

## مقاله پژوهشی

# رشد و ویژگی‌های بیوشیمیایی اکوتیپ‌های خارمریم (*Silybum marianum* L.) تحت تأثیر برهمکنش تاریخ کاشت و رژیم آبیاری

شیرینا سمیع‌عادل، حمیدرضا عشقی‌زاده\*، مرتضی زاهدی و محمد مهدی مجیدی

گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۳۰، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۹/۱۳)

## چکیده

در مطالعه ویژگی‌های بیوشیمیایی چهار اکوتیپ گیاه خارمریم (اصفهان، کهگیلویه و بویراحمد، خوزستان-امیدیه و مجارستان) در سه سطح ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد تخلیه رطوبت خاک و پنج تاریخ کاشت (۶ مهر، ۲۶ مهر، ۱۶ آبان، ۶ آذر و ۲۰ اسفند) در سال ۱۳۹۹ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه صنعتی اصفهان مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش به صورت تجزیه مرکب اسپلیت پلات در سه تکرار در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی آنالیز شد. نتایج نشان داد بین تیمارهای تاریخ کاشت و رژیم آبیاری تفاوت‌های معنی‌داری از نظر محتوای نسبی آب برگ، پرولین، مالون دی‌آلدئید، کلروفیل *a* و *b* و کاروتنوئیدها و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از قبیل کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز مشاهده شد. اکوتیپ‌ها به طور متفاوتی به این تغییرات واکنش نشان دادند، که بیانگر حساسیت‌های مختلف آن‌ها به شرایط محیطی است. اکوتیپ‌های اصفهان و کهگیلویه و بویراحمد دارای بیشترین عملکرد زیست‌توده (۱۱/۵ کیلوگرم بر متر مربع) بودند. اکوتیپ "کهگیلویه و بویراحمد" با بیشترین مقدار کلروفیل، کاروتنوئید، محتوای نسبی آب برگ و کارایی کوانتومی فتوسستم II (Fv/Fm) برای برنامه‌های اصلاحی و ایجاد ارقام مناسب اقلیم کشور پیشنهاد می‌شود. این تحقیق نشان می‌دهد که بهینه‌سازی تاریخ کاشت و رژیم آبیاری می‌تواند عملکرد گیاه خارمریم را به‌ویژه در شرایط افزایش تقاضای آب آبیاری حاصل از تغییرات آب و هوایی بهبود بخشد. بررسی ارتباط ویژگی‌های بیوشیمیایی گیاه با شرایط کاشت، بر ارزش بالقوه این تناسب‌ها برای بهبود مدیریت تولید محصولات گیاهی می‌افزاید.

کلمات کلیدی: تنش خشکی، ماریتیغال، عملکرد زیست‌توده، کلروفیل، گیاهان دارویی، محتوای نسبی آب برگ

## مقدمه

برای مقابله با تنش کم‌آبی از سه مکانیسم اصلی استفاده می‌کنند. اولین روش، فرار از خشکی است که شامل کاهش دوره رشد برای تولید محصول قبل از وقوع تنش و کاهش تعداد ساقه‌های فرعی و پنجه‌ها می‌شود (ابه‌ری و همکاران، ۱۳۸۶؛ Abreha et al., 2022). روش دوم، اجتناب از خشکی

تنش کم‌آبی یکی از رایج‌ترین تنش‌های غیرزیستی است که به رشد و نمو گیاهان آسیب می‌رساند و در مناطق با آب و هوای خشک و نیمه‌خشک، بیش از ۴۰ درصد زمین‌های زراعی دنیا را تحت تأثیر قرار داده است (Sinaki et al., 2007). گیاهان

\*نویسنده مسئول، نشانی پست الکترونیکی: hr.eshghizadeh@iut.ac.ir

است که با گسترش سیستم ریشه‌ای برای دسترسی بیشتر به آب، تغییر هدایت و اندازه روزه‌ها، افزایش تجمع آب‌سبزیک اسید و ضخامت کوتیکول صورت می‌گیرد (کوچکی و راشد محصل، ۱۳۸۸). سومین روش، تحمل خشکی است که از طریق تنظیم فشار اسمزی و تجمع متابولیت‌هایی مانند پرولین به دست می‌آید (Zhang et al., 2022).

یکی از روش‌های مدیریت گیاهان در شرایط تنش کم‌آبی، انتخاب تاریخ کاشت مناسب است. تاریخ کاشت مناسب به گیاهان امکان می‌دهد که بدون کوتاه شدن دوران رشد رویشی به مرحله گلدهی برسند. این انتخاب با توجه به شرایط آب و هوایی هر منطقه بر عملکرد کمی و کیفی گیاهان زراعی و دارویی تأثیر می‌گذارد (Baydar and Baydar, 2005). انطباق مراحل رشد گیاه با دما، طول روز، بارش و دیگر عوامل محیطی مناسب از طریق انتخاب تاریخ کاشت، بر استقرار و رشد رویشی و زایشی و در نهایت بر کمیت و کیفیت محصول نهایی تأثیرگذار است (قربانی و همکاران، ۱۳۸۹).

کشت گیاهان دارویی به دلیل متحمل بودن آن‌ها به خشکی، یکی دیگر از راه‌کارهای زراعی در شرایط کم‌آبی است. افزایش جمعیت و نیاز صنایع داروسازی به گیاهان دارویی، اهمیت این گیاهان را در صنایع پزشکی، آرایشی و غذایی بیشتر کرده است. خارمریم یا ماریتیغال (*Silybum marianum* L.) یکی از مهم‌ترین گیاهان دارویی برای درمان بیماری‌های کبدی است که به صورت خودرو در مناطق گرم و خشک می‌روید (Abenavoli et al., 2010; Hetz et al., 1995). ترکیبات مؤثره این گیاه که به نام سیلیمارین شناخته می‌شوند، شامل فلاونولیکنان‌هایی مانند سیلیبین، ایزوسیلیبین، سیلیکریستین، سیلیدیانین و تاکسیفولین است (Nasrabadi et al., 2014). سیلیمارین به عنوان یک آنتی‌اکسیدان قوی، بازسازی سلول‌های کبدی را تقویت کرده، کلسترول خون را کاهش داده و از سرطان پیشگیری می‌کند (Abenavoli et al., 2010). با توجه به پتانسیل بالای خارمریم در صنایع داروسازی، کشت این گیاه در ایران افزایش یافته است. با وجود سازگاری خارمریم با شرایط آب و هوایی ایران و مقاومت آن به خشکی، اطلاعات

کافی درباره تنوع ژنتیکی اکوتیپ‌های آن در ایران وجود ندارد (گلی و همکاران، ۱۳۸۶).

