
43. Seed and Plant Breeding Research Institute. 2015. Introduction of Crop Cultivars (Food Safety and Health, Volume 1). Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran, 235 p. (In Persian)
44. Serraj, R.A.C. H.I.D., Sinclair, T.R. 2002., Osmolyte accumulation: can it really help increase crop yield under drought conditions? Plant, Cell Environ. 25(2), 333–341. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00754.x>.
45. Shabani, E., Bolandnazar, S., Tabatabaei, S.J., Najafi, N., Alizadeh-Salteh, S., Roupael, Y., 2018. Stimulation in the movement and uptake of phosphorus in response to magnetic P solution and arbuscular mycorrhizal fungi in *Ocimum basilicum*. J. Plant Nutr. 41(13), 1662–1673. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1458872>.
46. Sharma, K., Neelaveni, K., Katyal, J., Srinivasa Raju, A., Srinivas, K., Kusuma Grace, J., Madhavi, M., 2008. Effect of combined use of organic and inorganic sources of nutrients on sunflower yield, soil fertility, and overall soil quality in rainfed Alfisol. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 39(11-12), 1791–1831. <https://doi.org/10.1080/00103620802073784>.
47. Sharma, S., Chen, C., Khatri, K., Rathore, M.S., Pandey, S.P., 2019. *Gracilaria dura* extract confers drought tolerance in wheat by modulating abscisic acid homeostasis. Plant Physiol. Biochem. 136, 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.01.015>.
48. Sidhu, S.K., Kaur, J., Singh, S., Grewal, S.K., Singh, M., 2018. Variation of morpho-physiological traits in geographically diverse pigeonpea [*Cajanus cajan* (L.) Millsp] germplasm under different phosphorus conditions. J. Plant Nutr. 41(10), 1321–1332. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1450423>.
49. Singh, S.K., Badgular, G., Reddy, V.R., Fleisher, D. H., Bunce, J.A., 2013. Carbon dioxide diffusion across stomata and mesophyll and photo-biochemical processes as affected by growth CO₂ and phosphorus nutrition in cotton. J. Plant Physiol. 170(9), 801–813. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.01.001>.
50. Tariq, A., Pan, K., Olatunji, O.A., Graciano, C., Li, Z., Sun, F., Sun, X., Song, D., Chen, W., Zhang, A., Wu, X., 2017. Phosphorus application improves drought tolerance of *Phoebe zhennan*. Front. Plant Sci. 8, 1561. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01561>.
51. Tariq, A., Pan, K., Olatunji, O.A., Graciano, C., Li, Z., Sun, F., Zhang, L., Wu, X., Chen, W., Song, D., Huang, D., 2018. Phosphorus fertilization alleviates drought effects on *Alnus cremastogyne* by regulating its antioxidant and osmotic potential. Sci. Rep. 8(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24038-2>.
52. Wang, X., Shen, J., Liao, H., 2010. Acquisition or utilization, which is more critical for enhancing phosphorus efficiency in modern crops? Plant Sci. 179, 302–306. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.06.007>.
53. Xu, W., Cui, K., Xu, A., Nie, L., Huang, J., Peng, S., 2015. Drought stress condition increases root to shoot ratio via alteration of carbohydrate partitioning and enzymatic activity in rice seedlings. Acta Physiol. Plant. 37(2), 9. <https://doi.org/10.1007/s11738-014-1760-0>.
54. Ye, H., Roorkiwal, M., Valliyodan, B., Zhou, L., Chen, P., Varshney, R.K., Nguyen, H.T., 2018. Genetic diversity of root system architecture in response to drought stress in grain legumes. J. Exp. Bot. 69(13), 3267–3277. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery082>.
55. Zahoor, R., Zhao, W., Abid, M., Dong, H., Zhou, Z., 2017. Potassium application regulates nitrogen metabolism and osmotic adjustment in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) functional leaf under drought stress. J. Plant Physiol. 215, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.05.001>.
56. Zandi Gouharrizi, Z., Khorassani, R., Halajnia, A. 2021. Investigating the effect of silicon on phosphorus absorption and wheat plant growth under moisture stress in a calcareous soil. Environ. Stress. Agri. Sci. 14, 3. 665–673. <https://doi.org/10.22077/escs.2020.2805.1728>. (In Persian with English abstract)
57. Zhang, B., Zhang, H., Wang, H., Wang, P., Wu, Y., Wang, M., 2018. Effect of phosphorus additions and arbuscular mycorrhizal fungal inoculation on the growth, physiology, and phosphorus uptake of wheat under two water regimes. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 49(7), 862–874. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1435798>.

58. Zhu, X. k., Li, C.Y., Jiang, Z.Q., Huang, L.L., Feng, C.N., Guo, W.S., Peng., Y.X., 2012. Responses of phosphorus use efficiency, grain yield, and quality to phosphorus application amount of weak-gluten wheat. *J. Integr. Agri.* 11(7), 1103–1110. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(12\)60103-8](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(12)60103-8).



Optimum Plant Density of Greenhouse Tomato Grown in a Soilless System in Golestan Province

Sh. Vakili Bastam^{1*} 

(Received: 22 May 2023; Accepted: 17 July 2023)

Abstract

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is an important commercial food plant. Several factors affect the growth of tomatoes in the greenhouse, and one of them is proper planting density. Investigating and suggesting the best density in hydroponic cultivation can have a significant effect on production efficiency. Therefore, a factorial experiment was conducted in the hydroponic cultivation system based on completely randomized design with three replications and two treatment of cultivar (Dafnis, Izmono and Hيراد) and density (at four density levels of 2, 2.5, 3 and 3.5 plants per m²) in the greenhouse of Gorgan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center. Characteristics of number of clusters per plant, number of flowers per cluster, percent of blossom drop, number of fruits per cluster, fruit yield per plant and per m², number of fruits per plant, number of fruits per m², average fruit weight, fruit diameter, fruit length, pericarp thickness, uniform fruit ripening, distance between clusters, marketable yield, total soluble solids and pH of fruit juice were measured. According to the mean comparisons, the average yield per m² at high plant density (3.5 plants per m²) in all three cultivars was significantly higher than others. With the increase of density from 3 to 3.5, from 2.5 to 3.5 and from 2 to 3.5 plants per m², respectively, relative increases in yield per m² of 2.4%, 28.6% and 43.1% in Hيراد, 6.8%, 21.75%, 23.4% in Dafnis and 22.7%, 35% and 51% in Izmono were observed. With the increase of plant density, the percentage of blossom drop of plants decreased significantly. The highest total soluble solids content of one cultivar (Hيراد) was observed in the highest density and two other cultivars were not affected. The pH of fruit juice of Dafnis and Izmono at a density of 3.5 plants per m² was significantly lower than other treatments, but there was no difference for this trait in Hيراد cultivar between different densities. The results of this study suggest to increase the density of tomato in hydroponic greenhouse in Golestan province up to 3.5 plants per m².

Keywords: Hybrid cultivar, Fruit set, Hydroponic, Tomato, Yield characteristics.

Background and Objective: Contrary to popular belief, greenhouses are not completely isolated from the outside environment. The condition inside the greenhouse tend to change constantly under the influence of external weather changes (Omid et al., 2004). One of the management techniques in increasing the quantity and quality of fruit is the use of proper plant density (Kumar Singh et al., 2021). Due to the high cost of crop production in greenhouses and in order to achieve the maximum production potential of the plant, it is

1- Crop and Horticultural Science Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Gorgan, Iran.

* Corresponding author, Email: sh.vakili@areeo.ac.ir

necessary to carry out more precise agricultural operations such as optimizing the density of plants. Investigating and introducing the best plant density in hydroponic cultivation can have a significant effect on increasing yield and production efficiency in Golestan province greenhouses.

Methods: A factorial experiment was carried out in the hydroponic cultivation system based on completely randomized design with three replications in the greenhouse of Gorgan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center. Three greenhouse tomato hybrid cultivars including Dafnis, Izmono and Hiran were cultivated at four density levels of 2, 2.5, 3 and 3.5 plants per m². The following traits were evaluated in this study: fruit yield per plant and per m², number of fruits per plant and per m², number of clusters per plant, number of flowers per cluster, percent of blossom drop, number of fruits per cluster, average fruit weight, fruit diameter, fruit length, pericarp thickness, uniform fruit ripening, distance between clusters, marketable yield, total soluble solids and pH of fruit juice.

Results: The results of analysis of variance showed that fruit yield per plant, fruit yield per m², number of fruits per plant, number of fruits per m², average fruit weight, fruit length, number of fruits per cluster, average distance between clusters, percent of blossom drop, uniform fruit ripening, pericarp thickness and pH of fruit juice were affected by the density factor. The results of mean comparisons showed that with the increase of density from 3 to 3.5, from 2.5 to 3.5 and from 2 to 3.5 plants per m², respectively, relative increases in yield per m² of 2.4%, 28.6% and 43.1% in Hiran, 6.8%, 21.75%, 23.4% in Dafnis and 22.7%, 35% and 51% in Izmono were observed. Correlation analysis of studied traits indicated that the fruit yield per m² had strong and significant correlation with the number of fruits per plant ($r = 0.82^{**}$), but it had a negative and significant correlation with the average fruit weight ($r = -0.46^{**}$).

Conclusions: According to the results of quantitative and qualitative traits of tomato, the density of 2 to 2.5 plants per m², which is considered in most hydroponic greenhouses in Golestan province, can be increased to 3.5 plants per m² density.

References:

1. Kumar Singh, S., Shahi, B.P., Singh, B.R., Kumar Singh, M., Singh, S.H and Kumar, M., 2021. The effects of plant density on the productivity of tomato hybrids in a newly developed low cost naturally ventilated greenhouse. *Int. J. Plant Soil Sci.* 33(3), 61–72.
2. Omid, M., Shafaii, A., 2004. Investigating greenhouse indoor temperature and humidity changes using a computer data collecting system. *Res. Agron. Hortic.* 64, 67–73. (In Persian with English abstract)



تراکم بوته مطلوب گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای در سیستم کشت بدون خاک در استان گلستان

شهربانو وکیلی بسطام^{۱*}

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۲۶)

چکیده

گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) یک گیاه مهم تجاری و غذایی است. عوامل متعددی بر رشد و نمو گوجه‌فرنگی در گلخانه تأثیرگذارند، که یکی از آنها تراکم کاشت مناسب است. بررسی و معرفی بهترین تراکم بوته در سیستم آب‌کشت، می‌تواند اثر چشم‌گیر بر افزایش عملکرد و بهره‌وری تولید داشته باشد. بدین منظور آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار با دو تیمار رقم (سه رقم دافنیس، ایزمونو و هیراد) و تراکم (در چهار سطح ۲، ۳، ۴/۵ و ۳/۵ بوته در مترمربع) در گلخانه مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در سیستم آب‌کشت انجام شد. در این آزمایش، تعداد خوشه در بوته، تعداد گل در خوشه، درصد ریزش گل، تعداد میوه در خوشه، عملکرد کل بوته، عملکرد در مترمربع، تعداد میوه در بوته، تعداد میوه در مترمربع، میانگین وزن تک میوه، قطر میوه، طول میوه، ضخامت فرابر، همزمان‌رسی میوه‌ها، فاصله بین خوشه‌ها، عملکرد بازارپسند، مواد جامد محلول و pH آب میوه اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج مقایسه میانگین، عملکرد در مترمربع در تراکم زیاد بوته (۳/۵ بوته در مترمربع) در هر سه رقم به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از سایر تیمارها بود. به‌طوری‌که با افزایش تراکم از ۳ به ۳/۵، از ۲/۵ به ۳/۵ و از ۲ به ۳/۵ به ترتیب در رقم هیراد ۲/۴، ۲۸/۶ و ۴۳/۱ درصد، در رقم دافنیس ۶/۸، ۲۱/۷، ۲۳/۴ درصد و در رقم ایزمونو ۲۲/۷، ۳۵ و ۵۱ درصد افزایش عملکرد در مترمربع مشاهده شد. نتایج نشان داد با افزایش تراکم بوته در مترمربع درصد ریزش گل در بوته‌ها به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. بیش‌ترین مقدار مواد جامد محلول در یک رقم (هیراد) در تراکم بیش‌تر مشاهده شد و در دو رقم دیگر تحت تأثیر تراکم قرار نگرفت. pH آب میوه در دو رقم دافنیس و ایزمونو در تراکم ۳/۵ بوته در مترمربع به‌طور معنی‌داری کم‌تر از سایر تیمارها بود، ولی در رقم هیراد تفاوتی در این صفت بین تراکم‌های مختلف مشاهده نشد. بر اساس نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود تراکم کشت گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای در سیستم آب‌کشت در استان گلستان می‌تواند تا ۳/۵ بوته در مترمربع افزایش یابد.

واژه‌های کلیدی: گوجه‌فرنگی، سیستم آب‌کشت، رقم هیبرید، فروت‌ست، ویژگی‌های عملکردی.

۱- بخش زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: sh.vakili@areeo.ac.ir

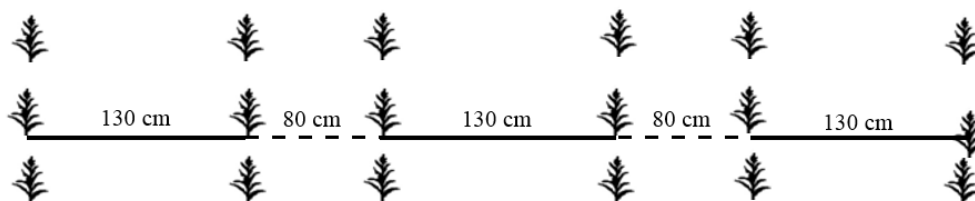
مقدمه

گوجه فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) یک گیاه مهم تجاری و غذایی است و به دلیل ارزش صادراتی آن، جایگاه ویژه‌ای در بین سبزی‌ها دارد (Singh et al., 2014). عوامل متعددی بر رشد و نمو گیاهان گلخانه‌ای تأثیر گذارند. عواملی مانند نور، دما، رطوبت، دی‌اکسید کربن، فراهمی عناصر غذایی و آب و pH خاک و آب از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌باشند. با وجود این‌که گلخانه یک محیط بسته است، ولی کاملاً از محیط بیرون جدا نیست؛ بنابراین شرایط درون گلخانه تحت تأثیر تغییرات آب و هوایی بیرون دائماً در حال تغییر است (Omid and Shafaii, 2004). در تشکیل ماده خشک، دو عامل فتوسنتز و تعرق نقش اساسی دارند و از سوی دیگر عوامل محیطی نور و دما، بر هر دوی این فرآیندها تأثیر گذارند (Choi et al., 2012). غلظت توصیه شده عناصر غذایی در تولید گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای بر اساس نور محیط و دمای گلخانه در مناطق مختلف تولید متفاوت است (Gent, 2004). بنابراین اجرای یک الگوی کاملاً یکسان مدیریت تولید در محصولات گلخانه‌ای در مناطق آب‌وهوایی مختلف مناسب نیست.

یکی از فنون مدیریتی در افزایش کمی و کیفی میوه استفاده از تراکم مناسب است (Kumar Singh et al., 2021). به‌علت هزینه زیاد کشت‌های گلخانه‌ای و برای حصول پتانسیل تولیدی گیاه، نیاز است تا عملیات کشاورزی دقیق‌تری مانند بهینه‌سازی تراکم بوته‌ها در واحد سطح صورت گیرد. یکی از اهداف کشاورزی در گلخانه استفاده بهتر از فضای این گلخانه‌ها به‌ویژه هنگام استفاده از سیستم‌های کشت بدون خاک با افزایش چند برابری تراکم گیاه است (Raviv and Lieth, 2008). در مطالعات گذشته در مورد تراکم بوته در کشت گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای نتایج متفاوتی گزارش شده است (Charlo et al., 2007; Amundson et al., 2012; Ayarna et al., 2021; Kumar Singh et al., 2021). Kaur et al, 2021 گزارش کردند که در کشت بدون خاک، با استفاده از تراکم بیش‌تر بوته عملکرد بیش‌تری حاصل می‌شود. در پژوهشی در هند در کشت خاکی

افزایش فاصله بین بوته‌ها و کاهش تراکم (سه سطح تراکم ۴/۹، ۳/۴ و ۲/۷ بوته در مترمربع) در کشت گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای، باعث افزایش تعداد میوه‌ها، میانگین وزن میوه، عملکرد میوه در بوته، عملکرد در واحد سطح و عملکرد میوه بازارپسند در هر بوته گردید (Kumar Singh et al., 2021). در پرورش گوجه‌فرنگی گیلاسی در کشت خاکی (Charlo et al., 2007) گزارش کردند که افزایش فاصله بوته روی ردیف از ۳۰ سانتی‌متر به ۵۰ سانتی‌متر، موجب افزایش عملکرد در بوته شد، ولی عملکرد در مترمربع را کاهش داد. در صورتی‌که افزایش تراکم بوته موجب افزایش عملکرد در واحد سطح و کاهش اندازه میوه و تولید میوه غیربازارپسند گردید. (Amundson et al., 2012) اثر فاصله روی ردیف (۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ سانتی‌متر) در سیستم کشت بدون خاک در گلخانه را بر عملکرد کل و وزن میوه بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که فاصله بوته ۷۰ سانتی‌متر موجب افزایش تعداد میوه در بوته نسبت به فاصله ۳۰ سانتی‌متر گردید و با افزایش فاصله بوته‌ها میزان عملکرد در واحد سطح کاهش یافت. (Ayarna et al., 2021) با انجام پژوهشی در دانشگاه چیا در ژاپن (در منطقه‌ای با آب‌وهوای گرم) با بررسی دو تراکم ۴/۷ و ۲/۱ بوته در مترمربع در سیستم کشت بدون خاک گزارش کردند که با کشت ارقام متحمل به گرما در تراکم زیاد، عملکرد گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای به‌میزان ۴/۸ برابر افزایش می‌یابد.

تراکم بوته گوجه‌فرنگی در کشت ارقام با رشد نامحدود و کشت درازمدت در اغلب گلخانه‌های استان گلستان (در هر دو کشت خاکی و بدون خاک)، ۲/۵ بوته در مترمربع (۲۵۰۰۰ بوته در هکتار) در کشت‌های تک ردیفه و دو ردیفه در نظر گرفته می‌شود. بررسی اثر افزایش و کاهش تراکم بوته نسبت به تراکم موجود در گلخانه‌ها، در عملکرد کمی و کیفی میوه‌ها و پیشنهاد بهترین تراکم می‌تواند اثر چشم‌گیر در افزایش عملکرد و بهره‌وری تولید در گلخانه‌های کشت بدون خاک استان داشته باشد.



شکل ۱. آرایش بوته‌ها در کشت دو ردیفه گوجه‌فرنگی در گلخانه (افزایش و کاهش تراکم بوته با تغییر فاصله بوته روی ردیف انجام شد).

Fig. 1. Bi-row planting system of tomato in greenhouse (The increase and decrease of the plant density was done by changing the distance between the plants on the row).

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گرگان با مساحت حدود ۱۶۰ مترمربع در سیستم آب‌کشت انجام شد. تعداد سه رقم هیبرید گلخانه‌ای گوجه‌فرنگی دافنیس، ایزمونو و هیراد با چهار سطح تراکم ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۵ بوته در مترمربع کشت شدند. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار (فاکتور اول رقم در دو سطح و فاکتور دوم تراکم بوته در چهار سطح) با تعداد ۱۰ بوته در هر واحد آزمایشی اجرا شد. آرایش بوته‌ها طوری در نظر گرفته شد که فاصله بین ردیف برای تمامی بوته‌ها از یک طرف ۸۰ سانتی‌متر و از طرف دیگر ۱۳۰ سانتی‌متر بود (شکل ۱) و تنها فاصله روی ردیف تراکم را تغییر داد. برای شروع کشت، بذرها در شهریورماه در سینی نشاء (ترکیبی حجمی مساوی از کوکوپیت و پرلیت) کشت شدند. پس از حدود ۳۰ روز که نشاها ۴ تا ۶ برگ حقیقی تولید کردند (مهرماه) به بستر اصلی گلخانه انتقال داده شدند. کشت به صورت دو ردیفه در کیسه‌های رشد با عرض ۴۰ سانتی‌متر (با ترکیب حجمی ۷۰٪ کوکوپیت و ۳۰٪ پرلیت) انجام شد. فاصله بوته‌ها روی ردیف ۴۷، ۳۸، ۳۲ و ۲۷ سانتی‌متر از یکدیگر (به ترتیب تراکم ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۵ بوته در مترمربع) در نظر گرفته شد. برای تغذیه در طول دوره رشد گیاه و تولید محصول از فرمول‌های رایج سیستم آب‌کشت براساس فصل سال و مراحل رشدی گیاه استفاده شد (Hochmuth and Hochmuth, 2021) که در جدول (۱) ارائه شده است. هرس و تربیت بوته‌ها (به صورت تربیت تک شاخه‌ای)، نخ‌کشی و پایین‌کشی بوته‌ها و

گرده‌افشانی مکانیکی با ضربه‌زدن به سیم‌های مهار قیم به صورت دوره‌ای انجام شد و بوته‌ها تا اواسط فروردین در گلخانه نگهداری شدند.

صفات تعداد خوشه، تعداد گل در خوشه، ریزش گل، تعداد میوه در خوشه، عملکرد کل بوته، عملکرد در مترمربع، عملکرد بازارپسند در مترمربع (عملکرد بازارپسند از حذف میوه‌های کم‌تر از ۵۰ گرم و بدشکل حاصل گردید)، تعداد میوه در بوته، تعداد میوه در مترمربع، میانگین وزن تک میوه، قطر میوه، طول میوه، ضخامت برابر، همزمان‌رسی میوه‌ها (متوسط نسبت میوه‌های رسیده در خوشه‌ها)، فاصله بین خوشه‌ها، مواد جامد محلول و pH آب میوه مورد اندازه‌گیری و بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل داده‌ها با نرم‌افزار آماری R 3.5.1 انجام شد. مقایسه میانگین صفات با آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح آماری ۵٪ انجام شد. نمودارها با نرم‌افزار MS Excel ترسیم شد.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثر عامل تراکم بر صفات تعداد میوه در خوشه، میانگین فاصله خوشه‌ها، ریزش گل، هم‌زمان‌رسی میوه‌ها، عملکرد میوه در بوته، عملکرد در مترمربع، تعداد میوه در بوته، تعداد میوه در مترمربع، میانگین وزن میوه، طول میوه، ضخامت برابر، pH آب میوه معنی‌دار شد (جدول ۲، ۳ و ۴). اثر عامل رقم بر صفات تعداد میوه در خوشه، تعداد خوشه در بوته، تعداد گل در خوشه، فاصله اولین خوشه گل، میانگین فاصله خوشه‌ها، عملکرد میوه در بوته، عملکرد میوه در مترمربع، تعداد میوه در بوته، تعداد میوه در مترمربع، میانگین

جدول ۱. غلظت عناصر غذایی در سیستم آب‌کشت گوجه‌فرنگی در مراحل مختلف رشدی گیاه.

Table 1. Nutrients concentration for tomato hydroponic culture in different growth stages.

مرحله رشدی Stage of growth							عناصر
انتقال نشا تا خوشه ۱	اولین خوشه تا خوشه ۲	دومین خوشه تا خوشه ۳	سومین خوشه تا خوشه ۵	پنجمین خوشه تا خوشه آخر			
Transplant to 1 st cluster	1 st cluster to 2 nd cluster	2 nd cluster to 3 rd cluster	3 rd cluster to 5 th cluster	5 th cluster to termination	Nutrients		
70	95	120	150	140	N		
50	50	50	50	45	P		
120	150	200	250	200	K		
150	180	180	200	180	Ca		
50	50	40	50	50	S		
40	45	50	60	50	Mg		
0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	B		
0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	Zn		
2	2	2	2	2	Fe		
0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	Cu		
0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	Mn		
0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	Mo		

جدول ۲. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات مربوط به خوشه گل تحت تأثیر تیمار رقم و تراکم بوته.

Table 2. Analysis of variance (mean squares) of cultivar and plant density effects on cluster characteristics.

درجه آزادی	تعداد میوه در خوشه	تعداد خوشه در بوته	تعداد گل در خوشه	فاصله اولین خوشه	میانگین فاصله خوشه‌ها	ریزش گل	منابع تغییر
df	Number of fruits per cluster	Number of clusters per plant	Number of flowers per cluster	The distance of first cluster	Average distance between clusters	Blossom drop%	S.O.V
2	1.57**	7.96*	3.34**	62.93*	25.02**	0.52 ^{ns}	رقم Cultivar
3	2.14**	0.63 ^{ns}	0.19 ^{ns}	10.87 ^{ns}	25.71**	2.20**	تراکم Density
6	0.78**	1.28 ^{ns}	0.12 ^{ns}	50.10**	8.26*	0.79**	برهم‌کنش رقم × Cultivar × Density
24	0.19	1.47	0.38	13.40	2.68	0.21	خطا Error
	10.95	13.04	11.14	6.56	6.18	14.46	ضریب تغییرات CV

برش‌دهی اثر تراکم بوته در سه رقم هیبرید گوجه‌فرنگی

Slicing of plant density effect in 3 hybrid tomato cultivars

3	0.940*	1.67*	0.083 ^{ns}	61.66*	0.766 ^{ns}	1.057*	هیراد (HIRAD)
3	3.139**	0.368 ^{ns}	0.344 ^{ns}	50.88*	36.95*	1.003*	دافنیس (DAFNIS)
3	0.275 ^{ns}	0.050 ^{ns}	0.009 ^{ns}	18.52 ^{ns}	1.636 ^{ns}	1.724*	ایزمونو (IZMONO)

* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد، ns: غیرمعنی‌دار

* and **: significant at the 5 and 1% probability levels, respectively, ns: non-significant

جدول ۳. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات عملکردی تحت تأثیر تیمارهای رقم و تراکم بوته.

Table 3. Analysis of variance (mean squares) of cultivar and plant density effects on yield characteristics.

طول میوه Fruit length	قطر میوه Fruit diameter	میانگین وزن میوه Average fruit weight	تعداد میوه در مترمربع Number of fruits per m ²	تعداد میوه در بوته Number of fruits per plant	عملکرد اقتصادی در مترمربع Marketable yield per m ²	عملکرد در مترمربع Yield per m ²	عملکرد در بوته Yield per plant	درجه آزادی df	منابع تغییر S.O.V
95.84**	30.75 ^{ns}	2511.6**	**9316	1172.6**	2265854 ^{ns}	9554960**	1105200**	2	رقم Cultivar
17.93**	7.88 ^{ns}	676.7*	5976**	49.2**	2901913 ^{ns}	19503175**	1183319**	3	تراکم Density
9.39**	3.26 ^{ns}	306.5**	500**	19.1**	1248895 ^{ns}	1377119 ^{ns}	107563 ^{ns}	6	برهم‌کنش رقم × تراکم Cultivar × Density
1.85	9.06	104.3	36	3.7	1519352	926284	156791	24	خطا Error
2.54	4.84	6.81	4.55	3.98	21.55	9.79	10.90		ضریب تغییرات CV

برش‌دهی اثر تراکم بوته در سه رقم هیبرید گوجه‌فرنگی

Slicing of plant density effect in 3 hybrid tomato cultivars

34.52**	7.62 ^{ns}	473.6*	68.31**	3.17 ^{ns}	3901.7 ^{ns}	11043 ^{ns}	144509 ^{ns}	3	هیراد (HIRAD)
11.80*	4.59 ^{ns}	497.3*	35.29*	59.74**	4332.2 ^{ns}	13274 ^{ns}	343025*	3	دافنیس (DAFNIS)
0.377	2.19 ^{ns}	883.9**	77.32**	15.38 ^{ns}	4010.6 ^{ns}	15491 ^{ns}	158727 ^{ns}	3	ایزمونو (IZMONO)

* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد، ns: غیرمعنی‌دار

* and **: significant at the 5 and 1% probability levels, respectively, ns: non-significant

جدول ۴. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) ویژگی‌های فیزیوشیمیایی میوه تحت تأثیر تیمارهای رقم و تراکم بوته.

Table 4. Analysis of variance (mean squares) of cultivar and plant density effects on fruit physicochemical traits.

pH	مواد جامد محلول Total soluble solids	ضخامت فرابار Pericarp thickness	هم‌زمان‌رسی Simultaneous fruit ripening	درجه آزادی df	منابع تغییر S.O.V
0.07**	0.18 ^{ns}	0.22 ^{ns}	26.99 ^{ns}	2	رقم Cultivar
0.04*	0.14 ^{ns}	0.67*	199.95**	3	تراکم Density
0.02 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.26 ^{ns}	99.88 ^{ns}	6	برهم‌کنش رقم × تراکم Cultivar × Density
0.01	0.07	0.16	41.73	24	خطا Error
2.68	5.54	5.58	11.48		ضریب تغییرات CV

برش‌دهی اثر تراکم بوته در سه رقم هیبرید گوجه‌فرنگی

Slicing of plant density effect in 3 hybrid tomato cultivars

0.003 ^{ns}	0.088 ^{ns}	0.229*	124.81*	3	هیراد (HIRAD)
0.061*	0.176 ^{ns}	0.661*	133.25 ^{ns}	3	دافنیس (DAFNIS)
0.013 ^{ns}	0.093 ^{ns}	0.308 ^{ns}	141.64*	3	ایزمونو (IZMONO)

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد، ns: غیرمعنی‌دار

* and **: significant at the 5 and 1% probability levels, respectively, ns: non-significant

بوته تعداد گل در خوشه کاهش یافت به طوری که بیشترین تعداد گل در خوشه متعلق به تراکم ۲ بوته در مترمربع و کمترین متعلق به تراکم ۳/۵ بوته بود (شکل ۲-ث). (Shanmukhi et al. (2017) گزارش کردند در تراکم بیش‌تر، طول دوره رویشی افزایش یافته و میزان گلدهی کاهش می‌یابد.

فاصله اولین خوشه

اثر تراکم بوته در سه رقم گوجه‌فرنگی مورد استفاده در آزمایش برای صفت فاصله اولین خوشه متفاوت بود. بیشترین مقدار این صفت در رقم هیراد با تراکم ۲ بوته در مترمربع، در رقم دافنیس با تراکم ۳ بوته در مترمربع و در رقم ایزمونو با تراکم ۲/۵ بوته در مترمربع مشاهده شد (شکل ۲-ج). (Cardoso et al. (2018) گزارش کردند تراکم بوته در فاصله اولین خوشه در گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای در شرایط کشت بدون خاک، تفاوتی ایجاد نکرد.

میانگین فاصله خوشه

بر اساس نتایج مقایسه میانگین در رقم هیراد و دافنیس تیمارهای با تراکم بیش‌تر میانگین فاصله خوشه بیش‌تری داشتند و در رقم ایزمونو تیمارهای تراکم مختلف بوته اثر معنی‌داری بر این صفت نداشت (شکل ۲-د). (Cardoso et al. (2018) گزارش کردند در کشت گوجه‌فرنگی با رشد نامحدود در شرایط بدون خاک، در تیمارهای تراکم ۵/۵، ۶/۶، ۸/۳ و ۱۱/۱ بوته در مترمربع، با افزایش تراکم، ساقه بوته‌ها برای دریافت نور بیش‌تر تمایل به رشد بیش از حد نشان ندادند و تراکم روی ارتفاع بوته تأثیرگذار نبود. اما در پژوهش دیگری در کشت سیستم آب‌کشت گوجه‌فرنگی با افزایش تراکم بوته از ۲/۷ به ۴/۱ بوته در مترمربع، ارتفاع بوته و فاصله خوشه‌ها افزایش یافت (Ayarna et al., 2021). همان‌طور که معنی‌داری اثر برهم‌کنش تیمار رقم و تراکم بوته بر این صفت در جدول (۲) نشان می‌دهد، تغییر رشد رویشی ساقه با افزایش تراکم، به ژنتیک رقم مورد بررسی نیز بستگی دارد.

وزن میوه، طول میوه و pH آب میوه معنی‌دار شد. از آنجایی که اثر برهم‌کنش تراکم بوته و رقم بر تعداد زیادی از صفات از لحاظ آماری معنی‌دار شد، برای بررسی بهتر اثر تراکم بوته در سه رقم مورد استفاده در آزمایش، تجزیه واریانس برش‌دهی اثر تراکم در ارقام مختلف نیز انجام شده و مقایسه میانگین بر اساس نتایج برش‌دهی انجام شد (جدول ۲، ۳ و ۴ و شکل‌های ۲، ۳ و ۴).

تعداد میوه در خوشه

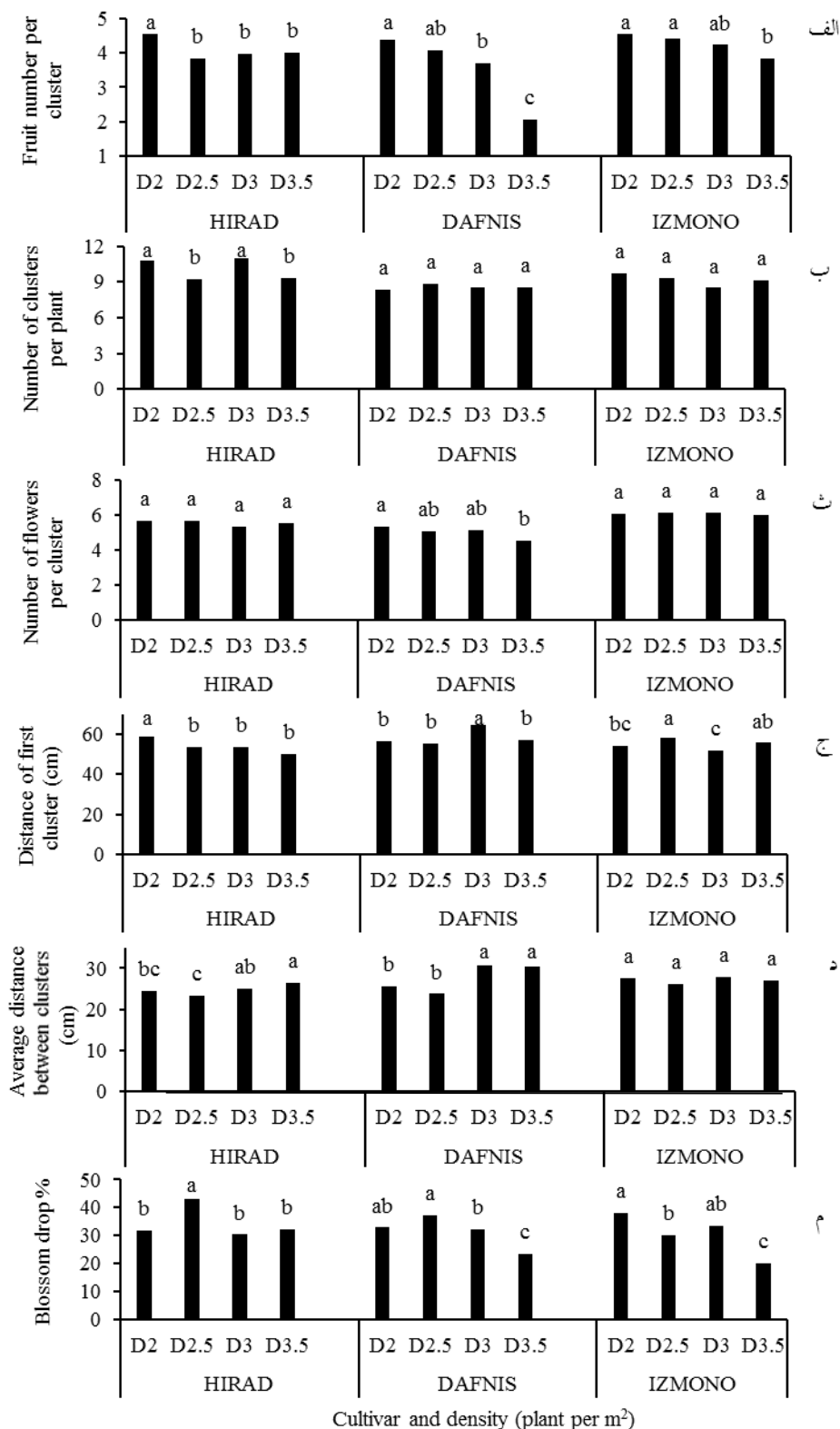
میانگین تعداد میوه در خوشه در تراکم‌های کم‌تر بوته، بیش‌تر بود. در رقم هیراد و دافنیس تراکم ۲ بوته در مترمربع و در رقم ایزمونو تراکم ۲ و ۲/۵ بوته بیش‌ترین تعداد میوه در خوشه را تولید نمودند (شکل ۲-الف). افزایش تعداد میوه در بوته در گوجه‌فرنگی با کاهش فاصله بوته‌ها و افزایش تراکم در پژوهش‌های پیشین نیز گزارش شده است (Buke and Sintayehu, 2020).

تعداد خوشه در بوته

نتایج مقایسه میانگین در دو رقم دافنیس و ایزمونو تفاوت معنی‌داری در تیمارهای مختلف تراکم بوته نشان نداد، اما در رقم هیراد تیمارهای تراکم ۲ و ۳ بوته با اختلاف معنی‌دار با تیمارهای ۲/۵ و ۳/۵ بوته در مترمربع بیش‌ترین تعداد خوشه در بوته را در طی فصل رشد در گلخانه تولید نمودند (شکل ۲-ب). در بررسی اثر تراکم بوته در کشت گوجه‌فرنگی محدود، رشد صفت تعداد خوشه در بوته در ارقام مختلف متفاوت بود به طوری که در یک رقم با افزایش تراکم، تعداد خوشه‌ها کاهش یافته و در رقم دیگر بالعکس بود (Shanmukhi et al., 2017).

تعداد گل در خوشه

نتایج آزمون چند دامنه‌ای دانکن تفاوت معنی‌داری در تیمارهای مختلف تراکم بوته برای صفت تعداد گل در خوشه در دو رقم هیراد و ایزمونو نشان نداد، اما در رقم دافنیس با افزایش تراکم



شکل ۲. مقایسه میانگین حاصل از برداشتهی اثر تراکم بوته در سه رقم هیبرید برای صفات مربوط به خوشه گل با آزمون چند دامنه‌ای دانکن (حروف مشابه نشان‌دهنده نبود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ است).

Fig. 2. Mean comparison of slicing of plant density effect on three hybrid cultivars for traits related to cluster; Bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

درصد ریزش گل

شکل (۲-م) نشان می‌دهد برخلاف انتظار در ارقام ایزمونو و دافنیس کم‌ترین مقدار ریزش گل در تراکم ۳/۵ بوته در مترمربع مشاهده شد و در رقم هیراد به غیر از تراکم ۲/۵ بوته، بقیه با هم تفاوت نداشتند. در پژوهشی افزایش تراکم بوته گوجه‌فرنگی در کشت خاکی گلخانه‌ای از ۲/۵ بوته به ۳/۱ و از ۳/۱ به ۵ بوته در مترمربع منجر به ریزش گل در هر مرحله افزایش تراکم بوته گردید (Chau and Chinh, 2021). در پژوهش دیگری در کشت گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای با افزایش تراکم از ۲/۶ به ۲/۸ و ۳/۲ بوته در مترمربع تغییری در میزان تلقیح گل و فروت‌ست ایجاد نشد ولی با افزایش تراکم به ۳/۶ بوته در مترمربع ریزش گل به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (Buke and Sintayehu, 2020). در سیستم آب‌کشت گوجه‌فرنگی در تراکم کم ۲/۷ و تراکم زیاد ۴/۱ بوته در مترمربع، تفاوتی در مقدار ریزش گل و فروت‌ست گزارش نشد (Ayarna et al., 2021). در تفسیر این نتایج می‌توان گفت که در کشت خاکی رقابت بین بوته‌ها برای جذب مواد غذایی از خاک یکی از عوامل مهم برای افزایش ریزش گل در تراکم زیاد است. در کشت‌های بدون خاک عناصر غذایی به‌صورت یون در دسترس گیاهان قرار می‌گیرند. بنابراین رقابت بین بوته‌ها برای جذب مواد غذایی نسبت به کشت‌های خاکی به حداقل و یا حتی به صفر می‌رسد (Gautam et al., 2021). اما در سیستم آب‌کشت در این آزمایش در شرایط اقلیمی استان گلستان، با انجام هرس مناسب و تربیت مناسب بوته‌ها، تراکم ۳/۵ بوته در مترمربع در نورسانی به خوشه‌ها (که در رأس ساقه‌ها واقع شده‌اند) برای تلقیح گل و فروت‌ست مشکلی ایجاد نکرده است.

عملکرد میوه

مقایسه میانگین عملکرد میوه گوجه‌فرنگی (گرم در بوته) بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن ارائه شده در شکل (۳-الف) نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقدار عملکرد در بوته در هر سه رقم هیراد، دافنیس و ایزمونو در تراکم ۲ بوته در مترمربع به-

دست آمد. بیش‌تر بودن عملکرد میوه گوجه‌فرنگی در بوته در تراکم کم‌تر بوته در مترمربع پیش از این نیز گزارش شده است (Buke and Sintayehu, 2020). برای صفت عملکرد کل میوه در مترمربع، بیش‌ترین عملکرد در مترمربع در رقم دافنیس و ایزمونو در تراکم ۳/۵ بوته در مترمربع و در هیراد در هر دو تراکم ۳ و ۳/۵ بوته در مترمربع حاصل شد و کم‌ترین عملکرد مربوط به تراکم ۲ بوته در مترمربع بود. به‌طوری‌که در هر سه رقم با کاهش تراکم بوته، عملکرد میوه در مترمربع کاهش یافت. عملکرد بیش‌تر میوه در مترمربع در تراکم بیش‌تر اثر مستقیم افزایش تعداد بوته در مترمربع است. نتایج مشابهی مربوط به عملکرد بیش‌تر بوته گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای در تراکم بیشتر بوته در سیستم کشت بدون خاک گزارش شده است (Maboko and Du Plooy, 2013).

بر اساس شکل (۳-ب) تراکم بوته در هر سه رقم مورد بررسی بر صفت عملکرد بازارپسند تأثیرگذار بود و بیش‌ترین عملکرد بازارپسند در مترمربع در تراکم‌های بیش‌تر بوته به‌دست آمد، اگرچه در برخی موارد مانند رقم هیراد تفاوت‌ها از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. افزایش عملکرد بازارپسند میوه گوجه‌فرنگی با افزایش تراکم بوته در گلخانه در پژوهش‌های پیشین نیز گزارش شد (Law-Ogbomo and Egharevba, 2009; Menberu et al., 2012).

با توجه به این‌که طول مدت آزمایش در این پروژه حدود ۶ ماه بود و کشت گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای استان گلستان حدود ۹ تا ۱۰ ماه به طول می‌انجامد (انتقال نشاء از اواسط مردادماه - اواسط شهریور تا آخرین برداشت در اواخر اردیبهشت - اواسط خردادماه)، انتظار می‌رود عملکرد کل تولید شده و نسبت افزایش عملکرد حاصله با افزایش تراکم بوته، بیش‌تر از این مقدار باشد.

تعداد میوه

بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن (شکل ۳-ث)، کم‌ترین میانگین تعداد میوه در بوته در رقم هیراد و دافنیس در تراکم ۳/۵ بوته در مترمربع و در رقم ایزمونو در تراکم‌های ۲/۵، ۳ و

مختلف تراکم بوته قرار نگرفت (شکل ۳-م). برای صفت طول میوه واکنش ارقام به تیمارهای مختلف تراکم بوته متفاوت بود، به طوری که رقم هیراد در تراکم ۲/۵ بوته در مترمربع بزرگ‌ترین طول میوه و در تراکم ۳ بوته کوچک‌ترین اندازه طول میوه را داشت. رقم دافنیس تراکم ۳ بوته در مترمربع کوچک‌ترین طول میوه را داشت و سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند. رقم ایزمونو در این صفت تفاوت معنی‌داری در تیمارهای مختلف تراکم بوته نشان نداد. در پژوهشی در بررسی اثر تراکم در کشت بدون خاک در گوجه‌فرنگی، کاهش فاصله بوته‌ها و افزایش تراکم بوته، عملکرد کل، عملکرد میوه‌های دارای اندازه بزرگ و متوسط را افزایش داد (Shanmukhi et al., 2017).

هم‌زمان‌رسی

صفت درصد هم‌زمان‌رسی میوه‌ها در تیمارهای تراکم بوته در ارقام مورد بررسی متفاوت از هم بود (شکل ۴-الف). در رقم هیراد در تیمارهای ۲/۵ و ۳ بوته، در رقم دافنیس در تیمارهای ۳ و ۳/۵ بوته و در رقم ایزمونو در تراکم ۳ بوته در مترمربع، درصد هم‌زمان‌رسی میوه‌ها بیش‌تر از سایر تیمارها بود. پژوهش‌های متعددی نشان داده است نور با تأثیر بر رونویسی ژن‌های رسیدگی میوه یا فعالیت‌های آنزیمی مرتبط با متابولیت‌های اولیه و یا ثانویه در تنظیم تجمع رنگدانه‌ها و رسیدگی میوه نقش دارد (Alba et al., 2000; Adams-Phillips et al., 2004). در دو رقم هیراد و ایزمونو، کاهش هم‌زمان‌رسی میوه‌ها در تراکم ۳/۵ بوته در مترمربع می‌تواند به‌خاطر دریافت نور کم‌تر در خوشه‌های پایین بوته‌ها باشد. در رقم دافنیس تعداد میوه در بوته کم‌تر از دو رقم دیگر بود (شکل ۳-ب) و لذا نایک‌نواختی دریافت نور در میوه‌های یک خوشه در این رقم کم‌تر بود.

ضخامت فرابر

شکل (۴-ب) اثر تراکم بوته در ارقام مورد بررسی در صفت ضخامت فرابر را نشان می‌دهد. ضخیم‌ترین فرابر در رقم هیراد متعلق به تیمار ۲ بوته در مترمربع، در رقم دافنیس به تیمارهای

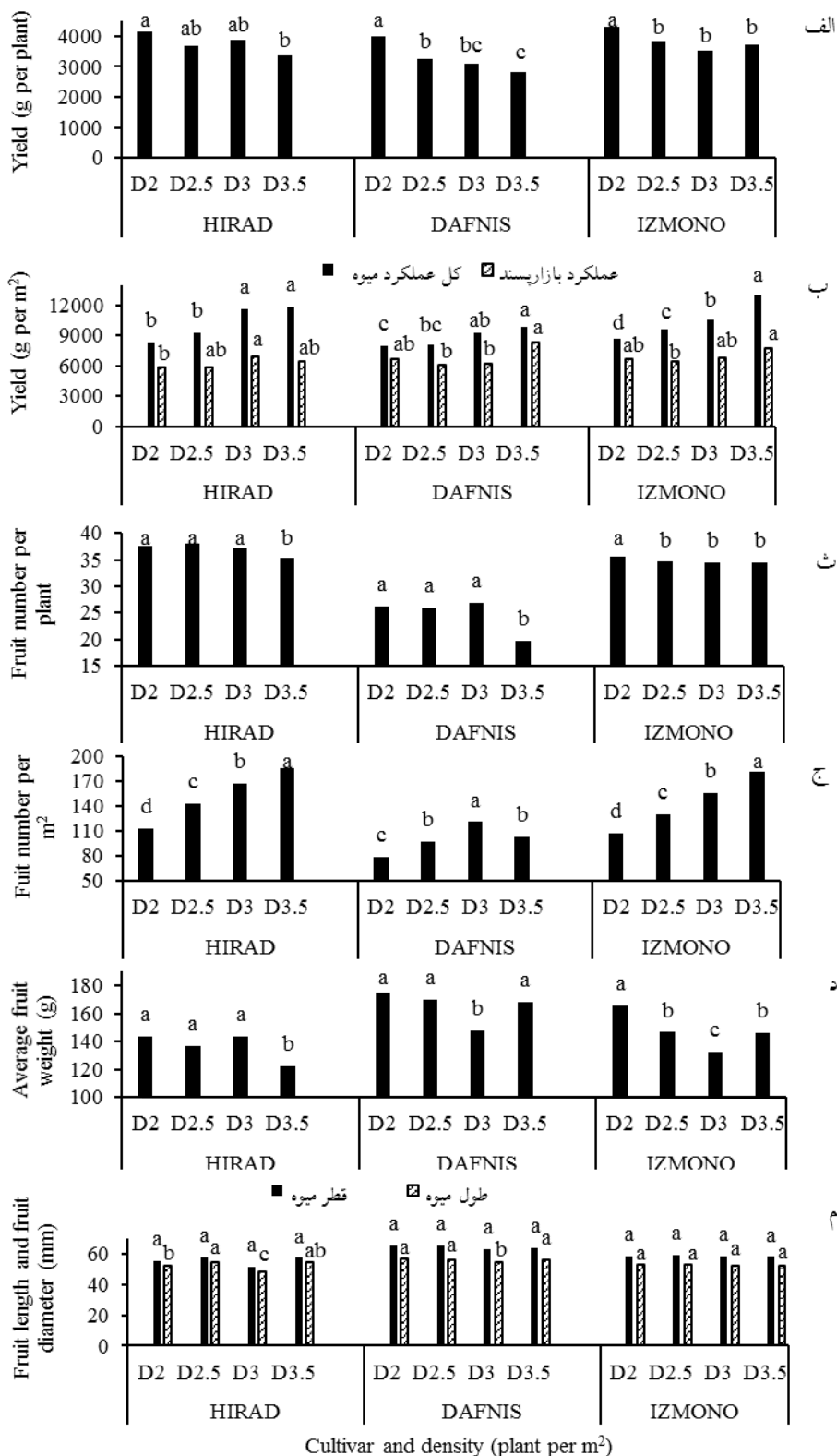
۳/۵ بوته مشاهده شد. ولی با افزایش تراکم بوته، صفت تعداد میوه در مترمربع افزایش یافت (شکل ۳-ج). به طوری که در رقم هیراد و ایزمونو تراکم ۳/۵ بوته در مترمربع و در رقم دافنیس تیمار ۳ بوته در مترمربع بیش‌ترین تعداد میوه در واحد مترمربع را با اختلاف معنی‌دار داشتند و در تراکم کم ۲ بوته با تفاوت معنی‌دار با سایر تیمارها، کم‌ترین تعداد میوه در مترمربع برداشت شد. در کشت گوجه‌فرنگی با رشد محدود در مزرعه با فواصل بیش‌تر بوته‌ها و تراکم کم‌تر در واحد سطح، صفات تعداد میوه در واحد سطح افزایش یافت (Martins et al., 2018; Mehla et al., 2000). برخلاف آن در کشت گوجه‌فرنگی با رشد نامحدود در گلخانه با سیستم آب‌کشت با افزایش تراکم بوته، افزایش تعداد میوه در مترمربع تا ۴۲٪ گزارش شد (Ayarna et al., 2021).

میانگین وزن میوه

در رقم هیراد، میانگین وزن تک میوه در تراکم ۲، ۳ و ۳/۵ بوته با هم تفاوت معنی‌داری نداشت، ولی در تراکم ۳/۵ بوته در مترمربع با تفاوت معنی‌دار کاهش یافت (شکل ۳-د). در رقم دافنیس کم‌ترین میانگین وزن میوه در تراکم ۳ بوته در مترمربع مشاهده شد و سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری نداشتند. در رقم ایزمونو تیمار تراکم ۲ بوته بیش‌ترین میانگین وزن میوه و تیمار ۳ بوته در مترمربع کم‌ترین میانگین وزن میوه را داشت. Mehla et al. (2000) گزارش کردند در کشت گوجه‌فرنگی در مزرعه با تراکم کم‌تر در واحد سطح، میوه‌های درشت‌تری در بوته‌ها تولید شد. فاصله بیش‌تر بوته‌ها موجب نفوذ بیش‌تر نور و هوادهی بهتر در کانونی بوته‌ها می‌گردد، میزان فتوسنتز در برگ‌های تغذیه‌دهنده به میوه بیش‌تر شده، در نتیجه میزان مواد خشک بیش‌تری تولید شده و وزن خشک میوه افزایش می‌یابد (Kumar Singh et al., 2021).

اندازه میوه

صفت قطر میوه در هیچ‌کدام از ارقام تحت تأثیر تیمارهای



شکل ۳. مقایسه میانگین حاصل از برداشته شدن تراکم بوته در سه رقم هیبرید برای صفات عملکردی با آزمون چند دامنه‌ای دانکن (حروف مشابه نشان‌دهنده نبود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ است).

Fig. 3. Mean comparison of slicing of plant density effect on three hybrid cultivars for traits related to yield; Bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

خوشه، تعداد گل در خوشه و مقدار pH آب میوه (به ترتیب $0/55^{**}$ ، $0/48^{**}$ ، $0/36^{*}$ و $0/38^{*}$) و همبستگی منفی معنی‌دار با میانگین فاصله خوشه‌ها ($-0/35^{*}$) داشت. یعنی با افزایش ارتفاع بوته و زیاد شدن فاصله خوشه‌ها از هم، عملکرد میوه در بوته کاهش یافت. همبستگی مثبت و معنی‌دار عملکرد با تعداد گل و میوه در بوته در ارقام گوجه‌فرنگی توسط ایسلام و همکاران (Islam et al., 2010) نیز گزارش شده است. بر اساس نتایج پژوهش حاضر، عملکرد میوه در مترمربع با تعداد میوه در بوته همبستگی بسیار زیاد و معنی‌داری نشان داد ($0/82^{**}$)، ولی با میانگین وزن میوه همبستگی منفی و معنی‌دار داشت ($-0/46^{**}$). همبستگی عملکرد در مترمربع با درصد ریزش گل نیز بر اساس انتظار منفی و معنی‌دار بود که نشان می‌دهد هر عاملی که موجب ریزش گل و عدم تشکیل فروت‌ست شود بر عملکرد نهایی مؤثر خواهد بود. صفت تعداد میوه در بوته با میانگین وزن میوه همبستگی منفی معنی‌دار ($-0/58^{**}$) داشت، بدین معنی که همان گونه که انتظار می‌رفت با افزایش تعداد میوه در بوته از میانگین وزن میوه کاسته شد؛ بنابراین صفت تأثیرگذار در افزایش عملکرد نهایی تعداد میوه بود. همبستگی عملکرد با صفت تعداد میوه در پژوهش‌های مختلف نیز گزارش شده است (Dhaliwal and Nandpuri, 1988; Dhankhar and Dhankhar, 2006; Islam et al., 2010; Kumar et al., 2013; Kumari and Sharma, 2014; Mahmood, 2008; Sabokkhiz et al., 2013; Srivastava et al., 2013). مشابه نتایج پژوهش حاضر، ایسلام و همکاران (Islam et al., 2010) نشان دادند که تعداد میوه در گیاه بیش‌ترین اثر مثبت را بر عملکرد داشته است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش میزان عملکرد میوه گوجه‌فرنگی در مترمربع در تیمارهای مختلف تراکم بوته و رقم از ۸ تا ۱۳ کیلوگرم متغیر بود. با افزایش تراکم از ۳ به ۳/۵، از ۲/۵ به ۳/۵ و از ۲ به ۳/۵ بوته در مترمربع به ترتیب در رقم هیراد ۲/۴، ۲۸/۶ و ۴۳/۱ درصد، در رقم دافنیس ۶/۸، ۲۱/۷، ۲۳/۴ درصد و در رقم

۲، ۳ و ۳/۵ بوته در مترمربع و در رقم ایزمونو متعلق به تیمار ۳/۵ بوته در مترمربع بود که اختلاف معنی‌داری با تیمارهای ۲ و ۲/۵ بوته در مترمربع نداشت.

مواد جامد محلول

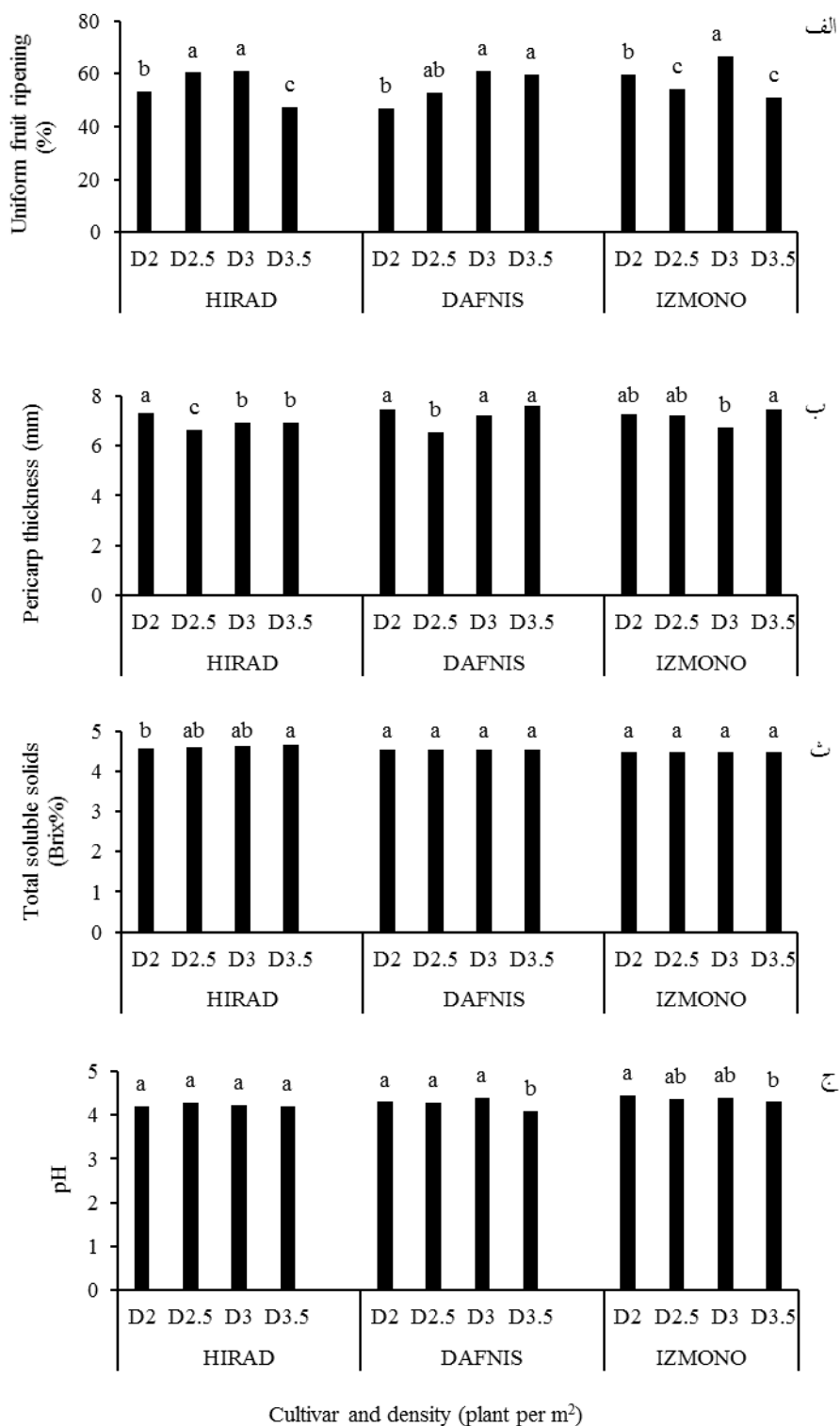
مقایسه میانگین تفاوت معنی‌داری در مواد جامد محلول بین ارقام دافنیس و ایزمونو نشان نداد (شکل ۴-ث). در رقم هیراد تراکم ۳/۵ بوته بیش‌ترین و تراکم ۲ بوته کم‌ترین درجه مواد جامد محلول را داشتند. پژوهش‌ها نشان می‌دهد تراکم بوته بر مقدار مواد جامد محلول میوه گوجه‌فرنگی تأثیرگذار است (Borraz et al., 1991). افزایش مقدار مواد جامد محلول در اثر افزایش تراکم بوته در گوجه‌فرنگی پیش از این گزارش شده است (Martins et al., 2018). با این وجود در پژوهشی در مورد گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای در سیستم آب‌کشت، مواد جامد محلول تحت تأثیر تراکم بوته قرار نگرفت (Cardoso et al., 2018).

pH آب میوه

بر اساس مقایسه میانگین میزان pH آب میوه گوجه‌فرنگی، در رقم هیراد تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای مختلف تراکم بوته مشاهده نشد (شکل ۴-ج). در رقم دافنیس بین تیمارهای ۲، ۳/۵ و ۲ بوته در مترمربع بیش‌ترین مقدار pH و در تیمار ۳/۵ کم‌ترین مقدار آن مشاهده شد. در رقم ایزمونو با تراکم ۲ بوته در مترمربع، بیش‌ترین مقدار و در تیمار ۳/۵ کم‌ترین مقدار pH مشاهده شد که با تیمارهای ۲/۵ و ۳ بوته در مترمربع اختلاف معنی‌دار نداشتند. کاردوسو و همکاران (Cardoso et al., 2018) گزارش کردند که مقدار pH تحت تأثیر تغییر تراکم بوته قرار نگرفت.

همبستگی بین صفات مورد بررسی

نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد عملکرد میوه در بوته همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری با تعداد میوه در بوته، تعداد میوه در



شکل ۴. مقایسه میانگین حاصل از برش‌دهی اثر تراکم بوته در سه رقم هیبرید برای صفات فیزیکوشیمیایی میوه با آزمون چند دامنه‌ای دانکن (حروف مشابه نشان‌دهنده نبود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ است).

Fig. 4. Mean comparison of slicing of plant density effect on three hybrid cultivars for fruit physicochemical traits; Bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

جدول ۵. ضرایب همبستگی ساده بین صفات اندازه‌گیری شده

Table 5. Simple correlation coefficients for the studied traits

صفات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	
در بوته	Yield per plant	Yield per m ²	Marketable yield per m ²	Number of fruits per plant	Number of fruits per m ²	Average fruit weight	Fruit diameter	Fruit length	Number of fruits per cluster	Number of clusters per plant	Number of flowers per cluster	The distance of first cluster	Average distance between clusters	Blossom drop%	Simultaneous fruit ripening	Pericarp thickness	جامد محلول	pH	
۱	1																		
۲	0.15	1																	
۳	0.14	0.39*	1																
۴	0.55**	0.28	-0.33*	1															
۵	-0.02	0.82**	-0.04	0.60**	1														
۶	0.01	-0.46**	0.23	-0.58**	-0.73**	1													
۷	0.23	0.09	0.17	-0.01	-0.04	-0.02	1												
۸	-0.05	-0.16	-0.15	0.00	-0.06	-0.14	0.62**	1											
۹	0.48**	-0.21	-0.33*	0.53**	0.00	-0.25	-0.24	-0.14	1										
۱۰	0.27	0.04	-0.22	0.42*	0.16	-0.18	0.17	0.07	0.29	1									
۱۱	0.36*	0.13	-0.13	0.55**	0.28	-0.34*	-0.21	-0.26	0.56**	0.27	1								
۱۲	-0.02	-0.18	0.05	-0.33*	-0.38*	0.17	-0.01	-0.10	0.03	-0.01	0.06	1							
۱۳	-0.35*	0.15	0.12	-0.45**	-0.04	0.03	-0.26	-0.32	-0.40*	-0.13	-0.10	0.37*	1						
۱۴	0.20	-0.41**	-0.22	0.26	-0.20	-0.08	0.13	0.36*	0.22	0.16	0.25	-0.14	-0.33*	1					
۱۵	-0.17	-0.07	-0.21	0.04	0.04	-0.04	-0.12	-0.20	-0.18	-0.04	0.01	-0.01	0.26	0.15	1				
۱۶	0.06	0.03	0.38*	-0.25	-0.20	0.34*	-0.01	-0.12	-0.25	-0.02	-0.11	0.26	0.27	-0.45**	-0.25	1			
۱۷	-0.14	0.15	-0.25	0.13	0.28	-0.39*	0.17	0.45	-0.03	0.25	-0.24	-0.22	-0.12	0.18	-0.06	-0.14	1		
۱۸	0.38*	-0.02	-0.06	0.12	-0.11	0.13	-0.13	-0.25	0.39*	0.01	0.37*	0.17	0.09	0.35*	0.14	-0.24	-0.40*	1	

* and **: significant at the 5 and 1% probability levels, respectively
* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد

تشکر و سپاسگزاری

این مقاله از گزارش نهایی پروژه پژوهشی با عنوان "بررسی آثار تراکم بوته بر عملکرد سه هیبرید گلخانه‌ای گوجه‌فرنگی در شرایط کشت هیدروپونیک در استان گلستان" و شماره مصوب ۱۱۵۹-۰۰۱۰۸-۳۳-۵۷-۲" استخراج شده است. نویسنده از مؤسسه تحقیقات علوم باغبانی و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گلستان به‌خاطر فراهم کردن شرایط اجرای این پژوهش سپاسگزاری می‌نماید.

تضاد منافع

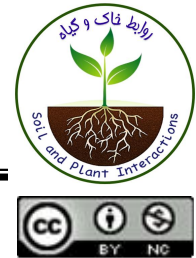
نویسنده مقاله اذعان دارد هیچ‌گونه تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

ایزومونو ۲۲/۷، ۳۵ و ۵۱ درصد افزایش عملکرد در مترمربع مشاهده شد. این آزمایش نشان داد در صورت هرس و قیم‌بندی مناسب بوته‌ها، افزایش تراکم بوته تا ۳/۵ بوته در مترمربع بر میزان افزایش یا شدت خسارت ریزش گل تأثیرگذار نیست، چرا که خوشه‌های جدید در رأس بوته‌ها واقع می‌شوند و سایه-اندازی بوته‌ها در بخش میانی و پایین کانوپی بوته‌ها تا حدودی موجب غیرهمرسی میوه در خوشه‌ها شده و در تلقیح گل و فروت‌ست تأثیر منفی ندارد. بنابراین در شرایط گلخانه‌های استان گلستان و اقلیم‌های مشابه تراکم ۳/۵ بوته گوجه‌فرنگی در مترمربع در کشت‌های بدون خاک و سیستم آب‌کشت پیشنهاد می‌شود.

منابع مورد استفاده

- Alba, R., Cordonnier-Pratt, M.M., Pratt, L.H., 2000. Fruit-localized phytochromes regulate lycopene accumulation independently of ethylene production in tomato. *Plant Physiol.* 123, 363–370.
- Adams-Phillips, L., Barry, C., Giovannoni, J., 2004. Signal transduction systems regulating fruit ripening. *Trends Plant Sci.* 9, 331–338.
- Amundson, S., Deyton, D.E., Kopsell, D.A., Hitch, W., Moore, A., Sams, C.E., 2012. Optimizing plant density and production systems to maximize yield of greenhouse-grown 'trust' tomatoes. *Hortthechnology* 22(1), 44–48.
- Ayarna, A.W., Tsukagoshi, S., Nkansah, G.O., Maeda, K., 2021. Effect of plant density on the yield of hydroponically grown heat-tolerant tomato under summer temperature conditions. *Am. J. Plant Sci.* 12(6), 901–913.
- Borraz, C.J., Castilho, S.F., Robeles, E.P., 1991. Efectos del despunte y la densidad de poblacion sobre dos variedades de jitomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill), em hidroponia bajo invernadero. *Chapingo* 14, 26–30.
- Buke, T., Sintayehu, A., 2020. Review on effects of planting density on growth performance of tomato (*Lycopersicon esculentum* MILL.). *Int. J. Curr. Res. Academic Rev.* 8(9), 58–63.
- Cardoso, F.B., Martinez, H.E.P., Silva, D.J.H., Milagres, C.C., Barbosa, J.G., 2018. Yield and quality of tomato grown in a hydroponic system, with different planting densities and number of bunches per plant. *Pesqui. Agropecu. Trop.* 48(4), 340–349.
- Charlo, H.C.O., Castoldi, R., Ito, L.A., Fernandes, C., Braz, L.T., 2007. Productivity of cherry tomatoes under protected cultivation carried out with different types of pruning and spacing. *Acta Hort.* 761, 323–326.
- Chau, M.H., Chinh, N.X., 2021. Effect of plant density and fertilizer application rates on growth, fruit yield and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in greenhouse condition. *Asian J. Plant Res.* 8(3), 22–31.
- Choi, S.Y., Kil, M.J., Kwon, Y.S., Jung, J.A., Park, S.K., 2012. Effect of different light emitting diode (LED) on growth and flowering in chrysanthemum. *Flower Res. J.* 20(3), 128–133.
- Dhaliwal, M.S., Nandpuri, K.S., 1988. Genetics of yield and its components in tomato. *Annu. Biol.* 4, 75–80.
- Dhankhar, S.K., Dhankhar, B.S., 2006. Variability, heritability, correlation and path coefficient studies in tomato. *J. Hort. Sci.* 35(1&2), 179–181.
- Hochmuth, G.J., Hochmuth, R., 2021. Nutrient solution formulation for hydroponic (Perlite, Rockwool, NFT) Tomatoes in Florida. IFAS Extension HS796.
- Islam, B., Ivy, N., Rasul M., Zakaria M., 2010. Character association and path analysis of exotic tomato (*Solanum lycopersicum* L.) genotypes. *Bangladesh J. Plant Breed. Genet.* 23(1), 13–18.
- Gautam, R., Singh, P.K., Kumar, P., Kumar, S., Singh, M.C., Dhital, S., Rani, M., Sharma, V. K.K., Jnapika, K.H., Kumar, J., 2021. Advances in soilless cultivation technology of horticultural crops. *Indian J. Agric. Sci.* 91(4), 503–508.
- Gent, M.P.N., 2004. Yield of greenhouse tomato in response to supplemental nitrogen and potassium. *Acta Hort.* 633, 341–348.

17. Kaur, R., Kumar Singh, J., Kumar Singh, S., 2021. Soilless agriculture: a modern and advanced method for agriculture development. Intern. J. Hortic. Crop Sci. Res. 11, 1–7.
18. Kumar, D., Kumar, R., Kumar, S., Bhardwaj, M.L., Thakur, M.C., Kumar, R., Thakur, K.S., Dogra, B., Vikram, S., Thakur A., Kumar, P., 2013. Genetic variability, correlation and path coefficient analysis in tomato. Int. J. Veg. Sci. 19(4), 13–323.
19. Kumar Singh, S., Shahi, B.P., Singh, B.R., Kumar Singh, M., Singh, S.H and Kumar, M., 2021. The effects of plant density on the productivity of tomato hybrids in a newly developed low cost naturally ventilated greenhouse. Int. J. Plant Soil Sci. 33(3), 61–72.
20. Kumari, S. Sharma, M.K., 2014. Genetic variability studies in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). Veg. Sci. 40(1), 83–86.
21. Law-Ogbomo, K.E., Egharevba, R.K.A., 2009. Effects of planting density and NPK fertilizer application on yield and yield components of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) in forest location. World J. Agric. Res. 5, 152–158.
22. Maboko, M.M., Du Plooy, C.P., 2013. High-density planting of tomato cultivars with early decapitation of growing point increased yield in a closed hydroponic system. Acta Agric. Scand. 63(8), 672–682.
23. Martins, D.S., Watthier, M., Schwengber, J.E., Silva, D.R., Schubert, R.N., Nogueira Peil, R.M., 2018. Planting density and number of stems for ecological crop determinate growth tomato. Afr. J. Agric. Res. 13(12), 544–550.
24. Mehla C.P., Srivastava, V.K., Jage, S., Mangat, R., Singh, J., Ram, M., 2000. Response of tomato varieties to N and P fertilization and spacing. Indian J. Agric. Res. 34(3), 182–184.
25. Memberu, K., Derbew, B., Ali, M., Yehenew, G., 2012. Effect of intra-row spacing and variety on fruit yield and quality of fresh market Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under Jimma Condition, Ethiopia. Ethiop. J. Sci. Technol. 3, 32–42.
26. Omid, M., Shafaii, A., 2004. Investigating greenhouse indoor temperature and humidity changes using a computer data collecting system. Res. Agron. Hortic. 64, 67–73. (In Persian with English abstract)
27. Raviv, M., Lieth, H.J., 2008. Soilless Culture: Theory and Practice. Elsevier, London, UK.
28. Sabokkhiz, M., Nejadshamloo, A., Malekzadeh Shafaroudy, S., 2014. Adaptation evaluation and comparison tomato cultivars under saline irrigation in Khorasan Razavi province. In: 1st International and 13th Iranian Crop Science Congress and 3rd Iranian Seed Science and Technology Conference, August 26, Seed and Plant Improvement Research Institute, Karaj, Iran. (In Persian with English abstract)
29. Seleguini, A., Seno, S., Junior, M. J. A. F., 2006. Espaçamento entre plantas e número de racimos para tomateiro em ambiente protegido. Acta Sci. 28(3), 359–363.
30. Shakeel, H., Jatoi, A., Ghafoor, A., Mahmood, T., 2008. Path coefficient analysis of yield component in tomato (*Lycopersicon esculentum*). Pak. J. Bot. 40(2), 627–635.
31. Shanmukhi, C.H., Reddy, M.L.N., Dorajee Rao, A.V.D., Babu, A.P., 2017. Effect of planting density and fertigation on growth and yield of processing tomato varieties. Int. J. Adv. Sci. Eng. Technol. 5 (3), 78–81.
32. Singh, T., Singh, N., Bahuguna, A., Nautiyal M., Sharma, V.K., 2014. Performance of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) hybrids for growth, yield and quality inside polyhouse under mid hill condition of Uttarakhand. Am. J. Drug Discov. Dev. 4, 202–209.
33. Srivastava, K., Kumari, K., Singh, S., Kumar, R., 2013. Association studies for yield and its component traits in tomato (*Solanum Lycopersicum* L.). Plant Arch. 13(1), 105–112.



Comparison of Yield and Quantitative and Qualitative Characteristics of Two Strawberry Cultivars Under Two Hydroponics Culture Systems

B. Baran Sheikhmazari¹, H. Hassanpour*¹, P. Noruzi and S. Nojavan

(Received: 3 May 2023; Accepted: 12 August 2023)

Abstract

Due to the limitations of water resources and poor soil quality, the use of modern and high-quality solutions is necessary to produce agricultural products with better quality. One of the effective methods for achieving this goal is the production and cultivation of plants by hydroponic methods. This study was conducted as a factorial in a completely randomized design with the aim of investigating the effect of hydroponic cultivation systems [drip system and deep flow technology (DFT)] as the first factor on the quality and yield of two strawberry cultivars (Albion, Sabrina) as the second factor with four replications. The results showed that Sabrina had the highest fruit length and width in the drip system. Also, the highest fruit weight and yield were observed in the Sabrina cultivar under the drip irrigation system. The highest titratable acidity content was observed in Sabrina cultivar under the drip system and the highest contents of total soluble solids, total phenol and total flavonoid were recorded in the DFT system. Besides, the highest total anthocyanin content was revealed in the Albion cultivar under the drip system. In general, the results of the present study showed that most of the qualitative and quantitative characteristics of strawberry fruits were affected by the cultivation system type and the yield and fruit quality of strawberries were higher in the drip system compared to the DFT system. It can be also concluded that Sabrina had the highest biochemical properties under the drip system.

Keywords: Antioxidant capacity, Deep flow technique, Drip irrigation, Total anthocyanin, Total flavonoid.

Background and Objective: By adjusting the concentration of the nutrient solution, hydroponic cultivation allows farmers to control and regulate the nutrients available to the plant (Keutgen and Pawelzik, 2007). In hydroponic culture systems (water culture), plants are grown in an environment other than soil in order to reach the maximum density of cultivation, improve performance, save water and nutrients, and reduce soil pollution (Rounaghi and Maftoon, 2006). Samec et al. (2016) reported that the variety had a significant effect on the quality characteristics of strawberries and Albion cultivar had the highest total soluble solids (TSS) and titratable acidity (TA) contents. The aim of this study was to investigate the effect of cultivation system type on the quality and yield of two strawberry cultivars (Sabrina and Albion) grown in hydroponic.

Methods: Sabrina and Albion strawberry transplants were obtained from a commercial greenhouse located in Urmia city and kept for 240 hours in a cold room (for chilling) at a temperature of 4 °C. Some traits such

1- Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.

* Corresponding author, Email: ha.hassanpour@urmia.ac.ir

as length, width, weight and yield of fruits, pH, TSS, TA, antioxidant activity, total phenol, flavonoid and anthocyanin contents were evaluated. To evaluate total phenol, the method of Du et al. (2009) was performed with a slight modification. The method of Shin et al. (2014) with a slight modification was followed to measure the total flavonoid. Antioxidant capacity was evaluated using the DPPH free radical method.

Results: The results showed that the cultivation system type affected the length, width, weight and yield of fruits. Based on the results of variance analysis, the cultivation system had a significant effect on total phenol, total flavonoid and anthocyanin contents at $p < 0.05$. The results showed that Sabrina had the highest fruit length and width in the drip system. Also, the highest fruit weight and yield were observed in the Sabrina cultivar under the drip irrigation system. The highest titratable acidity content was observed in Sabrina cultivar under the drip system and the highest contents of total soluble solids, total phenol and total flavonoid were recorded in the DFT system. Besides, the highest total anthocyanin content was revealed in the Albion cultivar under the drip system.

Conclusions: The results showed that the quantitative and qualitative characteristics of strawberry fruits were affected by the type of cultivar and cultivation system. The highest amount of strawberry fruit quantitative index (i.e., fruit length, width, weight and yield) was observed in the cultivar Sabrina grown under the drip system. In general, the obtained results showed that most of the quantitative and qualitative characteristics of strawberry fruit were affected by the cultivation system and Sabrina had the highest biochemical properties under the drip system.

References:

1. Du, G., Li, M., Ma, F., Liang, D., 2009. Antioxidant capacity and the relationship with polyphenol and vitamin C in *Actinidia* fruits. *Food Chem.* 113(2), 557–562.
2. Keutgen, A.J., Pawelzik, E., 2007. Cultivar-dependent cell walls modification of strawberry fruit under NaCl salinity stress. *J. Agr. Food Chem.* 55(18), 7580–7585.
3. Rounaghi, A., Maftoon, M., 2006. *Hydroponic*, First ed., Shiraz University Publishing Center, Shiraz.
4. Šamec, D., Maretić, M., Lugarić, I., Mešić, A., Salopek-Sondi, B., Duralija, B., 2016. Assessment of the differences in the physical, chemical and phytochemical properties of four strawberry cultivars using principal component analysis. *Food Chem.* 194, 828–834.
5. Shin, S.W., Ghimeray, A.K., Park, C.H., 2014. Investigation of total phenolic, total flavonoid, antioxidant and allyl isothiocyanate content in the different organs of *Wasabi japonica* grown in an organic system. *Afr. J. Tradit. Complement. Altern. Med.* 3(11), 38–45.



مقایسه عملکرد و ویژگی‌های کمی و کیفی دو رقم توت‌فرنگی در دو سامانه آب‌کشت

بهزاد بران شیخ‌مزاری^۱، حمید حسن‌پور^{*}، پرویز نوروزی و سهیلا نوجوان

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۲۱)

چکیده

با توجه به محدودیت‌های منابع آبی و کاهش کیفیت خاک، استفاده از راهکارهای نوین و پربازده برای تولید بیش‌تر و با کیفیت‌تر محصولات کشاورزی ضروری است. از جمله روش‌های مؤثر در راستای تحقق این مهم، تولید و کشت گیاهان به روش آب‌کشت است. این پژوهش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با هدف بررسی اثر سامانه‌های کشت آب‌کشت شامل سامانه قطره‌ای و فناوری جریان عمیق (DFT) به‌عنوان فاکتور اول بر کیفیت و عملکرد ارقام مختلف توت‌فرنگی (آلبیون، ساپرینا) به‌عنوان فاکتور دوم با چهار تکرار انجام شد. نتایج نشان داد، طول و عرض میوه رقم ساپرینا کشت شده در سامانه قطره‌ای دارای بیش‌ترین میزان بود. همچنین بیش‌ترین وزن و عملکرد میوه در رقم ساپرینا کشت شده در سامانه قطره‌ای مشاهده شد. بیش‌ترین میزان اسیدیته قابل‌تیتر (TA) در رقم ساپرینا کشت شده در سامانه قطره‌ای و بیش‌ترین محتوی مواد جامد محلول (TSS)، فنل کل و فلاونوئید کل نیز در سامانه DFT مشاهده شد. همچنین بیش‌ترین محتوی آنتوسیانین کل مربوط به رقم آلبیون کشت شده در سامانه قطره‌ای بود. به‌طور کلی نتایج پژوهش حاضر نشان داد که بیش‌تر ویژگی‌های کمی و کیفی میوه توت‌فرنگی تحت تأثیر نوع سامانه کشت قرار گرفته و در سامانه قطره‌ای عملکرد و کیفیت میوه توت‌فرنگی بالاتر از سامانه DFT بود. همچنین در ارزیابی نوع رقم می‌توان نتیجه گرفت که رقم ساپرینا بیش‌ترین ویژگی‌های بیوشیمیایی را در سامانه قطره‌ای داشت.

واژه‌های کلیدی: سامانه قطره‌ای، آنتوسیانین کل، فناوری جریان عمیق، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، فلاونوئید کل.

مقدمه

قندها است (Wang and Lin, 2003). طعم میوه توت‌فرنگی حاصل ترکیب انواع قندها، اسیدهای آلی و مواد فرار است که عوامل زیادی مانند رقم، وضعیت تغذیه‌ای گیاه و شرایط محیطی بر عطر و طعم آن تأثیر می‌گذارند. گلوکز، ساکارز و فروکتوز اصلی‌ترین قندهای محلول میوه توت‌فرنگی هستند. همچنین اسید سیتریک با میزان ۸۸٪ فراوان‌ترین اسید آلی در

توت‌فرنگی (*Fragaria × ananassa*) متعلق به تیره Rosaceae بوده و شامل گونه‌های مختلفی از جمله توت‌فرنگی وحشی یا جنگلی (*F. vesca*) است (Jalili Marandi, 2006). توت‌فرنگی میوه‌ای سرشار از ویتامین‌ها و مواد معدنی است (Kashi and Hekmati, 1991). میوه توت‌فرنگی منبعی عالی از فیبر و

۱- گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ha.hassanpour@urmia.ac.ir

یک پمپ با مقدار آب تنظیم شده برای هر گیاه توسط یک تایمر الکترونیک تحویل داده می‌شود (Jamshidzad, 2016; Bancha et al., 2017).

نتایج میراندا و همکاران (Miranda et al., 2014) نشان داد که سامانه‌های کشت و ژنوتیپ‌های مورد بررسی بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی و ویژگی‌های فیزیوشیمیایی ارقام توت‌فرنگی مؤثر بودند. سامک و همکاران (Šamec et al., 2016) دریافتند که رقم تأثیر معنی‌داری بر ویژگی‌های کیفی توت‌فرنگی داشت و رقم آلبیون بیش‌ترین میزان مواد جامد محلول (TSS) و اسیدیته قابل تیترا (TA) را داشت. میانگین عملکرد تولید طالبی در سامانه کشت بستر با سامانه قطره‌ای به ترتیب در حدود ۷۱٪ و ۱۸۴٪ بیش‌تر از سامانه آب‌کشت NFT و سامانه کشت خاک با سامانه قطره‌ای بود (Wiangsamut, 2017). بنابر نتایج جمشیدزاده و همکاران (Jamshidzad, 2016) می‌توان اظهار کرد که بیش‌ترین ارتفاع، تعداد برگ، مجموع تعداد گل، طول میوه و قطر و وزن تک میوه در سامانه قطره‌ای ولی بیش‌ترین وزن کل و تعداد میوه خیار در سامانه کشت آب‌کشت DFT بود. بر این اساس، با استفاده از محیط هیدروپونیک، میزان آب مصرفی گیاه و کارایی مصرف آب به آسانی اندازه‌گیری می‌شود (Rouphael and Colla, 2005). در سامانه آب‌کشت گیاهان کم‌تر تحت تأثیر تنش قرار می‌گیرند، چرا که همیشه آب و مواد غذایی در دسترس گیاه قرار دارند (Khan, 2018). از نظر زیست‌محیطی نیز تولید محصول در کشت آب‌کشت باعث افزایش بازده و بقای گیاهان، و کاهش مصرف آب و آفت‌کش‌ها می‌شود (Gruda, 2009). از این‌رو نوع سامانه کشت مهم بوده و می‌تواند عملکرد و کیفیت میوه را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین هدف از این پژوهش، مقایسه دو رقم توت‌فرنگی (آلبیون و سابرینا) از لحاظ ویژگی‌های کمی و کیفی و انتخاب بهترین رقم بر اساس نوع سامانه آب‌کشت است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش نشاءهای توت‌فرنگی رقم سابرینا و آلبیون از

میوه توت‌فرنگی است (Akhatou and Fernandez, 2014). توت‌فرنگی به دلیل داشتن سیستم ریشه‌ای سطحی، سطح برگ زیاد و آبدار بودن میوه به حجم آب زیادی نیاز دارد (Klamkowski and Treder, 2006). کشت آب‌کشت با تنظیم غلظت عناصر غذایی به کشاورزان این امکان را می‌دهد که عناصر غذایی در دسترس گیاه را به آسانی کنترل و تنظیم کنند (Keutgen and Pawelzik, 2007). در سامانه‌های کشت هیدروپونیک (آب‌کشت)، گیاهان در بستر غیرخاکی و به منظور رسیدن به تراکم کشت بیشینه، بهبود عملکرد، صرفه‌جویی در مصرف آب و مواد غذایی، کاهش آلودگی‌های خاک و مشکلات جذب عناصر، کشت می‌شوند (Rounaghi and Maftoon, 2006).

در سامانه فناوری جریان عمیق^۱ (DFT) محلول غذایی با عمق بیش‌تری در لوله‌های رشد جریان دارد. در این سامانه محلول غذایی به ضخامت ۲-۳ سانتی‌متر در لوله‌های پلی‌اتیلن جریان می‌یابد. گلدان‌های مشبک پلاستیکی حاوی بستر کشت بر روی این لوله‌ها قرار می‌گیرند که انتهای گلدان‌ها با محلول غذایی در حال جریان درون لوله‌ها در تماس است. لوله‌های پلی‌اتیلن با توجه به نوع و چگونگی رشد گیاه می‌تواند به روی یک سطح مستقیم و هموار و یا به صورت مارپیچ و زیگزاگ چیده شوند. تنظیم دما، pH و EC در سامانه DFT نسبت به سامانه لایه نازک محلول غذایی^۲ (NFT) آسان‌تر است، اما دسترسی به اکسیژن کم‌تری را میسر می‌سازد (Jamshidzad, 2017; Bancha et al., 2016). در سامانه قطره‌ای کیسه مخصوص حمل و نقل پرلیت یا بسترهای دیگر به پهلو قرار داده می‌شود. سوراخ‌های ریزی در قسمت لبه پایین برای خروج آب اضافی و سوراخ‌هایی در بالای کیسه برای استقرار گیاه ایجاد می‌گردد و سپس لوله‌های قطره‌چکان در کنار سوراخ‌هایی که گیاه در آن قرار گرفته، گذاشته می‌شود. در این سامانه آب یا مواد غذایی موجود در مخزن به هر گیاه یا گلدان با استفاده از

1. Deep flow technique
2. Nutrient film technique

جدول ۱. غلظت عناصر غذایی استفاده شده برای کشت توت‌فرنگی در سامانه آب‌کشت.

Table 1. Concentration of nutrients used for growing strawberries in the hydroponic system.