در پاسخ به تنش کم‌آبی و تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، گیاه فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند پراکسیدازها، کاتالاز و گلوکاتیون را افزایش می‌دهد (Aghaei et al., 2009). کمبود آب به رنگدانه‌ها و پلاستیدهای گیاه آسیب می‌زند و محتوای نسبی آب برگ را کاهش می‌دهد (Zivcak et al., 2014). تنش کم‌آبی موجب تغییر در متابولیت‌های اولیه مانند کربوهیدرات‌ها، اسیدهای آمینه و پلی‌آمین‌ها می‌شود و سطح تنظیم‌کننده‌های اسمزی از جمله پرولین که یک اسیدآمینه گیاهی است، افزایش می‌یابد. نتایج پژوهشی بر روی کلزا نشان داد که تنش کم‌آبی بر میزان کلروفیل، کاروتنوئید و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کلزا تأثیر معنی‌داری داشت (دهشیری و پاک‌نیت، ۱۳۹۱). همچنین، پژوهش بر روی گیاه سرخارگل نشان داد که تنش کم‌آبی در دو سطح ۵۰ و ۷۵ درصد تخلیه رطوبتی، باعث کاهش میزان کلروفیل *a* و *b*، عملکرد زیست‌توده و افزایش کربوهیدرات‌های محلول و پرولین شد (امامی، ۱۴۰۱).

تنظیم تاریخ کاشت برای کاهش خسارات تنش کم‌آبی اهمیت دارد، زیرا هم‌زمانی دوره‌های خشکی و دماهای بالا با دوره‌های حساس رشد گیاهی می‌تواند حداکثر خسارت را به گیاه وارد کند. با استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز و فناوری‌های نوین مانند ماهواره‌ها، می‌توان تاریخ کاشت مناسب را برای هر منطقه تعیین کرد (Belaqziz et al., 2021). پژوهش بر روی دو رقم ارزن نشان داد که تنش کم‌آبی موجب کاهش عملکرد زیست‌توده، عملکرد دانه، فلورسانس کلروفیل، کلروفیل *a* و *b* و محتوای نسبی آب برگ شد. اما انتخاب تاریخ کاشت مناسب (تاریخ کاشت دوم ۱۵ تیر) موجب بهبود شرایط کلی گیاه و افزایش عملکرد آن شد (نعمت‌پور و عشقی‌زاده، ۱۳۹۸). به‌طورکلی، تنش کم‌آبی موجب زودرسی نسبی گیاهان می‌شود و زودرسی معمول‌ترین صفت برای اصلاح مقاومت به خشکی است (Abreha et al., 2022).

تعیین تاریخ کاشت مناسب برای حصول بیشتر عملکرد و

کتنور نصب‌شده در ابتدای هر تیمار آبیاری، اندازه‌گیری شد. میزان آب مورد استفاده در جدول ۲ قابل مشاهده است.

**شرایط آب و هوایی:** داده‌های هواشناسی که به‌صورت روزانه از ایستگاه هواشناسی مزرعه لورک و ایستگاه هواشناسی نجف‌آباد دریافت شده و برای محاسبات در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است در جدول شماره ۳ ثبت شده است.

**عوامل آزمایشی:** هر واحد آزمایشی به ابعاد ۹۰ سانتی‌متر در ۱۴۰ سانتی‌متر بود، به‌طوری‌که تعداد سه ردیف با فاصله بین دو ردیف ۷۰ سانتی‌متر و فاصله بین دو بوته روی ردیف ۳۰ سانتی‌متر در عمق کاشت ۲ تا ۳ سانتی‌متر کشت شد و تراکم بوته ۱۲ بوته در هر واحد آزمایشی به‌دست آمد.

**تاریخ کاشت:** در این پژوهش پنج تاریخ کاشت شامل ۶ مهر ۱۳۹۹ (تاریخ کاشت اول/ پاییزه)، ۲۶ مهر ۱۳۹۹ (تاریخ کاشت دوم/ پاییزه)، ۱۶ آبان ۱۳۹۹ (تاریخ کاشت سوم/ پاییزه)، ۶ آذر ۱۳۹۹ (تاریخ کاشت چهارم/ پاییزه) و ۲۰ اسفند ۱۳۹۹ (تاریخ کاشت پنجم/ بهاره) مورد بررسی قرار گرفت.

**رژیم رطوبتی خاک:** جهت اعمال تیمارهای رطوبتی، سه سطح تخلیه رطوبت قابل استفاده گیاه (۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد از ظرفیت نگهداری رطوبت در خاک به‌ترتیب به عنوان آبیاری شاهد، تنش کم‌آبی خفیف و تنش کم‌آبی شدید) در نظر گرفته شد. رژیم‌های آبیاری بر اساس درصد حداکثر تخلیه رطوبتی مجاز ایجاد شدند که بر اساس مقدار تبخیر- تعرق جو طی دوره رشد بر اساس داده‌های روزانه هواشناسی ایستگاه نجف‌آباد و رابطه فائو- پنمن- مانیتث تعیین شده و ضریب گیاهی ( $K_c$ ) خارمریم که از مقالات قبلی استخراج شده (در مرحله رشد اولیه ۰/۳، در مرحله توسعه ۰/۷۷، در مرحله میانی رشد ۱/۰۴ و در مرحله رشد نهایی ۰/۸۵)، در محاسبه میزان تبخیر و تعرق مورد استفاده قرار گرفت (نوراللهی و همکاران، ۱۳۹۵). اندازه‌گیری رطوبت وزنی خاک پس از نمونه‌گیری از سه عمق ۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ سانتی‌متری خاک در آزمایشگاه انجام گرفت. میزان و نوبت هر آبیاری بر اساس نیاز گیاه از ابتدای آزمایش تا زمان استقرار کامل به صورت یکسان بود و پس از استقرار، رژیم‌های آبیاری ذکرشده اعمال شد.

ماده مؤثره گیاه بسیار مهم است. متابولیت‌های اولیه و ثانویه گیاه تحت تأثیر فرآیندهای ژنتیکی و شرایط محیطی تولید می‌شوند که تاریخ کاشت یکی از مهم‌ترین این شرایط است و بر کیفیت و کمیت متابولیت‌ها تأثیر به‌سزایی دارد (Andrzejewska and Skinder et al., 2014). تأخیر در کاشت گیاه باعث کاهش دوره رشد رویشی شده که با برخورد مراحل رشد زایشی با دمای بالا، سقط بذر و کاهش فرآورده‌های فتوسنتزی را افزایش می‌دهد (دوامی و همکاران، ۱۴۰۰). پژوهشی بر روی خارمریم نشان داد که کاشت زودهنگام این گیاه موجب افزایش عملکرد میوه‌ها و تعداد دانه در هر طبق می‌شود، درحالی‌که کاشت دیرهنگام به دلیل مواجهه با دماهای بالاتر، محتوای سیلی‌مارین را کاهش می‌دهد (Andrzejewska and Skinder et al., 2014). با این وجود برهم‌کنش تاریخ کاشت و رژیم آبیاری در گیاه خارمریم از نظر ویژگی‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیک روشن نیست. با توجه به اهمیت مطالب فوق، این تحقیق به منظور بررسی برهم‌کنش تاریخ کاشت و اکوتیپ بر ویژگی‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی گیاه خارمریم و شناسایی نشان‌گرهای فیزیولوژیک تحمل به خشکی انجام شد.

## مواد و روش‌ها

**ویژگی‌های محل اجرای آزمایش:** آزمایش در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه صنعتی اصفهان (مزرعه لورک) واقع در ۴۰ کیلومتری جنوب غرب اصفهان انجام گرفت. عرض جغرافیایی منطقه ۳۲ درجه و ۳۲ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی آن ۵۱ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی و ارتفاع آن از سطح دریاهای آزاد ۱۶۳۰ متر می‌باشد.

**ویژگی‌های خاک:** ویژگی‌های خاک مورد استفاده در جدول ۱ قابل مشاهده است.

**ویژگی‌های آب آبیاری:** آب مورد استفاده جهت آبیاری گیاهان در طول دوره رشد دارای پی‌اچ ۷/۵ و قابلیت هدایت الکتریکی ۱/۳ دسی‌زیمنس بر متر بوده، میزان آب در هر نوبت آبیاری و میزان کل آب آبیاری در طول دوره رشد با استفاده از

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک زراعی محل آزمایش

| عمق خاک<br>سانتی متر | رس | سیلت | شن | ماده آلی | نیترژن | بافت خاک | فسفر | پتاس | بی‌اچ | هدایت الکتریکی<br>دسی‌زیمنس بر متر |
|----------------------|----|------|----|----------|--------|----------|------|------|-------|------------------------------------|
| ۳۰-۰                 | ۲۵ | ۳۵   | ۴۰ | ۷۹       | ۰/۱    | لوم      | ۳۸   | ۴۹۱  | ۷/۷   | ۲/۲                                |
| ۶۰-۳۰                | ۲۶ | ۳۵   | ۴۰ | ۲۵       | ۰/۰۳   | لوم      | ۶/۵  | ۳۰۰  | ۷/۹   | ۱/۵                                |

جدول ۲- میزان آب مورد استفاده (مترمکعب در هکتار) جهت آبیاری گیاهان خارمریم در سه سطح آبیاری و پنج تاریخ کاشت

| تاریخ کشت | شاهد (۴۰ درصد) | تنش رطوبتی خفیف (۶۰ درصد) | تنش رطوبتی شدید (۸۰ درصد) |
|-----------|----------------|---------------------------|---------------------------|
| ۶ مهر     | ۶۹۶۷           | ۵۲۰۳                      | ۳۷۲۱                      |
| ۲۶ مهر    | ۶۷۰۲           | ۴۸۵۰                      | ۳۵۱۰                      |
| ۱۶ آبان   | ۶۷۰۲           | ۴۸۵۰                      | ۳۴۳۹                      |
| ۶ آذر     | ۶۶۱۴           | ۴۳۲۱                      | ۳۲۶۳                      |
| ۲۰ اسفند  | ۶۲۶۱           | ۳۸۸۰                      | ۳۰۸۷                      |

جدول ۳- میانگین ماهانه دمای کمینه، بیشینه، طول روز و میزان بارندگی در طول دوره رشد گیاه خارمریم در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰

| بازه زمانی                       | ماه میلادی | دمای بیشینه (°C) | دمای کمینه (°C) | طول روز (ساعت) | بارندگی (mm) |
|----------------------------------|------------|------------------|-----------------|----------------|--------------|
| ۱۱ شهریور تا ۹ مهر ۱۳۹۹          | سپتامبر    | ۳۰/۹             | ۱۵/۴            | ۱۲/۱           | ۰/۰۰         |
| ۱۰ مهر تا ۱۰ آبان ۱۳۹۹           | اکتبر      | ۲۴/۳             | ۷/۴۱            | ۱۱/۲           | ۰/۰۰         |
| ۱۱ آبان تا ۱۰ آذر ۱۳۹۹           | نوامبر     | ۱۶/۴             | ۴/۵۹            | ۱۰/۴           | ۱۰/۹         |
| ۱۱ آذر تا ۱۱ دی ۱۳۹۹             | دسامبر     | ۹/۷۲             | -۰/۳۲۹          | ۹/۹۴           | ۲۴/۹         |
| ۱۲ دی تا ۱۲ بهمن ۱۳۹۹            | ژانویه     | ۱۰/۹             | -۴/۸۹           | ۱۰/۲           | ۹/۱۰         |
| ۱۳ بهمن تا ۱۰ اسفند ۱۳۹۹         | فوریه      | ۱۵/۵             | -۰/۱۷۹          | ۱۰/۹           | ۱۹/۰         |
| ۱۱ اسفند ۱۳۹۹ تا ۱۱ فروردین ۱۴۰۰ | مارچ       | ۲۰/۰             | ۵/۸۵            | ۱۱/۸           | ۱۵/۲         |
| ۱۲ فروردین تا ۱۰ اردیبهشت ۱۴۰۰   | آوریل      | ۲۶/۴             | ۱۰/۴            | ۱۲/۸           | ۵/۹۵         |
| ۱۱ اردیبهشت تا ۱۰ خرداد ۱۴۰۰     | می         | ۲۹/۹             | ۱۳/۴            | ۱۳/۶           | ۹/۸۱         |
| ۱۱ خرداد تا ۹ تیر ۱۴۰۰           | ژوئن       | ۳۷/۲             | ۱۷/۹            | ۱۴/۱           | ۰/۰۰         |
| ۱۰ تیر تا ۹ مرداد ۱۴۰۰           | ژوئیه      | ۳۸/۳             | ۲۱/۳            | ۱۳/۹           | ۰/۲۰۰        |
| ۱۰ مرداد تا ۹ شهریور ۱۴۰۰        | آگوست      | ۳۵/۴             | ۱۸/۱            | ۱۳/۱           | ۰/۰۰         |

**اکوتیپ‌ها:** در این پژوهش چهار اکوتیپ خارمریم مورد

استفاده قرار گرفت. اکوتیپ‌های اصفهان و مجارستان به ترتیب از مرکز ملی ذخایر ژنتیکی و زیستی ایران و شرکت پاکان بذر تهیه و اکوتیپ‌های کهگیلویه و بویراحمد و خوزستان- امیدیه

از استان‌های مورد نظر جمع‌آوری شدند.

**صفات و نحوه اندازه‌گیری:** در این آزمایش صفات عملکرد زیست‌توده، کارایی کوانتومی فتوسیستم II (Fv/Fm)، محتوای نسبی آب برگ، غلظت کلروفیل *a*، *b* و کاروتنوئید،

فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز، محتوای پرولین، مالون دی‌آلدئید و کربوهیدرات‌های محلول اندازه‌گیری شد. جهت بررسی صفات، نمونه‌گیری از برگ‌های بالایی گیاه و در زمان گل‌دهی انجام و عملکرد زیست‌توده گیاه پس از رسیدگی فیزیولوژیک و برداشت گیاهان اندازه‌گیری شد.

**کارایی کوانتومی فتوسیستم II (Fv/Fm):** کارایی کوانتومی فتوسیستم II (Fv/Fm) به وسیله دستگاه فلورومتر مدل Hansatech version 1.21 و از محل میانه برگ و بین رگبرگ اصلی و لبه برگ در تمام بوته‌ها پیش از اعمال آبیاری مجدد و پس از قرارگرفتن در تاریکی به مدت ۲۰ دقیقه اندازه‌گیری شد.

**محتوای نسبی آب برگ (RWC):** جهت اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ، وزن تازه (FW)، وزن برگ‌ها در حالت آماس (TW) و وزن خشک (DW) آن‌ها اندازه‌گیری (Smart and Bingham, 1974) و RWC از رابطه زیر به دست آمد.

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

**غلظت کلروفیل a, b و کاروتنوئید:** برای اندازه‌گیری غلظت کلروفیل و کاروتنوئید از روش Lichtenthaler استفاده شد (۱۹۸۷). جذب نمونه‌های آماده‌شده در طول‌موج‌های ۶۶۳، ۶۴۶ و ۴۷۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر HITACHI U-1800 خوانده شد. پس از قرارگیری اعداد حاصل در روابط مربوطه، غلظت کلروفیل a, b و کاروتنوئید بر حسب میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ به دست آمد.

**فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی:** برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی ابتدا ۰/۱ گرم برگ، پودر شده و ۱ میلی‌لیتر بافر استخراج (شامل Tris، EDTA، Triton و DTT با نسبت مشخص) به آن اضافه و پس از قرارگیری در سانتریفیوژ یخچال‌دار Eppendorf 5810 R برای اندازه‌گیری انواع آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و پروتئین مورد استفاده قرار گرفت. غلظت پروتئین برگ با استفاده از روش Bradford (۱۹۷۶) اندازه‌گیری شد. میزان جذب نوری نمونه‌ها توسط دستگاه

اسپکتروفتومتر HITACHI U-1900 اندازه‌گیری شد. فعالیت آنزیم کاتالاز با استفاده از روش اصلاح‌شده Aebi (۱۹۹۸) و با ردیابی اسپکتروفتومتری تجزیه  $H_2O_2$  در طول‌موج ۲۴۰ نانومتر اندازه‌گیری شد.

فعالیت آسکوربات پراکسیداز با استفاده از روش Nakano و Asada (۱۹۸۱) با ردیابی اسپکتروفتومتری تجزیه  $H_2O_2$  در طول‌موج ۲۹۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید.

فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز به روش Chance و Maehly (۱۹۵۵) و با ردیابی اسپکتروفتومتری بر اساس اکسیداسیون گایاکول و تجزیه  $H_2O_2$  در طول‌موج ۴۷۰ نانومتر اندازه‌گیری شد.

**پرولین:** جهت اندازه‌گیری پرولین از روش Bates و همکاران (۱۹۷۳) استفاده شد. میزان جذب نوری نمونه‌ها در طول‌موج ۵۲۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر Unico 2100 اندازه‌گیری شد. اعداد، در معادله حاصل از نمودار رسم‌شده به وسیله استاندارد‌ها، و در فرمول میزان پرولین، قرار داده شده و غلظت پرولین برگ بر حسب میکرومول در گرم وزن تر برگ محاسبه شد.