مرحله رشد Growth stage	عناصر غذایی (میلی‌گرم بر لیتر) (mg/L) Nutrients													
	N	P	K	Mg	Ca	S	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Mo	EC	pH
رشد رویشی Vegetative growth	207	65	184	58	221	77	6.5	2.6	0.25	0.7	0.07	0.05	2	5.8
میوه‌دهی Fruiting	182	82	301	58	148	77	6.5	2.6	0.25	0.7	0.07	0.05	2	5.8

تغییر تنظیم شد (جدول ۱). روش محلول‌دهی در هر دو سامانه به صورت اتوماتیک بود، به طوری که در سامانه DFT تایمر ۱۰ دقیقه روشن بود و در این زمان محلول غذایی در داخل لوله‌ها جریان داشت و پس از ۵ دقیقه تایمر خاموش شده و محلول غذایی قطع می‌شد. با توجه به عدم دسترسی به ابزارهای کنترل برخط جذب و آنالیز محلول و به منظور جلوگیری از خطاهای احتمالی، محلول غذایی هر ۲۰ روز یکبار تجدید می‌شد.

در سامانه قطره‌ای نیز در هر روز ۷ مرحله و در هر مرحله ۱/۵ دقیقه محلول‌دهی می‌شد. فاکتورهای آزمایشی شامل نوع سامانه با دو سطح (قطره‌ای و DFT) و نوع رقم با دو سطح (آلبیون و سابرینا) بوده که در مجموع ۴ تیمار آزمایشی در این پژوهش استفاده شد. همچنین طول دوره آزمایشی در این پژوهش برابر ۵ ماه بود.

صفات مورد بررسی

در این پژوهش صفاتی مانند طول، عرض، وزن و عملکرد میوه، pH میوه، اسیدیته قابل تیتر (TA)، فعالیت آنتی‌اکسیدان، محتوی فنل، فلاونوئید و آنتوسیانین کل مورد ارزیابی قرار گرفت.

اندازه‌گیری طول و عرض، وزن و عملکرد میوه

برای اندازه‌گیری طول و عرض میوه از کولیس دیجیتالی استفاده شد و داده‌ها بر حسب میلی‌متر یادداشت شدند. برای تعیین وزن میوه از ترازوی دیجیتالی استفاده شد و داده‌ها



شکل ۱. کشت توت‌فرنگی رقم سابرینا در سامانه DFT

Fig. 1. Cultivation of strawberry cv. Sabrina under the DFT system.

یک گلخانه تجاری واقع در شهرستان ارومیه تهیه شده و به مدت ۱۰ روز در سردخانه گروه علوم باغبانی (برای اعمال سرمادهی) در دمای ۴ درجه سلسیوس قرار گرفتند. پس از این مدت، نشاءها در گلخانه گروه علوم باغبانی با دمای ۲۲ درجه سلسیوس روز و ۱۵ درجه سلسیوس شب و رطوبت نسبی ۷۰ درصد، بر روی سامانه‌های آب‌کشت کشت شد. نشاءها در سامانه قطره‌ای به صورت خطی بر روی کیسه‌های رشد با فواصل ۲۵-۲۰ سانتی‌متر کشت شده و در سامانه DFT در لیوان‌های مخصوص با فواصل کشت ۳۰ سانتی‌متر کشت شدند (شکل ۱).

در هر دو سامانه ترکیب بستر کشت پیت‌ماس، پرلیت و کوکوپیت با نسبت حجمی ۳:۱:۱ بود و فرمول غذایی مورد استفاده براساس روش یامازاکی (Yamazaki, 1982) با کمی

دمای ۴ درجه سلسیوس سانتریفیوژ شدند. سپس قسمت رویی نمونه‌ها به آرامی برداشته شده و در لوله‌های درب‌دار در دمای ۲۰- درجه سلسیوس نگهداری شدند.

اندازه‌گیری محتوی فنل کل میوه توت‌فرنگی

برای ارزیابی فنل کل از روش دیو و همکاران (Du et al., 2009) با کمی تغییر انجام شد. ابتدا ۳۰ میکرولیتر عصاره تهیه شده، به درون ویال ریخته شد و سپس ۱۸۰ میکرولیتر آب مقطر و ۱۲۰۰ میکرولیتر فولین ۱۰٪ به آن افزوده شد. پس از گذشت ۶ دقیقه، ۹۶۰ میکرولیتر کربنات سدیم به نمونه افزوده شد. نمونه‌ها به مدت ۱/۵ الی ۲ ساعت در مکان تاریکی در دمای اتاق نگهداری شدند. سپس جذب نمونه‌ها در طول موج ۷۶۵ نانومتر توسط دستگاه اسپکتوفتومتر قرائت شد. مقدار فنل کل بر حسب میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم وزن تازه معادل اسید گالیک بیان شد.

اندازه‌گیری محتوی فلاونوئید کل میوه توت‌فرنگی

برای ارزیابی فلاونوئید کل از روش شین و همکاران (Shin et al., 2014) با کمی تغییر استفاده شد. ابتدا ۵۰۰ میکرولیتر عصاره تهیه شده را با ۱۵۰ میکرولیتر نیتريت سدیم ۵٪ مخلوط کرده و پس از ۵ دقیقه، ۳۰۰ میکرولیتر کلرید آلومینیوم ۱۰٪ به آن افزوده شده، و پس از طی ۵ دقیقه، ۱ میلی‌لیتر سود یک مولار افزوده شد. در نهایت حجم محلول به ۵ میلی‌لیتر رسانده شد و توسط دستگاه اسپکتوفتومتر در طول موج ۴۲۰ نانومتر قرائت شد. مقدار فلاونوئید کل بر حسب میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم وزن تازه معادل کوئرستین بیان شد.

تعیین ظرفیت آنتی‌اکسیدانی میوه توت‌فرنگی

ظرفیت آنتی‌اکسیدان کل با استفاده از روش رادیکال آزاد DPPH (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl) ارزیابی شد. اندازه‌گیری توانایی عصاره‌ها در مهار رادیکال‌های آزاد (DPPH) به این صورت انجام شد که ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره آماده شده

بر حسب گرم یادداشت شدند. همچنین به منظور تعیین عملکرد، کل میوه‌های بوته‌ها از مرحله شروع میوه‌دهی تا پایان میوه‌دهی برداشت شده و وزن شدند و در پایان مجموع وزن تمام میوه‌ها در هر بوته به عنوان عملکرد آن بوته بر حسب گرم محاسبه شد.

اندازه‌گیری pH، اسیدیته قابل تیترا (TA) و محتوی TSS میوه توت‌فرنگی

برای اندازه‌گیری pH میوه از pH متر دیجیتالی و برای اندازه‌گیری TA نیز از روش تیتراسیون با هیدروکسید سدیم استفاده شده و به صورت گرم بر ۱۰۰ میلی‌لیتر بیان گردید. محتوی TSS نیز با استفاده از رفرکتومتر دستی اندازه‌گیری شد.

استخراج عصاره برای اندازه‌گیری ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، محتوی آنتوسیانین، فنل و فلاونوئید کل

عصاره‌گیری از نمونه‌ها به روش حسن‌پور و علیزاده (Hassanpour and Alizadeh, 2016) با کمی تغییر انجام شد. نمونه‌های میوه به صورت جداگانه به حالت پودر درآمدند. مقدار ۵/۰ گرم از نمونه پودر شده با ۵ میلی‌لیتر متانول ۸۵٪ مخلوط شده، به مدت ۱ دقیقه ورتکس شده و سپس نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت در دمای اتاق نگهداری شدند. پس از آن دوباره نمونه‌ها به مدت ۱ دقیقه ورتکس شده و سپس به مدت ۵ دقیقه در دور ۱۰۰۰۰ در دمای ۴ درجه سلسیوس سانتریفیوژ شدند. سپس قسمت رویی نمونه‌ها به آرامی برداشته شده، در لوله‌های درب‌دار در دمای ۲۰- درجه سلسیوس نگهداری شده و برای سنجش صفات بیوشیمیایی مانند فنل کل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی مورد استفاده قرار گرفت. استخراج عصاره میوه برای سنجش محتوی فلاونوئید و آنتوسیانین کل نیز بر اساس مطالعه (Hassanpour and Alizadeh, 2016) با کمی تغییر انجام شد. در این روش ۲/۰ گرم از نمونه پودر شده با ۵ میلی‌لیتر متانول ۸۵٪ (حاوی یک میلی‌لیتر HCl غلیظ) مخلوط شده و به مدت ۱ دقیقه ورتکس شد. پس از نگهداری نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق در دور ۱۰۰۰۰ به مدت ۱۵ دقیقه در

کل میوه توت‌فرنگی تحت تأثیر اثر نوع سامانه در سطح احتمال ۱ درصد قرار گرفتند درحالی‌که عرض میوه تحت تأثیر هیچکدام از فاکتورهای آزمایشی قرار نگرفت. همچنین نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر برهم‌کنش نوع سامانه و رقم بر صفات وزن، طول، عرض و عملکرد میوه معنی‌دار نبود (جدول ۲).

نتایج مقایسه میانگین نشان داد، طول میوه در سامانه قطره‌ای دارای بیش‌ترین میزان بود. همچنین کم‌ترین میزان طول میوه در سامانه DFT ثبت گردید (جدول ۳). گیاهانی که در شرایط کشت DFT رشد می‌کنند با کمبود اکسیژن در محلول غذایی مواجه می‌شوند و این کمبود مانع تنفس سلول‌های ریشه و منجر به کاهش رشد می‌گردد. همچنین با توجه به اینکه در پژوهش حاضر در سامانه DFT از لیوان‌های کوچک استفاده شده است، بنابراین فضا برای رشد گیاه توت‌فرنگی کافی نبوده و حجم ریشه‌های فعال نیز کم بود. در نتیجه بستر موجود در این لیوان‌ها بیش‌تر نقش نگهدارنده گیاه را داشته و جذب عناصر غذایی و آب از طریق ریشه‌های موجود در درون محلول در حال جریان در کانال‌ها صورت گرفته است. درحالی‌که در سامانه قطره‌ای هم حجم بستر زیاد هست و هم محلول غذایی از بالای بستر در اختیار گیاه قرار می‌گیرد. از این رو در این نوع سامانه بستر می‌تواند تا حدودی نقش نگهدارنده عناصر غذایی و در اختیار قرار دادن عناصر غذایی به گیاه را نیز داشته باشد و باعث رشد بهتر بوته‌های توت‌فرنگی شود. بنابراین در سامانه DFT به دلایل ذکر شده در فوق رشد بوته‌ها کم‌تر و عملکرد توت‌فرنگی‌های رشدیافته در سامانه DFT کم است (Tongaram, 2007). برخی پژوهش‌ها نشان می‌دهند که میانگین وزن میوه در سامانه کشت بستر با سامانه قطره‌ای به ترتیب نسبت به نمونه‌های موجود در سامانه هیدروپونیک NFT (همانند سامانه DFT از نوع بسته بوده ولی عمق جریان مواد غذایی نسبت به DFT کم‌تر است) و سامانه کشت خاک با آبیاری قطره‌ای حدود ۷۰٪ و ۱۸۱٪ بیش‌تر بود (Wiangsamut, 2017).

با ۱۹۰۰ میکروولتر DPPH مخلوط شد. پس از قرار دادن نمونه -ها به مدت ۳۰ دقیقه در تاریکی در دمای اتاق، جذب نمونه‌ها توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۱۷ نانومتر قرائت شده و بر اساس رابطه زیر درصد بازدارندگی محاسبه شد (Nakajima et al., 2004):

$$(1) \quad \text{درصد بازدارندگی} = (Ac-As)/Ac \times 100$$

که در این رابطه Ac و As به ترتیب جذب شاهد و جذب نمونه است.

تعیین محتوی آنتوسیانین کل میوه توت‌فرنگی

از روش حسن‌پور و علیزاده (Hassanpour and Alizadeh, 2016) برای اندازه‌گیری آنتوسیانین کل از روش اختلاف جذب در pH های مختلف استفاده شد. برای قرائت آنتوسیانین کل از دو طول موج ۵۲۰ و ۷۰۰ نانومتر استفاده شد. برای محاسبه آنتوسیانین کل از فرمول زیر استفاده شد:

$$(2) \quad \text{آنتوسیانین کل (mg/100g)} = (A/26900^a)(10^3)(449.2^b)(20^c)$$

10^3 = ضریب تبدیل

a = ضریب خاموشی سیانیدین ۳ گلوکزاید

b = وزن مولکولی سیانیدین ۳ گلوکزاید

c = درجه رقیق‌سازی

تجزیه آماری داده‌ها

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار انجام شد. داده‌ها به وسیله نرم‌افزار SAS تجزیه آماری شد و آزمون چند دامنه‌ای دانکن به منظور مقایسه میانگین تیمارها مورد استفاده قرار گرفت. همچنین نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel رسم شد.

نتایج و بحث

طول، عرض، وزن و عملکرد میوه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که وزن، طول، و عملکرد

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس اثر نوع سامانه کشت و نوع رقم بر برخی ویژگی‌های کمی میوه توت‌فرنگی.

Table 2. The ANOVA results of cultivation system and cultivar type effects on some quantitative traits of strawberry fruit.

منابع تغییرات Sources of variation	درجه آزادی df	وزن Weight	طول Length	میانگین مربعات Mean squares	
				عرض Width	عملکرد Yield
رقم Cultivar	1	0.12 ^{ns}	2.42 ^{ns}	0.46 ^{ns}	0.0025 ^{ns}
سامانه کشت Cultivation system	1	99.55 ^{**}	138.47 ^{**}	42.86 ^{ns}	3.86 ^{**}
رقم × سامانه کشت Cultivar × Cultivation system	2	4.37 ^{ns}	2.97 ^{ns}	5.32 ^{ns}	0.01 ^{ns}
خطا Error	12	2.23	4.83	2.20	0.085
ضریب تغییرات %CV	-	12.06	6.84	5.37	5.81

^{ns}, ^{**} و ^{*} به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد.
^{ns}, ^{**} and ^{*}: non-significant, significant at 1 and 5% probability levels, respectively

جدول ۳. اثر نوع سامانه کشت بر برخی صفات کمی میوه توت‌فرنگی.

Table 3. Effect of cultivation system on some quantitative traits of strawberry fruit.

تیمار Treatment	وزن میوه (گرم) Weight (g)	طول میوه (میلی‌متر) Fruit length (mm)	عرض میوه (میلی‌متر) Width fruit (mm)	عملکرد (گرم در بوته) Yield (g/plant)
سامانه قطره‌ای Drip system	15.480 ^a	36.213 ^a	30.52 ^a	256.69 ^a
سامانه DFT DFT system	9.576 ^b	32.063 ^b	27.60 ^a	88.77 ^b

در هر ستون، حروف غیرمشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌داری بین میانگین‌ها در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن است.
In each column, means followed by different letters are significantly different at $p < 0.05$ based on Duncan's test.

به ترتیب برابر با ۱۹/۴ و ۱۸/۵ گرم بود (Cantliffe et al., 2001). همچنین نتایج Jamshidzad (2016) نشان داد که نوع سامانه کشت به‌طور قابل توجهی بر وزن کل میوه خیار تأثیر داشت به طوری که بیش‌ترین وزن تک‌میوه در سامانه قطره‌ای اما بیش‌ترین وزن کل و تعداد میوه خیار در سامانه کشت آب‌کشت DFT مشاهده شد. نوع سامانه کشت تأثیر چشم‌گیری بر وزن کل میوه داشت ولی نوع رقم چندان مؤثر نبود که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی ندارد. شاید دلیل این عدم هم‌خوانی،

با توجه به نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، بیش‌ترین وزن میوه مربوط به سامانه قطره‌ای و کم‌ترین آن مربوط به سامانه DFT بود (جدول ۳). همچنین مقایسه میانگین‌ها نشان‌دهنده تفاوت بین سامانه‌ها بود به طوری که بیش‌ترین میزان عملکرد در سامانه قطره‌ای و کم‌ترین میزان آن مربوط به سامانه DFT بود (جدول ۳). نتایج پژوهشی نشان داد میانگین وزن میوه در گوجه‌فرنگی - های گیلاسی رشدیافته در سامانه قطره‌ای و سامانه شناور

می‌گیرد. نکته دیگری که می‌تواند منجر به رشد ضعیف بوته‌ها در سامانه DFT شود، ورود ترشحات ریشه به محلول غذایی است. در سامانه‌های بسته مانند DFT تنظیم محلول برگشتی و ترکیب محلول غذایی آن مهم بوده و اگر به‌درستی تنظیم نشود، تعادل عناصر غذایی به هم می‌خورد و در نتیجه غلظت برخی از عناصر نوسان زیادی داشته و رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، درحالی‌که در سامانه‌های باز مانند سامانه قطره‌ای چنین مشکلی وجود ندارد (da Silva et al., 2023).

TA و pH

بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) آثار ساده و برهمکنش نوع سامانه و رقم بر pH معنی‌دار نشد، درحالی‌که رقم تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ بر میزان TA داشت. نتایج نمودار مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۲) نشان داد که بیش‌ترین میزان TA مربوط به رقم سابیرینا و کم‌ترین میزان آن مربوط به رقم آلبیون بود. در پژوهشی مشخص شد که رقم تأثیر معنی‌داری بر ویژگی‌های کیفی میوه توت‌فرنگی داشت به‌طوری‌که رقم آلبیون بیش‌ترین میزان TA را نشان داد (Samec et al., 2016). همچنین در پژوهش دیگری مشخص شد که محتوای اسیدیته قابل‌تیترا تحت تأثیر نوع سامانه و رقم قرار گرفتند و محتوای اسیدیته قابل‌تیترا در سامانه قطره‌ای بیش‌تر بود (Miranda et al., 2014).

TSS

بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) اثر سامانه بر TSS میوه توت‌فرنگی در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار بود. با توجه به نتایج مقایسه میانگین (شکل ۳) بیش‌ترین میزان TSS مربوط به سامانه DFT و کم‌ترین آن مربوط به سامانه قطره‌ای بود. احتمال دارد با توجه به این‌که رشد میوه‌ها در سامانه DFT کم‌تر بوده است محتوای آب کم‌تری در درون میوه‌های رشدیافته در سامانه DFT وجود دارد (به دلیل اکسیژن محلول کم، جذب عناصر غذایی و آب به وسیله ریشه‌ها کاهش یافته است که در نتیجه

متفاوت‌بودن گیاه مورد استفاده، طراحی متفاوت سامانه‌ها و گلدان‌های استفاده‌شده در سامانه DFT، نوع محلول غذایی و شرایط متفاوت مکان پرورش باشد. لازم به ذکر است که اجرای سامانه DFT در پژوهش‌های مختلف از لحاظ اندازه کانال‌ها و گلدان‌های استفاده شده متفاوت بوده (da Silva et al., 2023) و این باعث تفاوت نتایج پژوهش‌ها در برخی از موارد شده است. (Darai and Alamzadeh Ansari (2021) به این نتیجه رسیدند که سامانه کشت بر طول میوه و عملکرد بوته خیار اثر داشت و اثر رقم بر طول میوه و عملکرد بوته میوه خیار اختلاف معنی‌داری ایجاد کرد. نتایج این بررسی نشان داد که سامانه کشت آب‌کشت هواکشت تغییر یافته دارای عملکرد بیش‌تری نسبت به سامانه آب‌کشت قطره‌ای در شرایط گلخانه شد. بر اساس پژوهش‌های پیشین، مشخص شده است که سامانه DFT برای محصولات تک‌برداشتی بیش‌تر مناسب است (da Silva et al., 2023). همچنان‌که در پژوهش حاضر نیز مشاهده شد که این سامانه برای توت‌فرنگی که برداشت تدریجی دارد، مناسب نبوده و عملکرد کمی را نشان داده است. همچنین فاصله بین گیاهان در حین طراحی سامانه نیز بر رشد و عملکرد گیاهان تأثیرگذار هست (da Silva et al., 2023) که فواصل موجود در سامانه استفاده‌شده در پژوهش حاضر کم‌تر بوده و باعث رشد و عملکرد کم‌تر توت‌فرنگی شده است. در ضمن حساسیت به محتوی اکسیژن حل‌شده در محیط ریشه بسته به گونه گیاهی متفاوت است که گونه توت‌فرنگی حساسیت بیش‌تری به محتوی اکسیژن حل‌شده در محیط ریشه داشته و منجر به رشد ضعیف گیاهان شده است. همچنین در سامانه DFT نسبت به سامانه قطره‌ای دمای محلول غذایی در درون کانال‌ها به‌ویژه در بعدازظهرها بیش‌تر افزایش می‌یابد و وجود دمایی زیاد در سامانه DFT فراهمی اکسیژن محلول را در منطقه ریشه کاهش می‌دهد. بنابراین نبود اکسیژن جذب آب و مواد غذایی را کاهش داده و این امر باعث کاهش رشد ریشه و در نتیجه کاهش عملکرد می‌شود. همچنین در فصول گرم سال غلظت اکسیژن محلول بیش‌تر کاهش یافته و رشد نیز بیش‌تر تحت تأثیر قرار

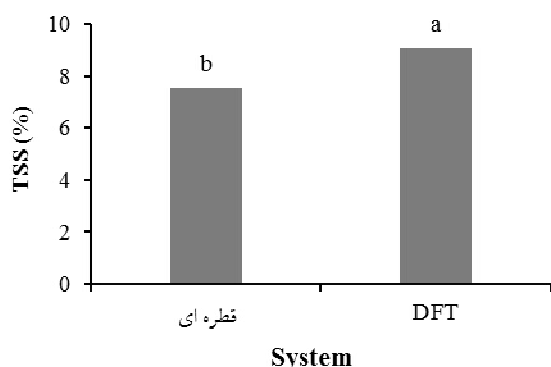
جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس اثر نوع رقم و سامانه کشت بر برخی صفات بیوشیمیایی میوه توت‌فرنگی.

Table 4. ANOVA results of variety and cultivation system type effects on some biochemical traits of strawberry fruit.

منابع تغییرات Sources of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares		
		پی‌اچ pH	اسیدیته قابل تیتراژ Titratable acidity	مواد جامد محلول Total soluble solids
رقم Cultivar	1	0.008 ^{ns}	0.09*	0.22 ^{ns}
سامانه کشت Cultivation system	1	0.03 ^{ns}	0.018 ^{ns}	9.45*
رقم × سامانه کشت Cultivation × Cultivar system	2	0.02 ^{ns}	0.004 ^{ns}	4.95 ^{ns}
خطا Error	12	0.01	0.01	1.25
ضریب تغییرات %CV	-	3.19	19.50	13.48

^{ns}, ** و * به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد.

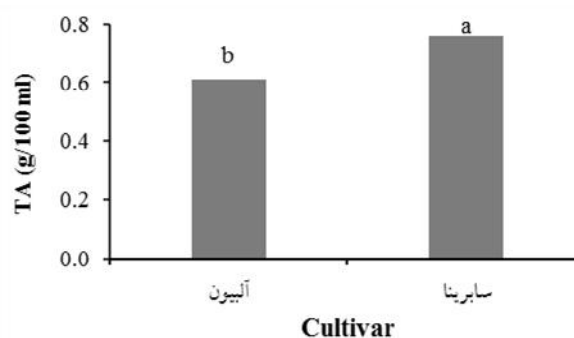
^{ns}, ** and *: non-significant, significant at 1 and 5% probability levels, respectively



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر نوع سامانه کشت بر میزان مواد جامد محلول (TSS) میوه توت‌فرنگی؛ حروف غیر مشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد در بین میانگین‌ها بر اساس آزمون دانکن است.

Fig. 3. Mean comparison of cultivation system type effect on the total soluble solids (TSS) content in strawberry fruit; Means followed by dissimilar letters are significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

محلول در سامانه که دارای اختلاف ارتفاع با کف مسیره‌های هادی محلول است، در زمان توقف سامانه و خاموشی آن، مسیره‌های هدایت محلول غذایی کاملاً خالی از آب یا محلول



شکل ۲. مقایسه میانگین اثر نوع رقم بر میزان اسیدیته قابل تیتراژ (TA) میوه توت‌فرنگی؛ حروف غیر مشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد بین میانگین‌ها بر اساس آزمون دانکن است.

Fig. 2. Mean comparison of cultivar type effect on the titratable acidity (TA) content in strawberry fruit; Means followed by dissimilar letters are significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

آب کم‌تری جذب میوه‌ها خواهد شد). بنابراین محتوی مواد جامد محلول در میوه‌های این سامانه افزایش می‌یابد. همچنین کمبود اکسیژن در سامانه DFT (به دلیل تعبیه قسمت سرریز

جدول ۵. تجزیه واریانس اثر نوع رقم و سامانه کشت بر ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، فنل، فلاونوئید و آنتوسیانین کل میوه توت‌فرنگی.

Table 5. ANOVA results of variety and cultivation system type effects on some biochemical traits of strawberry fruit.

منابع تغییرات Sources of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares			
		ظرفیت آنتی‌اکسیدانی Antioxidant capacity	فنل کل Total phenol	فلاونوئید کل Total flavonoid	آنتوسیانین کل Total anthocyanin
رقم Cultivar	1	0.002 ^{ns}	0.003 ^{ns}	1.78 ^{ns}	12.08*
سامانه کشت Cultivation system	1	0.001 ^{ns}	5.29*	12.45*	1.45 ^{ns}
رقم × سامانه کشت Cultivar × Cultivation system	2	0.005 ^{ns}	0.009 ^{ns}	2.43 ^{ns}	2.09 ^{ns}
خطا Error	12	0.02	1.16	3.45	3.07
ضریب تغییرات %CV	-	5.81	13.50	10.66	8.55

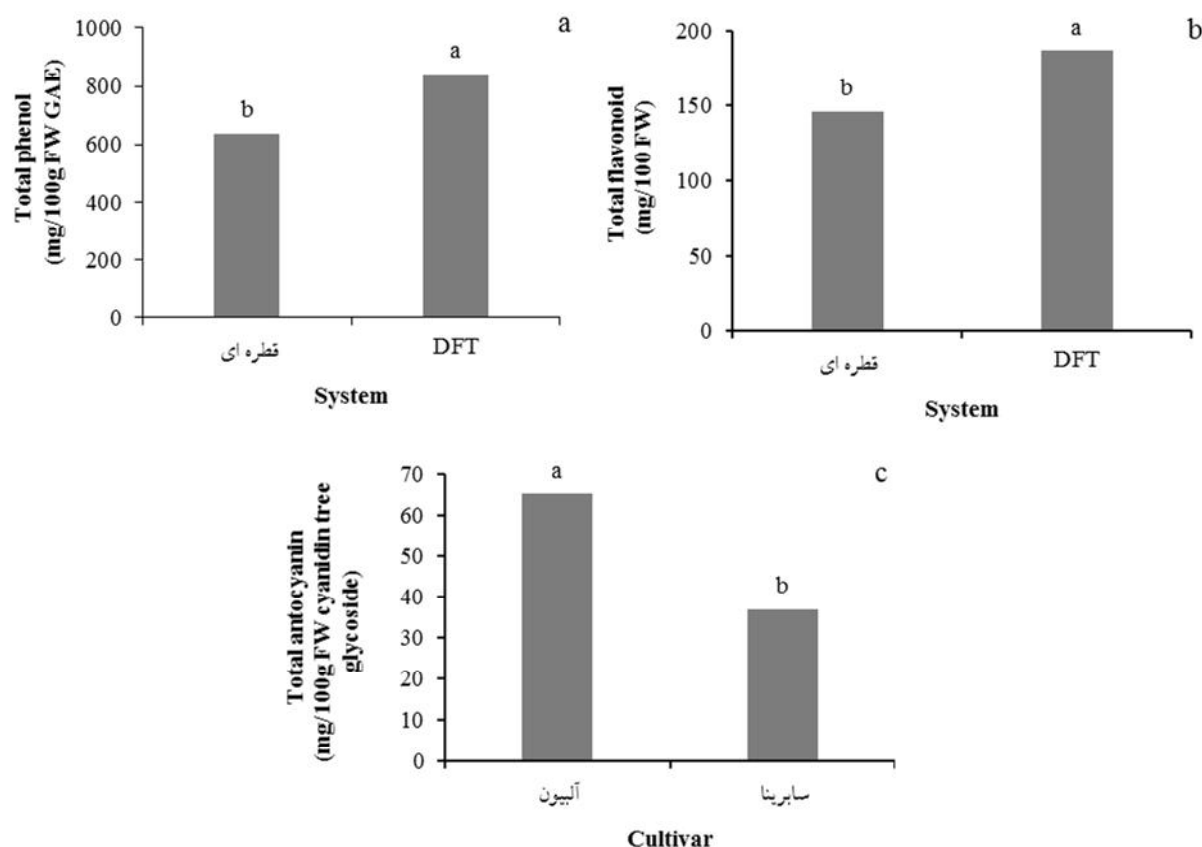
^{ns}، ** و * به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد.
^{ns}، ** and *: non-significant, significant at 1 and 5% probability levels, respectively

فلاونوئید کل داشت، ولی اثر برهم‌کنش نوع سامانه و رقم و اثر رقم بر محتوی فلاونوئید کل معنی‌دار نبود. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۴-b) نیز نشان داد که بیش‌ترین محتوی فلاونوئید کل مربوط به سامانه DFT و کم‌ترین میزان آن مربوط به سامانه قطره‌ای بود. همچنین براساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۵)، نوع سامانه و برهم‌کنش نوع سامانه و رقم تأثیر معنی‌داری بر محتوی آنتوسیانین کل نداشتند. ولی رقم تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ بر میزان آنتوسیانین کل داشت، به طوری که مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۴-c) نشان داد که بیش‌ترین محتوی آنتوسیانین کل در رقم آلبیون کشت‌شده در سامانه قطره‌ای مشاهده شد. در حالی که کم‌ترین محتوی آنتوسیانین کل مربوط به رقم ساپرینا بود.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که محتوی ترکیبات فنلی (مانند فنل و فلاونوئید کل) در سامانه DFT نسبت به سامانه قطره‌ای افزایش دارد. احتمال دارد با توجه به این‌که در سامانه DFT به دلیل حجم کم بستر و همچنین به دلیل جذب عناصر غذایی به‌طور مستقیم به وسیله ریشه‌های موجود در کانال، بستر

غذایی نمی‌شوند) باعث رشد کم‌تر ریشه‌ها و جذب کم‌تر محلول و آب در آن‌ها می‌شود و این باعث افزایش مواد جامد محلول می‌گردد. در سامانه DFT کنترل مداوم مقدار عناصر غذایی برای گیاهان دشوار است. بنابراین احتمال دارد که میزان EC محلول با گذشت زمان افزایش بیش‌تری یابد و معمولاً در میوه‌های تولیدشده تحت EC زیاد افزایش مواد قندی و طعم میوه نیز مشاهده می‌شود (Miranda et al., 2014).

ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، محتوی فنل، فلاونوئید، آنتوسیانین کل نتایج تجزیه واریانس نشان داد که آثار ساده و برهم‌کنش نوع سامانه و رقم بر ظرفیت آنتی‌اکسیدانی میوه توت‌فرنگی معنی‌دار نبود. براساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۵)، اثر سامانه بر محتوی فنل کل در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار شد. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۴-a) نشان داد که بیش‌ترین محتوی فنل کل مربوط به سامانه DFT بود و کم‌ترین محتوی آن در سامانه قطره‌ای مشاهده شد. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۵) نشان داد که سامانه کشت تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ بر محتوی



شکل ۴. مقایسه میانگین اثر نوع سامانه کشت بر محتوی فنل کل (a) و محتوی فلاونوئید کل (b) ، و اثر نوع رقم بر محتوی آنتوسیانین کل (c) میوه توت‌فرنگی؛ حروف غیرمشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد بین میانگین‌ها بر اساس آزمون دانکن است.

Fig. 4. Mean comparison of cultivation system type effect on total phenol content (a) and total flavonoid (b), and cultivar type effect on total anthocyanin content (c) of strawberry fruit; Means followed by dissimilar letters are significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

فیزیوشیمیایی ارقام توت‌فرنگی (آلبیون، کامارزا، فستیوال و اسوگرند) تأثیرگذار بودند (Miranda et al., 2014). Darai and Alamzadeh Ansari (2021) با بررسی تأثیر سامانه‌های کشت مختلف بر گیاه خیار دریافتند که سامانه هواکشت تغییر یافته از لحاظ غلظت مواد فنلی دارای برتری‌هایی نسبت به سامانه باز بود. به عبارت دیگر بخش هوایی گیاه توسعه بیشتری در سامانه باز داشته اما سامانه بسته از نظر طعم و میزان فنل بیشتر از سامانه باز بود یا به عبارت دیگر کیفیت میوه افزایش یافت. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که محتوی آنتوسیانین کل تحت تأثیر نوع سامانه کشت قرار نگرفته است ولی نوع رقم تأثیر معنی‌داری بر محتوی آنتوسیانین کل داشت. نتایج پژوهش‌های پیشین نیز نشان داده است که ژنوتیپ و رقم به‌عنوان فاکتورهای

تنها نقش‌نگدارنده گیاه را داشته و نقشی در نگهدارنده عناصر غذایی هر چند به مقدار کم نداشته باشد. ولی در سامانه قطره‌ای به دلیل حجم زیاد بستر و تغذیه از بالا، بستر می‌تواند تا حدودی نقش نگهدارنده عناصر غذایی و در اختیار قرار دادن آن‌ها به گیاه را نیز داشته باشد. لذا این تفاوت‌ها می‌تواند نقش مؤثری در رشد و کیفیت محصول و متابولیت‌های ثانویه میوه داشته باشد (Miranda et al., 2014). همچنین در سامانه DFT وجود کمبود اکسیژن حل‌شده در محیط ریشه می‌تواند باعث ایجاد تنش گردد که تنش حاصله می‌تواند سبب افزایش متابولیت‌ها ثانویه (از جمله ترکیبات فنلی) شود (Rouphael and Colla, 2005). در پژوهشی مشخص گردید که نوع سامانه‌های کشت بر محتوی ترکیبات فنلی و ویژگی‌های

سامانه کشت قرار گرفت. همچنین در بررسی انتخاب رقم می-توان نتیجه گرفت که رقم سابرینا بیش‌ترین ویژگی‌های کمی و کیفی را در سامانه قطره‌ای داشت.

تشکر و سپاسگزاری

در انجام این پژوهش، حمایت مالی خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نشده است.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

اصلی تغییر آنتوسیانین‌ها و میزان قند میوه‌های توت‌فرنگی می‌باشند (Crespo et al., 2010) و همچنین رنگ توت‌فرنگی تحت تأثیر تجمع آنتوسیانین‌ها و ترکیبات فنلی به وجود می‌آید (Samec et al., 2016).

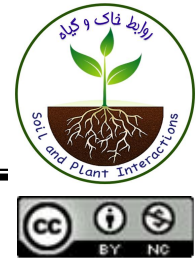
نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که ویژگی‌های کمی و کیفی توت‌فرنگی تحت تأثیر نوع رقم و سامانه قرار گرفت. بر اساس نتایج بیش‌ترین میزان شاخص‌های کمی میوه توت‌فرنگی (طول میوه، عرض میوه، وزن و عملکرد میوه) در رقم سابرینا کشت‌شده در سامانه قطره‌ای مشاهده شد. به‌طور کلی نتایج حاصله نشان داد که بیش‌تر ویژگی‌های کمی و کیفی میوه توت‌فرنگی تحت تأثیر

منابع مورد استفاده

- Akhatou, L., Fernandez, A., 2014. Influence of cultivar and culture system on nutritional and organoleptic quality of strawberry. *Sci. Hort.* 178(3), 259–265.
- Bancha, W., Manoch, K., Chaiwat, M., 2017. Yield, fruit quality, and growth of cantaloupe varieties grown in hydroponic system and drip irrigation systems of substrate and soil culture. *Int. J. Agr. Technol.* 13(71), 1381–1394.
- Cantliffe, D.J.N., Shaw, E., Jovicich, J.C., Rodriguez, I., Secker Karchi, Z., 2001. Passive ventilated high roof greenhouse production of vegetables in a humid mild winter climate. *Acta Hort.* 559, 515–520.
- Crespo, P., Bordonaba, J.G., Terry, L.A., Carlen, C., 2010. Characterization of major taste and health-related compounds of four strawberry genotypes grown at different Swiss production sites. *Food Chem.* 12, 16–24.
- Alamzadeh Ansari, N., Darai, H., 2022. Comparison of open and combined closed hydroponic systems on water productivity, nutrient use efficiency yield and fruit quality of cucumber. *J. Irrig. Sci. Eng.* [https://doi:10.22055/jise.2022.41963.2042](https://doi.org/10.22055/jise.2022.41963.2042). (In Persian with English abstract)
- Darai, H., Alamzadeh Ansari, N., 2021. The effect of two hydroponic cultivation systems on some morphological and biochemical characteristics of three greenhouse cucumber hybrids. In: *Proceedings of 12th Congress of Horticultural Sciences*, September, 5-8, Rafsanjan, Iran. (In Persian with English abstract)
- da Silva, M.G., Costa, I.P., Alvez, L.S., Soares, T.M., Gheyi, H.R., 2023. Coriander cultivation under different nutrient solution depths in hydroponic systems: a comparison between conventional DFT and adapted DFT with PVC pipes. *Water Res. Irrig. Manag.* 123(3), 29–43.
- Du, G., Li, M., Ma, F., Liang, D., 2009. Antioxidant capacity and the relationship with polyphenol and vitamin C in *Actinidia* fruits. *Food Chem.* 113(2), 557–562.
- Erkan, M., Selcuk, N., 2015. The effects of 1-MCP treatment on fruit quality of medlar fruit (*Mespilus germanica* L. cv. Istanbul) during long term storage in the palliflex storage system. *Postharvest Biol. Technol.* 100, 81–90.
- Gruda, N., 2009. Do soilless culture systems have an influence on product quality of vegetables? *J. Appl. Bot. Food Qual.* 82, 141–147.
- Jalili Marandi, R., 2006. *Small Fruits (Grape, Strawberry, Kiwifruit, Raspberry, Gooseberry, Currant and Cornelianberry)*, Second ed., Urmia Jahade Daneshgahi Press, Urmia, Iran. (In Persian)
- Jamshidzad, M., 2016. *Investigating Two Systems of Hydroponic Cultivation Techniques (Deep Cultivation and Drip Cultivation) on The Growth and Development of Two Greenhouse Cucumber Varieties (Karim and 225RZ)*. MSc Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
- Hassanpour, H., Alizadeh, S., 2016. Evaluation of phenolic compound, antioxidant activities and antioxidant enzymes of barberry genotypes in Iran. *Sci. Hort.* 200, 125–131.
- Kashi, A., Hekmati, J., 1991. *Growing Strawberries*, First ed., Siahtiri Press, Tehran. (In Persian)

15. Klamkowski, K., Treder, W., 2006. Morphological and physiological responses of strawberry plants to water stress. *Agr. Conspec. Sci.* 71, 159–165.
16. Keutgen, A.J., Pawelzik, E., 2007. Cultivar-dependent cell walls modification of strawberry fruit under NaCl salinity stress. *J. Agr. Food Chem.* 55(18), 7580–7585.
17. Khan, F.A.A., 2018. A review on hydroponic greenhouse cultivation for sustainable agriculture. *Int. J. Agr. Environ. Food Sci.* 2(2), 59–66.
18. Miranda, F.R., Dasilva, F.S., Dossantos, F.S.R., Dasilva, C.D.F.B., Rossetti, G., 2014. Production of strawberry cultivars in closed hydroponic systems and coconut fibre substrate. *Rev. Ciênc. Agron.* 45(4), 833–841.
19. Nakajima, J.I., Tanaka, I., Seo, S., Yamazaki, M., Saito, K., 2004. LC/PDA/ESI- MS profiling and radical scavenging activity of anthocyanins in various berries. *J. Biomed Biotechnol.* 5, 241–247.
20. Rounaghi, A., Maftoon, M., 2006. *Hydroponic*, First ed., Shiraz University publishing Center, Shiraz. (In Persian)
21. Roupghael, Y., Colla, G., 2005. Radiation and water use efficiencies of greenhouse Zucchini squash in relation to different climate parameters. *Eur. J. Agron.* 23(2), 183–194.
22. Šamec, D., Maretić, M., Lugarić, I., Mešić, A., Salopek-Sondi, B., Duralija, B., 2016. Assessment of the differences in the physical, chemical and phytochemical properties of four strawberry cultivars using principal component analysis. *Food Chem.* 194, 828–834.
23. Sato, S., Sakaguchi, S., Furukawa, H., Ikeda, H., 2006. Effects of NaCl application to hydroponic nutrient solution on fruit characteristic of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Sci. Hortic.* 109(3), 248–53.
24. Schmutz, Z., Loeu, F., Liebisch, F., Graber, A., Mathis, A., Griessler Bulc, T., Junge, R., 2016. Tomato productivity and quality in aquaponics: Comparison of three hydroponic methods. *Water* 8(11), 533–555.
25. Shadmehri, F., Chalovi, V., Sadeghy, H., 2019. Effect of planting date on yield and yield components of three strawberry cultivars cultivated without soil in Sari weather conditions. *J. Sci. Technol. Greenhouse Cult.* 9(4), 15–26.
26. Shin, S.W., Ghimeray, A.K., Park, C.H., 2014. Investigation of total phenolic, total flavonoid, antioxidant and allyl isothiocyanate content in the different organs of *Wasabi japonica* grown in an organic system. *Afr. J. Tradit. Complement. Altern. Med.* 3(11), 38–45.
27. Sonneveld, C., Voogt, W., 2009. Plant nutrition in future greenhouse production. In: Sonneveld, C., Voogt, W. (Eds.), *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*. Springer, Dordrecht, pp. 393–403.
28. Tongaram, D., 2007. *Soilless Culture*, First ed., Dee Publishers, Bangkok.
29. Wang, S.Y., Zheng, W., Galletta, G.J., 2002. Cultural system affects fruit quality and antioxidant capacity in strawberries. *J. Agr. Food Chem.* 50(22), 6534–6542.
30. Wang, S.Y., Lin, H.S., 2003. Compost as a soil supplement increases the level of antioxidant compounds and oxygen radical absorbance capacity in strawberries. *J. Agr. Food Chem.* 51(23), 6844–50.
31. Wiangsamut, B., 2017. Yield, fruit quality, and growth of 4 cantaloupe varieties grown in hydroponic system and drip irrigation systems of substrate and soil culture. *Int. J. Agr. Technol.* 13(7), 1381–1394.
32. Yamazaki, K., 1982. *Nutrient Solution Culture*, Pak-kyo Co., Tokyo.



Effect of Azolla Culture Medium on Biomass, Nutrient and Protein Concentrations of Azolla and Its Application as a Nutrient Supply for Bell Pepper

M. Fatahi Vanani¹ and B. Khalili* 

(Received: 3 May 2023; Accepted: 12 August 2023)

Abstract

Azolla extracts are biodegradable and non-polluting to the environment, and because of its unique composition, it was subjected to integrated biorefineries for organic fertilizer and plant growth stimulants production. Here we investigated the effect of media culture on productivity and chemical composition of *Azolla filiculoides* and *Azolla Caroliniana* and then application of Azolla extract as an organic fertilizer. This research was conducted in the two studies at the Soil-Plant Interaction Research Center of Isfahan University of Technology. The Azolla culture media treatments showed significant effect ($p < 0.05$) on Azolla iron and zinc concentration. In the both Azolla species, addition of 20% of sulfur and phosphorus to the culture media significantly increased concentrations of nitrogen and acidic, alkaline, polar, aromatic and aliphatic amino acids. In the second study, Johnson and half Johnson media contained 5% and 10% Azolla extract showed highest fruit yield (i.e., fresh and dry weights) and concentrations of iron, zinc and nitrogen in the fruit, shoot and root of bell pepper, in which some of them were significant ($p < 0.05$). In total, our results showed that Azolla culture media composition may change quality and quantity of the Azolla extract and application of the extract may led to biofortification of bell pepper significantly.