**محتوای مالون دی‌آلدئید:** برای اندازه‌گیری محتوای مالون دی‌آلدئید از روش Heath و Packer (۱۹۶۸) استفاده شد. میزان جذب محلول نهایی به وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر HITACHI U-1800 در طول‌موج‌های ۴۵۵، ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر قرائت و بر حسب نانومول بر گرم وزن تر برگ گزارش شد.

**محتوای کربوهیدرات‌های محلول:** اندازه‌گیری محتوای کربوهیدرات‌های محلول با استفاده از روش McCready و همکاران (۱۹۵۰) صورت گرفت. قرائت در طول‌موج ۶۲۵ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر Unico 2100 انجام گرفت. اعداد به دست آمده، در معادله حاصل از نمودار استاندارد‌های گلوکز، قرار داده شده و غلظت قندهای محلول گیاه بر حسب میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ محاسبه شد.

آزمایش به صورت تجزیه مرکب اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار آنالیز شد، به‌طوری

که ترکیب تاریخ کاشت و آبیاری به عنوان عامل‌های اصلی و اکوتیپ به عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شد. تجزیه‌های آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام پذیرفت. رسم شکل‌ها و محاسبات ساده و داده‌پردازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار Excel و Word انجام گرفت.

## نتایج و بحث

**تأثیر تاریخ کاشت:** نتایج آزمون بارتلت نشان داد که واریانس خطا یکنواخت بوده و شرایط برای انجام آزمایش مناسب است. تاریخ کاشت تأثیر معنی‌داری بر عملکرد زیست‌توده، کارایی کوانتومی فتوسیستم II ( $F_v/F_m$ )، محتوای نسبی آب برگ، غلظت کلروفیل  $a$ ،  $b$  و کارتنوئیدها، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، آسکوربات و گاپاکول پراکسیداز)، مالون دی‌آلدئید، پرولین و کربوهیدرات‌های محلول داشت (جدول ۴). بیشترین و کمترین عملکرد زیست‌توده به ترتیب در تاریخ‌های ۲۶ مهر (۱۳/۶ کیلوگرم در متر مربع) و ۲۰ اسفند (۵/۱۴ کیلوگرم) مشاهده شد (جدول ۵). نتایج پژوهشی دیگری بر گیاه خارمریم نیز تاریخ کاشت تأثیر معنی‌داری بر عملکرد زیست‌توده این گیاه داشت (عبدالله‌زارع و همکاران، ۱۳۹۱). کارایی کوانتومی فتوسیستم II ( $F_v/F_m$ ) به ترتیب در تاریخ‌های ۲۶ مهر (۰/۷۷۹) و ۲۰ اسفند (۰/۷۵۵) بیشترین و کمترین مقدار را نشان داد. محتوای نسبی آب برگ به ترتیب در تاریخ‌های ۲۰ اسفند (۸۰/۴ درصد) و ۶ آذر (۷۴/۷ درصد) بیشترین و کمترین مقدار را داشت. پژوهشی بر گندم نشان داد که با تأخیر در کاشت، محتوای نسبی آب برگ کاهش می‌یابد (کمائی و همکاران، ۱۳۹۶). بیشترین محتوای کلروفیل  $a$ ،  $b$  و کاروتنوئید (میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ) در تاریخ ۲۶ مهر به ترتیب برابر با ۰/۸۰۹، ۰/۵۳۶ و ۰/۳۷۰ و کمترین مقادیر آن‌ها در تاریخ ۲۰ اسفند مشاهده شد. کاهش میزان کلروفیل در کاشت دیر هنگام با تنش گرمایی مرتبط است که با نتایج سایر پژوهش‌ها بر گیاهان بادربشو (عباسی دهکردی و همکاران، ۱۴۰۱) و سرخارگل (اسدی‌صنم و همکاران، ۱۳۹۲) مطابقت دارد. بیشترین میزان آنزیم‌های کاتالاز و آسکوربات (واحد

آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) به ترتیب در تاریخ ۲۶ مهر و کمترین مقادیر آن‌ها در تاریخ ۶ آذر به دست آمد. بیشترین کمترین میزان فعالیت آنزیم گاپاکول پراکسیداز (واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) به ترتیب در تاریخ‌های ۱۶ آبان و ۶ آذر مشاهده شد. بیشترین محتوای مالون دی‌آلدئید (میکرومول در میلی‌لیتر) در تاریخ ۲۰ اسفند (۳/۲۲) و کمترین آن در تاریخ ۶ آذر (۲/۳۲) حاصل شد. بیشترین میزان پرولین (میکرومول در گرم وزن تر برگ) و کربوهیدرات‌های محلول (میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ) به ترتیب در تاریخ ۲۶ مهر و کمترین مقادیر آن‌ها در تاریخ ۲۰ اسفند ثبت شد. تجمع پرولین ممکن است باعث سازش بهتر سلول‌ها با شرایط تنش و حفاظت از آنزیم‌ها و ساختارهای سلولی شود (Ashraf and Foolad, 2007). پژوهشی بر دو رقم ارزن نشان داد که تاریخ کاشت تأثیر معنی‌داری بر میزان پرولین دارد (قاسمی و ارفع‌نیا، ۱۴۰۰). نتایج پژوهشی در گیاه سرخارگل نشان داد که غلظت مالون دی‌آلدئید و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز تحت تأثیر تاریخ کاشت قرار می‌گیرند (اسدی‌صنم و همکاران، ۱۳۹۲).

**تأثیر رژیم آبیاری:** نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر آبیاری بر تمامی صفات در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). عملکرد زیست‌توده تحت تنش کم‌آبی خفیف (۱۰/۷ کیلوگرم در متر مربع) و شدید (۹/۳۰ کیلوگرم) نسبت به تیمار آبیاری شاهد (۱۲/۲ کیلوگرم) به ترتیب ۱۲/۲ و ۲۳/۷ درصد کاهش یافت (جدول ۵). کاهش عملکرد زیست‌توده تحت تنش کم‌آبی در سایر پژوهش‌ها نیز مشاهده شده است، مثلاً در پژوهشی بر خارمریم، با افزایش شدت تنش، عملکرد گیاه به طور معنی‌داری کاهش یافت (سارانی ملاک و همکاران، ۱۴۰۱). این کاهش می‌تواند به دلیل کاهش پتانسیل آب گیاه و کاهش نرخ فتوسنتز به علت محدودیت آب باشد (Lowlor and Cornic, 2002). بیشینه کارایی کوانتومی فتوسیستم II ( $F_v/F_m$ ) تحت تنش کم‌آبی خفیف (۰/۷۵۵) و شدید (۰/۷۲۶) نسبت به تیمار آبیاری شاهد (۰/۸۱۰) به ترتیب ۶/۷۹ و ۱۰/۳ درصد کاهش یافت. کاهش ۱ تا ۴ درصدی کارایی کوانتومی

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس و سطح معنی‌داری میانگین مربعات صفات مختلف اندازه‌گیری‌شده در چهار اکوتیپ گیاه خارمریم تحت تأثیر پنج تاریخ کاشت و سه رژیم آبیاری

| میانگین مربعات |                  |                  |                    |          |                  | درجه آزادی | منابع تغییرات               |
|----------------|------------------|------------------|--------------------|----------|------------------|------------|-----------------------------|
| کاروتنوئید     | کلروفیل <i>b</i> | کلروفیل <i>a</i> | RWC                | Fv/Fm    | عملکرد زیست‌توده |            |                             |
| ۰/۳۸۱**        | ۰/۴۰۷**          | ۱/۳۵**           | ۸۸۰**              | ۰/۱۰۸**  | ۱۳۲**            | ۲          | آبیاری                      |
| ۰/۰۲۲**        | ۰/۱۰۱**          | ۰/۱۲۴**          | ۱۸۴**              | ۰/۰۰۳**  | ۳۹۹**            | ۴          | تاریخ کشت                   |
| ۰/۰۰۵**        | ۰/۰۰۵**          | ۰/۰۰۲**          | ۱۲/۵ <sup>ns</sup> | ۰/۰۰۰**  | ۴/۰۳**           | ۸          | تاریخ کشت × آبیاری          |
| ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰            | ۰/۰۰۰            | ۵/۲۲               | ۰/۰۰۰    | ۰/۵۷۰            | ۳۰         | خطای <i>a</i>               |
| ۰/۱۶۶**        | ۰/۱۸۱**          | ۰/۹۱۹**          | ۱۰۸۲**             | ۰/۰۲۹**  | ۶۲/۶**           | ۳          | اکوتیپ                      |
| ۰/۰۰۳**        | ۰/۰۰۵**          | ۰/۰۱۰**          | ۲۱/۱*              | ۰/۰۰۱**  | ۱/۶۸**           | ۶          | آبیاری × اکوتیپ             |
| ۰/۰۱۶**        | ۰/۰۱۱**          | ۰/۰۱۹**          | ۶۶/۵**             | ۰/۰۰۵**  | ۲/۷۰**           | ۱۲         | تاریخ کشت × اکوتیپ          |
| ۰/۰۰۲**        | ۰/۰۰۳**          | ۰/۰۰۸**          | ۸/۴۷ <sup>ns</sup> | ۰/۰۰۰۲** | ۰/۷۶۹*           | ۲۴         | تاریخ کشت × اکوتیپ × آبیاری |
| ۰/۰۰۰          | ۰/۰۲۳            | ۰/۰۰۰            | ۷/۵۰               | ۰/۰۰۰    | ۰/۴۵۵            | ۸۹         | خطای <i>b</i>               |
| ۲/۵۹           | ۴/۰۰             | ۲/۳۵             | ۳/۵۳               | ۱/۴۵     | ۶/۲۵             |            | ضریب تغییرات                |

\*, \*\* و <sup>ns</sup> به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد، معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد و عدم معنی‌دار بودن هستند.

ادامه جدول ۴-۴

| میانگین مربعات   |                    |                 |         |                     |         | درجه آزادی | منابع تغییرات               |
|------------------|--------------------|-----------------|---------|---------------------|---------|------------|-----------------------------|
| کربوهیدرات محلول | پرولین             | مالون دی‌آلدئید | گایاکول | آسکوربات            | کاتالاز |            |                             |
| ۶۴۱۰**           | ۳۵۷۶**             | ۱۵/۷۲**         | ۱۴/۱۲** | ۱۹/۸**              | ۰/۵۹۹** | ۲          | آبیاری                      |
| ۱۰۵۴**           | ۱۴۶**              | ۴/۳۹**          | ۲/۳۱**  | ۱/۹۴**              | ۰/۰۰۹** | ۴          | تاریخ کشت                   |
| ۸۲۱**            | ۳۰/۰۴*             | ۰/۱۰۷**         | ۰/۱۶۷** | ۰/۲۳۸**             | ۰/۰۰۷** | ۸          | تاریخ کشت × آبیاری          |
| ۷/۳۲             | ۱۲/۸۴              | ۰/۰۶۹           | ۰/۰۳۴   | ۰/۱۰۹               | ۰/۰۰۲   | ۳۰         | خطای <i>a</i>               |
| ۴۲۴۹**           | ۴۷۸**              | ۵/۲۷**          | ۱۵/۸**  | ۳۲/۵**              | ۰/۳۴۸** | ۳          | اکوتیپ                      |
| ۲۸/۷**           | ۱۶/۸ <sup>ns</sup> | ۰/۲۰۲**         | ۰/۱۸۲** | ۱/۰۴**              | ۰/۰۰۶** | ۶          | آبیاری × اکوتیپ             |
| ۳۳۹**            | ۸۸/۵**             | ۰/۳۱۳**         | ۰/۱۲۳** | ۰/۲۳۲**             | ۰/۰۰۴** | ۱۲         | تاریخ کشت × اکوتیپ          |
| ۱۴/۹**           | ۸/۱۴ <sup>ns</sup> | ۰/۰۷۶**         | ۰/۰۵۴*  | ۰/۰۶۹ <sup>ns</sup> | ۰/۰۰۲** | ۲۴         | تاریخ کشت × اکوتیپ × آبیاری |
| ۵/۴۴             | ۱۱/۴۶              | ۰/۰۲۹           | ۰/۰۳۰   | ۰/۰۵۱               | ۰/۰۰۰   | ۸۹         | خطای <i>b</i>               |
| ۱/۷۳             | ۱۰/۴               | ۶/۳۳            | ۶/۰۰    | ۷/۵۰                | ۵/۵۲    |            | ضریب تغییرات                |