Keyword: *Azolla filiculoides*, *Azolla Caroliniana*, Fe and Zn concentrations, Protein and amino acids, Bell pepper, Azolla extract.

Background and Objective: Micronutrient malnutrition or hidden hunger remains a major global challenge for human health and wellness. Being free floating aquatic plants, *Azolla* can be produced independently of arable lands. The aquatic fern *Azolla* is a special case among free-floating aquatic plants because it has evolved a symbiosis with the cyanobacterium *Nostoc azollae*, which fixes atmospheric nitrogen (N_2). *Azolla* ferns occur across many continents and across various climates. Using *Azolla* extract as a biofertilizer to replace artificial nitrogen fertilizer reduces pollution by nitrogen losses of various cultivation and provides added value to farmers (Brouwer, 2017; Brouwer et al., 2018). Here, we investigated the effect of media culture on productivity and chemical composition of *Azolla filiculoides* and *Azolla Caroliniana* and then application of *Azolla* extract as an organic fertilizer.

Methods: We tested two hypotheses: 1) *Azolla* culture medium could affect biomass, nutrient and protein

1- Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran.

* Corresponding author, Email: bkhalili@iut.ac.ir

concentrations of Azolla, and 2) Azolla extract application may improve fruit quality and cover some required nutrients of plant. The treatments of first study included a) IRR12 culture media (the standard Azolla medium) (control), b) IRR12 culture media + 10% extra sulfur concentration, c) IRR12 culture media + extra 20% sulfur concentration, d) IRR12 culture media + 10% extra phosphorus concentration, e) IRR1 culture medium + 20% extra phosphorus concentration, f) IRR12 + 10% sulfur + 20% phosphorus concentration, and g) IRR12 + 20% extra sulfur + 20% extra phosphorus concentrations. The second study treatments were a) Johnson media (control), b) Johnson media + 5% Azolla extract, c) Johnson media + 10% Azolla extract, d) half Johnson media + 5% Azolla extract, and e) half Johnson media + 10% Azolla extract. Analysis of variance, comparison of the Azolla culture media and application of the extract in bell pepper growing media were done by completely randomized design with a one-way treatment structure using SAS 9.0 software.

Results: The results of the first study showed that the highest concentrations of iron and zinc in the third generation of *Azolla filiculoides* were detected in the IRR12 + 10% sulfur + 20% phosphorus culture media and the highest concentrations of zinc in the first and third generation of *Azolla Caroliniana* and the first generation of *Azolla filiculoides* were detected in the IRR12 + 20% sulfur culture media. The IRR12 + 20% sulfur + 20% phosphorus culture media treatment increased concentrations of nitrogen and acidic, alkaline, polar, aromatic and aliphatic amino acids in the both Azolla species. Although, the highest dry weight yield of the both Azolla species was observed in the IRR12 + 10% phosphorus treatment. In the second study, Johnson and half Johnson media contained 5% and 10% Azolla extract showed highest fruit yield (i.e., fresh and dry weights) and concentrations of iron, zinc and nitrogen in the fruit, shoot and root of bell pepper, in which some of them were significant ($p < 0.05$).

Conclusions: The fast-growing, nitrogen fixing, aquatic fern Azolla could be a promising novel crop for the production of organic and eco-friendly fertilizer, due to its high protein content, favorable amino acid profile and micronutrient contents.

References:

1. Brouwer, P., 2017. Turning The Aquatic Weed Azolla into a Sustainable Crop. PhD Thesis, Utrecht University, The Netherlands.
2. Brouwer, P., Schluepmann, H., Nierop, K.G.J., Elderson, J., Bijl, P.K., van der Meer, I., de Visser, W., Reichart, G.J., Smeeckens, S., van der Werf, A., 2018. Growing Azolla to produce sustainable protein feed: the effect of differing species and CO₂ concentrations on biomass productivity and chemical composition. *J. Sci. Food Agric.* 98, 4759–4768. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9016>.



تأثیر نوع محیط کشت بر زیست توده، غلظت عناصر غذایی و محتوی پروتئین آزولا، و کاربرد عصاره آن در تغذیه فلفل دلمه‌ای

محمد فتاحی وانانی^۱ و بنفشه خلیلی*

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۲۱)

چکیده

عصاره آزولا ترکیبی تجزیه پذیر و غنی از عناصر غذایی و ترکیب شیمیایی و بدون ترکیبات آلوده کننده محیط زیست است، بنابراین در سال‌های اخیر تبدیل آزولا به کود آلی محرک رشد گیاه مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش تأثیر ترکیب شیمیایی محیط کشت بر عملکرد و ترکیب شیمیایی آزولا فیلیکلوئیدس و آزولا کارولینایا و کاربرد عصاره آزولا به عنوان کود آلی در محیط کشت فلفل دلمه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. این پژوهش در مرکز پژوهشی روابط خاک و گیاه دانشگاه صنعتی اصفهان انجام گرفت. نتایج نشان داد تیمارهای محیط کشت آزولا تأثیر معنی داری ($p < 0.05$) بر غلظت آهن و روی دو گونه آزولا داشته‌اند. همچنین تیمار افزایش ۲۰٪ گوگرد و فسفر به محیط کشت آزولا غلظت آمینواسیدهای آلیفاتیک و آروماتیک دو گونه آزولا را به طور معنی داری نسبت به شاهد افزایش داده است. از سوی دیگر نتایج مطالعه دوم نشان داد تیمارهای کاربرد ۵ و ۱۰ درصد عصاره آزولا در محیط کشت جانسون و نیم جانسون بیشترین عملکرد میوه و غلظت آهن، روی و پروتئین را در میوه، شاخصاره و ریشه فلفل دلمه‌ای نشان داده‌اند اگر چه تنها در برخی موارد این افزایش از لحاظ آماری معنی دار ($p < 0.05$) بود. به طور کلی، ترکیب محیط کشت آزولا ممکن است بر کمیت و کیفیت آزولا تأثیرگذار باشد و کاربرد عصاره غنی آزولا می‌تواند موجب غنی‌سازی زیستی در فلفل دلمه‌ای شود.

واژه‌های کلیدی: آزولا فیلیکلوئیدس، آزولا کارولینایا، آهن و روی، پروتئین و آمینواسیدها، فلفل دلمه‌ای، عصاره آزولا.

مقدمه

از منظر کشاورزی پایدار این روش‌ها دیگر نمی‌تواند گزینه سودمندی باشد (Bleakley and Hayes, 2017). پروتئین یکی از مواد اصلی در تغذیه انسان و دام است که با توجه به روند افزایش جمعیت، محدودیت تولیدات کشاورزی و تمرکز جغرافیایی تولید گیاهان پروتئینی، در آینده دچار کمبود خواهد

علی‌رغم افزایش بیش از دو برابری جمعیت جهان در نیم‌قرن گذشته، به کارگیری روش‌های نوین کشاورزی و افزایش درآمد سرانه باعث کاهش گرسنگی در سراسر جهان شده است. با این حال با توجه به آثار مخرب زیست محیطی کشاورزی فشرده،

۱- گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: bkhalili@iut.ac.ir

شد. بنابراین جایگزینی منابع جدید پروتئینی به جای منابع سنتی مانند سویا و همچنین روش‌های جدید تولید به‌ویژه در مناطق معتدل لازم است تا نیازهای پروتئین پیش‌بینی‌شده را تأمین نموده و تقاضای مصرف‌کنندگان را برآورده سازد (Bleakley and Hayes, 2017, Brouwer et al., 2018). جلبک‌های دریایی و ریزجلبک‌ها با توجه به مشخصات آمینواسیدی مطلوب و سطوح پروتئینی مشابه با منابع سنتی پروتئین مانند سویا، گوشت، تخم مرغ و شیر به‌عنوان یک منبع پروتئینی جدید و ماندگار در نظر گرفته می‌شوند (Bleakley and Hayes, 2017, Macartain et al., 2007).

آزولا نوعی سرخس شناور آزاد متعلق به خانواده تک‌هسته‌ای *Azollaceae* است و دارای هفت گونه و سه زیرگونه است (Katole et al., 2017). به‌طور گسترده در مناطق گرم و مرطوب، حوضچه‌ها، آبگیرها و کانال‌های دارای آب راکد رشد می‌کند و به‌عنوان محصولی جدید و امیدوارکننده در تولید خوراک دام و غذا با توجه به رشد سریع و محتوای پروتئینی بالا و همچنین مشخصات آمینواسیدی مطلوب نسبت به سویا، مطرح شده است (Becerra et al., 1995, Brouwer et al., 2018). مورفولوژی آزولا متفاوت از سایر سرخس‌هاست. به‌ویژه تفاوت در ساختار برگ آن باعث ایجاد محیطی مطلوب برای همزیستی با سیانوباکتر *آنابنا* شده است. در نتیجه همزیستی سیانوباکتر *آنابنا* و آزولا، این سرخس قادر به تثبیت نیتروژن مولکولی است (Carrapico, 2010). مقدار تثبیت نیتروژن در آزولا ۰/۱۷-۰/۱۵ میلی‌گرم نیتروژن بر ساعت در هر گرم زیست‌توده خشک است که به‌طور چشم‌گیری از نیتروژن تثبیت‌شده در غده‌های موجود در ریشه سویا با مقدار ۰/۰۸ میلی‌گرم بر ساعت در هر گرم زیست‌توده خشک، بیش‌تر است (Brouwer et al., 2018).

آزولا به‌عنوان گیاه آبی در سال ۱۹۸۶ به منظور انجام پژوهش‌های مربوط به ظرفیت تثبیت نیتروژن، واردات آزولا از فیلیپین به بندر انزلی در شمال استان گیلان را آغاز کرد. در مدت زمان کوتاهی آزولا در شمال ایران پخش شد (Delnavaz and Azimi, 2009). آزولا به‌عنوان گیاه آبی سرشار از پروتئین (۳۷-۲۰ درصد وزن خشک) معرفی شده است (Katole et al., 2017). برآورد مواد معدنی مختلف آزولا نشان می‌دهد آزولا حاوی ۸ درصد ماده خشک، ۲۴/۶۱-۲۱/۴ درصد پروتئین خام، ۱۵-۱۲/۷ درصد فیبر خام، ۴۷/۰۸-۴۳/۸ درصد فیبر شوینده طبیعی^۱ (NDF)، ۳۶/۰۸ درصد فیبر شوینده اسیدی^۲ (ADF)، ۳/۸ درصد عصاره اتیلن، ۴/۱ درصد نشاسته و ۱۵/۹ درصد خاکستر کل بر اساس ماده خشک است (Katole et al., 2017). رشد جلبک‌ها تابعی از شدت نور، چگونگی جذب مواد مغذی، افزایش pH با جذب کربن محیط و انباشتگی متابولیت‌های سلولی است. علاوه بر نور، CO₂ و pH، نوع و غلظت مواد مغذی یکی از عوامل نرخ رشد متفاوت در گونه‌های مختلف ریز جلبک است (Macartain et al., 2007). به‌طور کلی شرایط رشد و تولید آزولا تفاوت چندانی با جلبک‌های آبی ندارد. بر اساس پژوهش‌های سینگ (۱۹۷۷)، آزولا توانایی زنده‌ماندن در محدوده گسترده‌ای از دما را داراست اما دمای بهینه برای بیش‌تر گونه‌ها در دامنه ۱۸-۲۸ درجه سلسیوس است. همچنین آزولا توانایی زنده‌ماندن در دامنه وسیعی از pH (۱۰-۳/۵) را دارد (Singh, 1977). پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد تغییرات زیاد ترکیبات

باوجود این‌که گونه آزولا *فیلیکلونیدس* در ایران به‌عنوان یک گونه شناخته شده مطرح است و به‌نظر می‌رسد گونه‌های دیگر آزولا نیز در برخی مناطق ایران یافت شوند اما هیچ‌گونه‌ای از آزولا در ایران به‌عنوان گونه بومی ثبت نشده است

۱. Neutral detergent fibre
2. Acid detergent fibre

خاک باعث کاهش چگالی ظاهری و pH خاک، افزایش گنجایش نگهداری آب، کربن آلی، غلظت نیتروژن آمونیومی، نترات، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم خاک و کاهش مقدار شوری خاک از ۳۵ به ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر شده است (Raof et al., 2006, Raja et al., 2012).

پژوهش‌ها در مورد تأثیر عصاره آزولا بر عملکرد رشد گیاه نخودفرنگی نشان می‌دهد استفاده از عصاره ۲۰ درصد آزولا به صورت محلول‌پاشی برگ، باعث افزایش معنی‌داری در مقدار وزن تازه، وزن خشک، طول ساقه، طول ریشه و درصد جوانه‌زنی شده است (Bindhu, 2013). کاربرد عصاره آزولا و برخی از جلبک‌های سبز آبی بر تولید، کیفیت و کمیت میوه زردآلو تأثیرگذار بوده است (Taha and El-Shahat, 2017). همچنین کاربرد آزولا تازه به همراه کمپوست در بستر کاشت گیاه لوبیای فرانسوی باعث افزایش معنی‌داری در مقدار عملکرد غلاف، درصد جوانه‌زنی، قدرت نهال و مقدار زیست‌توده این گیاه شده است (Tejaswini et al., 2015). کاربرد کود زیستی آزولا فیلیکولئیدس باعث افزایش تعداد برگ، افزایش سطح برگ، قطر میوه، تعداد میوه و عملکرد کل فلفل در دو واریته *Sunny* و *Cheyenne* شده است (Boye et al., 2018). سایر پژوهش‌ها حاکی از این است آزولا غنی شده با آهن به‌عنوان یک کود کندرهش، باعث افزایش عملکرد خیار در کشت هیدروپونیک می‌شود. به طوری که در تیمار کاربرد کمپلکس Fe-Azolla بیش‌ترین رشد ریشه و شاخه حاصل شده است (Plessner et al., 1998). همچنین کاربرد خاکی عصاره آزولا می‌تواند بر ویژگی‌های بیولوژیک خاک تأثیرگذار باشد. برای نمونه ناهید و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند کاربرد عصاره آزولا به همراه کمپوست چای و مخمر باعث افزایش فعالیت میکروبی خاک شد که به دنبال آن همبستگی مثبتی بین فعالیت میکروبی و فعالیت آنزیم دهیدروژناز مشاهده شده است (EL-Shimi et al., 2015).

این پژوهش با فرض تأثیر ترکیب شیمیایی محیط کشت بر ویژگی‌های آزولا و با هدف بهینه‌سازی این محیط کشت برای

شیمیایی محیط رشد، نوع گونه و شرایط رشد نه تنها کمیت بلکه کیفیت زیست‌توده آزولا را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Brouwer, 2017). فراهمی فسفر یکی از اصلی‌ترین علل افزایش رشد آزولا است. به‌عنوان مثال افزایش غلظت فسفر باعث افزایش زیست‌توده چهار گونه آزولا *مکزیکانا*، *میکروفیلا* و گونه *پیناتا* با دو زیرگونه *ایمبریکا* و *پیناتا* شده است (Kushari and Watanabe, 1992). همچنین افزایش غلظت آهن در محیط کشت آزولا باعث افزایش غلظت نیتروژن در آزولا می‌شود که این امر بیانگر تأثیر آهن بر رشد و میزان تثبیت نیتروژن در سیانوباکترهای همزیست با آزولا است (Temminck et al., 1997, Wagner, 2018). افزایش غلظت CO₂ تا ۸۰۰ ppm در محیط کشت دو گونه آزولا *فیلیکولئیدس* و *پیناتا* طیف آمینواسید دو گونه را تغییر داده است (Brouwer et al., 2018). پژوهش‌ها نشان می‌دهد گوگرد نقش اساسی در بیوستز آمینواسید سیستئین و متیونین دارد؛ بنابراین کاربرد این عنصر در محیط کشت آزولا *پیناتا* می‌تواند بر غلظت این دو آمینواسید در آزولا تأثیرگذار باشد (Silva and Silva, 2007).

با توجه به توانایی تولید آزولا در همه مناطق جهان، آزولا می‌تواند به‌عنوان یک راه‌حل مناسب و دائمی برای تأمین نیتروژن در کشاورزی به‌منظور افزایش حاصلخیزی خاک، تأمین غذا و رفع گرسنگی به‌کار رود (Datta, 2011). با افزایش علاقه به روش‌های سالم و بیولوژیک تولید محصولات زراعی و با توجه به برخی پیامدهای زیان‌بار کودهای شیمیایی، عصاره جلبک‌های دریایی به‌عنوان یک کود بیولوژیک در برخی سرزمین‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Colavita et al., 2011). در همین ارتباط (Bund and Norre, 2011) بیان کردند که استفاده از عصاره جلبک دریایی *Ascophyllum nodosum* موجب افزایش اندازه میوه، بهبود شکل ظاهری و رنگ میوه می‌شود. پژوهش‌ها در هند نشان می‌دهد بیش‌ترین عملکرد گندم با کاربرد ۲۰ تن آزولا به همراه ۶۰ کیلوگرم کود نیتروژن در هکتار حاصل شده است (Raof et al., 2006). همچنین استفاده از مقادیر ۶، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ تن در هکتار آزولا تازه در

۷- IRR12 + ۲۰ درصد گوگرد + ۲۰ درصد فسفر به منظور تأمین غلظت‌های بیش‌تر عنصر فسفر در این مطالعه از NaH_2PO_4 و برای تأمین غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ درصد بیش‌تر عنصر گوگرد از $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ استفاده شد. کشت دو گونه آزولا تا سه نسل پیاپی انجام شد؛ بدین‌صورت که با رسیدن اولین تیمار به بیش‌ترین عملکرد در واحد سطح (زمانی که فضای بیش‌تری در سطح برای رشد وجود نداشته باشد) تمامی آزولا از سطل‌ها برداشت شده و تعداد سه عدد آزولا پس از نشانه‌گذاری برای کشت و تکثیر به محیط کشت‌های جدید منتقل شدند.

اندازه‌گیری صفات رویشی

پس از برداشت هر نسل عملکرد به‌صورت وزن تازه و وزن خشک و زمان دو برابر شدن (DT) اندازه‌گیری شد. مدت‌زمان موردنیاز برای افزایش زیست‌توده آزولا به دو برابر مقدار اولیه خود بر اساس معادله (۱) برآورد شد (Peters and Meeks, 2003):

$$DT = \frac{t}{\log\left(\frac{W_t}{W_0}\right) / 0.301} \quad (1)$$

t: مدت‌زمان رشد آزولا

W_t : زیست‌توده نهایی آزولا در زمان t

W_0 : زیست‌توده آزولا در زمان شروع آزمایش

اندازه‌گیری غلظت نیتروژن و پروتئین آمینواسیدها در آزولا غلظت نیتروژن و پروتئین به روش تقطیر با بخار آب با دستگاه کدال (KJELTEC AUTO 1030 Analyzer) (Singh, 1977) و غلظت آمینواسیدهای عصاره آزولا با استفاده از دستگاه آنالیز آمینواسید (مدل ARACUS) در نسل‌های اول و سوم اندازه‌گیری شد (Kouzuma et al., 2004).

اندازه‌گیری غلظت آهن، روی، کربن، هیدروژن و گوگرد

غلظت آهن و روی (در نسل‌های اول و سوم) به روش هضم

دستیابی به بیش‌ترین عملکرد در واحد سطح، افزایش غلظت عناصر غذایی و غلظت پروتئین و اسیدهای آمینه در عصاره آزولا انجام شد. همچنین با توجه به محتوای غنی آزولا از پروتئین‌ها، آمینواسیدها و عناصر غذایی، کاربرد عصاره آزولا در محیط کشت فلفل دلمه‌ای می‌تواند موجب بهبود کیفیت و کمیت میوه این گیاه شود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مرکز پژوهشی روابط خاک و گیاه دانشگاه صنعتی اصفهان به صورت دو مطالعه جداگانه در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. در مطالعه اول اثر محیط کشت آزولا بر زیست‌توده آزولا، عناصر غذایی و محتوای پروتئین و آمینواسیدهای عصاره آزولا فیلکلوئیدس و آزولا کارولینینا بررسی گردید. مطالعه دوم به منظور بررسی اثر کاربرد عصاره آزولا (کشت‌یافته در محیط IRR12 + ۲۰٪ غلظت فسفر و گوگرد) بر عملکرد و کیفیت میوه فلفل دلمه‌ای با ۵ تیمار در ۴ تکرار انجام شد.

مطالعه اول

در این بخش از پژوهش، ۲ گونه آزولا در ۷ نوع تیمار مختلف محیط کشت با ۳ تکرار در قالب طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی مورد بررسی قرار گرفت. برای کشت و تکثیر دو گونه آزولا از محلول غذایی IRR12 (محیط کشت توسعه‌یافته در مؤسسه بین‌المللی تحقیقات برنج، IRRI) به‌عنوان محیط کشت متداول برای تغذیه آزولا استفاده شد.

تیمارهای مطالعه اول به شرح زیر بود:

۱- IRR12 به‌عنوان محیط کشت شاهد (Carrapico, 2009)

۲- IRR12 + ۱۰ درصد گوگرد

۳- IRR12 + ۲۰ درصد گوگرد

۴- IRR12 + ۱۰ درصد فسفر

۵- IRR12 + ۲۰ درصد فسفر

۶- IRR12 + ۱۰ درصد گوگرد + ۲۰ درصد فسفر

شد. نمونه‌های ریشه و شاخساره به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۵ درجه سلسیوس در خشک‌کن قرار گرفتند. سپس وزن خشک آن‌ها به‌طور جداگانه توسط ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شد. پس از خشک‌شدن بافت گیاهی، برگ‌ها از قسمت انتهایی دم‌برگ از ساقه جدا شده و سپس آسیاب شد. همچنین مقدار موردنیاز ریشه و میوه برداشت شده و پس از آسیاب شدن برای اندازه‌گیری غلظت عناصر به آزمایشگاه منتقل گردید. غلظت عناصر آهن و روی در نمونه‌های برگ، میوه و ریشه به روش هضم تر و با استفاده از دستگاه جذب اتمی و غلظت نیتروژن نیز به روش کجلدال اندازه‌گیری شد (Wright and Stuczynski, 1996).

محاسبات آماری با نرم‌افزار آماری SAS 9.0، مقایسه میانگین‌ها با آزمون کم‌ترین اختلاف معنی‌دار (LSD) و رسم نمودارها با نرم‌افزار MS Excel 2016 انجام شد.

نتایج و بحث

تأثیر ترکیب شیمیایی محیط کشت بر غلظت عناصر غذایی،

محتوی پروتئین و زیست توده دو گونه آزولا

نتایج حاصل از اعمال تیمارهای مختلف بر غلظت آهن عصاره هر دو گونه آزولا در جدول (۱) ارائه شده است. نتایج نشان داد بیش‌ترین غلظت آهن در نسل اول (۱/۵۲ میلی‌گرم بر گرم) مربوط به تیمار IRR12 + ۲۰٪ فسفر است. همچنین تمام سطوح تیماری در نسل سوم نیز باعث افزایش غلظت آهن نسبت به شاهد شد به طوری که بیش‌ترین غلظت آهن (۲/۶۳ میلی‌گرم بر گرم) در تیمار IRR12 + ۱۰٪ گوگرد + ۲۰٪ فسفر حاصل شده است. همچنین غلظت آهن در نسل سوم با میانگین غلظت ۲/۱۹ میلی‌گرم بر گرم، نسبت به نسل اول با میانگین ۱/۲۰ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک افزایش معنی‌داری داشته است. نتایج اعمال تیمارهای مختلف بر غلظت آهن گونه آزولا کارولینیاناً نشان داد سایر تیمارها نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری نداشته‌اند به طوری که تیمار IRR12 + ۲۰٪ فسفر + ۱۰ درصد گوگرد با مقدار ۳/۱۶ میلی‌گرم آهن بر گرم وزن خشک

تر و با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد (Wright and Stuczynski, 1996). غلظت عناصر کربن، هیدروژن و گوگرد با دستگاه CHNS Analyzer (مدل Vario EL III) اندازه‌گیری شد.

مطالعه دوم

پس از انتخاب بهترین تیمار محیط کشت آزولا با بیش‌ترین عملکرد در واحد سطح، بیش‌ترین غلظت آهن و بیش‌ترین غلظت آمینواسیدها، آزولا فیلیکوئیدس در این تیمار دوباره کشت داده شد. سپس عصاره آزولا تکثیرشده به روش اصلاح‌شده (Brouwer 2017) استخراج شده و به‌عنوان کود زیستی در کشت فلفل دلمه‌ای (مطالعه دوم) مورد آزمایش قرار گرفت.

به‌منظور بررسی اثر عصاره آزولا بر ویژگی‌های رویشی و عملکرد فلفل دلمه‌ای، ۵ نوع محیط کشت در ۴ تکرار و در مجموع ۲۰ گلدان که هرکدام حاوی یک گیاه فلفل دلمه‌ای بود در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد آزمایش قرار گرفت. عصاره استخراج‌شده آزولا به‌عنوان عصاره ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شد و برای استفاده در محیط کشت فلفل دلمه‌ای از عصاره با غلظت ۳۰ درصد استفاده گردید.

تیمارهای این آزمایش در هر بار تعویض محلول جانسون به شرح زیر اعمال شد:

- ۱- محلول جانسون کامل + ۵ درصد (v/v) عصاره آزولا
- ۲- محلول جانسون کامل + ۱۰ درصد (v/v) عصاره آزولا
- ۳- محلول جانسون حاوی ۵۰ درصد از غلظت نیتروژن و آهن + ۵ درصد (v/v) عصاره آزولا
- ۴- محلول جانسون حاوی ۵۰ درصد از غلظت نیتروژن و آهن + ۱۰ درصد (v/v) عصاره آزولا
- ۵- محلول جانسون کامل به‌عنوان شاهد

دو ماه پس از اعمال تیمارهای فوق، گیاهان از بسترهای کشت خارج شده، ریشه‌ها از قسمت طوقه از ساقه اصلی جدا شده و پس از حذف رطوبت اضافی، وزن شاخساره و ریشه هر بوته به‌صورت جداگانه به‌وسیله ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری

جدول ۱. مقایسه میانگین غلظت آهن (Fe) و روی (Zn) در تیمارهای مختلف محیط کشت دو گونه آزولا در نسل‌های اول و سوم.

Table 1. Comparison of the iron (Fe) and zinc (Zn) concentration in different treatments of the culture medium of two *Azolla* species in the first and third generations.

Third generation نسل سوم				First generation نسل اول				Treatment تیمار
<i>caroliniana</i>		<i>filiculoides</i>		<i>Caroliniana</i>		<i>filiculoides</i>		
Zn (mg/g)	Fe (mg/g)	Zn (mg/g)	Fe (mg/g)	Zn (mg/g)	Fe (mg/g)	Zn (mg/g)	Fe (mg/g)	
0.066 ^b	2.42 ^b	0.060 ^{ab}	2.20 ^{ab}	0.070 ^a	1.42 ^e	0.062 ^{ab}	*1.13 ^c	IRRI2 + 10% S
0.074 ^a	2.52 ^b	0.068 ^a	1.99 ^b	0.070 ^a	1.27 ^f	0.066 ^a	0.66 ^d	IRRI2 + 20% S
0.062 ^b	3.16 ^a	0.056 ^{bc}	2.53 ^{ab}	0.070 ^a	2.19 ^c	0.050 ^c	1.52 ^a	IRRI2 + 10% P
0.052 ^c	2.90 ^{ab}	0.048 ^c	1.99 ^b	0.052 ^d	3.16 ^a	0.039 ^d	1.49 ^b	IRRI2 + 20% P
0.055 ^c	2.81 ^{ab}	0.067 ^a	2.63 ^a	0.060 ^c	1.57 ^d	0.051 ^c	1.47 ^b	IRRI2 + 10% S + 20% P
0.055 ^c	3.22 ^a	0.054 ^{bc}	2.43 ^{ab}	0.065 ^b	2.91 ^b	0.048 ^c	1.48 ^b	IRRI2 + 20% S + 20% P
0.051 ^c	1.02 ^e	0.058 ^b	0.67 ^c	0.051 ^e	1.02 ^g	0.058 ^b	0.67 ^d	Control
0.005	0.630	0.009	0.546	0.0009	0.0231	0.005	0.0286	LSD ($p < 0.05$)

* در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

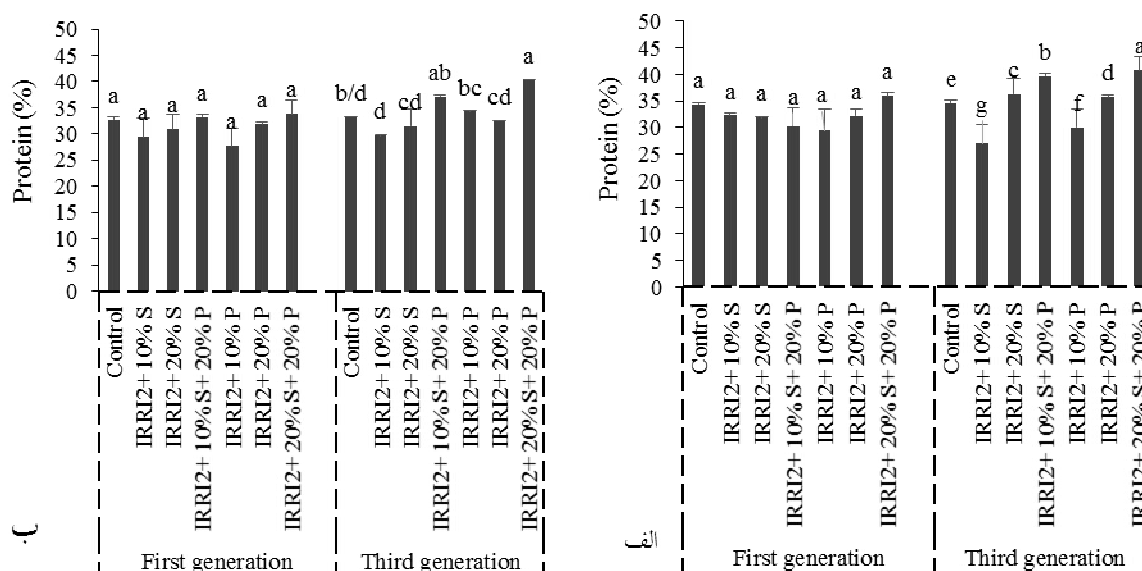
* In each column, numbers with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

تیمار IRR12 (Treatment) + 10% S: محیط کشت متداول آزولا + ۱۰٪ گوگرد، IRR12 + 20% S: محیط کشت آزولا + ۲۰٪ گوگرد، IRR12 + 10% P: محیط کشت آزولا + ۱۰٪ فسفر، IRR12 + 20% P: محیط کشت آزولا + ۲۰٪ فسفر، IRR12 + 10% S + 20% P: محیط کشت آزولا + ۱۰٪ گوگرد + ۲۰٪ فسفر، IRR12 + 20% S + 20% P: محیط کشت آزولا + ۲۰٪ گوگرد + ۲۰٪ فسفر، شاهد Control.

همچنین بیش‌ترین غلظت روی آزولا کارولینیانا در نسل اول (۰/۰۷ میلی‌گرم بر گرم) و در نسل سوم (۰/۰۷۴ میلی‌گرم بر گرم) در تیمار IRR12 + ۲۰٪ گوگرد مشاهده شد. کم‌ترین غلظت روی مربوط به تیمار شاهد با مقدار ۰/۰۵۱ میلی‌گرم بر گرم آزولا بوده است (جدول ۱). اگر چه پژوهش‌ها در زمینه تأثیر محیط کشت آزولا بر محتوی عناصر ریزمغذی آن محدود است، (Kushari and Watanabe (1992) بیان کردند افزایش غلظت فسفر محیط کشت باعث افزایش زیست‌توده ۴ گونه آزولا مکزیکانا، میکروفیلا و گونه پیناتا با دو زیرگونه ایمریکا و پیناتا شده است. آنها همچنین اظهار داشتند که افزایش غلظت فسفر در محیط کشت آزولا، درصد فسفر، درصد نیتروژن و درصد پتاسیم این چهار گونه را نیز افزایش داده است (Kushari and Watanabe, 1992). نتایج سایر

آزولا بیش‌ترین غلظت آهن را به همراه داشته است. همچنین در نسل سوم نیز تیمار IRR12 + ۲۰٪ فسفر + ۲۰٪ گوگرد با مقدار ۳/۲۲ میلی‌گرم آهن بر گرم آزولا بیش‌ترین مقدار را داشته است. نتایج غلظت آهن در هر دو گونه آزولا نشان داد غلظت این عنصر در نسل سوم نسبت به نسل اول افزایش معنی‌داری داشته است (جدول ۱).

نتایج نشان می‌دهد افزایش ۲۰ درصدی غلظت گوگرد در محیط کشت آزولا باعث افزایش غلظت روی در عصاره هر دو گونه آزولا فیلیکلوئیدس و کارولینیانا شده است. به‌طوری‌که در نسل اول بیش‌ترین غلظت روی آزولا فیلیکلوئیدس (۰/۰۶۶ میلی‌گرم روی بر گرم) در تیمار IRR12 + ۲۰٪ گوگرد حاصل شده است. این تیمار در نسل سوم نیز موجب افزایش غلظت روی نسبت به شاهد (۰/۰۶۸ میلی‌گرم بر گرم) شده است.



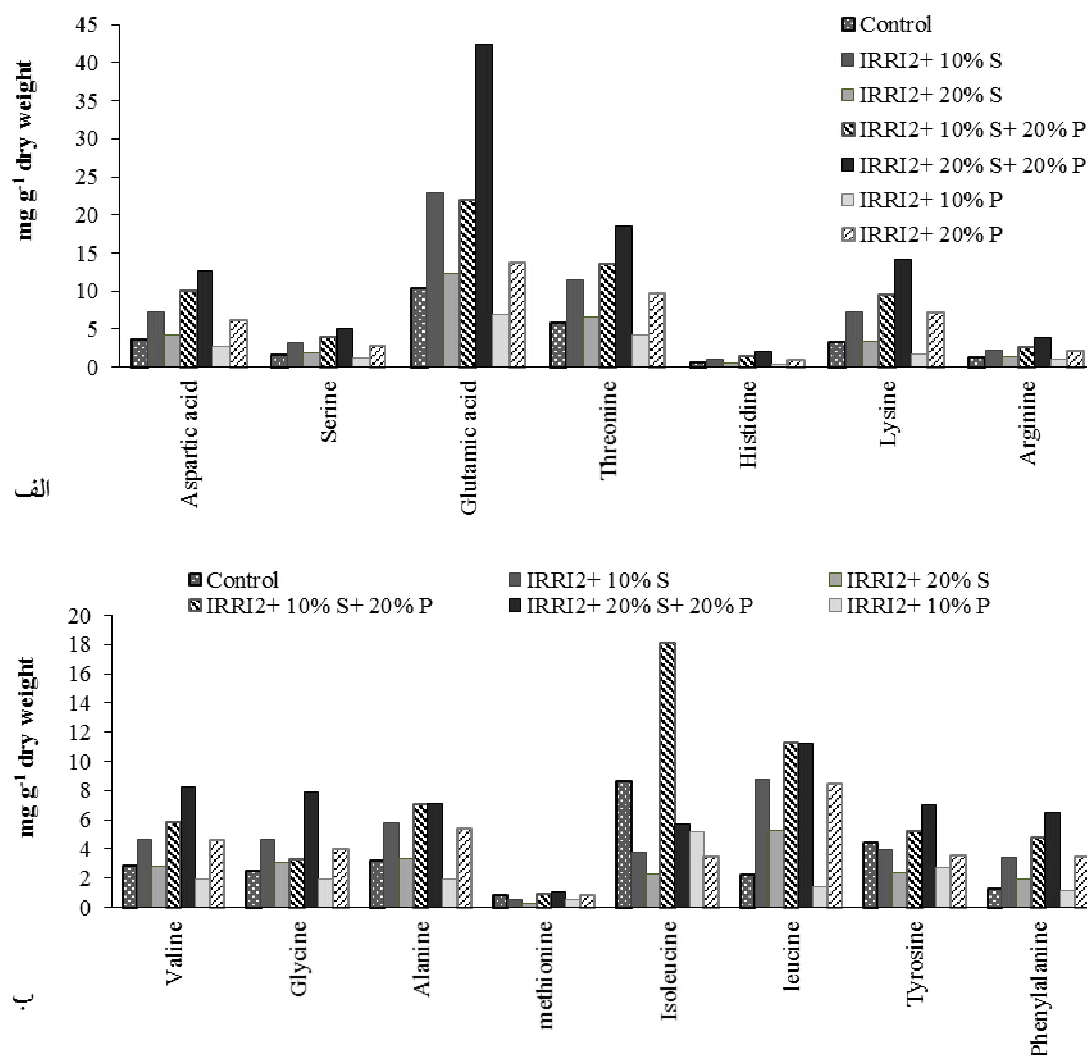
شکل ۱. غلظت پروتئین در *آزولا فیلیکولیدس* (الف) و *آزولا کارولینایا* (ب) در نسل اول و نسل سوم در تیمارهای محیط کشت؛ حروف یکسان در نمودارها نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی دار آماری بین تیمارهای هر یک از نسل‌ها است (LSD, $p < 0.05$).

Fig. 1. Protein concentration of (a) *Azolla filiculoides* and (b) *Azolla caroliniana* in the first and third generations; The identical letters in the graphs indicate that there is no significant difference in the treatments (LSD, $p < 0.05$).

First generation: نسل اول، Third generation: نسل سوم، IRR12 + 10% S: محیط کشت *آزولا* + ۱۰٪ فسفر، IRR12 + 20% S: محیط کشت *آزولا* + ۲۰٪ فسفر، IRR12 + 10% S + 20% P: محیط کشت *آزولا* + ۱۰٪ فسفر + ۲۰٪ فسفر، IRR12 + 20% S + 20% P: محیط کشت *آزولا* + ۲۰٪ فسفر + ۲۰٪ فسفر، Control: محیط کشت *آزولا* + ۱۰٪ فسفر + ۲۰٪ فسفر + ۲۰٪ فسفر، شاهد

نتایج حاصل از اعمال تیمارهای مختلف نشان می‌دهد اعمال تیمار IRR12 + ۲۰٪ فسفر + ۲۰٪ فسفر تا نسل سوم موجب افزایش معنی دار درصد پروتئین در عصاره *آزولا فیلیکولیدس* (۴۰/۷۵ درصد) و *آزولا کارولینایا* (۴۰/۳۵ درصد) نسبت به شاهد شده است (شکل ۱). همچنین درصد پروتئین *آزولا فیلیکولیدس* در نسل سوم نسبت به نسل اول افزایش معنی داری داشته است. کاربرد عنصر فسفر نسبت به کاربرد عنصر گوگرد تا نسل سوم *آزولا کارولینایا* درصد پروتئین را ۲/۷ درصد افزایش داده است. Cary and Weerts (1992) گزارش کردند با افزایش فسفر از ۰/۱ به ۲ میلی‌گرم بر لیتر در محیط کشت *آزولا*، غلظت نیتروژن ۱۳ درصد و پتاسیم ۳۳/۷ درصد افزایش یافته است. همچنین افزایش غلظت فسفر از ۲ به ۵ میلی‌گرم بر لیتر باعث افزایش تقریباً دو برابری نیتروژن شده اما غلظت فسفر تغییری را نشان نداده است. همچنین افزایش

پژوهش‌ها نشان داده است که افزایش غلظت آهن در محیط کشت *آزولا* بر غلظت نیتروژن *آزولا* تأثیرگذار بوده، به طوری که افزایش غلظت آهن در محیط کشت *آزولا* باعث افزایش غلظت نیتروژن در *آزولا* شده است. این یافته بیانگر تأثیر آهن بر رشد و میزان تثبیت نیتروژن در سیانوباکترهای همزیست با *آزولا* است (Temmink et al., 2018, Wagner, 1997). همچنین *آزولا فیلیکولیدس* قادر به پاسخ پویا به فراهمی فسفر در محیط کشت است، اما این سطح پاسخ در یک غلظت معین از فسفر محدود خواهد شد (Brouwer et al., 2018). در همین خصوص پژوهش‌های مشابهی انجام شد که نشان می‌دهد کمبود آهن و بروز علائمی مانند رنگ‌پریدگی ناشی از کمبود آهن در غلظت‌های زیاد فسفر می‌تواند به دلیل بی‌حرکی آهن در مقادیر زیاد فسفر و تشکیل کمپلکس $Fe-PO_4$ باشد (Rajaie and Tavakoly, 2018, Römheld, 2000).



شکل ۲. طیف آمینواسیدهای (الف) اسیدی، بازی و قطبی (ب) آلیفاتیک و آروماتیک *Azolla filicoides* در تیمارهای مختلف محیط کشت.

Fig. 2. The range of (a) acidic, basic and polar amino acids and (b) aliphatic and aromatic amino acids of *Azolla filicoides* in different treatments of culture medium.

IRR12 + 10% S: محیط کشت آزولا + ۱۰٪ گوگرد، IRR12 + 20% S: محیط کشت آزولا + ۲۰٪ گوگرد، IRR12 + 10% P: محیط کشت آزولا + ۱۰٪ فسفر، IRR12 + 20% P: محیط کشت آزولا + ۲۰٪ فسفر، IRR12 + 10% S + 20% P: محیط کشت آزولا + ۱۰٪ گوگرد + ۲۰٪ فسفر، IRR12 + 20% S + 20% P: محیط کشت آزولا + ۲۰٪ گوگرد + ۲۰٪ فسفر، شاهد: Control.

تیمارهای مختلف فسفر بر عملکرد و محتوای نیتروژن آزولا نشان دادند بیشترین مقدار نیتروژن به دنبال کاربرد تیمار ۵۰ میکرومولار و کمترین مقدار مربوط به تیمار ۵/۰ و ۲ میکرومولار فسفر بوده است (Temminck et al., 2018). نتایج مقایسه میانگین غلظت آمینواسید دو گونه آزولا *فیلیکلونیدس* و *کارولینیاننا* در نسل سوم نشان می‌دهد تفاوت

غلظت فسفر در محیط باعث کاهش غلظت سدیم در آزولا شده است با این حال تأثیری در غلظت کلسیم، منیزیم و پتاسیم نداشته است (Cary and Weerts, 1992). سایر پژوهش‌ها نشان می‌دهد شرایط محیطی تولید و ترکیب محیط کشت جلبک‌ها در مقدار پروتئین و ترکیب آمینواسیدهای جلبک تأثیرگذار است. در همین خصوص (Temminck et al., 2018) با بررسی اثر

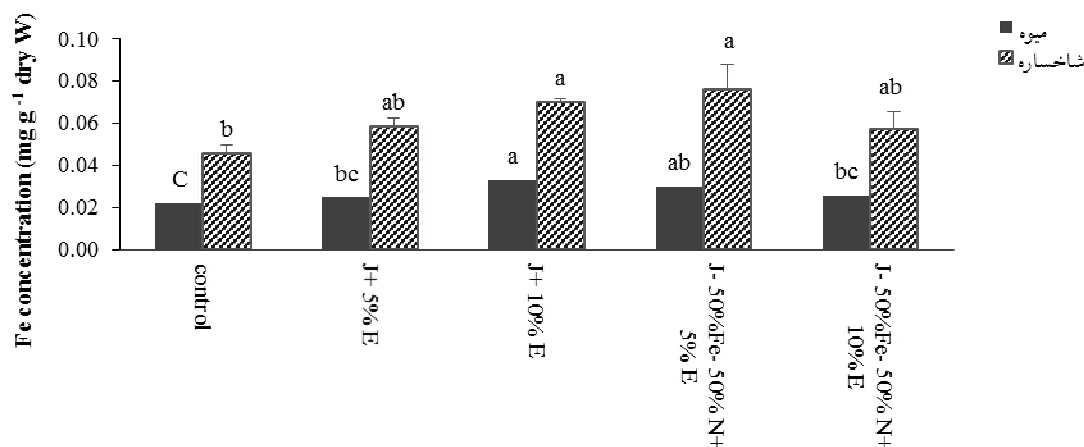
کاهش داشته است (Brouwer et al., 2018). پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد گوگرد نقش اساسی در بیوسنتز آمینواسید سیستمین و متیونین دارد. بنابراین کاربرد این عنصر در محیط کشت *آزولا بیناتا* می‌تواند بر غلظت این دو آمینواسید در *آزولا* تأثیرگذار باشد؛ به طوری که افزایش غلظت این عنصر در کشت *آزولا* غلظت متیونین در عصاره *آزولا* را ۱۵ درصد و غلظت سیستمین را تا ۳۰ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌دهد (Silva and Silva, 2007). ترکیب و غلظت آمینواسیدهای آزاد در *آزولا جاپونیکا* تحت تأثیر گونه، مرحله رشد، بافت گیاه و عوامل طبیعی مانند فراهمی عناصر غذایی است (Kitoh et al., 1992). بررسی تأثیر کاربرد اوره بر متابولیسم اسیدهای آمینه و پراکسیداسیون لیپید در غشاء *آزولا* نشان می‌دهد تغییر در ترکیب محیط کشت و عناصر غذایی *آزولا* باعث تغییر در ویژگی‌های ظاهری، محتوای آمینواسید و تغییر در غشاء سلولی *آزولا* می‌شود، به طوری که افزودن اوره به محیط کشت افزایش متابولیسم اسیدهای آمینه و پراکسیداسیون لیپید در غشاء سلولی *آزولا بیناتا* می‌شود (Chen et al., 2017).