\*, \*\* و <sup>ns</sup> به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد، معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد و عدم معنی‌دار بودن هستند.

فتوسیستم II تحت تنش کم‌آبی در مطالعه‌ای بر روی هشت ژنوتیپ گندم مشاهده شد (Samieadel et al., 2023). محتوای نسبی آب برگ تحت تنش کم‌آبی خفیف (۷۸/۱ درصد) و شدید (۷۳/۳ درصد) نسبت به تیمار آبیاری شاهد (۸۰/۹)

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات رژیم آبیاری، تاریخ کاشت و اکوتیپ بر صفات مختلف اندازه‌گیری شده در گیاه خارمریم

| عوامل<br>آزمایشی | سطوح                | عملکرد زیست‌توده<br>(کیلوگرم بر مترمربع) | Fv/Fm               | محتوای نسبی<br>آب برگ (%) | کلروفیل <i>a</i><br>(میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ) | کلروفیل <i>b</i><br>(میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ) | کاروتنوئید         |
|------------------|---------------------|------------------------------------------|---------------------|---------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------|
| آبیاری           | شاهد                | ۱۲/۳ <sup>a</sup>                        | ۰/۸۱۰ <sup>a</sup>  | ۸۰/۹ <sup>a</sup>         | ۰/۸۷۰ <sup>a</sup>                               | ۰/۵۵۶ <sup>a</sup>                               | ۰/۴۲۳ <sup>a</sup> |
|                  | تنش خفیف            | ۱۰/۸ <sup>b</sup>                        | ۰/۷۷۵ <sup>b</sup>  | ۷۸/۱ <sup>b</sup>         | ۰/۷۰۲ <sup>b</sup>                               | ۰/۴۷۴ <sup>b</sup>                               | ۰/۳۳۶ <sup>b</sup> |
|                  | تنش شدید            | ۹/۳۰ <sup>c</sup>                        | ۰/۷۲۶ <sup>c</sup>  | ۷۳/۳ <sup>c</sup>         | ۰/۵۷۰ <sup>c</sup>                               | ۰/۳۹۱ <sup>c</sup>                               | ۰/۲۶۴ <sup>c</sup> |
| تاریخ<br>کاشت    | ۶ مهر               | ۱۲/۱ <sup>b</sup>                        | ۰/۷۵۵ <sup>d</sup>  | ۷۶/۰ <sup>c</sup>         | ۰/۶۵۸ <sup>e</sup>                               | ۰/۴۷۰ <sup>c</sup>                               | ۰/۳۳۶ <sup>c</sup> |
|                  | ۲۶ مهر              | ۱۳/۷ <sup>a</sup>                        | ۰/۷۸۰ <sup>a</sup>  | ۷۸/۸ <sup>b</sup>         | ۰/۸۰۱ <sup>a</sup>                               | ۰/۵۳۶ <sup>a</sup>                               | ۰/۳۷۱ <sup>a</sup> |
|                  | ۱۶ آبان             | ۱۲/۳ <sup>b</sup>                        | ۰/۷۶۶ <sup>b</sup>  | ۷۷/۳ <sup>c</sup>         | ۰/۷۴۱ <sup>b</sup>                               | ۰/۴۸۲ <sup>b</sup>                               | ۰/۳۵۹ <sup>b</sup> |
|                  | ۶ آذر               | ۱۰/۷ <sup>c</sup>                        | ۰/۷۶۰ <sup>c</sup>  | ۷۴/۷ <sup>d</sup>         | ۰/۷۰۳ <sup>c</sup>                               | ۰/۴۸۹ <sup>b</sup>                               | ۰/۳۳۲ <sup>c</sup> |
|                  | ۲۰ اسفند            | ۵/۱۰ <sup>d</sup>                        | ۰/۷۵۹ <sup>cd</sup> | ۸۰/۵ <sup>a</sup>         | ۰/۶۶۷ <sup>d</sup>                               | ۰/۳۹۰ <sup>d</sup>                               | ۰/۳۰۶ <sup>d</sup> |
|                  | اصفهان              | ۱۱/۵ <sup>a</sup>                        | ۰/۷۷۰ <sup>b</sup>  | ۷۹/۷ <sup>b</sup>         | ۰/۶۷۵ <sup>c</sup>                               | ۰/۵۰۸ <sup>a</sup>                               | ۰/۳۱۷ <sup>c</sup> |
| اکوتیپ           | خوزستان- امیدیه     | ۹/۰۵ <sup>c</sup>                        | ۰/۷۲۸ <sup>c</sup>  | ۷۱/۱ <sup>d</sup>         | ۰/۵۲۹ <sup>d</sup>                               | ۰/۳۷۹ <sup>c</sup>                               | ۰/۲۶۶ <sup>d</sup> |
|                  | کهگیلویه و بویراحمد | ۱۱/۵ <sup>a</sup>                        | ۰/۷۸۸ <sup>a</sup>  | ۸۲/۵ <sup>a</sup>         | ۰/۸۳۶ <sup>a</sup>                               | ۰/۴۹۴ <sup>b</sup>                               | ۰/۳۸۱ <sup>b</sup> |
|                  | مجارستان            | ۱۱/۱ <sup>a</sup>                        | ۰/۷۷۱ <sup>b</sup>  | ۷۶/۵ <sup>c</sup>         | ۰/۸۱۶ <sup>b</sup>                               | ۰/۵۱۳ <sup>a</sup>                               | ۰/۳۹۹ <sup>a</sup> |