نتایج اندازه‌گیری عملکرد در واحد سطح (وزن تازه) در سه نسل پیاپی در دوره‌های ده روزه نشان می‌دهد افزایش غلظت عناصر فسفر و گوگرد به میزان ۲۰ درصد در محیط کشت، باعث کاهش معنی‌دار وزن تازه *آزولا فیلیکلوئیدس* شده است (شکل ۳). به طوری که بیش‌ترین عملکرد در واحد سطح در نسل دوم *آزولا فیلیکلوئیدس* مربوط به تیمار محیط کشت IRR12 به عنوان شاهد (۴۵۹/۸۲ گرم بر مترمربع) است. همچنین کم‌ترین عملکرد در واحد سطح مربوط به تیمار محیط کشت IRR12 + ۲۰٪ فسفر + ۲۰٪ گوگرد است. بیش‌ترین عملکرد در واحد سطح این گونه *آزولا* در نسل سوم مربوط به تیمار محیط کشت IRR12 + ۱۰٪ فسفر و کم‌ترین عملکرد در واحد سطح مربوط به تیمار محیط کشت IRR12 + ۲۰٪ فسفر + ۱۰٪ گوگرد است. مقایسه میانگین داده‌های نسل اول، نسل دوم و نسل سوم نشان داد بیش‌ترین عملکرد مربوط به نسل اول با میانگین ۴۶۶/۳۴ گرم بر مترمربع، سپس نسل سوم با عملکرد

معنی‌داری بین این دو گونه *آزولا* از نظر غلظت آمینواسید وجود ندارد (شکل ۲). با توجه به نتایج گلوتامیک اسید با میزان ۲۰ درصد فراوان‌ترین اسید آمینه در *آزولا فیلیکلوئیدس* بوده و سپس ایزولوسین با مقدار ۱۷ درصد، ترئونین ۱۱٪، تیروزین ۹ درصد، آسپارتیک اسید ۷ درصد، والین ۶ درصد، آلانین ۶ درصد، لیزین ۶ درصد، گلایسین ۵ درصد، لوسین ۴ درصد، آرژنین ۳ درصد، سرین ۳ درصد، متیونین ۳ درصد، هیستیدین ۱ درصد و فنیل آلانین ۱ درصد از کل محتوای آمینواسید *آزولا فیلیکلوئیدس* را شامل می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد تیمار IRR12 + ۲۰٪ گوگرد + ۲۰٪ فسفر، غلظت آمینواسیدهای آلیفاتیک و آروماتیک *آزولا فیلیکلوئیدس* را به طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش داده است. به طوری که غلظت آمینواسید آسپارتیک اسید از ۳/۶۲ میلی‌گرم بر گرم در نمونه شاهد به ۱۲/۶۷ میلی‌گرم بر گرم، غلظت گلوتامیک اسید از ۱۰/۳۱ میلی‌گرم بر گرم در نمونه شاهد به ۴۲/۴۴ میلی‌گرم بر گرم، ترئونین از ۵/۸۹ در نمونه شاهد به ۱۸/۴۷ میلی‌گرم بر گرم و لیزین از ۳/۳ میلی‌گرم بر گرم در نمونه شاهد به ۱۴/۲ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک افزایش یافته است.

اعمال تیمارهای محیط کشت غلظت آمینواسیدهای اسیدی، بازی و قطبی *آزولا کارولینینا* را تغییر داده است، به طوری که تیمار IRR12 + ۲۰٪ گوگرد + ۲۰٪ فسفر غلظت آمینواسید آسپارتیک اسید را از ۴/۱۷ به ۱۶/۶۶ میلی‌گرم بر گرم افزایش داده است. نتایج اندازه‌گیری غلظت آمینواسیدهای آلیفاتیک و آروماتیک در *آزولا کارولینینا* نشان می‌دهد به غیر از تیمار IRR12 + ۱۰٪ فسفر، سایر تیمارهای اعمال‌شده غلظت آمینواسیدها را افزایش داده‌اند (شکل ۲).

(Brouwer et al. (2018) نشان دادند افزایش غلظت CO₂ تا ۸۰۰ ppm در محیط کشت دو گونه *آزولا فیلیکلوئیدس* و *آزولا بیناتا* طیف آمینواسید دو گونه را تغییر داده است. به طوری که غلظت تربیتوفان و آلانین به ترتیب ۱۸ و ۱۷ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است اما غلظت سیستمین و هیستیدین در *آزولا فیلیکلوئیدس* به ترتیب ۱۴ و ۱۱ درصد



شکل ۴. تأثیر کاربرد عصاره آزولا بر غلظت آهن در شاخساره و میوه فلفل دلمه‌ای؛ ستون‌های دارای حروف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری بین تیمارها است. (LSD, $p < 0.05$).

Fig. 4. Effect of Azolla extract application on Fe concentration in shoot and fruit of bell pepper; The identical letters in the graphs indicate that there is no significant difference in the treatments (LSD, $p < 0.05$).

J+5%E: محلول جانسون + ۵٪ عصاره، J+10%E: محلول جانسون + ۱۰٪ عصاره، J-50%Fe-50%N+5%E: محلول جانسون حاوی ۵٪ غلظت آهن و نیتروژن + ۵٪ عصاره، J-50%Fe-50%N+10%E: محلول جانسون حاوی ۵٪ غلظت آهن و نیتروژن + ۱۰٪ عصاره، Control: شاهد

برابر شدن آزولا تأثیرگذار است که می‌تواند به دلیل نقش حیاتی نیتروژن در بیوستز سلول در حین فتوستز و نهایتاً تولید بافت گیاهی آزولا باشد.

تأثیر کاربرد عصاره آزولا در محیط کشت بر صفات فلفل

دلمه‌ای

نتایج مقایسه میانگین وزن تازه و وزن خشک هر میوه فلفل دلمه‌ای نشان می‌دهد افزودن ۵ درصد (v/v) عصاره آزولا به محیط کشت باعث افزایش معنی‌دار وزن تازه هر میوه (۱۲۲/۱۸ گرم) و وزن خشک هر میوه (۹/۰۷ گرم) شده است (شکل ۴). کم‌ترین میانگین وزن هر میوه (۶۵/۵۵ گرم وزن تازه و ۴/۵۲ گرم وزن خشک) در تیمار محلول جانسون حاوی ۵٪ از غلظت نیتروژن و آهن + ۱۰ درصد عصاره آزولا مشاهده شده است (جدول ۲). نتایج به‌دست آمده نشان داد بیش‌ترین مقدار وزن تازه ریشه (۲۷/۵ گرم در بوته) در تیمار کاربرد ۱۰ درصد (v/v) عصاره آزولا در محلول جانسون حاوی ۵۰ درصد از غلظت نیتروژن و آهن به‌دست آمده است. همچنین نتایج نشان

است. در همین خصوص Cary and Weerts (1992) نشان داد در دمای 25°C افزایش فسفر باعث افزایش ۷ برابری زیست توده آزولا شده است. همچنین نرخ نسبی رشد، زمان دو برابر شدن و میزان سطح برگ آزولا پاسخ مثبتی به افزایش غلظت فسفر نشان داده است (Cary and Weerts, 1992). همچنین Cheng et al. (2010) نشان دادند افزودن فسفر به محیط کشت آزولا، وزن خشک را ۱۳۰۰ درصد نسبت به شاهد (بدون فسفر)، میزان جذب کربن را ۱۳۰۹ درصد، انباشت نیتروژن را ۱۴۹۱ درصد، درصد نیتروژن را ۱۵/۱ درصد و غلظت کربن را ۰/۴ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش داده است. پژوهش‌ها نشان می‌دهد فعالیت آنزیم نیتروژناز در آزولا به‌شدت تحت تأثیر ترکیب محیط کشت و غلظت عناصر غذایی موجود در محیط کشت بوده و ترکیب محیط کشت به‌طور مستقیم بر فتوستز و در نهایت بر عملکرد وزن تازه و وزن خشک آزولا تأثیرگذار است (Rai and Rai, 2003, Rai et al., 2006). پژوهش‌های Handajani (2012) نشان می‌دهد کاربرد نیتروژن و فسفر بر عملکرد وزن تازه و وزن خشک و زمان دو

جدول ۲. تأثیر کاربرد عصاره آزولا بر میانگین وزن تازه و وزن خشک شاخساره، هر میوه و ریشه فلفل دلمه‌ای.

Table 2. Effect of Azolla extract application on average of fresh weight and dry weight of bell pepper shoot, each fruit and root.

Dry weight وزن خشک			Fresh weight وزن تازه			Treatments تیمارها
Root (g)	Fruit (g)	Shoot (g)	Root (g)	Fruit (g)	Shoot (g)	
1.65 ^a	9.07 ^a	6.31 ^a	19.65 ^{bc}	122.18 ^a	42.57 ^a	J + 5% E (w/w)
1.81 ^a	4.77 ^b	5.95 ^a	16.26 ^c	73.92 ^b	39.93 ^a	J + 10% E (w/w)
2.20 ^a	5.66 ^b	8.27 ^a	26.18 ^{ab}	80.75 ^b	51.89 ^a	J - 50%Fe - 50% N + 5% E (w/w)
1.99 ^a	4.52 ^b	7.17 ^a	27.50 ^a	65.55 ^b	54.29 ^a	J- 50%Fe - 50% N+ 10% E (w/w)
1.36 ^a	6.69 ^{ab}	8.47 ^a	20.59 ^{a/c}	85.01 ^b	54.47 ^a	Control
0.876	3.311	3.92	7.23	28.49	18.98	LSD ($p < 0.05$)

* در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

* In each column, numbers with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

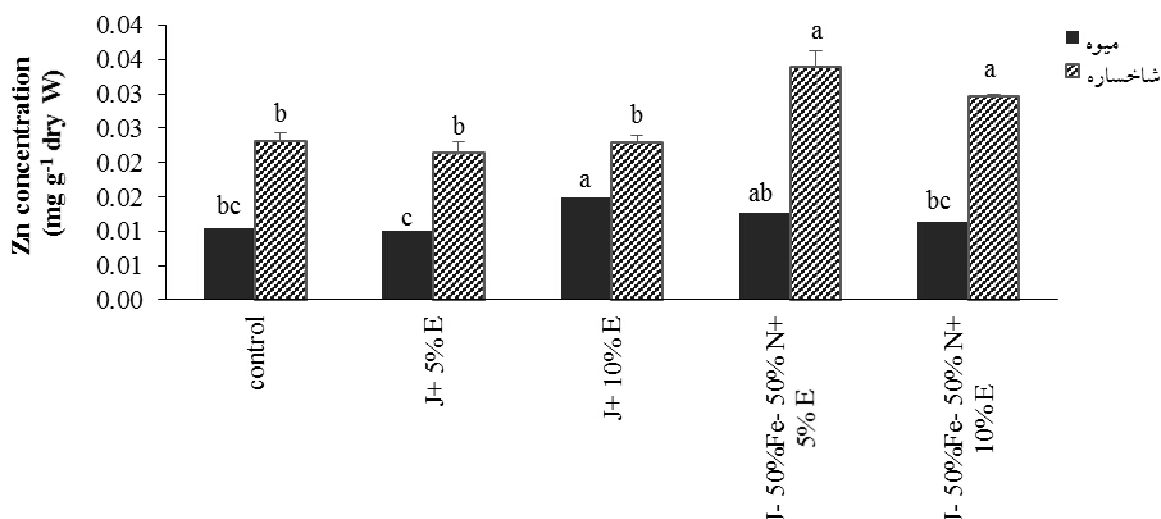
J + 5% E: محلول جانشون + ۵٪ عصاره، J + 10% E: محلول جانشون + ۱۰٪ عصاره، J - 50%Fe - 50% N + 5% E: محلول جانشون حاوی ۵٪ غلظت آهن و نیتروژن + ۵٪ عصاره، J- 50%Fe - 50% N+ 10% E: محلول جانشون حاوی ۵٪ غلظت آهن و نیتروژن + ۱۰٪ عصاره، Control: شاهد

دانسته‌اند (Hanafy and El-Emary, 2018).

نتایج غلظت آهن و روی در شاخساره و میوه فلفل دلمه‌ای در شکل‌های (۵) و (۶) ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد افزودن ۵ درصد عصاره آزولا (v/v) به محلول جانشون باعث افزایش غلظت آهن در شاخساره و میوه فلفل دلمه‌ای شده است. به طوری که بیش‌ترین غلظت آهن در شاخساره در تیمار محلول جانشون حاوی ۵۰ درصد از غلظت نیتروژن و آهن + ۵ درصد عصاره آزولا مشاهده شد و کم‌ترین غلظت آهن در شاخساره با مقدار ۰/۰۴۵ میلی‌گرم بر گرم مربوط به تیمار شاهد بود (شکل ۴).

بیش‌ترین غلظت آهن در میوه (۰/۰۳۲ میلی‌گرم بر گرم) و روی در میوه (۰/۰۱۴ میلی‌گرم بر گرم) در تیمار کاربرد ۱۰ درصد عصاره آزولا در محیط کشت جانشون و کم‌ترین غلظت روی در میوه و شاخساره در گیاه شاهد مشاهده گردید (شکل-های ۴ و ۵). (Sadegh Kasmaei et al. (2019). با بررسی تأثیر ریزوباکترهای محرک رشد گیاه، کمپوست آزولا و بیوجار آزولا بر برخی شاخص‌های کیفی خاک و رشد گیاه رزماری نشان دادند تمامی پارامترهای رشد و غلظت عناصر غذایی در

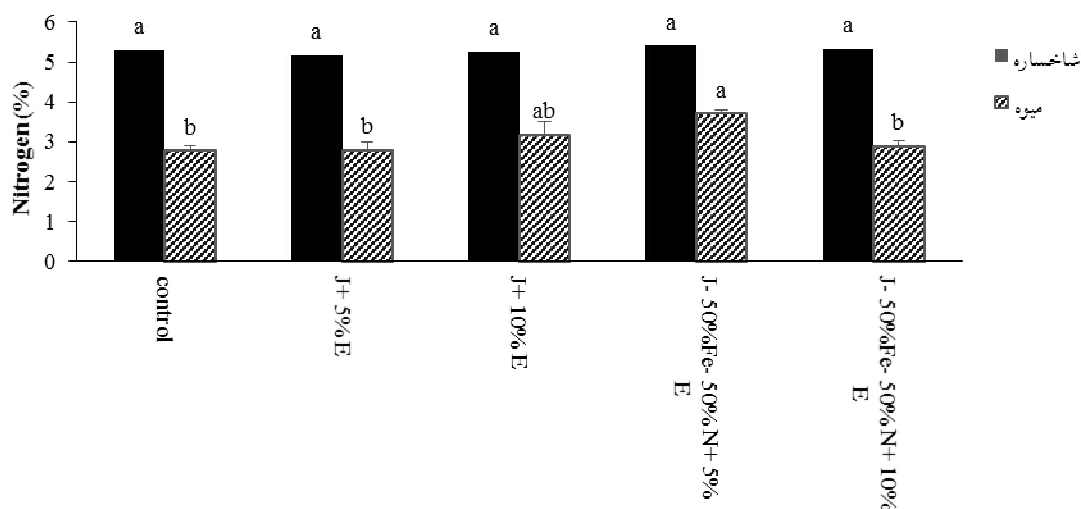
می‌دهد در تیمارهای کاهش ۵۰ درصدی غلظت آهن و نیتروژن همراه با کاربرد عصاره آزولا کاهش معنی‌داری در وزن شاخساره و ریشه مشاهده نشد که می‌تواند به این دلیل باشد که عناصر غذایی و هورمون‌های موجود در عصاره آزولا تا حدی کمبود عناصر محیط کشت را جبران کرده‌اند (جدول ۲). Hanafy and El-Emary (2018) اظهار داشتند استفاده از عصاره ۲۰ درصد آزولا پیناتا در کشت گوجه‌فرنگی، درصد جوانه‌زنی، ارتفاع گیاه، طول ریشه، وزن خشک و وزن تازه گیاه افزایش معنی‌داری نسبت به نمونه شاهد نشان داده است. همچنین سایر پارامترهای رشد مانند تعداد شاخه، تعداد برگ، وزن و تعداد میوه با کاربرد عصاره آزولا پیناتا افزایش یافته و زمان رسیدن میوه‌ها کاهش یافته است. این پژوهشگران همچنین اظهار داشتند کاربرد عصاره ۲۰ درصد آزولا پیناتا باعث افزایش درصد پروتئین کل در گوجه‌فرنگی می‌شود. این پژوهشگران افزایش عملکرد شاخساره، ارتفاع بوته و درصد جوانه‌زنی بذر گوجه‌فرنگی در اثر کاربرد عصاره ۲۰ درصد آزولا را به علت وجود هورمون‌ها و تنظیم‌کننده‌های رشد مانند سیتوکینین‌ها، اکسین‌ها، ویتامین‌ها و اسیدآمین‌ها و اسیدآمین‌ها موجود در عصاره آزولا



شکل ۵. تأثیر کاربرد عصاره آزولا بر غلظت روی در شاخساره و میوه فلفل دلمه‌ای؛ ستون‌هایی دارای حروف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری بین تیمارها است (LSD, $p < 0.05$).

Fig. 5. Effect of Azolla extract application on Zn concentration in shoot and fruit of bell pepper; The identical letters in the graphs indicate that there is no significant difference in the treatments (LSD, $p < 0.05$).

J+ 5% E: محلول جانسون + ۵٪ عصاره، J+ 10% E: محلول جانسون + ۱۰٪ عصاره، J- 50%Fe- 50%N+ 5% E: محلول جانسون حاوی ۵٪ غلظت آهن و نیترژن + ۵٪ عصاره، J- 50%Fe- 50%N+ 10% E: محلول جانسون حاوی ۵٪ غلظت آهن و نیترژن + ۱۰٪ عصاره، Control: شاهد



شکل ۶. تأثیر کاربرد عصاره آزولا بر درصد نیترژن در شاخساره و میوه فلفل دلمه‌ای؛ ستون‌هایی دارای حروف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری تیمارها است (LSD, $p < 0.05$).

Fig. 6. Effect of Azolla extract application on nitrogen concentration in shoot and fruit of bell pepper; The identical letters in the graphs indicate that there is no significant difference in the treatments (LSD, $p < 0.05$).

J+ 5% E: محلول جانسون + ۵٪ عصاره، J+ 10% E: محلول جانسون + ۱۰٪ عصاره، J- 50%Fe- 50%N+ 5% E: محلول جانسون حاوی ۵٪ غلظت آهن و نیترژن + ۵٪ عصاره، J- 50%Fe- 50%N+ 10% E: محلول جانسون حاوی ۵٪ غلظت آهن و نیترژن + ۱۰٪ عصاره، Control: شاهد

هورمون‌های تقویت‌کننده رشد مانند ایندول استیک اسید (IAA) و ایندول بوریک اسید (IBA) و عناصر کم‌مصرف مانند آهن، روی، مولیبدن، کبالت، مس و نیکل و همچنین ویتامین‌ها و اسیدهای آمینه است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد زمانی که هدف از کشت آزولا کاربرد آن به‌عنوان کود آلی است، تغییر ترکیب شیمیایی محیط کشت آزولا می‌تواند موجب افزایش عملکرد آزولا و غلظت عناصر پرمصرف و کم‌مصرف و همچنین تغییر کیفیت و کمیت آمینواسیدها در دو گونه آزولا فیلیکلوئیدس و کارولینانا شود که می‌تواند افزایش کیفیت عصاره استخراج‌شده از آزولا را به‌دنبال داشته باشد.

کاربرد عصاره آزولا استخراجی در محیط کشت فلفل دلمه‌ای افزایش غلظت عناصر آهن و روی، درصد نیتروژن و عملکرد شاخساره و میوه در فلفل دلمه‌ای و بهبود کیفیت میوه در برخی تیمارها را به‌دنبال داشته است. همچنین به‌نظر می‌رسد کاربرد این عصاره در برخی تیمارهای محیط کشت نیم‌جانسون نیتروژن و آهن، کمبود این عناصر غذایی را تا حدی جبران کرده و کیفیت و کمیت میوه و شاخساره گیاه با شاهد تفاوت معنی‌دار نداشته است. این یافته نشان‌دهنده این امر است که می‌توان برخی از نیازهای غذایی گیاهان در محیط‌های کشت هیدروپونیک را با کودهای آلی تأمین کرد. علاوه بر این، کاربرد عصاره آزولا به‌عنوان کودهای آلی غنی از اسیدهای آمینه و عناصر پرمصرف و کم‌مصرف می‌تواند منجر به غنی‌سازی محصولات گلخانه‌ای گردد.

تشکر و سپاسگزاری

بخشی از هزینه‌های این پژوهش با حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (طرح شماره ۹۸۰۱۴۷۸۶) تأمین گردید.

گیاه رزماری با کاربرد کمپوست و بیوجار آزولا افزایش یافته است. (Setiawati et al. (2018) نشان دادند استفاده از پودر تازه یا کمپوست آزولا مقادیر فسفر قابل جذب در خاک و فسفر گیاه را افزایش می‌دهد که می‌تواند به دلیل محتوای زیاد فسفر در آزولا بوده یا در نتیجه کاهش pH خاک باعث حلالیت بیش‌تر فسفر در خاک شده باشد. (Richardson and Simpson (2011) دلیل افزایش جذب و غلظت فسفر در گیاه رزماری با کاربرد آزولا را به دلیل افزایش فعالیت آنزیم فسفاتاز بیان کردند که باعث حل شدن فسفات‌های نامحلول و تغییر فرم آن‌ها به فرم‌های محلول و قابل جذب برای گیاه می‌شود.

کاربرد ۵ درصد (v/v) عصاره آزولا در محیط کشت جانسون حاوی ۵۰ درصد نیتروژن و آهن موجب افزایش معنی‌دار درصد نیتروژن میوه شده است. این درحالی است که کم‌ترین مقدار نیتروژن در تیمار شاهد با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری نداشته است (شکل ۶). این نتایج نشان می‌دهد کاربرد عصاره آزولا در محیط کشت کمبود نیتروژن محیط کشت را جبران کرده است، اگر چه این احتمال وجود دارد که نوع کاربرد عصاره (به‌عنوان مثال محلول‌پاشی) تأثیر بیش‌تری بر محتوای عناصر غذایی میوه و شاخساره داشته باشد (شکل ۶). (Al-Marsoumi and Al-Hadethi (2020) با بررسی تأثیر اسید هیومیک و محلول‌پاشی عصاره جلبک دریایی بر درختان یک-ساله انبه اظهار داشتند عصاره جلبک دریایی اثر معنی‌داری بر غلظت نیتروژن برگ نهال انبه داشته است. نتایج پژوهش Hanafy and El-Emary (2018) نشان می‌دهد عصاره ۲۰ درصد آزولا تأثیر قابل توجهی بر تمام ویژگی‌های بیوشیمیایی گوجه‌فرنگی داشته است. با توجه به نتایج این پژوهش، آزولا به دلیل توانایی در بهبود ویژگی‌های رویشی و محتوای ویتامین‌ها، بتاکاروتن، هورمون‌های رشد، مواد معدنی و بهبود خواص آنتی‌اکسیدانی می‌تواند به‌عنوان کود مناسب و ارزان‌قیمت در کشاورزی استفاده شود. همچنین پژوهش‌های Abeer et al. (2015) و Rathore et al. (2009) نیز گویای این مطلب است که عصاره جلبک دریایی و آزولا فیلیکلوئیدس حاوی

تضاد منافع

شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

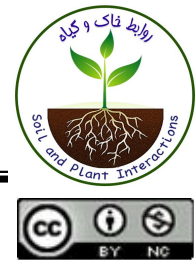
نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منفعی با شخص،

منابع مورد استفاده

1. Abeer, S., Shafeek, M., Ahmed, H.I., Abdel-Al, F., 2015. Improving growth, fruit set, total yield and fruit quality of sweet pepper plants (*Capsicum annum L.*) by using antioxidant and seaweed extracts. Middle East J. Agric. Res. 4, 154–161.
2. Al-Marsoumi, F., Al-Hadethi, M., 2020. Effect of humic acid and seaweed extract spray in leaf mineral content of mango seedlings. Plant Arch 20, 827–830.
3. Becerra, M., Preston, T.R., Ogle, B., 1995. Effect of replacing whole boiled soya beans with azolla in the diets of growing ducks. Livest. Res. Rural. Dev. 7, 1–10.
4. Bindhu, K., 2013. Effect of Azolla extract on growth performance of *Pisum sativum*. Biol. Sci. 2, 88–90.
5. Bleakley, S., Hayes, M., 2017. Algal Proteins: Extraction, Application, and Challenges Concerning Production. Foods 6(5), 33. <https://doi.org/10.3390/foods6050033>.
6. Boye, M.A.D., Grogan, N., Kotchi, V., Doriane, A., 2018. Influence of biofertilizers (*Azolla filiculoides* and Compost) on the growth and productivity of two varieties of pepper (*Capsicum Annum*) in the locality of Daloa. IJSET. 5, 86–93.
7. Brouwer, P., 2017. Turning the aquatic weed Azolla into a sustainable crop. PhD Thesis, Utrecht University, The Netherlands.
8. Brouwer, P., Schluempmann, H., Nierop, K.G.J., Elderson, J., Bijl, P.K., van der Meer, I., de Visser, W., Reichart, G. J., Smeekens, S., van der Werf, A., 2018. Growing Azolla to produce sustainable protein feed: the effect of differing species and CO₂ concentrations on biomass productivity and chemical composition. J. Sci. Food Agric. 98, 4759–4768. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9016>.
9. Bund, S. and Norre, J. 2011. Seaweed extract improve cherry fruit quality. Aphc. Aushs. Nziash. Joint. Con., Lorn, Australia. 18–22.
10. Buyel, J. F., Twyman, R.M., Fischer, R., 2015. Extraction and downstream processing of plant-derived recombinant proteins. Biotechnol. Adv. 33, 902–913. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.04.010>.
11. Carrapiço, F. 2010. Azolla as a superorganism. Its implication in symbiotic studies. In: Seckbach, J., Grube, M. (Eds.), Symbioses and Stress. Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology, vol 17. Springer, Dordrecht. pp. 225–241. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9449-0-11>.
12. Cary, P.R., Weerts, P.G., 1992. Growth and nutrient composition of *Azolla pinnata* R. Brown and *Azolla filiculoides* Lamarck as affected by water temperature, nitrogen and phosphorus supply, light intensity and pH. Aquat. Bot. 43, 163–180.
13. Chen, J., Huang, M., Cao, F., Pardha-Saradhi, P., Zou, Y., 2017. Urea application promotes amino acid metabolism and membrane lipid peroxidation in Azolla. PlosOne. 12, 185–230.
14. Cheng, W., Sakai, H., Matsushima, M., Yagi, K., Hasegawa, T., 2010. Response of the floating aquatic fern *Azolla filiculoides* to elevated CO₂, temperature, and phosphorus levels. Hydrobiologia 656, 5–14.
15. Colavita, G.M., Spera, N., Blackhall, V., Sepulveda, G.M., 2011. Effect of seaweed extract on pear fruit quality and yield. Acta Horti. 909, 601–608. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2011.909.72>.
16. Datta, S. N., 2011. Culture of Azolla and its efficacy in diet of *Labeo rohita*. Aquaculture 310, 376–379. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.11.008>.
17. Delnavaz, B., Azimi, A., 2009. Alien and exotic Azolla in northern Iran. AJB. 8, 187–190.
18. EL-Shimi, N., El-Badawy, E., Tolba, H., 2015. Response of sweet pepper plants to some organic and bio-fertilizers and its effect on fruit yield and quality. Middle East J. Agric. Res. 4, 435–445.
19. Farahpour-Haghani, A., Hassanpour, M., Alinia, F., Nouri-Ganbalani, G., Razmjou, J., Agassiz, D., 2017. Water ferns *Azolla* spp. (*Azollaceae*) as new host plants for the small China-mark moth, *Cataclysta lemnata* (Linnaeus, 1758) (*Lepidoptera, Crambidae, Acentropinae*). Nota Lepidopterologica 40, 1–13. <https://doi.org/10.3897/nl.40.10062>.
20. Hanafy, A., El-Emary, G. A. E., 2018. Role of *Azolla pinnata* biofertilizer extract in producing healthy tomatoes. Asian J. Chem. 3, 1–8. <https://doi.org/10.9734/ajrb/2018/v3i329832>.
21. Handajani, H., 2012. Optimization of nitrogen and phosphorus in Azolla growth as biofertilizer. Makara J. Technol. 15, 142–146.
22. Hill, M.P., McConnachie, A.J., 2009. *Azolla filiculoides* Lamarck (*Azollaceae*). In: Muniappan, R., Reddy, G.V.P., Raman, A. (Eds.), Biological Control of Tropical Weeds Using Arthropods. Cambridge: Cambridge University Press,

- pp. 74–87. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511576348.005>
23. Hussner, A., Weyer, K., Gross, E., Hilt, S., 2010. Comments on increasing number and abundance of non-indigenous aquatic macrophyte species in Germany. *Weed Res.* 50, 519–526. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2010.00812.x>.
24. Katole, S. B., Lende, S. R., Patil, S. S., 2017. A review on potential livestock feed. *Int. J. Livest. Res.* 05, 01–09.
25. Khoshravesh, R., Akhiani, H., Eskandari, M., Greuter, W., 2009. Ferns and fern allies of Iran. *Rostaniha*, 10(Supplement 1), pp. 1–130.
26. Kitoh, S., Shiomi, N., Uheda, E., 1992. Free amino acids and ammonia in the *Azolla-Anabaena* association grown with N_2 , NH_4^+ , and NO_3^- . *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 38, 289–296.
27. Kitoh, S., Shiomi, N., Uheda, E., 1992. Free amino acids and ammonia in the *Azolla-Anabaena* association grown with N_2 , NH_4^+ , and NO_3^- . *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 38, 289–296.
28. Kouzuma, T., Uemastu, Y., Usami, T., Imamura, S., 2004. Study of glycated amino acid elimination reaction for an improved enzymatic glycated albumin measurement method. *Clin. Chim. Acta.* 346, 135–143.
29. Kushari, D., Watanabe, I., 1992. Differential responses of azolla to phosphorus deficiency: II. Screening method under concentration controlled conditions. *Soil Sci. Plant Nutr.* 38, 65–73.
30. Macartain, P., Gill, C.I.R., Brooks, M., Campbell, R., Rowland, I.R., 2007. Special article nutritional value of edible seaweeds. *Nutr. Rev.* 65, 535–543. <https://doi.org/10.1301/nr.2007.dec.535>.
31. Pereira, A.L., Carrapico, F., 2009. Culture of *Azolla filiculoides* in artificial conditions. *Plant Biosyst.* 143, 431–434. <https://doi.org/10.1080/11263500903172110>.
32. Peters, G.A., Meeks, J.C., 2003. The *Azolla-Anabaena* symbiosis: basic biology. *Ann. Rev. Plant Biol.* 40, 193–210. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.40.060189.001205>.
33. Plessner, O.E., Chen, Y., Shenker, M., Tel-Or, E., 1998. Iron-enriched *Azolla* as a slow-release biofertilizer for cucumber plants grown in a hydroponic system. *J. Plant Nutr.* 21, 2357–2367. <https://doi.org/10.1080/01904169809365569>.
34. Rai, A.K., Rai, V., 2003. Effect of NaCl on growth, nitrate uptake and reduction and nitrogenase activity of *Azolla pinnata-Anabaena azollae*. *Plant Sci.* 164, 61–69.
35. Rai, V., Sharma, N.K., Rai, A.K., 2006. Growth and cellular ion content of a salt-sensitive symbiotic system *Azolla pinnata-Anabaena azollae* under NaCl stress. *J. Plant Physiol.* 163, 937–944.
36. Raja, W., Rathaur, P., John, S. A., Ramteke, P. W., 2012. *Azolla*: an aquatic pteridophyte with great potential. *Int. J. Res. Biol. Sci.* 2(2), pp.68–72.
37. Rajaie, M., Tavakoly, A.R., 2018. Iron and/or acid foliar spray versus soil application of Fe-EDDHA for prevention of iron deficiency in Valencia orange grown on a calcareous soil. *J. Plant Nutr.* 41, 150–158.
38. Raoof, B., Kaushik, B.D., Prasanna, R., 2006. Formulation of a low-cost medium for mass production of *Spirulina*. *Biomass Bioenergy* 30, 537–542. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.09.006>.
39. Rathore, S., Chaudhary, D., Boricha, G., Ghosh, A., Bhatt, B., Zodape, S., Patolia, J., 2009. Effect of seaweed extract on the growth, yield and nutrient uptake of soybean (*Glycine max*) under rainfed conditions. *S. Afr. J. Bot.* 75, 351–355.
40. Richardson, A. E., Simpson, R. J., 2011. Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus. *Plant Physiol.* 156, 989–996.
41. Richerson, P., Grigarick, A., 1967. The life history of *Stenopelmus rufinusus* (Coleoptera: Curculionidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.* 60, 351–354. <https://doi.org/10.1093/aesa/60.2.351>.
42. Römheld, V., 2000. The chlorosis paradox: Fe inactivation as a secondary event in chlorotic leaves of grapevine. *J. Plant Nutr.* 23, 1629–1643.
43. Sadegh Kasmaei, L., Yasrebi, J., Zarei, M., Ronaghi, A., Ghasemi, R., Saharkhiz, M.J., Ahmadabadi, Z., Schnug, E., 2019. Influence of plant growth promoting rhizobacteria, compost, and biochar of *Azolla* on rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) growth and some soil quality indicators in a calcareous soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 50, 119–131.
44. Setiawati, M. R., Damayani, M., Herdiyantoro, D., Suryatmana, P., Anggraini, D. and Khumairah, F. H., 2018. The application dosage of *Azolla pinnata* in fresh and powder form as organic fertilizer on soil chemical properties, growth and yield of rice plant. *AIP Conf Proc.* <https://doi.org/10.1063/1.5021210>.
45. Silva, P., Silva, H., 2007. Effect of mineral nutrients on cell growth and self-flocculation of *Tolypothrix tenuis* for the production of a biofertilizer. *Bioresour. Technol.* 98, 607–611.
46. Singh, P.K., 1977. *Azolla* plants as fertilizer and feed. *Indian farming*.
47. Taha, N., El-Shahat, R., 2017. Influence of *Azolla*, some blue green algae strains and humic acid on soil, growth, productivity, fruit quality and storability of Canino apricot cultivar grown under clay loamy soil. *Int. J. Plant Prod.* 8, 1–11.
48. Tejaswini, G.S., Mahadevakumar, S., Janardhana, G.R., 2015. Effect of *Azolla pinnata* on seed germination, vigour index, biomass and yield of french bean (*Phaseolus vulgaris*). *Curr. Agric. Res.* 3, 137–141. <http://dx.doi.org/10.12944/CARJ.3.2.07>.
49. Temmink, R.J., Harpenslager, S.F., Smolders, A.J., van Dijk, G., Peters, R.C., Lamers, L.P., van Kempen, M.M., 2018. *Azolla* along a phosphorus gradient: biphasic growth response linked to diazotroph traits and phosphorus-induced iron chlorosis. *Sci. Rep.* 8, 1–8.

50. Wagner, G.M., 1997. Azolla: a review of its biology and utilization. *Bot. Rev.* 63, 1–26.
51. Witt, A., Luke, Q., 2017. Guide to the naturalized and invasive plants of Eastern Africa. CABI. <https://doi.org/10.1079/9781786392145.0000>.
52. Wright, R.J., Stuczynski, T., 1996. Atomic absorption and flame emission spectrometry. In: Helmke, P.A., Johnston, C.T., Loeppert, R.H., Page, A.L., Soltanpour, P.N., Sparks, D.L., Sumner, M.E., Tabatabai, M.A (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 3. Chemical Methods*. SSSA/ASA, Madison, WI, USA, pp. 65–90.



Effect of Salicylic Acid Foliar Application on Growth Characteristics in Tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) Under Lead Stress Conditions

H. Kakaei¹, A.A. Amirinejad^{1*}  and M. Ghobadi²

(Received: 9 August 2023; Accepted: 19 September 2023)

Abstract

The use of plant hormones has been introduced as a simple and suitable strategy to reduce the adverse effect of heavy metals in plants. To investigate the effect of salicylic acid (SA) in reducing lead (Pb) stress in tomato (*Lycopersicon esculentum* L.), a factorial experiment was conducted based on completely randomized design with three replications in the greenhouse of Razi University. Factors included soil Pb contamination at three levels (0, 150 and 300 mg kg⁻¹ soil as Pb(NO₃)₂) and SA at three levels (0, 250 and 500 μM). Results showed that the highest proline content (23.4 mmol g⁻¹) and Pb concentration (4.26 mg kg⁻¹) were obtained in 300 mg kg⁻¹ of Pb and 0 μM SA, which shows an increase of 303 and 387%, respectively, compared to the control (without Pb and SA). Also, the highest amount of soluble sugars (0.48 mg kg⁻¹), plant height (43.5 cm), root length (18.3 cm/plant), shoot dry weight (7.48 g/plant), and leaf area (263.1 cm²/plant) were found in the treatment of 500 μM SA and 0 mg kg⁻¹ Pb. In general, the results showed that the application of SA, as a plant hormone, is a simple and convenient method to reduce the adverse effects of Pb stress in tomato.

Keywords: Plant hormones, Heavy metals, Growth characteristics, Stress.

Background and Objective: Heavy metals are non-biodegradable and persistent in nature thereby disrupting the environment and causing huge health threats to humans (Ferronato and Torretta, 2019). Lead (Pb) is a toxic heavy metal that enters the environment through various anthropogenic sources, and inhibits plant growth and development. Lead toxicity may result from disturbance in plant metabolism as a consequence of disturbance in the uptake and translocation of mineral nutrients (Hussain et al., 2017). A new method for reducing the effect of heavy metals on plants is the use of growth regulators such as salicylic acid (SA) (Vaculík et al., 2019). Tomato (*Lycopersicon esculentum*) is an important vegetable that is rich in minerals, various vitamins and antioxidant compounds. Since the cultivation of tomato, as an important and highly productive crop, is very common in many parts of Iran, including on the side of the roads, there is a possibility of contamination of the arable soils with lead. Therefore, the present study was conducted to evaluate the effects of foliar spraying of salicylic acid on reducing Pb-induced stress in tomato (*Lycopersicon esculentum* L.).

1- Department of Soil Science and Engineering, College of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran.

2- Department of Plant Production and Genetics, College of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran.

* Corresponding author, Email: a.amirinejad@razi.ac.ir

Methods: A factorial experiment based on a completely randomized design with three replications was conducted in the greenhouse of Razi University. Factors included Pb at three levels (0, 150 and 300 mg kg⁻¹ as Pb(NO₃)₂) and SA at three levels (0, 250, and 500 μM). The solutions containing Pb(NO₃)₂ were sprayed uniformly on the soil sub-samples according to the desired concentrations. The samples were kept moist for 30 days close to the soil field capacity (FC). At the four-leaf stage, SA foliar spraying started and replicated three times until the beginning of flowering. After harvest, some characteristics including soluble sugars and proline content, plant height, shoot and root dry weights, and root volume and length were determined. Also, Pb concentration in leaf extract were measured by Varian AA220 atomic absorption spectrophotometer. The analysis of variance (ANOVA) and mean comparisons (Duncan's multiple range test, $p < 0.05$) were performed using SPSS-16 software.

Results: The results revealed that Pb stress reduced all plant characteristics, such as plant height, root volume and root length, as well as, dry weights of shoot and root, and elevated leaf Pb concentration, proline content and soluble sugars in tomato. However, the SA application resulted in improvement of growth traits. Also, the results showed that the interaction effect of Pb and SA on the most growth characteristics such as plant length, shoot and root dry weights, leaf area, and proline content, soluble sugars and Pb concentration was significant. The highest proline content (23.4 mmol g⁻¹) and Pb concentration (4.26 mg kg⁻¹) were obtained in 300 mg kg⁻¹ of Pb and 0 μM SA. Also, the highest amount of soluble sugars (0.48 mg kg⁻¹), plant height (43.5 cm), root length (18.3 cm/plant), shoot dry weight (7.48 g/plant), and leaf area (263.1 cm²/plant) were found in the treatment of 500 μM SA and 0 mg kg⁻¹ Pb. It seems that under Pb-induced stress, applying SA, as a plant hormone, is an effective approach for improving crop growth by increasing plant resistance.

Conclusions: The results showed the significant negative effect of lead (Pb) on all the measured growth characteristics, including plant height, shoot dry weight, leaf area, root length, surface, volume and dry weight of tomato, as well as the amounts of proline and soluble sugars. The salicylic acid (SA) improved the resistance of tomato plants to Pb stress by increasing plant growth indices. In general, the application of appropriate concentration of SA (i.e., 500 μM) is an economic and easy strategy to reduce the effects of Pb (300 mg kg⁻¹ soil) in tomato.

References:

1. Ferronato, N., Torretta, V., 2019. Waste mismanagement in developing countries: a review of global issues. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 16(6), 1060. <https://doi.org/10.3390/ijerph16061060>.
2. Hussain, I., Siddique, A., Ashraf, M., Rasheed, R., Ibrahim, M., Iqbal, M., Akbar, S., Imran, M. 2017. Does exogenous application of ascorbic acid modulate growth, photosynthetic pigments and oxidative defense in okra (*Abelmos chusesculentus* L.) under lead stress? *Acta Physiol. Plant*. 39, 144–151. <https://doi.org/10.1007/s11738-017-2439-0>
3. Vaculík, M., Lux, A., Luxová, M., Tanimoto, E., Lichtscheidl, I., 2019. Silicon mitigates cadmium inhibitory effects in young maize plants. *Environ. Exp. Bot.* 67(1), 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.012>



اثر محلول پاشی سالیسیلیک اسید بر ویژگی‌های رشدی گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum* L.) در شرایط تنش سرب

حدیث کاکایی^۱، علی اشرف امیری‌نژاد^{۱*} و مختار قبادی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۵/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۶/۲۸)

چکیده

کاربرد هورمون‌های گیاهی، به‌عنوان یک راه‌حل ساده و مناسب برای کاهش اثر مضر فلزات سنگین در گیاهان معرفی شده است. برای بررسی اثر سالیسیلیک اسید بر کاهش تنش سرب در گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum* L.)، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشگاه رازی انجام شد. تیمارها شامل سرب در سه سطح (۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک از نمک نترات سرب) و سالیسیلیک اسید در سه سطح (۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میکرومولار) بودند. نتایج نشان داد که بیش‌ترین مقدار پرولین (۲۳/۴ میلی‌مول بر گرم) و غلظت سرب شاخساره (۴/۲۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و بدون سالیسیلیک اسید به‌دست آمد که نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد سرب و سالیسیلیک اسید)، به‌ترتیب افزایش ۳۰۳ و ۳۸۷ درصد را نشان می‌دهد. همچنین، بیش‌ترین قندهای محلول (۰/۴۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، ارتفاع گیاه (۴۳/۵ سانتی‌متر)، طول ریشه (۱۸/۳ سانتی‌متر در بوته)، وزن خشک شاخساره (۷/۴۸ گرم در بوته) و سطح برگ (۲۶۳/۱ سانتی‌مترمربع در بوته) در تیمار ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و بدون سرب حاصل شد. به‌طور کلی، نتایج نشان داد کاربرد سالیسیلیک اسید به‌عنوان یک هورمون گیاهی، راه‌حلی ساده و مناسب برای کاهش آثار مضر تنش سرب در گوجه‌فرنگی است.

واژه‌های کلیدی: تنش، فلزات سنگین، ویژگی‌های رشدی، هورمون گیاهی.

مقدمه

(2019). در مناطق خشک و نیمه‌خشک، آبیاری محصولات کشاورزی با فاضلاب‌های تصفیه‌نشده، استفاده از کودها و ترکیبات شیمیایی و نیز کاربرد کمپوست‌های آلی و فضولات حیوانی، از منابع اصلی آلودگی خاک با عناصر سنگین هستند

فلزات سنگین به دلیل غیرقابل تجزیه بودن و آثار زیان‌بار فیزیولوژیک بر گیاهان، حتی در غلظت‌های کم، اهمیت زیادی از نظر زیست‌محیطی دارند (Ferronato and Torretta, 2019).

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.amirinejad@razi.ac.ir

گیاهان، به غلظت کاربرد، نوع گونه گیاهی، دوره رشد و شرایط محیطی بستگی دارد (Abbasi et al., 2020).

در پژوهشی برای بررسی تأثیر سالیسیلیک اسید بر مقاومت گیاه ریحان نسبت به سمیت سرب گزارش شد که اثر برهم کنش سالیسیلیک اسید و سرب بر وزن تازه و خشک شاخساره، وزن تازه ریشه، کلروفیل های a و b، کارتنوئید و کربوهیدرات معنی-دار بود. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که کاربرد سالیسیلیک اسید می-تواند از طریق افزایش شاخص‌های رشدی و غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی، در کاهش آثار منفی تنش سرب در ریحان مؤثر باشد (Padash et al., 2018).

Alamer and Favez (2020) نیز با بررسی تأثیر سالیسیلیک اسید بر رشد و فعالیت‌های فیزیولوژیک گیاه جعفری تحت سمیت سرب گزارش کردند که با افزایش سطح کاربرد سرب، ضمن کاهش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید، برگ‌های جعفری حالت کلروزه نشان دادند. ولی محلول‌پاشی گیاه با سالیسیلیک اسید، به کاهش کلروز و افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاهان تیمارشده با سرب کمک کرد. به عبارت دیگر، کاربرد سالیسیلیک اسید آثار سمیت سرب بر گیاه جعفری را به طور معنی‌داری کاهش داد.

همین‌طور، در پژوهشی تأثیر کاربرد سالیسیلیک اسید بر صفات فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و عملکرد ذرت تحت تنش سرب بررسی شد. نتایج آنها نشان داد که سرب به ویژگی‌های رشدی و عملکرد گیاه آسیب رسانده و در مقابل، سالیسیلیک اسید به‌عنوان یک فیتوهورمون، نقش مهمی در فرآیندهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی داشته است. به عبارتی، سالیسیلیک اسید به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم، فرآیندهای فیزیولوژیک را بهبود بخشیده، و در نتیجه توانایی گیاه ذرت برای غلبه بر آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از سمیت سرب را افزایش داده است (Sofy et al., 2020).

گوجه‌فرنگی با نام علمی *Lycopersicon esculentum* از خانواده بادمجانیان (Solanaceae) و گیاه بومی آمریکای جنوبی است. این سبزی مهم در سطح بیش از پنج میلیون هکتار در دنیا

(Khodaverdiloo et al., 2020). در این بین، سرب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فلزات سنگین آلاینده محیط زیست، به دلیل سمیت زیاد برای گیاهان بیش‌تر مورد توجه است (Hussain et al., 2017). از آثار مهم تنش سرب بر گیاهان، کاهش سنتز کلروفیل و یا کاهش تقسیم سلولی و رشد عمومی گیاه به دلیل اختلال در فعالیت‌های آنزیمی و تولید گونه‌های اکسیژن فعال و خسارت اکسیداتیو است (Khan et al., 2016). با توجه به این مسئله، ارائه راهکارهایی برای کاهش پیامدهای منفی تنش سرب بر گیاهان امری اجتناب‌ناپذیر است.

تاکنون از روش‌های فیزیکی و شیمیایی مختلفی برای اصلاح و پالایش خاک‌های آلوده و کاهش سمیت فلزات سنگین در گیاهان استفاده شده است که اغلب این روش‌ها، علاوه بر داشتن هزینه زیاد، سبب کاهش کیفیت فیزیکی و شیمیایی و یا کاهش فعالیت‌های حیاتی خاک می‌شوند (Ward and Singh, 2004). در این راستا، کاربرد هورمون‌های گیاهی می‌تواند یک راه‌کار ساده و مناسب برای تعدیل آثار منفی تنش سرب در گیاهان باشد. به عبارت دیگر، یکی از مکانیسم‌های گیاهان برای کاهش آسیب‌های ناشی از سمیت فلزات سنگین از جمله سرب، تولید سالیسیلیک اسید است (Vaculík et al., 2019).

سالیسیلیک اسید (اورتویدروکسی بنزوئیک اسید) یک ترکیب فنولی و از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی است که در گیاهان تحت تنش محیطی نقش حفاظتی و دفاعی داشته و مقاومت گیاه را در برابر تنش افزایش می‌دهد. به عبارتی، این ماده در گیاهان نقش آنتی‌اکسیدان‌ها را ایفا کرده و باعث حذف رادیکال‌های آزاد می‌شود (Popova et al., 2009). همچنین، سالیسیلیک اسید با اثر بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند کاتالاز و سوپر اکسیدازها و متابولیت‌هایی مانند اسید آسکوربیک و گلوکاتیون و یا با کلاته کردن فلزات به دلیل داشتن گروه هیدروکسیل آزاد بر روی حلقه بنزوئیک اسید، می‌تواند آثار ناشی از تنش فلزات سنگین را کاهش دهد (Mahdavian et al., 2016). اثر سالیسیلیک اسید بر کاهش سمیت فلز سنگین در

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

Table 1. Physical and chemical properties of the soil used

سرب Pb (mg kg ⁻¹)	گنجایش تبادل کاتیونی Cation exchange capacity (cmol _e kg ⁻¹)	آهک CaCO ₃ %	کربن آلی Organic carbon %	رس Clay %	سیلت Silt %	شن Sand %	رسانایی الکتریکی عصاره اشباع Electrical conductivity of saturated extract (dS m ⁻¹)	pH
0.18	14	31.2	0.83	25	64.5	10.5	0.28	7.8

روش سه مرحله‌ای، pH گل اشباع با دستگاه pH سنج، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی و خنثی‌سازی با اسید کلریدریک (Page et al., 1982) و کربن آلی (OC) به روش اصلاح‌شده واکلسی و بلسک (Walkley and Black, 1934) انجام شد. در جدول (۱) ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی نشان داده شده است. خاک مورد بررسی دارای بافت لوم سیلت، آهکی، دارای کربن آلی کم و غیرآلوده به سرب (Madhavan et al., 1989) بود.

این پژوهش به صورت آزمایش فاکتوریل، در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشگاه رازی انجام گرفت. تیمارها شامل تنش سرب در سه سطح (۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک از نمک نترات سرب) و سالیسیلیک اسید در سه سطح (۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میکرومولار) بودند. انتخاب سطوح تیمارها بر اساس نتایج پژوهش‌های پیشین در مورد گوجه‌فرنگی و سایر گیاهان مشابه انجام شد (Guo et al., 2018; Padash et al., 2018; Sofy et al., 2020; Teymouri et al., 2021). برای آلوده کردن خاک، با توجه به سطوح غلظت سرب، مقدار نمک نترات سرب لازم در واحد حجم آب مقطر حل کرده و به صورت یکنواخت به خاک هر گلدان (روی یک نایلون پلاستیکی) پاشیده شد. به منظور برهم‌کنش کامل سرب با خاک و نزدیک شدن به شرایط خاک آلوده طبیعی، نمونه‌های خاک به مدت ۳۰ روز ضمن بهم‌زدن، در شرایط نزدیک به رطوبت گنجایش مزرعه (FC) در گلخانه نگاه داشته شد. سپس نمونه خاک آلوده شده به سرب به مقدار هفت کیلوگرم در گلدان‌هایی با ابعاد ۲۰ سانتی‌متر ارتفاع و ۲۳ سانتی‌متر قطر دهانه ریخته شد.

از بین نشاهای تهیه شده تعداد هشت نشا سالم به هر گلدان

کشت شده و تولید سالانه آن حدود ۱۶۱ میلیون تن است (FAO, 2021). گوجه‌فرنگی سرشار از مواد معدنی، انواع ویتامین‌ها و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و از مهم‌ترین محصولات زراعی در ارتباط با سلامت و تغذیه انسان به‌شمار می‌آید. این سبزی ۲۵ درصد از کل تولیدات سبزی جهان را به‌خود اختصاص می‌دهد (Veselina and Dinev, 2020).

با توجه به این‌که کشت گوجه‌فرنگی، به‌عنوان یک محصول زراعی مهم و پر بازده، در بسیاری از نقاط ایران و از جمله در حاشیه جاده‌ها بسیار رایج است، احتمال آلودگی خاک زمین‌های تحت کشت به سرب وجود دارد. هرچند پژوهش‌های متعددی در مورد اثر سالیسیلیک اسید بر کاهش تنش‌های محیطی مختلف مانند خشکی، شوری و یا برخی از فلزات سنگین بر رشد گوجه‌فرنگی وجود دارد، اما در مورد نقش این هورمون گیاهی بر کاهش تنش سرب در این سبزی، نتایج پژوهشی در دسترس وجود ندارد. بنابراین در این پژوهش، اثر محلول پاشی با سالیسیلیک اسید بر کاهش تنش سرب در گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum* L.) بررسی شد.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش، نمونه برداری از خاک رویین (عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری) مزرعه پژوهشی دانشگاه رازی با مشخصات جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۹ دقیقه و ۱۴ ثانیه شمالی و ۴۷ درجه و ۶ دقیقه و ۱۴ ثانیه شرقی انجام گرفت. اندازه‌گیری‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل تعیین بافت خاک به روش هیدرومتر، رسانایی الکتریکی (EC) عصاره گل اشباع خاک به-وسیله دستگاه رسانایی سنج، گنجایش تبادل کاتیونی (CEC) با

میلی لیتر از محلول با یک میلی لیتر ناین هیدرین و یک میلی لیتر اسید استیک ترکیب شد. پس از یک ساعت نگهداری در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس بن ماری، دو میلی لیتر تولوئن به هر نمونه افزوده شده و سپس شدت جذب نوری در طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت شد. در پایان با استفاده از منحنی واسنجی مربوطه، مقدار پرولین تعیین شد (Bates et al., 1973).

برای تعیین غلظت سرب، ۰/۵ گرم پودر خشک شاخساره را در کوره با دمای نهایی ۵۵۰ درجه سلسیوس خاکستر نموده و ۲/۵ میلی لیتر اسیدکلریدریک ۲ مولار به آن افزوده شد (Du Laing et al., 2003). پس از عصاره گیری، غلظت سرب با دستگاه اسپکتروفتومتری جذب اتمی مدل AA220 شرکت Varian (ساخت کشور استرالیا) تعیین شد.

تجزیه آماری داده‌ها با نرم افزار SPSS و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

آثار سرب و سالیسیلیک اسید بر ویژگی‌های شاخساره گیاه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر برهم کنش سالیسیلیک اسید و سرب بر وزن خشک شاخساره، سطح برگ، ارتفاع گیاه، غلظت سرب و مقادیر پرولین و قندهای محلول شاخساره در سطح یک درصد معنی دار شد (جدول ۲).

غلظت سرب شاخساره

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین غلظت سرب در شاخساره گوجه‌فرنگی (۴/۳۶ میلی گرم بر کیلوگرم) در تیمار ۳۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم سرب و بدون کاربرد سالیسیلیک اسید و کمترین آن (۰/۱۴ میلی گرم بر کیلوگرم) با کاربرد ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و بدون سرب به دست آمد (جدول ۳). به عبارت دیگر، با افزایش مقدار سرب خاک، غلظت سرب شاخساره به طور معنی داری افزایش یافت. این مسئله، بیانگر رابطه مستقیم بین غلظت فلز در محیط و جذب آن توسط گیاه است.

منتقل گردید. عملیات آبیاری بر اساس نیاز آبی گیاه و کاهش رطوبت خاک، دو یا سه بار در هفته با روش وزنی انجام شد. در طول مدت آزمایش، میانگین دمای روزانه گلخانه ۲۳-۲۰ و شبانه ۱۵-۱۰ درجه سلسیوس بود. دو هفته پس از استقرار کامل نشاها، ۵ گیاهچه را باقی گذاشته و بقیه تنک شدند. سپس، تیمار سالیسیلیک اسید در ساعات غروب آفتاب به صورت محلول پاشی برگی انجام گرفت. این عملیات با فاصله هر ده روز یک بار تکرار شده و تا شروع گلدهی ادامه یافت. در تیمار شاهد نیز آب مقطر روی گیاهان اسپری شد.

در پایان دوره رشد رویشی و در ابتدای گل‌دهی، برخی شاخص‌های رشدی گیاه تعیین شده و به صورت میانگین هر بوته محاسبه شدند. ارتفاع گیاه از سطح خاک تا انتهای ساقه و نیز طول ریشه‌ها با خط‌کش اندازه‌گیری شد. ریشه‌ها و شاخساره در آون با دمای ۷۵ درجه سلسیوس برای مدت ۷۲ ساعت خشک شده و جرم خشک آنها با ترازو تعیین شد. اندازه‌گیری سطح برگ‌های کاملاً توسعه یافته هر بوته با استفاده از کاغذ شطرنجی، قطر ساقه‌های هر بوته با استفاده از کولیس، حجم ریشه تازه هر بوته با روش جابجایی آب در استوانه مدرج و سطح ریشه‌ها با استفاده از فرمول اتکینسون انجام گرفت (Alizadeh, 2014).

برای تعیین قندهای محلول، ۰/۵ گرم نمونه خشک گیاهی با ۱/۵ میلی لیتر اتانول ۸۰ درصد به مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۸۰ درجه سلسیوس نگهداری شده و سپس نمونه‌ها سانتریفیوژ شدند. ۱۰ میکرولیتر از نمونه فاز مایع را در یک فالدکون ریخته و به آن ۲۵۰ میکرولیتر محلول ۰/۵ درصد فنول و ۱۲۵۰ میکرولیتر اسیدسولفوریک ۹۸ درصد افزوده شد. در نهایت به وسیله اسپکتروفتومتر، میزان جذب نوری در طول موج ۴۸۵ نانومتر قرائت شده و به کمک منحنی واسنجی، مقدار قندهای محلول تعیین شد (Dubois et al., 1956).

برای تعیین پرولین، ۰/۵ گرم از پودر خشک شده شاخساره را با ۱۰ میلی لیتر سولفوسالیسیلیک سه درصد به مدت ۴۸ ساعت در دمای پایین نگهداری کرده و پس از صاف کردن، یک

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر سرب و سالیسیلیک اسید بر ویژگی‌های شاخساره گوجه‌فرنگی (میانگین مربعات)

Table 2. Analysis of variance for the effects of Pb and salicylic acid on the aerial characteristics of tomato (mean squares)

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی df	غلظت سرب Pb concentration	قندهای محلول Soluble sugars	پرولین Proline	سطح برگ Leaf area	وزن خشک برگ Leaf dry weight	ارتفاع گیاه Plant height
Pb سرب	2	0.886**	1.41*	0.03**	8225**	12.9**	211**
سالیسیلیک اسید Salicylic acid (SA)	2	0.025**	1.21*	0.17**	6562**	24.8**	238**
سرب × سالیسیلیک اسید Pb × SA	4	0.007**	1.58**	0.06**	450**	0.42**	6.37**
خطا Error	18	0.001	0.33	0.004	91.7	0.08	1.11
ضریب تغییرات (%) CV (%)	-	12.1	16.5	1.8	5.4	6.1	3.2

* و **: به ترتیب اثر معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد را نشان می‌دهد.

* and ** represent significant effect at the probability levels of 5 and 1%, respectively.

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش سرب × اسید سالیسیلیک بر ویژگی‌های شاخساره گوجه‌فرنگی

Table 3. Mean comparisons of the effect of Cd × salicylic acid interaction on the aerial characteristics of tomato

سطوح سالیسیلیک اسید Salicylic acid levels ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	سطوح سرب Pb levels (mg kg^{-1})	وزن خشک شاخساره Leaf dry weight (g/plant)	سطح برگ Leaf area (cm^2/plant)	ارتفاع گیاه Plant height (cm)	پرولین Proline ($\mu\text{mol g}^{-1}$)	غلظت سرب اندام هوایی Pb (mg kg^{-1})	قندهای محلول Soluble sugars (mg kg^{-1})
0	0	5.35 ^c	181.5 ^b	31.4 ^c	7.7 ^e	1.1 ^f	0.1 ^b
	150	3.21 ^e	155.7 ^c	26.6 ^d	14.2 ^c	3.23 ^c	0.29 ^{ab}
	300	1.45 ^f	137.6 ^d	21.7 ^e	23.4 ^a	4.26 ^a	0.31 ^{ab}
250	0	6.59 ^b	191.2 ^b	38.7 ^b	3.21 ^g	0.93 ^f	0.33 ^{ab}
	150	4.47 ^d	168.2 ^c	31.9 ^c	11.3 ^d	2.72 ^d	0.30 ^{ab}
	300	3.31 ^e	160.1 ^{cd}	29.4 ^d	17.9 ^b	3.67 ^b	0.35 ^{ab}
500	0	7.48 ^a	263.1 ^a	43.5 ^a	4.3 ^h	0.14 ^f	0.31 ^{ab}
	150	5.26 ^c	182.1 ^b	38.5 ^b	8.28 ^f	2.16 ^e	0.37 ^{ab}
	300	4.53 ^d	160.5 ^c	33.1 ^c	11.4 ^d	3.21 ^c	0.48 ^a

در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

In each column, numbers with similar letters are not significantly different (Duncan's test, $p < 0.05$).

ورود به گیاه، در ریشه‌ها انباشته می‌شود، ممکن است سالیسیلیک اسید سبب اختلال در انتقال سرب از ریشه به برگ-های گیاه گردد.

از طرف دیگر، با کاربرد سالیسیلیک اسید، غلظت سرب در شاخساره گیاه به طور معنی‌داری کاهش یافت. مکانیسم این تاثیر به‌خوبی روشن نیست، اما با توجه به اینکه سرب پس از

برابر تنش شده و از سلول‌های گیاهی محافظت می‌نماید (Mahdavian et al., 2016).

در مقابل، کاربرد سالیسیلیک اسید در شرایط تنش‌های محیطی، می‌تواند فتوسنتز گیاهی و رشد عمومی گیاه را بهبود بخشد و به‌عبارتی، با تسریع رشد کلی، موجب توسعه واکنش‌های ضدتنشی و کاهش تولید پرولین در گیاهان شود (Aghlmand et al., 2017). همچنین، گزارش شده است که سالیسیلیک اسید می‌تواند با افزایش فعالیت آنزیم‌های مؤثر بر پروتئین‌سازی سلول، به حفظ غشاء سلولی و اندامک‌ها آن کمک نموده و با کاهش تنش اکسایشی، موجب کاهش تولید پرولین در گیاهان شود (Vaculik et al., 2019).

قندهای محلول

بر اساس جدول مقایسه میانگین‌ها، بیش‌ترین میزان قند محلول (۰/۴۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در گیاه، در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و کم‌ترین آن (۰/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار شاهد سرب و سالیسیلیک اسید به‌دست آمد (جدول ۳). در واقع، افزایش کربوهیدرات‌ها بیانگر نوعی مکانیسم تحمل گیاهان برای عبور از شرایط تنش محیطی است. به‌عبارتی، یکی از راه‌های سازگاری اغلب گیاهان در برابر تنش فلزات سنگین، افزایش غلظت قندهای محلول در بافت گیاهی است.

با تجمع سرب در منطقه ریشه، امکان جذب و ورود آن به درون بافت‌های گیاهی افزایش می‌یابد. این مسئله بر سرعت تنفس و متابولیسم کربوهیدرات‌ها تأثیر گذاشته و زمینه افزایش قندهای محلول را فراهم می‌سازد (Aldoobie and Beltagi, 2013). در واقع، متابولیسم قندها یک مکانیسم دفاعی برای تنظیم اسمزی است تا گیاه بتواند با افزایش ذخیره کربوهیدراتی، موجب تنظیم پتانسیل آبی سلول برای کاهش غلظت نسبی یون‌های سرب تجمع‌یافته در واکنش‌گردها (Kocal et al., 2008).

از سوی دیگر، سالیسیلیک اسید می‌تواند با تأثیر بر مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاهان تحت تنش، موجب افزایش فتوسنتز و به

به هر حال، یکی از آثار مهم تنش سرب در گیاهان، تخریب سلول‌ها با ایجاد تنش‌های اکسیداتیو است. به‌عبارت دیگر، سرب در تولید برخی از رادیکال‌های فعال اکسیژن مانند سوپراکسید و پراکسید هیدروژن نقش مؤثری دارد. در این راستا، گیاهان برای کاهش اثر این رادیکال‌های آزاد، اقدام به تولید برخی آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی (مانند کاتالاز و پراکسیدازها) و یا غیرآنزیمی (مانند گلوکاتایون و پرولین) می‌نمایند (Khan et al., 2016). در این شرایط، سالیسیلیک اسید نیز می‌تواند با مهار فعالیت کاتالاز، سطح پراکسید هیدروژن در سلول‌های گیاهی افزایش دهد (Abbasi et al., 2020). پراکسید هیدروژن در فرآیندهای انتقال نقش سیگنال را بازی کرده و ژن‌های وابسته به مقاومت را در گیاهان فعال می‌کند. به‌عبارت دیگر، سالیسیلیک اسید نقش یک مولکول پیام‌رسان طبیعی را در افزایش مقاومت دفاعی گیاه را ایفاء کرده که می‌تواند آثار سوء تنش سرب را در گیاهان کاهش دهد.

پرولین شاخصاره

بررسی نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیش‌ترین مقدار پرولین در بخش هوایی گیاه (۲۳/۴ میکرومول بر گرم) با کاربرد ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب (بدون سالیسیلیک اسید) و کم‌ترین آن (۴/۳ میکرومول بر گرم) با کاربرد ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید (بدون سرب) به‌دست آمد (جدول ۳). به‌عبارتی، با افزایش مقدار سرب خاک و جذب آن به‌وسیله گیاه، مقدار پرولین شاخصاره به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. این مسئله، بیانگر اثر تنش سرب بر افزایش اسید آمینه پرولین در گیاه است. به‌عبارت دیگر، افزایش تولید و تجمع پرولین در سیتوپلاسم سلولی در شرایط تنش سرب نسبت به شرایط معمول، نشان‌دهنده نقش پرولین به‌عنوان یک ترکیب مهم سیستم دفاعی گیاهان است (Rasheed et al., 2014). به‌عبارتی، افزایش تولید پرولین نسبت به سایر آمینواسیدها در طی تنش‌های اکسیداتیو و از جمله تنش فلزات سنگین، یک مکانیسم دفاعی آنتی‌اکسیدانی است که منجر به افزایش تحمل گیاه در

۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و بدون سرب و کم‌ترین آن (۱/۴۵ گرم در بوته) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و بدون سالیسیلیک اسید به‌دست آمد (جدول ۳). کاهش رشد شاخساره گیاهان تحت تنش سرب می‌تواند به‌دلیل تجمع زیاد این فلز در گیاه، لیگنینی‌شدن دیواره سلولی و یا برهم‌کنش سرب با گروه‌های سولفیدریل غشاء سلولی و غیرفعال کردن آن‌ها باشد (Khan et al., 2016).

نتایج برخی پژوهش‌ها نشان داد که در گیاهان تیمار شده با سالیسیلیک اسید، در نتیجه افزایش میزان فتوسنتز کل، کاهش تعرق و افزایش RWC برگ، وزن خشک گیاهان افزایش یافته است (Aghlmand et al., 2017). هماهنگ با نتایج پژوهش حاضر، (Teymouri et al., 2021) نیز گزارش کرده‌اند که با افزایش غلظت سرب خاک، مقادیر وزن خشک شاخساره و ریشه گیاه مریم گلی کاهش معنی‌داری یافته و در مقابل با کاربرد سالیسیلیک اسید، وزن خشک شاخساره و ریشه افزایش یافت.

سطح برگ

بیش‌ترین سطح برگ (۲۶۳/۱ سانتی‌متر مربع در بوته) در شرایط بدون تنش سرب و کاربرد ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و کم‌ترین آن (۱۳۷/۶ سانتی‌متر مربع) در شرایط کاربرد ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و بدون سالیسیلیک اسید به‌دست آمد (جدول ۳). کاهش سطح برگ در شرایط تنش‌های محیطی و از جمله تنش فلزات سنگین، یک پاسخ و واکنش منفی گیاهان حساس است. به عقیده برخی دانشمندان، فلزات سنگین از عوامل محدودکننده رشد ریشه گیاهان در خاک بوده که در اثر کاهش رشد و گسترش سیستم ریشه‌ای و یا تغییر در ساختار غشاء سلول‌های ریشه، موجب کاهش جذب آب و عناصر غذایی می‌شود (Emamverdian et al., 2015). بنابراین این تغییرات بر فرآیندهای فیزیولوژیک مانند تعرق، تنفس و فتوسنتز اثر گذاشته و در نهایت موجب کاهش رشد قسمت‌های مختلف گیاه و از جمله کاهش سطح برگ می‌گردد.

دنبال آن افزایش میزان قندهای محلول شود (Popova et al., 2009). به‌عبارت دیگر، سالیسیلیک اسید با تأثیر بر بیش‌تر واکنش‌های متابولیکی گیاهان، نقش مهمی در کاهش آثار ناشی از تنش‌های محیطی و از جمله تنش فلزات سنگین دارد. بنابراین، می‌توان گفت که افزایش قندهای محلول در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید، بیان‌گر نقش سالیسیلیک اسید در افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش سرب است.

ارتفاع گیاه

بر اساس نتایج بدست‌آمده، بیش‌ترین ارتفاع گیاه (۲۳/۵ سانتی‌متر) در شرایط کاربرد ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و بدون سرب و کم‌ترین آن (۲۱/۷ سانتی‌متر) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و بدون سالیسیلیک اسید به‌دست آمد (جدول ۳). به‌عقیده (Teymouri et al., 2021)، سرب از جمله فلزات سنگین است که در گیاهان تنش اکسیداتیو ایجاد می‌کند. وقتی گیاهان در معرض غلظت زیاد سرب قرار گیرند، علاوه بر کاهش وزن خشک شاخساره و ریشه، ارتفاع گیاه تحت تنش نیز کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین گزارش کردند که، با محلول‌پاشی گیاهان با سالیسیلیک اسید، آثار منفی سرب کاهش یافته و ارتفاع بوته‌های ریحان به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است (Teymouri et al., 2021).

همچنین، گزارش شده است که علت کاهش ارتفاع گیاهان با تجمع فلزات سنگین در ریزوسفر، اثر این فلزات بر کاهش مقدار نسبی آب (RWC) گیاه بوده که با تأثیر بر کانال‌های آبی تونوپلاست، موجب کاهش طول‌شدگی سلولی می‌شوند (Shamshirgaran et al., 2016). از طرف دیگر، سالیسیلیک اسید ممکن است با تأثیر بر جذب عناصر غذایی به‌وسیله ریشه در شرایط تنش سرب، زمینه افزایش شاخص‌های رشدی و از جمله ارتفاع گیاه را فراهم سازد (Abbasi et al., 2020).

وزن خشک شاخساره

بیش‌ترین وزن خشک شاخساره (۷/۴۸ گرم در بوته) با کاربرد

جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس آثار سرب و سالیسیلیک اسید بر ویژگی‌های ریشه گوجه‌فرنگی (میانگین مربعات)

Table 4. Analysis of variance for the effects of Pb and salisilic acid on the root characteristics of tomato (mean squares)

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی df	سطح ریشه Root area	حجم ریشه Root volume	وزن خشک ریشه Root dry weight	طول ریشه Root length
سرب Pb	2	362**	317*	5.21*	91.1**
سالیسیلیک اسید Salisilic acid (SA)	2	411**	1602**	8.94**	40.7**
سرب × سالیسیلیک اسید Pb × SA	4	13.8*	319.7*	7.94**	3.81**
خطا Error	18	3.32	75.4	1.33	0.69
ضریب تغییرات (%) CV (%)	-	5.2	26.5	33.4	6.1

* و **: به ترتیب اثر معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد را نشان می‌دهد.

* and ** represent significant effect at the probability levels of 5 and 1%, respectively.

2015). یافته‌های Teiymouri et al. (2021) بر روی گیاه مریم گلی نیز نشان داد که افزایش غلظت سرب در محیط ریشه، سبب کاهش معنی‌دار طول ریشه شد، اما کاربرد همزمان سالیسیلیک اسید با سرب، موجب افزایش طول ریشه نسبت به تیمار سرب گردید.

ریشه عامل تماس گیاه با محیط خاک است و بنابراین اثر سرب موجود در خاک بر کاهش طول ریشه بوته‌های گوجه‌فرنگی قابل انتظار است. در واقع سرب موجب کاهش تقسیم سلولی و رشد بافت‌های مختلف و از جمله طول ریشه می‌شود. همچنین، دلیل دیگر کاهش رشد و توسعه ریشه در خاک با حضور فلزات سنگین و از جمله سرب، چوبی‌شدن بافت دیواره سلول‌ها گزارش شده است (Hussain et al., 2017). از سوی دیگر، کاربرد سالیسیلیک اسید به‌عنوان یک هورمون گیاهی سبب افزایش طول ریشه گوجه‌فرنگی شد. در حقیقت، این هورمون می‌تواند بر رشد ریشه تأثیر گذاشته و با تحریک آن، اثر منفی سرب را کاهش دهد (Abbasi et al., 2020).

وزن خشک ریشه

بررسی اثر سالیسیلیک اسید بر سطح ریشه بوته‌های

از طرف دیگر، سالیسیلیک اسید به‌عنوان یکی از تنظیم‌کننده‌های رشدی، با افزایش آنزیم رابیسکو سبب افزایش سطح برگ و بهبود فتوسنتز می‌شود (Abbasi et al., 2020). همچنین گزارش شده است که سالیسیلیک اسید با کاهش سرعت نمو و یا به تأخیر انداختن زمان رسیدگی گیاه، سبب افزایش سطح برگ می‌شود (Shamshirgaran et al., 2016).

آثار برهم‌کنش سرب و سالیسیلیک اسید بر ویژگی‌های ریشه
نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد که اثر برهم‌کنش سالیسیلیک اسید و سرب بر طول و وزن خشک ریشه (در سطح یک درصد)، و سطح و حجم ریشه (در سطح ۵ درصد) معنی‌داری شد (جدول ۴).

طول ریشه

بیش‌ترین طول ریشه (۱۸/۳ سانتی‌متر در بوته) در تیمار ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و بدون سرب و کم‌ترین آن (۷ سانتی‌متر در بوته) در شرایط تنش ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و بدون کاربرد سالیسیلیک اسید به‌دست آمد (جدول ۵). فلزات سنگین به‌وسیله مهار تقسیم سلولی و یا کاهش تقسیم سلولی، سبب کاهش طول ریشه می‌شوند (Singh et al.,

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش سرب × سالیسیلیک اسید از نظر ویژگی‌های ریشه گوجه‌فرنگی

Table 5. Mean comparisons of the effect of Pb × salicylic acid interaction on the root characteristics of tomato

سطوح سالیسیلیک اسید Salicylic acid levels ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	سطوح سرب Pb levels (mg kg^{-1})	وزن خشک ریشه Root dry weight (g/plant)	طول ریشه Root length (cm/plant)	حجم ریشه Root volume (cm^3/plant)	سطح ریشه Root area (cm^2/plant)
0	0	3.51 ^a	11.9 ^{cd}	29.1 ^{ab}	37.7 ^{bc}
	150	2.67 ^b	8.7 ^e	27.3 ^{ab}	27.9 ^e
	300	2.24 ^b	7.0 ^f	22.8 ^b	20.7 ^f
250	0	4.25 ^{ab}	16.1 ^b	35.1 ^{ab}	40.1 ^b
	150	2.91 ^b	12.1 ^{cd}	30.9 ^{ab}	35.1 ^d
	300	2.48 ^b	8.9 ^e	27.9 ^{ab}	31.0 ^e
500	0	5.07 ^a	18.3 ^a	44.1 ^a	48.7 ^a
	150	3.81 ^{ab}	13.1 ^c	35.1 ^{ab}	42.0 ^b
	300	3.32 ^{ab}	10.9 ^d	31.9 ^{ab}	37.3 ^{cd}

در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

In each column, numbers with similar letters are not significantly different (Duncan's test, $p < 0.05$).

حجم و سطح ریشه

بر اساس نتایج بدست آمده، اگرچه استفاده از تیمارهای ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب به ترتیب باعث کاهش ۶/۲ و ۲۱/۷ درصدی حجم ریشه گوجه‌فرنگی شد اما در مقابل، استفاده از تیمارهای ۲۵۰ و ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید به ترتیب باعث افزایش ۲۲/۳ و ۴۸/۹ درصدی حجم ریشه گردید. همچنین، بیش‌ترین سطح ریشه (۴۸/۷ سانتی‌متر مربع در بوته) در شرایط بدون تنش سرب و کاربرد ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و کم‌ترین آن (۲۰/۷ سانتی‌متر مربع در بوته) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و بدون سالیسیلیک اسید بدست آمد (جدول ۵).

سرب به‌عنوان یکی از فلزات سنگین مهم محدودکننده رشد ریشه گیاهان شناخته شده که موجب کاهش توسعه سیستم ریشه‌ای در خاک می‌شود. این کاهش رشد ممکن است نتیجه اختلال در عملکرد هورمون اکسین یا به دلیل جلوگیری از تشکیل ریشه‌های جانبی در گیاهان تیمار شده با سرب باشد. به عبارت‌تی، تنش سرب ناشی از غلظت زیاد این عنصر در خاک سبب می‌شود ریشه‌ها کوتاه، ضعیف و کم حجم شوند (Singh et al., 2015).

گوجه‌فرنگی تحت تنش سرب نشان داد که استفاده از تیمارهای ۲۵۰ و ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید به ترتیب باعث افزایش ۲۱/۱ و ۴۴/۵ درصدی وزن خشک ریشه شد. استفاده از تیمارهای ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب نیز به ترتیب وزن خشک ریشه را به میزان ۲۳/۹ و ۳۶/۱ درصد کاهش داد (جدول ۵).

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد فلزات سنگین (مانند سرب) بر فرایند تقسیم سلولی اثر منفی داشته و به عبارتی از رشد عمومی گیاه و از جمله رشد و توسعه ریشه در خاک جلوگیری می‌کنند. بنابراین، قابل پیش‌بینی است که با تجمع سرب در محیط ریزوسفر، زیتوده ریشه به‌طور معنی‌داری کاهش یابد. اما کاربرد سالیسیلیک اسید توانست آثار منفی سرب بر توسعه و رشد ریشه گوجه‌فرنگی را کاهش داده و به عبارتی موجب افزایش وزن خشک ریشه شود. به عقیده برخی دانشمندان اثر فلزات سنگین بر کاهش رشد شاخساره و ریشه گیاهان ناشی از اختلال در تولید هورمون‌های گیاهی مانند اکسین است، اما سالیسیلیک اسید به‌عنوان یک هورمون رشد گیاهی سبب افزایش طول، حجم و جرم ریشه گیاهان می‌گردد (Ferronato and Torretta, 2019).

نتیجه گیری

میلی گرم بر کیلوگرم سرب) بر ویژگی‌های رشدی شاخساره و ریشه گوجه‌فرنگی است.

نتایج این پژوهش بیانگر اثر معنی‌دار سرب بر کاهش تمام شاخص‌های رشدی مورد اندازه‌گیری شامل ارتفاع گیاه، وزن خشک شاخساره، سطح برگ، طول، سطح، حجم و وزن خشک ریشه گوجه‌فرنگی و نیز مقادیر پرولین و فندهای محلول بود. به عبارت دیگر، تیمار سالیسیلیک اسید با افزایش شاخص‌های رشدی گیاه، سبب بهبود مقاومت بوته‌های گوجه‌فرنگی در برابر تنش سرب شد. به طور کلی می‌توان گفت که کاربرد غلظت مناسب سالیسیلیک اسید (۵۰۰ میکرومولار) یک روش اقتصادی و آسان در راستای کاهش آثار تنش سرب (تیمار ۳۰۰

تشکر و سپاسگزاری

در انجام این پژوهش، حمایت مالی خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نشده است.

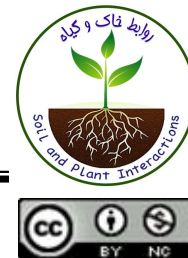
تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منفعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

منابع مورد استفاده

1. Abbasi, F., Khaleghi, A., Khadivi, A., 2020. The Effect of salicylic acid on physiological and morphological traits of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Gesunde Pflanzen*, 72, 155–162. <https://doi.org/10.1007/s10343-019-00496-0>
2. Aghlmand, S., Esmailpour, B., Jalilvand, P., Heidari, H., 2017. Effect of salicylic acid and paclobutrazole on growth and physiological traits of basil under water stress conditions. *Plant Proce. Func.* 9, 35–44 (In Persian with English abstract). <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-502-en.html>
3. Alamer, K.H., Fayez, K.A., 2020. Impact of salicylic acid on the growth and physiological activities of parsley plants under lead toxicity. *Physiol. Mol. Biol. Plants* 26(7), 1361–1373. <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00830-1>
4. Aldoobie, N.F., Beltagi, M.S., 2013. Physiological, biochemical and molecular responses of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants to heavy metals stress. *Afr. J. Biotechnol.* 12(29), 4614–4622. <https://doi.org/10.5897/AJB2013.12387>
5. Alizadeh, A., 2014. *Water, Soil and Plant Relation*. 14th edition, Astane Godse Razavi Press, 484p.
6. Bates, L.S., Waldren, R.P., Teare, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant Soil* 29, 205–207. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00018060>
7. Dubois, D., Gilleres, K.A., Hamilton, J.K., 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Anal. Chem.* 28, 350–356. <http://dx.doi.org/10.1021/ac60111a017>
8. Emamverdian, A., Ding, Y., Mokhberdorran, F., Xie, Y., 2015. Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response. *Sci. World J.* 2015, 1–18. <https://doi.org/10.1155/2015/756120>
9. FAO, 2021. *Food and Agricultural Organization Statistics Book on National Crop Production*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
10. Ferronato, N., Torretta, V., 2019. Waste mismanagement in developing countries: a review of global issues. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 16(6), 1060. <https://doi.org/10.3390/ijerph16061060>
11. Guo, J., Zhou, R., Ren, X., Jia, H., Hua, L., Xu, H., Lv, X., Zhao, J., Wei, T., 2018. Effects of salicylic acid, epibrassinolide and calcium on stress alleviation and Cd accumulation in tomato plants. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 157, 491–496. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.04.010>
12. Hussain, I., Siddique, A., Ashraf, M., Rasheed, R., Ibrahim, M., Iqbal, M., Akbar, S., Imran, M., 2017. Does exogenous application of ascorbic acid modulate growth, photosynthetic pigments and oxidative defense in okra (*Abelmos chusesculentus* L.) under lead stress? *Acta Physiol. Plant.* 39, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s11738-017-2439-0>
13. Khan, I., Iqbal, M., Ashraf, M.Y., Ashraf, M.A., Ali, S., 2016. Organic chelates-mediated enhanced lead (Pb) uptake and accumulation is associated with higher activity of enzymatic antioxidants in spinach (*Spinace aoleracea* L.). *J. Hazard. Mater.* 317, 352–361. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.06.007>
14. Khodaverdiloo, H., Han, F.X., Hamzenejad, R., Karimi, A., Moradi, N., Kazery, J.A., 2020. Potentially toxic element contamination of arid and semi-arid soils and its phytoremediation. *Arid Land Res. Manag.* 34, 361–391. <https://doi.org/10.1080/15324982.2020.1746707>
15. Kocal, N., Sonnewald, U., Sonnewald, S., 2008. Cell wall-bound invertase limits sucrose export and is involved in symptom development and inhibition of photosynthesis during compatible interaction in tomato. *Plant Physiol.* 148,

- 1523–36. <https://doi.org/10.1104/pp.108.127977>
16. Du Laing, G., Tack, F.M.G., Verloo, M.G., 2003. Performance of selected destruction methods for the determination of heavy metals in reed plants *Phragmites australis*. J. Analyt. Chim. Acta. 49, 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2003.08.044>.
17. Mahdavian, K., Ghaderian, S.M., Schat, H., 2016. Pb accumulation, tolerance, antioxidants, thiols, and organic acids in metalicolous and non-metalicolous *Peganum harmala* under Pb exposure. Environ. Exp. Bot. 126, 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.01.010>
18. Madhavan, S., Rosenman, K.D., Shehata, T., 1989. Lead in soil: recommended maximum permissible levels. Environ. Res. 49(1), 136–142. [https://doi.org/10.1016/S0013-9351\(89\)80028-3](https://doi.org/10.1016/S0013-9351(89)80028-3)
19. Padash A., Ghanbari A. Sirousmehr A., and Asgharipour M.R. 2018. Effect of salicylic acid on concentration of nutrients, protein and antioxidant enzymes of basil under lead stress. Iran. J. Plant Res. 31(1), 35–44. (In Persian with English abstract). 20.1001.1.23832592.1397.31.1.4.0
20. Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), 1982. Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties, Second Edition, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Inc, Madison, WI, USA. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed>
21. Popova, L.P., Maslenskova, L.T., Yordanova, R.Y., Ivanova, A.P., Krantev, A.P., Szalai, G., Janda, T., 2009. Exogenous treatment with salicylic acid attenuates cadmium toxicity in pea seedlings. Plant Physiol. Biochem. 47(3), 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.11.007>
22. Rasheed, R., Ashraf, M.A., Hussain, I., Haider, M.Z., Kanwal, U., Iqbal, M., 2014. Exogenous proline and glycine betaine mitigate cadmium stress in two genetically different spring wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. Braz. J. Bot. 37, 399–406. <https://doi.org/10.1007/s40415-014-0089-7>
23. Shamsirgaran, Z S, Saied Nematpour, F., Safipour Afshar, A., 2016. Effect of mycorrhizal symbiosis on growth, some physiological parameters and cadmium accumulation in black seed (*Nigella sativa* L.). J. Plant Proc. Func. 5 (17), 133–144. <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-436-fa.html> (In Persian with English abstract).
24. Singh, S., Parihar, P., Singh, R., Singh, V.P., Prasad, S.M., 2015. Heavy metal tolerance in plants: role of transcriptomics, proteomics, metabolomics, and ionomics. Front. Plant Sci. 6, 1143. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01143>
25. Sofy, M.R., Seleiman, M.F., Alhammad, B.A., Alharbi, B.M., Mohamed, H.I., 2020. Minimizing adverse effects of Pb on maize plants by combined treatment with jasmonic, salicylic acids and proline. Agronomy 10(5), 699. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050699>
26. Teymouri, A., Amirnejad, A., Ghobadi, M., 2021. The effects of biochar and salicylic acid on alleviation of Pb stress in salvia (*Salvia officinalis* L.). J. Soil Plant Interac. 12(1), 95–108 (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jspi.12.1.20161>
27. Vaculík, M., Lux, A., Luxová, M., Tanimoto, E., Lichtscheidl, I., 2019. Silicon mitigates cadmium inhibitory effects in young maize plants. Environ. Exp. Bot. 67(1), 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.012>
28. Veselina, V., Dinev, N.S., 2020. Mineral content and quality parameters of tomato fruits as affected by different potassium fertilization treatments and cultivar specifics. Indian J. Agric. Res. 55(2), 169–174. <https://doi.org/10.18805/IJARE.A-563>.
29. Walkley, A., Black, I.A., 1934. Examination of the degtjareff method determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 37(1), 29–38.
30. Ward, O.P., Singh, A., 2004. Soil bioremediation and phytoremediation - An overview. In: Singh, A., Ward, O.P. (Eds), Applied Bioremediation and Phytoremediation. Springer, Berlin, Germany, pp. 1–11.



The Effect of Different Levels of Carbon Dioxide and Ethanol Spraying on The Growth, and Physiological and Biochemical Characteristics of Basil

E. Darabi Hoseinabad Ghaeni¹, M. Moghaddam*^{ID} and F. Arasteh

(Received: 3 June 2023; Accepted: 31 October 2023)

Abstract

One of the research requirements in agriculture is to find a new and practical method for sustainable production that brings the highest efficiency and the least harm to humans and the environment. In order to investigate the effect of different levels of carbon dioxide and ethanol foliar spraying on the physiological and biochemical characteristics of basil (*Ocimum basilicum* cv. Keshkeni luvelou), a factorial pot experiment based on a completely randomized design with three replications was conducted in the research greenhouse of the Department of Horticultural Sciences and Landscape of Ferdowsi University Mashhad in 2018. The factors included ethanol spraying at 4 levels (0, 10, 20, and 30% v/v) and carbon dioxide at 3 levels (380, 700, and 1050 $\mu\text{mol mol}^{-1}$). The results showed that the highest relative water content (RWC) of leaf, photosynthesis rate, transpiration rate, stomatal conductance, and leaf protein were observed in the treatment of 20% v/v ethanol foliar application with the application of 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ of carbon dioxide, as they increased by 45%, 295%, 684%, 83%, and 328% compared to the control, respectively. Fresh and dry biomasses of shoot parts increased significantly with increasing carbon dioxide concentration and ethanol spraying. Thus, the highest fresh and dry biomasses of shoot parts were obtained in foliar spraying of 30% v/v of ethanol and 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ of carbon dioxide which increased by 176% and 76%, respectively, compared to the control. The highest activity of polyphenol oxidase and guaiacol peroxidase, stomatal resistance, and electrolyte leakage were related to spraying 30% v/v of ethanol with an application of 1050 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ of carbon dioxide which showed an increase of 2%, 4%, 65%, and 76%, respectively, compared to the control. Overall, the results showed that foliar spraying of 20 and 30% v/v of ethanol along with the application of 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ carbon dioxide had the greatest effect in increasing photosynthesis and finally the fresh and dry biomasses of basil.

Keyword: Photosynthesis, Transpiration, Electrolyte leakage, Polyphenol oxidase, Stomatal conductance.

Background and Objective: Basil (*Ocimum basilicum* L.) is one of the valuable plants that is widely cultivated in the warm regions of Africa, Asia, and the Mediterranean climate zone. Finding a practical method for sustainable production in agriculture that brings the highest efficiency and the minimum harm to humans and the environment is necessary. One of the effective methods of fertilization in the agricultural

1- Department of Horticultural Science and Landscape Architecture, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

* Corresponding author, Email: m.moghaddam@um.ac.ir

system is the foliar application of fertilizers and leaf feeding, by which nutrients can be quickly provided to the aerial parts of the plant. Alcohols are passively absorbed by plant cells via simple diffusion through the membrane. In this regard and considering the positive effects of ethanol, this research aims to investigate some physiological and biochemical responses of basil cv. Keshkeni luvellou to carbon dioxide and foliar application of ethanol.

Methods: A pot experiment was conducted as a factorial experiment based on a completely randomized design with three replications in the research greenhouse of the Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad in 2018. Experimental factors included ethanol foliar application at 4 levels (0, 10, 20, and 30% v/v) and carbon dioxide at 3 levels (380, 700, and 1050 $\mu\text{mol mol}^{-1}$). The plants were harvested at the flowering stage to evaluate some physiological and biochemical characteristics including photosynthesis rate, transpiration rate, stomatal conductance, leaf relative water content (RWC), leaf protein, electrolyte leakage, polyphenol oxidase activity, guaiacol peroxidase activity, and stomatal resistance. Minitab17 software was used to analyze the data and the mean comparison was performed based on the Bonferroni test ($p < 0.05$).

Results: The results showed that the highest leaf RWC, photosynthesis rate, transpiration rate, stomatal conductance, and leaf protein were observed in the treatment of 20% v/v ethanol foliar application with the application of 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ of carbon dioxide. In addition, the highest polyphenol oxidase and guaiacol peroxidase activities, stomatal resistance, and electrolyte leakage were obtained in the treatment of 30% v/v ethanol application with a 1050 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ of carbon dioxide. The fresh and dry biomasses of shoot increased significantly with increasing carbon dioxide concentration and ethanol spraying. Thus, the highest fresh and dry biomasses of shoot were obtained in the foliar spraying of 30% v/v ethanol with the use of 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ carbon dioxide.

Conclusions: In this study, the results showed that all the studied traits were affected by ethanol foliar spraying and elevated carbon dioxide. Furthermore, the results showed that foliar application of 20 and 30% v/v of ethanol with the application of 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ of carbon dioxide had the most effect on the studied characteristics. Besides, the control treatment (without ethanol foliar application and carbon dioxide injection) had the least significant effect on the studied traits. Overall, the results of this research showed that foliar spraying of 20 and 30% v/v of ethanol with the application of 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ carbon dioxide had the greatest effect in increasing photosynthesis rate and the fresh and dry biomass of basil plants.

References:

1. Khosravi, M.T., Mehrafarin, A., Naqdi Badi, H.A., Haji Aghaei, R., Khosravi, A., 2011. The effect of methanol and ethanol on the performance of *Echinacea purpurea* in Karaj. *J. Med. Plant Res.* 2(2), 128–121.



تأثیر سطوح مختلف دی اکسید کربن و محلول پاشی اتانول بر رشد و برخی ویژگی های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی ریحان

عزت دارابی حسین آباد قاینی^۱، محمد مقدم* و فائزه آراسته

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۸/۹)

چکیده

به منظور بررسی تأثیر سطوح مختلف دی اکسید کربن و محلول پاشی اتانول بر فرایندهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی ریحان رقم کشکنی لولو (*Ocimum basilicum* cv. Keshkeni luvelou) آزمایشی گلدانی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه پژوهشی گروه علوم باغبانی و مهندسی فضای سبز دانشگاه فردوسی مشهد در سال ۱۳۹۸ اجرا شد. فاکتورهای آزمایش شامل محلول پاشی اتانول در ۴ سطح (۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد حجمی) و دی اکسید کربن در ۳ سطح (۳۸۰، ۷۰۰ و ۱۰۵۰ میکرومول بر مول) بودند. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین محتوای نسبی آب برگ، فتوسنتز، تعرق، هدایت روزنه‌ای و پروتئین برگ در تیمار محلول پاشی ۲۰ درصد حجمی اتانول همراه با کاربرد ۷۰۰ میکرومول بر مول دی اکسید کربن بود که به ترتیب ۴۵، ۲۹۵، ۶۸۴، ۸۳ و ۳۲۸ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد داشت. جرم زیست توده تازه و خشک شاخساره با افزایش غلظت دی اکسید کربن و محلول پاشی اتانول افزایش معنی داری پیدا کردند. به طوری که بیشترین مقدار آن‌ها در محلول پاشی ۳۰ درصد حجمی اتانول همراه با کاربرد ۷۰۰ میکرومول بر مول دی اکسید کربن به دست آمد که به ترتیب ۱۷۶ و ۷۶ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داشت. بیشترین فعالیت آنزیم‌های پلی فنل اکسیداز، گایاکول پراکسیداز و مقاومت روزنه‌ای و نشت الکترولیت مربوط به محلول پاشی ۳۰ درصد حجمی اتانول همراه با کاربرد ۱۰۵۰ میکرومول بر مول دی اکسید کربن بود که به ترتیب ۲، ۴، ۶۵ و ۷۶ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش نشان داد. در کل نتایج این پژوهش نشان داد محلول پاشی ۲۰ و ۳۰ درصد حجمی اتانول همراه با کاربرد ۷۰۰ میکرومول بر مول دی اکسید کربن بیشترین تأثیر را در افزایش فتوسنتز و در نهایت زیست توده تازه و خشک گیاه ریحان داشت.

واژه‌های کلیدی: فتوسنتز، تعرق، پلی فنل اکسیداز، نشت الکترولیت، هدایت روزنه‌ای.

مقدمه

کشت می‌شود. یکی از روش‌های مؤثر کوددهی در نظام

کشاورزی، محلول پاشی کودها و تغذیه برگ است که توسط

آن می‌توان عناصر غذایی را در اسرع وقت در اختیار شاخساره

ریحان (*Ocimum basilicum* L.) یکی از گیاهان ارزشمندی

است که به طور گسترده در مناطق گرم آفریقا، آسیا و مدیترانه

۱- گروه علوم باغبانی و مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.moghadam@um.ac.ir

باعث افزایش عملکرد نعناع‌فلغلی شد (Nurafkan et al., 2018). براساس نتایج پژوهشی که در سال ۲۰۲۳ انجام شده است، افزایش دی‌اکسید کربن باعث رشد برگ‌های کاهو، افزایش کارایی فتوسنتزی و بهبود کیفیت آن شد (Song et al., 2023). افزایش غلظت دی‌اکسید کربن سبب توسعه اندام‌ها و تأثیر مثبت بر عملکرد و کیفیت بادمجان شد (Kirnakak et al., 2001). (Khosravi et al., 2011) گزارش کردند محلول‌پاشی متانول (۵۰-۱۰ درصد حجمی) رشد و عملکرد گیاه بادم زمینی را با توجه به کاهش سرعت تنفس نوری افزایش داد و همین‌طور باعث آماس سلول‌ها شد. تشکیل کلروفیل در حضور نور نیازمند هورمون سیتوکنین است. از آنجایی که محلول‌پاشی با الکل‌ها باعث افزایش سیتوکنین گیاه می‌شود، می‌تواند باعث افزایش کلروفیل در گیاه شود (Moghaddam et al., 2014). تاکنون پژوهش‌های زیادی در مورد تأثیر مثبت دی‌اکسید کربن بر رشد و عملکرد محصولات مختلف انجام شده است. اتانول به‌عنوان یک ماده طبیعی در تغذیه کربنی برای افزایش فتوسنتز به ویژه زمانی که محدودیت دی‌اکسید کربن در هوا وجود دارد می‌تواند مطرح باشد. بنابراین هدف از انجام پژوهش حاضر ارزیابی زیست‌توده تازه و خشک شاخساره، و ویژگی‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیک ریحان تحت تأثیر برهم‌کنش غلظت-های مختلف دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول و تعیین بهترین غلظت‌ها و سطح سمیت تیمارها بود.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی اثر برهم‌کنش دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول بر زیست‌توده تازه و خشک شاخساره، و ویژگی‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی ریحان رقم کشکنی لولو (*Ocimum basilicum* cv. keshkeni luvelou) آزمایشی گلدانی در طول بهار و تابستان سال ۱۳۹۸ در گلخانه پژوهشی گروه علوم باغبانی و مهندسی فضای سبز دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد (واقع در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۱ دقیقه شرقی و

گیاه قرار داد. الکل‌ها به‌صورت غیرفعال و به‌وسیله انتشار ساده از غشاء سلولی عبور کرده و جذب سلول‌های گیاه می‌شوند (Khosravi et al., 2011). تغذیه از طریق برگ و یا به‌عبارتی محلول‌پاشی یکی از روش‌های رساندن مواد غذایی و عناصر مورد نیاز به گیاهان است که به‌علت سرعت جذب از راه شاخساره می‌توان در کوتاه‌ترین زمان به نتیجه رسید و نیاز غذایی گیاهان را تأمین نمود. چون محلول‌پاشی با الکل‌ها (به ویژه اتانول و متانول) به‌عنوان یکی از راهکارهای مناسب در افزایش عملکرد کمی و کیفی گیاهان به حساب می‌آید، دارای جایگاه ویژه‌ای در کشاورزی پایدار و حفظ منابع طبیعی و همین‌طور بقای آن برای نسل‌های آینده است. اتانول یکی از ساده‌ترین فرآورده‌های گیاهی است که توسط بیش‌تر گیاهان به‌ویژه در طول مراحل اولیه رشد برگ‌ها تحت تأثیر دمتیلاسیون پکتین، تولید می‌شود و با ماهیت یک ترکیب فرار به‌سرعت از طریق روزنه‌های برگ به محیط خارج انتشار می‌یابد (Bradford, 1996). اتانول و متانول به علت دارا بودن مولکول‌های کوچک‌تر از دی‌اکسید کربن به‌سهولت با انتشار ساده بدون صرف انرژی، از غشاء سلول گیاهی عبور کرده و جذب سلول می‌گردد و در نتیجه سبب افزایش ماده خشک گیاه می‌شوند (Asgari and Moeinfard, 2014). پژوهش‌ها ثابت کرده است که اتانول در بافت گیاهی به فرمالدهید و سرانجام به دی‌اکسید کربن تبدیل می‌شود. افزایش غلظت دی‌اکسید کربن داخلی باعث افزایش عملکرد فتوسنتزی گیاه می‌شود (Khosravi, 2011). پژوهش‌ها آثار مستقیم و غیرمستقیم افزایش غلظت دی‌اکسید کربن را بر ذرت (گیاه چهارکربنه) مثبت و مفید ارزیابی نموده و نشان دادند که افزایش غلظت دی‌اکسید کربن موجب افزایش عملکرد ذرت در حدود ۲۲ درصد می‌گردد (Jones et al., 1984). علاوه بر این استفاده از ترکیبات الکلی به‌عنوان یک محرک زیستی عمل کرده و باعث افزایش رشد و عملکرد گیاه می‌شود (Benson and Nonomun, 1994). پژوهش‌های انجام‌شده در این راستا نشان داده است که محلول‌پاشی با اتانول به‌ویژه در غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ درصد

انتقال داده شدند. اولین محلول‌پاشی با اتانول در مرحله ۸ برگی و محلول‌پاشی‌های دیگر با فاصله یک هفته از هم و به مدت یک ماه انجام شدند. ارزیابی و اندازه‌گیری صفات در مرحله تمام گل صورت گرفت.

زیست‌توده تازه و خشک ریشه و شاخساره

برای تعیین وزن زیست‌توده تازه و خشک برگ، ساقه و ریشه از ترازویی با دقت ۰/۰۱ گرم استفاده شد. برای تعیین وزن خشک، بوته‌ها به مدت ۴۸ ساعت درون آون با دمای ۷۵ درجه سلسیوس قرار گرفتند و سپس وزن آن‌ها اندازه‌گیری شد.

محتوای نسبی آب برگ

برای اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ (RWC) نمونه‌هایی از برگ کامل تهیه شده و وزن تازه نمونه برگ (FW) آن‌ها اندازه‌گیری شد. این قطعات به منظور تعیین وزن آماس به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق، در آب مقطر به حالت غوطه‌ور قرار داده شد و پس از این زمان وزن آماس نمونه (TW) ثبت گردید. سپس نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت درون آون با دمای ۷۵ درجه سلسیوس قرار گرفت و وزن خشک (DW) آن‌ها به دست آمد. در نهایت RWC برگ با فرمول زیر محاسبه شد (Sanchez et al., 1998):

$$RWC (\%) = [(FW - DW) / (TW - DW)] \times 100 \quad (1)$$

نشت الکترولیت

برای اندازه‌گیری نشت الکترولیت از روش Li et al. (1995) استفاده شد. برای این منظور نمونه‌های برگ به ابعاد ۲ در ۲ سانتی‌متر با آب بدون یون شسته شده، به شیشه‌های ۵۰ میلی‌لیتری درب‌دار محتوای ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر منتقل شده و به مدت ۲۴ ساعت در تاریکی و دمای اتاق نگهداری شدند. سپس میزان رسانایی الکتریکی آن‌ها به عنوان نشت اولیه (EC_1) به وسیله دستگاه رسانایی سنج (EC متر) اندازه‌گیری شد. نشت ثانویه (EC_2) نیز با اندازه‌گیری میزان رسانایی الکتریکی نمونه‌ها

ارتفاع ۹۸۵ متری از سطح دریا) در شرایط کنترل‌شده اجرا شد. میانگین دمای روز و شب گلخانه در مدت انجام آزمایش به ترتیب 26 ± 3 و 22 ± 3 درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۷۵ درصد بود. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۲ فاکتور و در ۳ تکرار انجام شد. فاکتور اول دی‌اکسید کربن در سه غلظت (۳۸۰، ۷۰۰ و ۱۰۵۰ میکرومول بر مول) و فاکتور دوم محلول‌پاشی اتانول در چهار سطح (۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد حجمی معادل ۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌لیتر اتانول در ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب) بود. ابتدا بذرهای ریحان در سینی‌های کاشت حاوی کوکوپیت کشت شدند. بذر ریحان به منظور جوانه‌زنی به دمایی در حدود ۱۸ تا ۲۰ درجه سلسیوس نیاز دارد. سپس نشاءها در مرحله چهار برگی به گلدان‌های هم‌اندازه با قطر دهانه ۳۰ و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر انتقال داده شدند. در هر گلدان ۴ نشاء ریحان کاشته شد. ترکیب خاک گلدان‌ها شامل خاک باغچه، خاک برگ، ماسه به نسبت حجمی ۱:۱:۱ بود. بافت خاک لوم شنی (رس ۸/۵ درصد، سیلت ۱۹/۳ درصد، شن ۷۲/۱ درصد)، ماده آلی خاک ۱/۴ درصد، رسانایی الکتریکی آن برابر ۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر و pH برابر ۷/۷ بود. برای اعمال تیمار دی‌اکسید کربن از دو محفظه استفاده شد که یکی برای غلظت ۷۰۰ میکرومول بر مول و دیگری برای غلظت ۱۰۵۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن به کار رفت. محفظه‌ها به طول ۲ متر، عرض ۱/۵ متر و ارتفاع ۲ متر استفاده شد که با پلاستیک کاملاً شفاف (چادرها) پوشانده شده بود و دارای سیستمی کاملاً خودکار برای تنظیم غلظت گاز دی‌اکسید کربن بودند. بدین صورت که یک فتوسل برنامه روشن و خاموش شدن دستگاه را به ترتیب در روز و شب اجرا می‌کرد. تزریق گاز با استفاده از کپسول‌های ۵۰ کیلوگرمی دی‌اکسید کربن و شیرهای برقی و تایمرهایی که در مسیر قرار داده شده بودند، صورت گرفت. با استفاده از یک حسگر دی‌اکسید کربن قابل حمل، اندازه‌گیری غلظت دی‌اکسید کربن در طول روز انجام می‌شد. گیاهان در مرحله ۶ برگی به منظور اعمال سطوح مختلف دی‌اکسید کربن به درون چادرهای مختلف

مالون دی‌آلدئید

میزان آسیب به غشاءها با اندازه‌گیری مقدار مالون دی‌آلدئید (MDA) به‌عنوان فراورده نهایی پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء تعیین شد. به‌منظور اندازه‌گیری MDA میزان ۰/۲۵ گرم از نمونه تازه گیاهی را در نیتروژن مایع پودر کرده، و سپس با ۵۰ میلی‌لیتر بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار با $\text{pH} = 7$ مخلوط شد. نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه با ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه، در دمای ۴ درجه سلسیوس سانتریفیوژ شد. سپس ۱۵۰ میکرولیتر از محلول فوقانی برداشته شد و به آن ۳۰۰ میکرولیتر تری‌کلرواستیک (TCA) ۲۰ درصد افزوده شد. برای تهیه محلول تری‌کلرواستیک ۲۰ درصد که حاوی اسید تری‌تیوبار بی‌تیوریک (TBA) ۰/۵ درصد بود، ۵ گرم اسید تیوبار بی‌تیوریک و ۲۰۰ گرم اسید تری‌کلرواستیک را در ۷۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط نموده و یک شب در یخچال با دمای ۴ درجه سلسیوس نگه‌داشته و روز بعد با افزودن آب مقطر محلول به حجم ۱ لیتر رسانده شد. مخلوط به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب گرم با دمای ۹۵ درجه سلسیوس قرار داده شد و بلافاصله در حمام یخ سرد گذاشته شد. سپس نمونه‌ها مجدداً به مدت ۵ دقیقه با شدت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه در دمای محیط سانتریفیوژ گردید. ماده قرمز رنگ مالون دی‌آلدئید تیوبار بی‌تیوریک اسید حاصل شده و جذب نوری آن در دو طول موج ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر قرائت شد. برای تعیین غلظت مالون دی‌آلدئید از فرمول زیر با ضریب خاموشی ۱۵۵ میلی‌مولار بر سانتی‌متر استفاده شد (Davy et al., 2005):

$$\text{MDA} = (\text{A532} - \text{A600}/155) \times 1000 \quad (3)$$

که در آن A532 و A600 اعداد قرائت‌شده در طول موج‌های مذکور با دستگاه اسپکتروفتومتر است.

پروتئین کل

برای سنجش میزان پروتئین کل در گیاه، به لوله‌های آزمایش ۵ میلی‌لیتر معرف بیوره و سپس ۱۰۰ میکرولیتر عصاره پروتئینی افزوده شده و به‌سرعت هم زده شد. پس از گذشت ۵ دقیقه

پس از گرمادهی درون اتوکلاو به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس (به‌منظور کشته‌شدن سلول‌های گیاهی) بررسی شد. در نهایت نشت ثانویه (EC_2) پس از سردشدن محتویات درون لوله‌های آزمایش تعیین شد. در نهایت شاخص پایداری غشاء (EL) با معادله زیر محاسبه شد (Sajedidi Moghaddam et al., 2012):

$$\text{EL} = (\text{EC}_1/\text{EC}_2) \times 100 \quad (2)$$

تهیه عصاره متانولی

۰/۵ گرم برگ تازه از برگ‌های جوان کاملاً توسعه‌یافته جدا شده و در هاون چینی با ۵ میلی‌لیتر متانول ۹۹ درصد عصاره‌گیری شد. سپس به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ با سرعت ۴۵۰۰ دور در دقیقه انجام گرفت. آنگاه برای اندازه‌گیری صفات بیوشیمیایی، قسمت شفاف و فوقانی عصاره جدا شد (نمونه‌ها از برگ‌های موجود در گره‌های ۴ و ۵ گرفته شدند).

هدایت و مقاومت روزنه‌ای

اندازه‌گیری میزان هدایت و مقاومت روزنه‌ای برگ با استفاده از دستگاه پرومتر دستی مدل (SC-1 Leaf Prometer) انجام شد. برای این منظور از جوان‌ترین برگ‌های کاملاً توسعه‌یافته استفاده شد.

کربوهیدرات محلول

برای اندازه‌گیری کربوهیدرات‌های محلول، ۰/۲ میلی‌لیتر از عصاره متانولی با ۳ میلی‌لیتر معرف آنترون (۰/۱۵ گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۷۲ درصد) مخلوط شد. مخلوط فوق به مدت ۲۰ دقیقه درون حمام آب گرم با دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس به‌منظور انجام واکنش قرار گرفت. سپس میزان جذب نور پس از سردشدن نمونه‌ها توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Sadasivam et al., 1992).

اکسیداسیون گایاکول در طول موج 470 نانومتر به مدت 3 دقیقه اندازه‌گیری شد. مقدار تراگایاکول تولیدشده با استفاده از ضریب خاموشی $25/5 \text{ cm}^{-1} \text{ mM}^{-1}$ محاسبه شد (Plewa et al., 1991).

پلی فنل اکسیداز (PPO)

برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز از پیروگالل به-عنوان پیش‌ماده آنزیم استفاده شد. مخلوط واکنش شامل $2/5$ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم 50 میلی‌مولار ($\text{pH}=7$)، 200 میکرولیتر پیروگالل $0/02$ مولار و 100 میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. جذب نمونه‌ها در طول موج 420 نانومتر و پس از سه دقیقه در دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. برای محاسبه واحد آنزیمی از ضریب خاموشی معادل $6/2 \text{ cm}^{-1} \text{ mM}^{-1}$ استفاده شد (Kar and Mishra, 1976).

تجزیه و تحلیل داده‌های آماری

برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار Minitab 17 استفاده شد. مقایسه میانگین داده‌ها از طریق آزمون Bonferroni در سطح احتمال 5 درصد تعیین شد. همچنین برای رسم نمودارها از نرم‌افزار MS Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

محتوای نسبی آب برگ

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که برهم‌کنش دی‌اکسید کربن و محلول پاشی اتانول در سطح احتمال یک درصد بر محتوای نسبی آب (RWC) برگ ریحان معنی‌دار شد (جدول ۱). بیش‌ترین مقدار RWC برگ ($92/9$ درصد) در تیمار 700 میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و محلول پاشی اتانول 20 درصد حجمی بود مشاهده شد که به لحاظ آماری با تیمارهای عدم محلول پاشی اتانول و دیگر سطوح محلول پاشی اتانول در همین غلظت دی‌اکسید کربن و عدم محلول پاشی اتانول و تیمار 1050 میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و همچنین محلول پاشی اتانول 20 و 30 درصد حجمی و تیمار

جذب آن در طول موج 595 نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. در نهایت غلظت پروتئین با استفاده از منحنی واسنجی آلبومین محاسبه شد (Bradford, 1976).

چگونگی تهیه معرف بیوره

$0/1$ گرم کوماسی بریلیانت بلو 250 G در 50 میلی‌لیتر اتانول 96 درصد ریخته شد و با همزن الکتریکی به هم زده تا حل شد و یک ساعت بعد 100 میلی‌لیتر ارتوفسفریک اسید 85 درصد به آن قطره قطره افزوده شد و حجم نهایی محلول با استفاده از آب مقطر استریل شده به حجم 1000 میلی‌لیتر رسانده شد. این محلول از کاغذ صافی وات‌من شماره 1 عبور داده شد. محلول حاضر در دمای 4 درجه سلسیوس تا 24 ساعت قابل نگهداری است.

تهیه عصاره پروتئینی

برای سنجش میزان پروتئین و فعالیت آنزیم‌های مختلف نیاز است که از نمونه گیاهی عصاره پروتئینی تهیه شود. بدین صورت که $0/5$ گرم از نمونه تازه گیاهی در 5 میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم 50 میلی‌مولار حاوی پلی‌وینیل پیرولیدین (PVP) یک درصد و EDTA یک میلی‌مولار سائیده و عصاره-گیری انجام شد (قابل ذکر است که تمامی مراحل فوق در مجاورت یخ انجام شد). سپس عصاره‌ها به مدت 20 دقیقه در دمای 4 درجه سلسیوس با 5000 دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. محلول شفاف رویی برای سنجش آنزیم‌ها و پروتئین کل مورد استفاده قرار گرفت (Gapinska et al., 2008).

گایاکول پراکسیداز (GPX)

فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز با استفاده از پیش‌ماده گایاکول اندازه‌گیری شد. در این روش 3 میلی‌لیتر مخلوط واکنش شامل $2/77$ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم 50 میلی‌مولار ($\text{pH}=7$)، 100 میکرولیتر آب اکسیژنه یک درصد، 100 میکرولیتر گایاکول 2 درصد و 30 میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. افزایش جذب به دلیل

جدول ۱. تجزیه واریانس صفات رشدی، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی ریحان رقم کشکی لولو تحت تاثیر تیمارهای دی اکسید کربن و محلول پاشی اتانول
Table 1. Variance analysis of growth, physiological and biochemical traits in basil cultivar of Keshkeni luvlou as affected by carbon dioxide and ethanol spraying treatments

شاخصه	زیست توده خشک	زیست توده تازه	شاخصه تازه	زیست توده کربن و محلول پاشی اتانول	فلاونوید	کربوهیدراتهای محلول	نسبت الکترولیت	نسبت آب برگ	محتوای نسبی آب برگ	درجه آزادی	منابع تغییر
	Dry shoot biomass	Fresh shoot biomass	Flavonoid	Soluble carbohydrates	Electrolyte leakage	Leaf relative water content	Degree of freedom	Sources of variation			
	6.51**	3236.05**	0.18**	0.00000075**	18.71**	70.38**	2	دی اکسید کربن	Carbon dioxide		
	10.90**	297.95**	0.0062**	0.00000061**	4.54**	191.47**	3	اتانول	Ethanol		
	3.98**	154.54**	0.026**	0.00000043 ^{ns}	16.49**	208.61**	6	دی اکسید کربن × اتانول	Ethanol × Carbon dioxide		
	0.76	29.6	0.0005	0.000000032	0.97	4.5	24	خطا	Error		

**، ns stand for significant effect at the 1% probability level and without significant effect, respectively

بر مول) و عدم محلول پاشی اتانول مشاهده شد که به لحاظ آماری با محلول پاشی دیگر سطوح اتانول در همین غلظت دی‌اکسید کربن و همچنین محلول پاشی اتانول ۱۰ و ۳۰ درصد حجمی همراه با ۷۰۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۲). نشت الکترولیت یک شاخص پایداری غشاء است، چون در هنگام تنش گونه‌های فعال اکسیژن افزایش یافته و باعث پراکسیداسیون لیپیدی و کاهش پایداری غشاء می‌شوند و در نتیجه مواد سیتوپلاسمی از آن به بیرون نشت کرده و رسانایی الکتریکی را افزایش می‌دهد (Manchanda et al., 2008). نشت الکترولیتی شاخصی از میزان مقاومت گیاه بوده که تحت شرایط تنش افزایش می‌یابد (Kirmakak et al., 2001) و بیان‌گر میزان خسارت به غشای پلاسمایی است. شرایط تنش منجر به آسیب دیدگی غشاء سلولی و افزایش میزان نشت الکترولیت می‌گردد (Chaum et al., 2010). غلظت‌های زیاد دی‌اکسید کربن در توت‌فرنگی باعث پارگی سلول و افزایش میزان نشت الکترولیت شد (Roger et al., 2008). در پژوهش حاضر نیز سطوح بالای دی‌اکسید کربن و اتانول موجب ایجاد تنش اکسیداتیو و افزایش میزان نشت الکترولیت شد که با نتایج Ruger et al. (2008) هم‌خوانی دارد.

شدت فتوستنز

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر برهم‌کنش دی‌اکسید کربن و محلول پاشی اتانول در سطح احتمال یک درصد بر میزان فتوستنز برگ ریحان معنی‌دار شد (جدول ۳). بیش‌ترین شدت فتوستنز (۶/۶۸ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه) در غلظت ۷۰۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و محلول-پاشی اتانول ۲۰ درصد حجمی مشاهده شد که به لحاظ آماری با محلول پاشی اتانول ۱۰ درصد حجمی در همین غلظت دی‌اکسید کربن تفاوت معنی‌داری نداشت. کم‌ترین شدت فتوستنز (۱/۶۹ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه) در غلظت ۳۸۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و عدم محلول پاشی اتانول

۳۸۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن اختلاف معنی‌داری نداشت. کم‌ترین میزان RWC (۶۳/۹ درصد) در غلظت ۱۰۵۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و محلول پاشی ۳۰ درصد حجمی اتانول مشاهده شد (جدول ۲). در تیمار ۷۰۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و محلول پاشی اتانول ۲۰ درصد حجمی، شرایط برای رشد گیاه بهبود یافته و RWC افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده شرایط مطلوب برای گیاه است. اما به نظر می‌رسد محلول پاشی اتانول در ۳۰ درصد حجمی و تیمار ۱۰۵۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن شرایط تنشی را برای گیاه ایجاد می‌کند که منجر به کاهش RWC در ریحان شد. محتوای نسبی آب برگ نشان‌دهنده میزان آب موجود در اندام‌های گیاه یا بیان‌کننده شادابی آن بوده و توان یک گیاه در حفظ آب تحت شرایط تنش را مشخص می‌نماید. بنابراین در شرایط کنترل‌شده و یکسان در یک آزمایش، مقدار اندازه‌گیری‌شده این صفت بیان‌گر پاسخ یک گیاه بوده و هر چه این مقدار بیش‌تر باشد توانایی حفظ آب در گیاه بیش‌تر می‌شود. افزایش غلظت دی‌اکسید کربن موجب بسته‌شدن جزئی روزنه‌ها می‌شود. کاهش هدایت روزنه‌ای باعث کاهش تعرق در واحد سطح برگ می‌شود. کاهش در سرعت از دست دادن آب برگ می‌تواند به دلیل کاهش تعرق و کاهش نیاز آبی در شرایط افزایش غلظت دی‌اکسید کربن باشد و در نتیجه افزایش محتوای نسبی آب برگ می‌شود (Heins, 1980; Abbaszadeh et al., 2008; Monajem, 2011).

نشت الکترولیت

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر برهم‌کنش دی‌اکسید کربن و محلول پاشی اتانول در سطح احتمال ۱ درصد بر نشت الکترولیت برگ ریحان معنی‌دار شد (جدول ۱). بیش‌ترین نشت الکترولیت آب برگ (۱۶/۰۵ درصد) در تیمار ۱۰۵۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و محلول پاشی ۳۰ درصد حجمی اتانول و کم‌ترین میزان آن (۹/۰۹ درصد) در تیمار شاهد عدم کاربرد دی‌اکسید کربن (غلظت ۳۸۰ میکرومول

جدول ۲. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول بر ویژگی‌های فیزیولوژیک ریحان رقم کشکنی لولو
Table 2. Mean comparison of interaction effect of carbon dioxide and ethanol spraying on the physiological characteristics of basil cultivar of Keshkeni luvellou

شاخصه خشک شاخساره	زیست‌توده خشک شاخساره	زیست‌توده تازه شاخساره	زیست‌توده تازه شاخساره	فلاونوئید	نشست الکترولیت	محتوای نسبی آب برگ	اتانول	دی‌اکسید کربن
Dry shoot biomass	Fresh shoot biomass	Fresh shoot biomass	Flavonoid	Electrolyte leakage	Leaf relative water content	Ethanol	Carbon dioxide	
(g/plant)	(g/plant)	(mg g ⁻¹ FW)	(%)	(%)	(%v/v)	(میکرومول بر مول)		
5.30 ^d	28.21 ^e	0.47 ^f	9.09 ^d	83.8 ^c	0			
6.17 ^{bd}	35.60 ^{de}	0.53 ^{ef}	10.29 ^{cd}	82.1 ^c	10	380		
6.70 ^c	37.90 ^{de}	0.58 ^{de}	10.24 ^{cd}	88.3 ^{ac}	20			
7.76 ^{ad}	42.60 ^{ce}	0.64 ^{cd}	10.82 ^{cd}	90.8 ^{ab}	30			
8.69 ^{ac}	56.03 ^{bc}	0.66 ^c	12.05 ^{ad}	87.1 ^{ac}	0			
9.16 ^a	63.56 ^{ab}	0.73 ^b	10.98 ^{cd}	90.9 ^{ab}	10	700		
9.20 ^a	77.01 ^a	0.92 ^a	12.92 ^{bc}	92.9 ^a	20			
9.33 ^a	78.00 ^a	0.51 ^{ef}	11.87 ^{cd}	91.4 ^a	30			
6.30 ^{bd}	50.75 ^{bd}	0.53 ^{ef}	12.45 ^c	87.8 ^{ac}	0			
6.56 ^{cd}	50.98 ^{bd}	0.54 ^{ef}	12.41 ^c	84.9 ^{bc}	10	1050		
7.63 ^{ad}	56.05 ^{bc}	0.56 ^e	13.23 ^{ac}	83.8 ^c	20			
8.90 ^{ab}	66.20 ^{ab}	0.58 ^{de}	16.05 ^a	63.9 ^d	30			

در هر ستون، اعداد دارای حداقل یک حرف مشابه تفاوت معنی‌داری براساس آزمون بونفرونی در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.
 In each column, the numbers with at least one similar letter are not significantly different based on the Bonferroni test at the 5% probability level.

جدول ۳. تجزیه واریانس صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در گیاه ریحان رقم کشکی لولو تحت تأثیر تیمارهای دی اکسید کربن و محلول پاشی اتانول
Table 3. Variance analysis of physiological and biochemical traits in basil cultivar of Keshkeni luvellou as affected by carbon dioxide and ethanol spraying treatments

پروتئین محلول	گایاکول	پلی فنل	پلی اکسیداز	گایاکول	مالون دی آلدئید	مقاومت	روزنه‌ای	هدایت روزنه‌ای	شدت تعرق	شدت فتوسنتز	درجه آزادی	تیمار
Soluble protein	Guaiacol peroxidase	Polyphenol oxidase	Polyphenol oxidase	Malondialdehyde	Stomatal resistance	Stomatal resistance	Stomatal conductance	Transpiration rate	Photosynthesis rate	Degree of freedom	Treatment	
0.000001**	0.001631 ^{ns}	0.000000081**	0.000000063**	0.0000006 ^{ns}	1511.94**	10.99**	4.42**	6.13**	2	دی اکسید کربن		
0.000005*	0.021608 ^{ns}	0.00000063**	0.000004**	111.26	2.14**	7.71**	3.55**	2	اتانول			
0.000004*	0.041246**	0.00000075**	0.000007 ^{ns}	2206.13**	6.95**	2.7**	9.03**	6	دی اکسید کربن × اتانول			
0.0000007	0.010437	0.00000007	0.0000006	23.8	0.24	0.05	0.08	24	خطا			
										Error		

* و **، ns به ترتیب اثر معنی دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد و بدون اثر معنی دار
 * and **, ns stand for significant effect at the 5 and 1% probability levels and without significant effect, respectively

فلاونوئید

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر برهم‌کنش دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول در سطح احتمال یک درصد بر مقدار فلاونوئید برگ ریحان معنی‌دار شد (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیش‌ترین میزان فلاونوئید (۰/۹۲ میلی‌گرم در گرم وزن تازه برگ) در تیمار ۷۰۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول ۲۰ درصد حجمی مشاهده شد (جدول ۲). کم‌ترین میزان فلاونوئید (۰/۴۷ میلی‌گرم در گرم وزن تازه برگ) در تیمار شاهد (عدم کاربرد دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول) دیده شد (جدول ۲). بیش‌ترین شدت فتوستتوز در سطح ۷۰۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول ۲۰ درصد حجمی به دست آمد و بیش‌ترین میزان فلاونوئید نیز در این تیمار مشاهده شد که نشان‌دهنده تولید زیاد این متابولیت‌های ثانویه با افزایش فتوستتوز است. دی‌اکسید کربن منبع اصلی کربن در گیاه محسوب شده و به‌طور عمده در سنتز متابولیت‌های اولیه و ثانویه در طی عمل فتوستتوز مصرف می‌شود؛ بنابراین افزایش میزان آن می‌تواند باعث رشد گیاه شود و تولید محصولات فرعی فرایند فتوستتوز نیز در این شرایط افزایش می‌یابد (Mirseyyed Hosseini et al., 2018). فلاونوئیدها دسته بزرگی از ترکیبات فنلی موجود در گیاهان را تشکیل می‌دهند که توسط جاروب‌کردن رادیکال‌های آزاد و یا سازوکارهایی مانند خاموش‌کردن اکسیژن منفرد از اکسیداسیون لیپیدها جلوگیری می‌کنند (Xu et al., 2015). با ایجاد تنش اکسیداتیو در گیاه، مسیر فنیل‌پروپانوییدها و به‌ویژه مسیر بیوستتوز فلاونوئیدها افزایش می‌یابد (Mackernes et al., 2001). در پژوهش حاضر با افزایش غلظت دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول، سنتز فلاونوئیدها افزایش یافت؛ اما با افزایش بیش از حد آن‌ها و کاهش فتوستتوز مقدار آن‌ها کاهش یافت.

زیست‌توده تازه و خشک شاخساره

بیش‌ترین زیست‌توده تازه شاخساره (۷۸ گرم در بوته)، مربوط

دیده شد (جدول ۴). پژوهش‌ها نشان داده است اتانول پس از نفوذ به درون بافت گیاه تبدیل به فرمالدئید شده و این ترکیب در نهایت به دی‌اکسید کربن اکسید می‌شود. دی‌اکسید کربن تولیدشده باعث افزایش غلظت دی‌اکسید کربن درون برگ شده که این فرایند منجر به افزایش کارایی فتوستتوزی شده (Khosravi, 2011; Mirseyyed Hosseini et al., 2018) احتمالاً منجر به تولید بیش‌تر محصول در گیاه می‌شود (Heins, 1980). محلول‌پاشی برگ‌ها به‌عنوان یک بازدارنده تنفس نوری عمل کرده و با کاهش تنفس نوری موجب می‌شود تا فتوستتوز در گیاه افزایش یافته و در نتیجه پیری برگ به تأخیر افتد و به‌دنبال آن افزایش در ویژگی‌های رشدی گیاه مشاهده شود (Roger et al., 2008). گیاهان تیمارشده با هیدروالکل‌ها می‌توانند فتوستتوز خالص خود و متعاقب آن کارایی تبدیل کربن در گیاه را بهبود بخشند (Benson et al., 1994). افزایش غلظت دی‌اکسید کربن درونی منجر به افزایش کارایی فتوستتوزی می‌شود. بررسی‌های انجام‌شده روی گیاه لوبیا قرمز نشان داد که دو برابر شدن غلظت دی‌اکسید کربن (از ۳۵۰ به ۷۰۰ میکرومول بر مول)، به‌ترتیب باعث افزایش فتوستتوز و عملکرد دانه به‌میزان ۵۰ و ۲۴ درصد می‌گردد، ولی با این حال بر اندازه دانه اثرگذار نیست (Plew et al., 1991). Sajedi Moghaddam et al. (2012) بیان کردند که محلول‌پاشی با الکل‌ها می‌تواند محتوای دی‌اکسید کربن را در گیاه افزایش داده و بدین طریق فعالیت کربوکسیلازی آنزیم رابیسکو را افزایش دهد. در نتیجه فعالیت فتوستتوزی گیاه بهبود یافته و رشد گیاه افزایش می‌یابد. برای بسیاری از گیاهان، افزایش فتوستتوز واکنش بنیادی و اساسی و وابسته به افزایش غلظت دی‌اکسید کربن است که تمام جنبه‌های دیگر مانند رشد و نمو گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌طور کلی در گیاهان با افزایش غلظت دی‌اکسید کربن، شدت فتوستتوز، میزان تولید ماده خشک، کارایی مصرف آب و جذب عناصر غذایی افزایش می‌یابد (Li et al., 2020).

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر برهم کنش غلظت دی اکسید کربن و محلول پاشی اتانول بر صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی ریحان رقم کشکی لولو

Table 4. Mean comparison of interaction effect of carbon dioxide and ethanol spraying on physiological and biochemical traits in basil cultivar of Keshkeni luvelou

پروتئین محلول در (میلی گرم در (وزن تازه)	پراکسیداز (میلی گرم کوبرسیتین (میلی گرم کوبرسیتین (وزن تازه)	گاپاکول پراکسیداز (میلی گرم کوبرسیتین (میلی گرم کوبرسیتین (وزن تازه)	پلی فنل اکسیداز (میلی گرم کوبرسیتین (میلی گرم کوبرسیتین (وزن تازه)	مقاومت روزهای (موتوریک بر ثانیه (موتوریک بر ثانیه (موتوریک بر ثانیه)	هدایت روزانه‌ای (مول بر مترمربع (مول بر مترمربع (مول بر مترمربع)	شدت تعرق (میلی مول بر (میلی مول بر (میلی مول بر)	شدت فتوسنتز (میکرومول بر (میکرومول بر (میکرومول بر)	اتانول (%v/v)	دی اکسید کربن (میکرومول بر مول)
Soluble protein (mg g ⁻¹ FW)	Guaiacol peroxidase (unit ⁻¹ mg protein)	Polyphenol oxidase (unit ⁻¹ mg protein)	Stomatal resistance (mol m ⁻² s ⁻¹)	Stomatal conductance (mol m ⁻² s ⁻¹)	Transpiration rate (μmol m ⁻² s ⁻¹)	Photosynthesis rate (μmol m ⁻² s ⁻¹)	Ethanol (%v/v)	Carbon dioxide (ppm)	
0.0032 ^{abc}	0.02 ^b	0.0003317 ^c	108.70 ^f	6.06 ^g	0.58 ^e	1.69 ^j	0		
0.0027 ^{bc}	0.02 ^b	0.0004159 ^c	112.66 ^{ef}	7.46 ^{dg}	1.52 ^{cd}	2.94 ^{gh}	10	380	
0.0013 ^{de}	0.05 ^{ab}	0.0004294 ^c	110.13 ^f	7.56 ^{cg}	1.54 ^{cd}	4.82 ^{cde}	20		
0.0016 ^d	0.06 ^{ab}	0.0004334 ^c	111.46 ^f	7.76 ^{bf}	1.9 ^{cd}	4.98 ^{cde}	30		
0.0017 ^d	0.09 ^{ab}	0.0003804 ^c	127.41 ^{de}	8.66 ^{bc}	2.25 ^e	5.70 ^{bc}	0		
0.0031 ^{abc}	0.10 ^{ab}	0.0003932 ^c	139.16 ^{cd}	9.10 ^{bc}	3.4 ^b	6.38 ^{ab}	10	700	
0.0036 ^a	0.16 ^{ab}	0.0004788 ^c	106.00 ^f	11.13 ^a	4.55 ^a	6.68 ^a	20		
0.0029 ^{abc}	0.22 ^{ab}	0.0006638 ^c	135.20 ^{cd}	9.23 ^b	1.49 ^d	2.82 ^h	30		
0.0030 ^{abc}	0.10 ^{ab}	0.0007127 ^{bc}	141.30 ^{cd}	9.02 ^{bed}	3.99 ^{ab}	4.43 ^{de}	0		
0.00084 ^e	0.13 ^{ab}	0.0007590 ^{bc}	146.06 ^{bc}	7.20 ^{efg}	3.50 ^b	4.22 ^{ef}	10	1050	
0.0025 ^c	0.22 ^{ab}	0.0010078 ^{ab}	160.13 ^{ab}	6.58 ^{fg}	3.25 ^b	3.52 ^{fg}	20		
0.0035 ^{ab}	0.36 ^a	0.014216 ^a	175.46 ^a	6.23 ^{fg}	1.84 ^{cd}	2.50 ^{hi}	30		

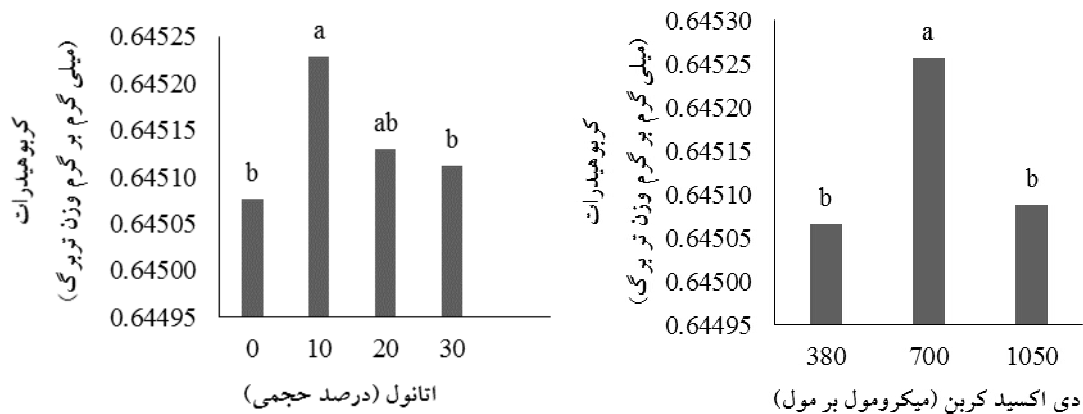
در هر ستون، اعداد دارای حداقل یک حرف مشابه تفاوت معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون بونفرونی ندارند. In each column, the numbers with at least one similar letter are not significantly different based on the Bonferroni test at the 5% probability level.

ترکیب اتانول و متانول منجر به افزایش زیست‌توده و در نتیجه عملکرد گیاه سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.) گردید (Khosravi, 2011) که با نتایج پژوهش حاضر هم‌راستا است. دی‌اکسید کربن منبع اصلی کربن در گیاه محسوب شده و به‌طور عمده در سنتز متابولیت‌های اولیه در طی عمل فتوسنتز مصرف می‌شود؛ بنابراین افزایش میزان آن می‌تواند رشد گیاه را بهبود بخشد (Merati et al., 2015). یکی دیگر از علل احتمالی آن را می‌توان این‌گونه بیان کرد که گیاهان با سطح مطلوب دی‌اکسید کربن به‌علت کارایی بیش‌تر مصرف آب و نیتروژن، شرایط رشدی بهتری را خواهند داشت (Xu et al., 2015).

کربوهیدرات‌های محلول

با توجه به نتایج تجزیه واریانس، اثر برهم‌کنش تیمارها بر کربوهیدرات‌های محلول برگ ریحان معنی‌دار نشد، ولی آثار ساده آن‌ها بر این صفت در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). مقایسه میانگین آثار ساده نشان داد که بیش‌ترین مقدار کربوهیدرات محلول در غلظت ۷۰۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و همچنین در محلول‌پاشی اتانول ۱۰ درصد حجمی به‌دست آمد (شکل ۱). کربوهیدرات‌های محلول از جمله گلوکز، فروکتوز و ساکارز و همچنین نشاسته در شرایط تنش در گیاه تجمع می‌یابند و به‌عنوان محافظت‌کننده اسمزی عمل کرده و از طریق تنظیم اسمزی، آماس گیاه را حفظ نموده و موجب پایداری غشاء و پروتئین‌ها می‌شوند (Jahantigh et al., 2015). کربوهیدرات‌های محلول یکی از ترکیباتی هستند که می‌توانند در مقادیر زیاد بدون صدمه به فعالیت‌های بیوشیمیایی تجمع یافته و باعث حفظ یکپارچگی غشاء و افزایش مقاومت به تنش شوند (Sanchez et al., 1998). شاید بتوان این‌گونه بیان کرد که دو تیمار بررسی‌شده در پژوهش حاضر تاثیر مهارکنندگی برای تولید کربوهیدرات را داشته است. غلظت زیاد دی‌اکسید کربن (۱۰۵۰ میکرومول بر مول) و همچنین محلول‌پاشی در غلظت‌های زیاد اتانول (۲۰ و ۳۰ درصد حجمی) موجب تولید و افزایش غلظت دی‌اکسید کربن

به کاربرد دی‌اکسید کربن در غلظت‌های ۷۰۰ میکرومول بر مول و محلول‌پاشی اتانول ۳۰ درصد حجمی بود که با تیمارهای غلظت ۷۰۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول ۱۰ و ۲۰ درصد حجمی تفاوت آماری نداشت. بیش‌ترین زیست‌توده خشک شاخساره (۹/۳۳ گرم در بوته)، مربوط به کاربرد دی‌اکسید کربن در غلظت ۷۰۰ میکرومول بر مول و محلول‌پاشی اتانول ۳۰ درصد حجمی بود که به لحاظ آماری با تیمار بدون محلول‌پاشی اتانول و محلول‌پاشی اتانول ۱۰ و ۲۰ درصد حجمی در همین غلظت دی‌اکسید کربن و همچنین با غلظت ۳۸۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول ۳۰ درصد حجمی در غلظت ۱۰۵۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول ۲۰ و ۳۰ درصد حجمی تفاوت معنی‌داری نداشت. غلظت‌های زیاد دی‌اکسید کربن در محیط و همچنین محلول‌پاشی اتانول که به فرمالدئید تبدیل شده و در نهایت به دی‌اکسید کربن اکسید می‌شود، باعث تجمع دی‌اکسید کربن در درون بافت گیاهی می‌شود. بنابراین اشباع شدن شیره سلولی از دی‌اکسید کربن و عدم مصرف آن باعث اسیدی شدن شیره سلولی (تولید اسید کربنیک) شده که در ادامه موجب تبدیل قندهای محلول به نامحلول می‌شود. این فرایند منجر به پلاسمولیز سلول‌های روزنه و بسته شدن روزنه‌ها شده و در نهایت سبب کاهش فتوسنتز و زیست‌توده خشک گیاهی می‌گردد. بنابراین در تیمار ۱۰۵۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن همراه با محلول‌پاشی اتانول به دلیل اشباع دی‌اکسید کربن شدت فتوسنتز کاهش یافته و زیست‌توده خشک نیز کاهش می‌یابد. اما کاربرد تنها ۱۰۵۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن در شرایط عدم محلول‌پاشی اتانول، به دلیل مصرف این مقدار دی‌اکسید کربن در فتوسنتز و عدم اشباع دی‌اکسید کربن موجب افزایش فتوسنتز شد. (Delusia et al., 1985) در پژوهشی که روی چند گیاه انجام دادند، به این نتیجه رسیدند هنگامی که غلظت دی‌اکسید کربن به ۱۰۰۰ میکرومول بر مول رسید، توان فتوسنتزی کاهش معنی‌داری یافت که با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد. همچنین در پژوهش دیگری محلول‌پاشی



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر دی‌اکسید کربن و محلول پاشی اتانول بر میزان کربوهیدرات محلول ریحان رقم کشکنی لولو؛ مقایسه میانگین بر اساس آزمون بونفرونی در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

Fig. 1. Mean comparison of the effect of carbon dioxide and ethanol spraying on the amount of soluble carbohydrates in basil cultivar of Keshkeni luvellou; The mean comparison was done based on the Bonferroni test at a probability level of 5%

اتاقک زیر روزنه ایجاد می‌شود که دلالت بر نقش عوامل روزنه-ای در کاهش فتوسنتز در شرایط تنش دارد. نتایج شدت تعرق ریحان نشان داد که رابطه مستقیمی بین این صفت با شدت فتوسنتز گیاه وجود دارد. افزایش غلظت دی‌اکسید کربن تحت آبیاری کامل باعث کاهش شدت تعرق پوشش گیاهی می-گردد، درحالی‌که هنگامی که گیاه تحت تنش آبی باشد با افزایش غلظت دی‌اکسید کربن شدت تعرق تغییر معنی‌داری نداشته و یا در برخی موارد، کمی افزایش خواهد یافت (Burkart, 2004).

هدایت روزنه‌ای

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر برهم‌کنش دی‌اکسید کربن و محلول پاشی اتانول در سطح احتمال یک درصد بر میزان هدایت روزنه‌ای برگ ریحان معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیش‌ترین میزان هدایت روزنه‌ای (۱۱/۱۳ مول بر مترمربع بر ثانیه) در تیمار ۷۰۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و محلول پاشی اتانول ۲۰ درصد حجمی مشاهده شد (جدول ۴). کم‌ترین میزان هدایت روزنه‌ای (۶/۰۶ مول بر مترمربع بر ثانیه) در تیمار شاهد (۳۸۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و عدم محلول پاشی

در شیره سلولی می‌گردد. به نظر می‌رسد به دلیل عدم مصرف در فرآیند فتوسنتز، دی‌اکسید کربن در سلول تجمع یافته که خود باعث اسیدی شدن شیره سلولی می‌شود. در چنین شرایطی قندهای محلول به نشاسته که کربوهیدرات نامحلول است تبدیل می‌شوند. شاید دلیل کاهش قندهای محلول در غلظت‌های زیاد تیمارها به دلیل تبدیل کربوهیدرات‌های محلول به نامحلول باشد.

شدت تعرق

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر برهم‌کنش دی‌اکسید کربن و محلول پاشی اتانول در سطح احتمال یک درصد بر شدت تعرق برگ ریحان معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیش‌ترین شدت تعرق (۴/۵۵ میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه) در تیمار ۷۰۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و محلول پاشی اتانول ۲۰ درصد حجمی مشاهده شد. کم‌ترین شدت تعرق (۰/۵۸ میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه) در تیمار شاهد (۳۸۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و عدم محلول پاشی اتانول) مشاهده شد (جدول ۴). Monajem et al. (2011) گزارش کردند که در نتیجه تنش تغییرات موازی در شدت فتوسنتز، شدت تعرق و غلظت دی‌اکسید کربن در

است که برای سازگاری‌های گیاه به محیط‌های تحت تنش‌زا دارای نقش‌های متفاوتی است. افزایش آبسزیک اسید در بافت برگ گیاه باعث بسته‌شدن روزنه‌ها و کاهش خروج آب از گیاه می‌شود. تنش‌هایی مانند سرما، شوری، گرما و تنش‌های مکانیکی نیز سبب افزایش سنتز آبسزیک اسید در گیاه می‌شود. بنابراین افزایش سنتز آبسزیک اسید در گیاه را می‌توان به دلیل افزایش مقاومت روزنه‌ای دانست (Kafi et al., 2015). در نتیجه در پژوهش حاضر محلول‌پاشی و تزریق دی‌اکسید کربن در سطوح بالا به نوعی تنش بوده و در نتیجه افزایش مقاومت روزنه‌ای در این سطوح مشاهده شد.

مالون دی‌آلدئید

در جدول تجزیه واریانس، برهم‌کنش تیمارها بر میزان مالون دی‌آلدئید برگ ریحان معنی‌دار نشد، ولی اثر ساده محلول‌پاشی اتانول در سطح احتمال یک درصد بر آن معنی‌دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر ساده اتانول نشان داد که اتانول ۳۰ درصد حجمی بیش‌ترین تأثیر را بر میزان مالون دی‌آلدئید برگ ریحان داشت که تفاوت معنی‌داری با سطوح ۲۰ و ۱۰ درصد حجمی آن نداشت (شکل ۲). به نظر می‌رسد اتانول ایجاد تنش در گیاه نموده و افزایش مالون دی‌آلدئید در این حالت به‌خاطر ایجاد تنش است. رادیکال سوپراکسید تولیدی در حین تنش از طریق پراکسیداسیون لیپیدهای موجود در غشاء میزان مالون دی‌آلدئید در گیاه را نیز افزایش می‌دهند که این یافته مشابه نتایج (2020) Farsaraei است. بنابراین می‌توان عنوان کرد که در پژوهش حاضر محلول‌پاشی اتانول موجب تنش در گیاه شد.

آنزیم پلی‌فنل اکسیداز

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر برهم‌کنش دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول در سطح احتمال یک درصد بر فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیش‌ترین فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز (۰/۰۰۱۴ واحد بین‌المللی بر میلی‌گرم

اتانول) دیده شد که تفاوت معنی‌داری با برخی از تیمارها نداشت (جدول ۴). از آثار اصلی گاز دی‌اکسید کربن بر گیاهان می‌توان به افزایش فتوسنتز و هدایت روزنه‌ای و تعرق و بهبود کارایی مصرف آب و نور اشاره کرد (Li et al., 2020). متابولیسم متانول، اتانول و تبدیل آن‌ها به قندها در برگ‌های گیاهان تیمار شده با آن‌ها می‌تواند پتانسیل اسمزی برگ‌ها را تغییر داده و باعث افزایش فشار آماس و افزایش هدایت روزنه‌ای آن‌ها شود که این امر باعث افزایش سرعت آسیمیلایون و همچنین افزایش رشد گیاهان خواهد شد (Manchanda et al., 2008).

مقاومت روزنه‌ای

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر برهم‌کنش دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول در سطح احتمال یک درصد بر میزان مقاومت روزنه‌ای برگ ریحان معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیش‌ترین میزان مقاومت روزنه‌ای (۱۷۵/۴۶ مترمربع بر ثانیه بر مول) در تیمار ۱۰۵۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول ۳۰ درصد حجمی مشاهده شد. کم‌ترین مقاومت روزنه‌ای (۱۰۶/۷۰ مترمربع بر ثانیه بر مول) در تیمار ۷۰۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول ۲۰ درصد حجمی مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با تیمار ۳۸۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و عدم محلول‌پاشی اتانول و محلول‌پاشی اتانول ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد حجمی نداشت (جدول ۴). این بدین معنی است که در شرایط تنش، مقاومت روزنه‌ای افزایش پیدا می‌کند که با نتایج پژوهشگران دیگر هم‌خوانی دارد (Jones et al., 1984). افزایش غلظت دی‌اکسید کربن موجب بسته‌شدن جزئی روزنه‌ها می‌شود. این کاهش هدایت روزنه‌ای باعث کاهش تعرق در واحد سطح برگ می‌شود. کاهش در سرعت از دست دادن آب برگ می‌تواند به دلیل کاهش تعرق و کاهش نیاز به آب در شرایط افزایش غلظت دی‌اکسید کربن باشد (Casella et al., 2006). آبسزیک اسید یک هورمون تششی

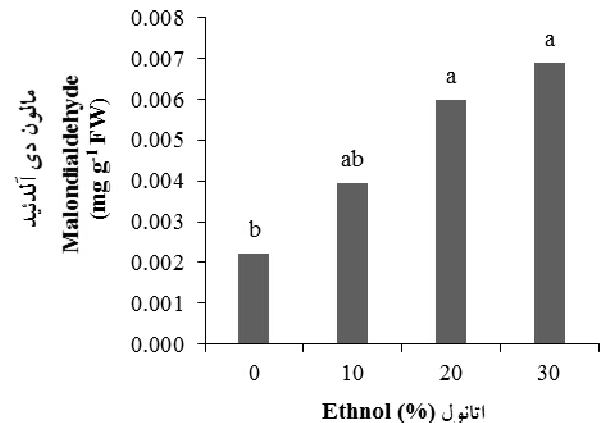
محلول‌پاشی اتانول ۳۰ درصد حجمی تنش به گیاه ریحان وارد شده است.

گیاکول پراکسیداز

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که آثار تیمارها در سطح احتمال یک درصد بر فعالیت آنزیم گیاکول پراکسیداز معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیش‌ترین فعالیت آنزیم گیاکول پراکسیداز (۰/۳۶ واحد بین‌المللی بر میلی‌گرم پروتئین) در تیمار ۱۰۵۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی ۳۰ درصد حجمی اتانول مشاهده شد که به لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با برخی از سطوح نداشت کم‌ترین فعالیت این آنزیم (۰/۲۰ واحد بین‌المللی بر میلی‌گرم پروتئین) نیز در تیمار شاهد (۳۸۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و عدم محلول‌پاشی اتانول) دیده شد که تفاوت معنی‌داری با دیگر سطوح تیمارها نداشت (جدول ۴). (Salarpour et al. (2015 گزارش کردند که در گیاه رازیانه تنش حاصل از کم‌آبایی سبب افزایش معنی‌داری در فعالیت آنزیم گیاکول پراکسیداز و آنزیم‌های دیگر نسبت به تیمار شاهد شد. آنچه نتایج پژوهش حاضر نشان داد این است که در اثر محلول‌پاشی اتانول و تغذیه دی‌اکسید کربن در غلظت‌های زیاد، به گیاه ریحان تنش وارد شد که در نتیجه آن فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانتهی افزایش یافته است.

پروتئین محلول

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر برهم‌کنش دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول در سطح احتمال یک درصد بر میزان پروتئین محلول برگ ریحان معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیش‌ترین مقدار پروتئین محلول (۰/۰۳۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه برگ) در تیمار ۷۰۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول ۲۰ درصد حجمی مشاهده شد که به لحاظ آماری با سطوح دیگر اختلاف معنی‌داری نداشت. کم‌ترین



شکل ۲. اثر محلول‌پاشی اتانول بر میزان مالون دی‌آلدئید ریحان رقم کشکنی لولو؛ مقایسه میانگین بر اساس آزمون بونفرونی در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

Fig. 2. The simple effect of ethanol spraying on the amount of malondialdehyde in basil cultivar of Keshkeni levelou; The mean comparison was done based on the Bonferroni test at a probability level of 5%.

پروتئین) در تیمار ۱۰۵۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول ۳۰ درصد حجمی مشاهده شد که با تیمار محلول‌پاشی اتانول ۲۰ درصد حجمی در همین غلظت دی‌اکسید کربن تفاوت معنی‌داری نداشت. کم‌ترین فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز (۰/۰۰۳۳ واحد بین‌المللی بر میلی‌گرم پروتئین) در تیمار شاهد (۳۸۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و عدم محلول‌پاشی اتانول) مشاهده شد (جدول ۴). در گیاه پونه معطر به‌منظور افزایش مقاومت گیاه به تنش شوری، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانتهی (سوپراکسید دیسموتاز، پلی‌فنل اکسیداز، کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز) افزایش یافت (Manderscheid and Weigel, 2007) که این موارد با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد. میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز و اغلب آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانتهی دیگر رابطه مستقیمی با طول زمان تنش دارد و نشان‌دهنده آن است که با افزایش دوره تنش، فعالیت این آنزیم‌ها نیز تقویت می‌شود (Farsaraei, 2020). این‌طور به‌نظر می‌رسد که در پژوهش حاضر غلظت زیاد دی‌اکسید کربن (۱۰۵۰ میکرومول بر مول) و

کربن و محلول‌پاشی اتانول باعث آثار متفاوتی بر زیست‌توده تازه و خشک شاخساره، و ویژگی‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه ریحان شد. نتایج ارزیابی تأثیر سطوح مختلف دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول بر صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی شامل محتوای نسبی آب برگ، نشت الکترولیت، کربوهیدرات محلول، فلاونوئید، پروتئین محلول، شدت فتوستتیز، هدایت روزنه‌ای و شدت تعرق ریحان نشان داد که بیش‌ترین تأثیر معنی‌داری در بیش‌تر این صفات در تیمار ۷۰۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول ۲۰ درصد حجمی دیده شد. بیش‌ترین زیست‌توده تازه و خشک شاخساره در تیمار ۷۰۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول ۳۰ درصد حجمی به‌دست آمد. همچنین بیش‌ترین فعالیت آنزیم‌های پلی‌فنل اکسیداز و گایاکول پراکسیداز و مقاومت روزنه‌ای و نشت الکترولیت در سطوح بالای تیمارها (یعنی غلظت ۱۰۵۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول ۳۰ درصد حجمی) مشاهده شد. همچنین بهترین تیمارها از نظر افزایش شدت فتوستتیز و بیش‌ترین زیست‌توده تازه و خشک شاخساره، محلول‌پاشی ۲۰ و ۳۰ درصد حجمی اتانول همراه با کاربرد ۷۰۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن بودند. بنابراین نتایج این پژوهش نشان داد که بهترین تیمار برای افزایش صفات رشدی در این پژوهش تیمار ۷۰۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول ۳۰ درصد حجمی است.

تشکر و سپاسگزاری

نویسندگان از دانشگاه فردوسی مشهد برای حمایت مالی از این طرح پژوهشی تشکر و قدردانی می‌نمایند.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچگونه تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

مقدار پروتئین محلول (۰/۰۰۰۸۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه برگ) در تیمار ۱۰۵۰ میکرومول بر مول دی‌اکسید کربن و محلول‌پاشی اتانول ۱۰ درصد حجمی مشاهده شد (جدول ۴). در آزمایشی که بر روی نیشکر (گیاهی با مسیر فتوستتیزی چهارکربنه) انجام شد مشاهده گردید در گیاهانی که در غلظت دو برابر دی‌اکسید کربن معمولی هوا رشد می‌کنند، اثر مثبتی در مراحل نمو ایجاد می‌شود، از جمله اینکه کلروفیل کل و پروتئین محلول به‌ترتیب ۳۱ و ۱۵ درصد افزایش می‌یابد (Wu et al., 2004). افزایش غلظت دی‌اکسید کربن و اتانول (در بالاترین سطوح آن‌ها) موجب ایجاد تنش و باعث کاهش پروتئین محلول و افزایش فعالیت آنزیم‌های پلی‌فنل اکسیداز و گایاکول پراکسیداز در گیاه ریحان شد. تنش‌های غیرزنده از جمله تنش شوری سبب می‌شود تا از سنتز برخی از پروتئین‌ها جلوگیری شود. در مقابل سنتز برخی دیگر از آن‌ها افزایش یابد (می‌توان به آنزیم‌های پروتئینی اشاره کرد)، ولی در مجموع میزان کل پروتئین محلول در گیاه کاهش می‌یابد. به‌منظور تولید اسیدهای آمینه برای تنظیم اسمزی سلول، پروتئین‌های موجود در گیاه به‌وسیله آنزیم پروتئاز هیدرولیز شده و همین امر سبب کاهش پروتئین محلول در گیاهانی که در شرایط تنش قرار گرفته‌اند می‌شود (Farsaraei, 2020). نتایج پژوهش حاضر در مورد اثر سطوح بالای تیمارها این موضوع را تایید می‌کند.

نتیجه‌گیری کلی

امروزه بهبود عملکرد گیاهان از طریق افزایش فتوستتیز با تزریق دی‌اکسید کربن و استفاده از محلول‌پاشی اتانول می‌تواند به‌عنوان راهکاری مناسب مورد توجه قرار گیرد. در مورد تأثیر دی‌اکسید کربن همراه با محلول‌پاشی اتانول بر عملکرد ریحان پژوهش‌های زیادی انجام نگرفته است. در این پژوهش، اثر محلول‌پاشی اتانول و دی‌اکسید کربن بر زیست‌توده تازه و خشک شاخساره و برخی صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی ریحان در شرایط کنترل‌شده در گلخانه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج دلالت بر آن دارد که اثر سطوح مختلف دی‌اکسید

منابع مورد استفاده

1. Abbaszadeh, B., Sharifi Ashourabadi, E., Lebaschi, M.H., Naderi Hajibagher Kandy, M., Moghadami, F., 2008. The effect of drought stress on proline contents, soluble sugars, chlorophyll and relative water contents of balm (*Melissa officinalis* L.). IJMAPR. 23(4), 504–513. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2008.10090>
2. Asgari, A.A., Moinfard, A., 2014. The effect of foliar application of foliar alcohols as a new method in agriculture. In: The First National Congress of Biology and Natural Sciences of Iran, November 22th, Tehran.
3. Benson, A.A., Nonomura, A.M., 1994. The path of carbon in photosynthesis: methanol inhibition of glycolic acid accumulation. Res. J. Phytochem. 89(20), 9794–8. <https://doi.org/10.1073/pnas.89.20.9794>
4. Bradford, M.M., 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Anal. Biochem. 72(1-2), 248–254. <https://doi.org/10.1006/abio.1976.9999>
5. Burkart, S., Manderscheid, R., Weigel, H.J., 2004. Interactive effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations and plant available soil water content on canopy evapotranspiration and conductance of spring wheat. Eur. J. Agron. 21, 401–17. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.07.003>
6. Casella, E., Soussana, J.F., Loiseau, P., 1996. Long-term effects of CO₂ enrichment and temperature increase on a temperate grass sward. Plant Soil 182, 83–99. <https://doi.org/10.1007/BF00010998>
7. Chaum, S., Takabe, T., Kirdmanee, C., 2010. Ion contents, relative electrolyte leakage, proline accumulation, photosynthetic abilities and growth characters of oil palm seedlings in response to salt stress. Pak. J. Bot. 42(3), 2020–2191. <https://doi.org/10.3390/plants10102044>
8. Delucia, E. H., Sasek, T. W., & Strain, B. R., 1985. Photosynthetic inhibition after long-term exposure to elevated levels of atmospheric carbon dioxide. Photosynth. Res. 7, 175–184. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(88\)90078-0](https://doi.org/10.1016/0168-1923(88)90078-0)
9. Davey, M.W., Stals, E., Panis, B., Keulemans, J., Swennen, R.L., 2005. High-throughput determination of malondialdehyde in plant tissues. Anal. Biochem. 347(2), 201–207. <http://doi.org/10.3844/ajbbsp.2013.235.242>
10. Farsarai, S., 2020. Comparison of The Effect of Three Types of Superabsorbent Polymers on Morphophysiological and Biochemical Properties and The Amount of Basil Essential Oil (Leko cultivar) under Salinity Stress. MSc Thesis, Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad.
11. Gapinska, M., Skłodowska, M., Gabara, B., 2008. Effect of short-and long-term salinity on the activities of antioxidative enzymes and lipid peroxidation in tomato roots. Acta Physiol. Plant. 30(1), 11–18. <http://doi.org/10.1007/s11738-007-0072-z>
12. Heins, R., 1980. Inhibition of ethylene synthesis and senescence in carnation by ethanol. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 105(1), 141–144. <http://doi.org/10.1104/pp.71.3.541>
13. Jahantigh, A., Najafi, F., Naqdi Badi, H.A., Khavarinezhad, R.A., Sanjarian, F., 2016. Study of some physiological characteristics of hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) in the vegetative stage under the influence of salinity stress. IJPB 8(27), 94–81. <http://doi.org/10.22108/IJPB.2016.20695>
14. Jones, P., Allen. L.H. Jr., Jones. J.W., Boote, K.J., Campbell, W.J., 1984. Soybean canopy growth, photosynthesis and transpiration responses to whole season carbon dioxide enrichment. Agron. J. 76, 633–637. <https://doi.org/10.2480/agrmet.469>
15. Kafi, M., Ganjali, A. And Abbasi, F., 2007. Evaluation of changes in abscisic acid (ABA) leaf tissue and stomatal resistance in drought tolerant and susceptible genotypes of chickpea (*Cicer arietinum* L.). J. Sci. IR of Iran 26, 4–19. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw153>
16. Kar, M., Mishra, D., 1976. Catalase, peroxidase and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence. Plant Physiol. 57(2), 315–319. <https://doi.org/10.1104/pp.57.2.315>
17. Khosravi, E., 2011. Effect of Methanol and Ethanol on Yield and Quality of *Melissa officinalis* L. MSc Thesis. Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Islamic Azad University of Karaj, Iran.
18. Khosravi, M. T., Mehrafarin, A., Naqdi Badi, H., A. Haji Aghaei, R. Khosravi, A., 2011. The effect of methanol and ethanol on the performance of *Echinacea purpurea* in Karaj. J. Med. Plant. Res. 2(2), 128–121. <https://doi.org/10.3390/app13116477>
19. Kirmaak, H., Kaya, C., Tas, I., and Higgs, D., 2001. The influence of water deficit on vegetation growth. Physiology fruit yield and quality in eggplants. Bulg. J. Plant Physiol. 27, 34–46. <https://doi.org/10.55257/ethabd.1340314>
20. Lee, Y.H., Sang, W.G., Baek, J.K., Kim, J.H., Shin, P., Seo, M.C., Cho, J., 2020. The effect of concurrent elevation in CO₂ and temperature on the growth, photosynthesis, and yield of potato crops. PLoS One. 15(10), e0241081. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241081>
21. Li, X., Dong, J., Nazim, S., Gruda, Chu, W., Duan, Z., 2020. Interactive effects of the CO₂ enrichment and nitrogen supply on the biomass accumulation, gas exchange properties, and mineral elements concentrations in cucumber plants at different growth stages. Agron. 10(139), 2–21. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010139>
22. Lutts, S., Kinet, J.M. and Bouharmont, J., 1995. Changes in plant response to NaCl during development of rice (*Oryza sativa* L.) varieties differing in salinity resistance. J. Exp. Bot. 46(12), 1843–1852. <https://doi.org/10.1093/jxb/46.12.1843>

23. Mackerness, S.A.H., John, C.F., Jordan, B., Thomas, B. 2001. Early signaling components in ultraviolet-B responses: distinct role for different reactive oxygen species and nitric oxide. *FEBS Lett.* 489, 237–242.
24. Manderscheid, R., H.J. Weigel., 2007. Drought stress effects on wheat are mitigated by atmospheric CO₂ enrichment. *ASD* 27, 79–87. [https://doi.org/10.1016/S0014-5793\(01\)02103-2](https://doi.org/10.1016/S0014-5793(01)02103-2)
25. Manchanda, P., Xie, Y. Youn, N., 2008. The role of targeted communication and contagion in product adoption. *Mark. Sci.* 27(6), 961–976. <https://doi.org/10.1287/mksc.1070.0354>
26. Merati, M.J., Niknam, V., Hassanpour, H. Mir Masoumi, M., 2015. Comparison of the effect of salinity stress on growth and antioxidant responses of different organs of aromatic mint (*Mentha pulegium* L.). *J. Plant Res.* 28 (5), 1107–1097. <https://doi.org/20.1001.1.23832592.1394.28.5.17.0>
27. Mirseyyed Hosseinieh, H., Fathi Gardlidani, A., Mansour Kouhestani, M.R. Bihanta, M., 2018. The effect of carbon dioxide concentration and soil nitrogen availability on growth and physiological indices of wheat. *Iran. J. Soil Water Res.* 49 (4), 779–767. <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2017.237231.667716>
28. Moghaddam, M., Alymanesh, M.R., Mehdizadeh, L., Mirzaei, H., Ghasemi Pirbalouti, A., 2014. Chemical composition and antibacterial activity of essential oil of *Ocimum ciliatum*, as a new source of methyl chavicol, against ten phytopathogens. *Ind. Crops. Prod.* 59, 144–148. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.05.006>
29. Monajem, S., Ahmadi, A. Mohammadi, V., 2011. Effect of drought stress on photosynthesis, yield and grain yield of rapeseed cultivars. *Iran. J. Field Crops Res.* 13(3), 533–547. <https://doi.org/10.3390/w12082127>
30. Nourafcan, H., Kalantari, Z., and F. Sefidkon., 2018. The effect of methanol and ethanol foliar application on essential oil composition of peppermint. *J. Agroecol.* 14(2), 9–18. <https://doi.org/10.22067/JHS.2022.61778.0> (In Persian with English abstract)
31. Parsad, P.V.V., Boot, K.J., Allen, L.H., Thomas, J.M.G., 2002. Effect of elevated temperature and carbon dioxide on seed-set and yield of kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Glob. Change Biol.* 8, 710–721. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00508.x>
32. Plewa, M.J., Smith, S.R., Wagner, E.D., 1991. Diethyldithiocarbamate suppresses the plant activation of aromatic amines into mutagens by inhibiting tobacco cell peroxidase. *Mutat. Res-Fund. Mol. M.* 247(1), 57–64. [https://doi.org/10.1016/0027-5107\(91\)90033-k](https://doi.org/10.1016/0027-5107(91)90033-k)
33. Ramirez, I., Dorta, F., Espinozo, V., Jimenez, E., Mercad, A., Penacortes, H., 2006. Effects of foliar and root applications of methanol on the growth of arabidopsis, tobacco and tomato plants. *J. Plant Growth Regul.* 25(1), 30–44. <https://doi.org/10.1007/s00344-005-0027-9>
34. Roger, F., John Elger, H., Watking, B., Philipia, J., 2008. Physical and mechanical changes in strawberry fruit after high carbon dioxide treatments. *Postharvest Biol. Technol.* 19, 139–146. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1058173>
35. Sadasivam, S., and Manickam, A., 1992. *Biochemical Methods for Agricultural Sciences*. Wiley Eastern Limited.
36. Sairam, R.K., Rao, K.V., Srivastava, G., 2002. Differential response of wheat genotypes to long term salinity stress in relation to oxidative stress, antioxidant activity and osmolyte concentration. *Plant Sci.* 163, 1037–1046. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00278-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00278-9)
37. Sajedi Moghadam, S., Mehrafarin, A., Naqdiadi, H. A. Pazaki, A. R., Qavami, N., 2012. Evaluation of phytochemical performance of thyme plant under hydroalcohol spraying. *J. Med. Plant. Res.* 11(4), 139–130. [https://doi.org/10.1016/S2222-1808\(13\)60100-0](https://doi.org/10.1016/S2222-1808(13)60100-0)
38. Salarpur Gharba, F., Farahbakhsh, H., 2015. The effect of dehydration and salicylic acid on essential oils and antioxidant enzymes in fennel. *J. Crop Improv.* 17(3), 727–713. <https://doi.org/10.22108/IJPB.2022.133824.1288>
39. Sanchez, F.J., Manzanares, M., de Andres, E.F., Tenorio, J.L., Ayerbe, L., 1998. Turgor maintenance, osmotic adjustment and soluble sugar and proline accumulation in 49 pea cultivars in response to water stress. *Field Crops Res.* 59(3), 225–235. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00125-7](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00125-7)
40. Song, H., W, Peiqi., Lu, X., Wang, B., Song, T., Lu, Q., Li, M., Xu., X., 2023. Comparative physiological and transcriptomic analyses reveal the mechanisms of CO₂ enrichment in promoting the growth and quality in *Lactuca sativa*. *PLoS One* 18 (2), 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278159>.
41. Vu, J.C.V., Aleen Jr, L.H., Gesch, R.W., 2006. Up-regulation of photosynthesis and sucrose metabolism enzymes in young expanding leaves of sugarcane under elevated grown CO₂. *Plant Sci.* 171, 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2006.03.003>
42. Wu, X., Beecher, G.R., Holden, J.M., Haytowitz, D.B., Gebhardt, SE., Prior, RI., 2004. Lipophilic and hydrophilic antioxidant capacities of common foods in the United States. *J. Agric. Food Inf.* 52(12), 4026–4037. <https://doi.org/10.1021/jf049696w>
43. Xu, Z., Jiang, Y., Zhou, G., 2015. Response and adaptation of photosynthesis, respiration, and antioxidant systems to elevated CO₂ with environmental stress in plants. *Front. Plant Sci.* 6, 701–715. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00701>

Contents

Phosphorus Efficiency of Sirvan and Sivand Wheat Cultivars Under Drought Stress Conditions in a Calcareous Soil	1
M. Moosavi, R. Khorassani and R. Tavakkol Afshari	
Optimum Plant Density of Greenhouse Tomato Grown in a Soiless System in Golestan Province	21
Sh. Vakili Bastam	
Comparison of Yield and Quantitative and Qualitative Characteristics of Two Strawberry Cultivars Under Two Hydroponics Culture Systems.....	39
B. Baran Sheikmazari, H. Hassanpour, P. Noruzi and S. Nojavan	
Effect of Azolla Culture Medium on Biomass, Nutrient and Protein Concentrations of Azolla and Its Application as a Nutrient Supply for Bell Pepper.....	53
M. Fatahi Vanani and B. Khalili	
Effect of Salicylic Acid Foliar Application on Growth Characteristics in Tomato (<i>Lycopersicon esculentum</i> L.) Under Lead Stress Conditions.....	73
H. Kakaei, A.A. Amirinejad and M. Ghobadi	
The Effect of Different Levels of Carbon Dioxide and Ethanol Spraying on The Growth, and Physiological and Biochemical Characteristics of Basil.....	87
E. Darabi Hoseinabad Ghaeni, M. Moghaddam and F. Arasteh	

Journal of

Soil and Plant Interactions

Isfahan University of Technology

Vol. 14, No. 3, Fall 2023

ISSN 2783-5014

Publisher : Isfahan University of Technology
Managing Editor : M. A. Hajabbasi
Editor-in-Chief : M. R. Mosaddeghi

Editorial Board:

Fariborz Abbasi	Professor of Water Engineering, Agricultural Engineering Research Institute, AERI
Nasser Aliasgharzad	Professor of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz
Bahram Baninasab	Professor of Horticultural Science, Isfahan University of Technology
Andrea Carminati	Professor of Soil Physics, Faculty of Biology, Chemistry & Earth Sciences, University of Bayreuth, Germany
Mahdi Gheysari	Associate Professor of Water Engineering, Isfahan University of Technology
Thomas Keller	Professor of Soil Physics, Department of Soil and Environment, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden & Agroscope Research Station ART, Zurich, Switzerland
Hossein Khademi	Professor of Soil Science, Isfahan University of Technology
Habib Khodaverdiloo	Professor of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University & The University of Queensland, Australia
Mary Beth Kirkham	Professor of Soil Water and Plant Relations, Department of Agronomy, Kansas State University, USA
Mohammad Mahdi Majidi	Professor of Genetic and Plant Breeding, Isfahan University of Technology
Hossein Shariatmadari	Professor of Soil Science, Isfahan University of Technology
Mehdi Sharifi	Associate Professor of Soil Science, Summerland Research and Development Centre, Summerland, BC, Canada
Amrakh I. Mamedov	Professor of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tottori University, Tottori, Japan
Mohammad Hossein Mohammadi	Associate Professor of Soil Science, Faculty of Agriculture, and Natural Resources, University of Tehran
Mohammad Reza Mosaddeghi	Professor of Soil Science, Isfahan University of Technology
Mohammad Reza Neyshabouri	Professor of Soil Science, University of Tabriz
Farshid Nourbakhsh	Professor of Soil Science, Isfahan University of Technology
Adrian Unc	Professor of Soil Science, School of Science and the Environment, Memorial University of Newfoundland, Canada

Executive Editor : B. Khalili
Assistant Editor : M. R. Mosaddeghi
Administrative Manager : F. Nasiri
Typesetting : F. Nasiri
Printed : Isfahan University of Technology
Published by : Isfahan University of Technology

Address: Journal of Soil and Plant Interactions, Scientific Publications Office, Administration Building, Isfahan University of Technology, Isfahan 8415683111, Iran.
Phone: (0098)31-33912797, Fax: (0098)3133912626
E-Mail: jspi@of.iut.ac.ir
Website: <http://jspi.iut.ac.ir>



Soil and Plant Interactions

Contents

- Phosphorus Efficiency of Sirvan and Sivand Wheat Cultivars
Under Drought Stress Conditions in a Calcareous Soil..... 1
M. Moosavi, R. Khorassani and R. Tavakkol Afshari
- Optimum Plant Density of Greenhouse Tomato Grown in a
Soilless System in Golestan Province21
Sh. Vakili Bastam
- Comparison of Yield and Quantitative and Qualitative Characteristics
of Two Strawberry Cultivars Under Two Hydroponics Culture Systems 39
B. Baran Sheikhmazari, H. Hassanpour, P. Noruzi and S. Nojavan
- Effect of Azolla Culture Medium on Biomass, Nutrient and Protein
Concentrations of Azolla and Its Application as a Nutrient Supply for Bell Pepper 53
M. Fatahi Vanani and B. Khalili
- Effect of Salicylic Acid Foliar Application on Growth Characteristics
in Tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) Under Lead Stress Conditions 73
H. Kakaei, A.A. Amirinejad and M. Ghobadi
- The Effect of Different Levels of Carbon Dioxide and Ethanol
Spraying on The Growth, and Physiological and Biochemical Characteristics of Basil 87
E. Darabi Hoseinabad Ghaeni, M. Moghaddam and F. Arasteh