سطوح آبیاری شاهد، تنش خفیف و شدید کمبود آب بر اساس ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد از حداکثر تخلیه مجاز رطوبت قابل دسترس گیاه. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

ادامه جدول ۵-

| عوامل<br>آزمایشی | سطوح                | کاتالاز             | آسکوربات          | گایاکول           | مالون دی‌آلدئید<br>(میکرومول در<br>میلی‌لیتر) | پرویلین<br>(میکرومول در<br>گرم وزن تر برگ) | کربوهیدرات<br>(میلی‌گرم در گرم<br>وزن تر برگ) |
|------------------|---------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| آبیاری           | شاهد                | ۰/۳۵۳ <sup>a</sup>  | ۲/۴۲ <sup>c</sup> | ۲/۴۰ <sup>c</sup> | ۲/۱۷ <sup>c</sup>                             | ۲۴/۳ <sup>c</sup>                          | ۱۲۴ <sup>c</sup>                              |
|                  | تنش خفیف            | ۰/۴۷۴ <sup>b</sup>  | ۳/۰۵ <sup>b</sup> | ۳/۰۰ <sup>b</sup> | ۲/۷۵ <sup>b</sup>                             | ۳۳/۸ <sup>b</sup>                          | ۱۳۶ <sup>b</sup>                              |
|                  | تنش شدید            | ۰/۵۵۲ <sup>a</sup>  | ۳/۵۷ <sup>a</sup> | ۳/۳۶ <sup>a</sup> | ۳/۱۹ <sup>a</sup>                             | ۳۹/۶ <sup>a</sup>                          | ۱۴۵ <sup>a</sup>                              |
| تاریخ<br>کاشت    | ۶ مهر               | ۰/۴۶۱ <sup>b</sup>  | ۲/۸۶ <sup>c</sup> | ۲/۸۴ <sup>b</sup> | ۲/۵۴ <sup>c</sup>                             | ۳۳/۴ <sup>a</sup>                          | ۱۳۷ <sup>b</sup>                              |
|                  | ۲۶ مهر              | ۰/۴۷۸ <sup>a</sup>  | ۳/۳۴ <sup>a</sup> | ۲/۸۹ <sup>b</sup> | ۲/۸۵ <sup>b</sup>                             | ۳۴/۷ <sup>a</sup>                          | ۱۳۹ <sup>a</sup>                              |
|                  | ۱۶ آبان             | ۰/۴۵۷ <sup>b</sup>  | ۳/۱۷ <sup>b</sup> | ۳/۳۵ <sup>a</sup> | ۲/۵۶ <sup>c</sup>                             | ۳۳/۶ <sup>a</sup>                          | ۱۳۸ <sup>ab</sup>                             |
|                  | ۶ آذر               | ۰/۴۳۵ <sup>c</sup>  | ۲/۸۴ <sup>c</sup> | ۲/۶۶ <sup>c</sup> | ۲/۳۲ <sup>d</sup>                             | ۳۱/۷ <sup>b</sup>                          | ۱۳۵ <sup>c</sup>                              |
|                  | ۲۰ اسفند            | ۰/۴۶۸ <sup>ab</sup> | ۲/۸۵ <sup>c</sup> | ۲/۸۶ <sup>b</sup> | ۳/۲۳ <sup>a</sup>                             | ۲۹/۵ <sup>c</sup>                          | ۱۲۵ <sup>d</sup>                              |
|                  | اصفهان              | ۰/۳۷۰ <sup>d</sup>  | ۲/۲۴ <sup>d</sup> | ۲/۲۹ <sup>d</sup> | ۳/۰۴ <sup>a</sup>                             | ۳۰/۳ <sup>c</sup>                          | ۱۲۷ <sup>c</sup>                              |
| اکوتیپ           | خوزستان- امیدیه     | ۰/۵۶۴ <sup>a</sup>  | ۴/۱۴ <sup>a</sup> | ۳/۶۶ <sup>a</sup> | ۲/۳۴ <sup>d</sup>                             | ۳۶/۲ <sup>a</sup>                          | ۱۳۸ <sup>b</sup>                              |
|                  | کهگیلویه و بویراحمد | ۰/۴۹۸ <sup>b</sup>  | ۳/۱۷ <sup>b</sup> | ۳/۰۸ <sup>b</sup> | ۲/۴۸ <sup>c</sup>                             | ۳۴/۵ <sup>b</sup>                          | ۱۴۷ <sup>a</sup>                              |
|                  | مجارستان            | ۰/۴۰۶ <sup>c</sup>  | ۲/۴۹ <sup>c</sup> | ۲/۶۵ <sup>c</sup> | ۲/۹۴ <sup>b</sup>                             | ۲۹/۴ <sup>c</sup>                          | ۱۲۷ <sup>c</sup>                              |

سطوح آبیاری شاهد، تنش خفیف و شدید کمبود آب بر اساس ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد از حداکثر تخلیه مجاز رطوبت قابل دسترس گیاه. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

درصد) به ترتیب ۳/۴۶ و ۹/۳۹ درصد کاهش داشت. خشکی باعث کاهش محتوای نسبی آب برگ می‌شود (Zivcak et al., 2014). پژوهشی بر رازیانه نشان داد که تنش کم‌آبی باعث کاهش ۶ درصدی محتوای آب برگ می‌شود (غلامی زالی و احسان‌زاده، ۱۳۹۸). محتوای کلروفیل *a* تحت تنش کم‌آبی خفیف (۰/۷۰۱) و شدید (۰/۵۷۰) نسبت به تیمار آبیاری شاهد (۰/۸۶۹ میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ) به ترتیب ۱۹/۳ و ۳۴/۴ درصد کاهش یافت. محتوای کلروفیل *b* تحت تنش کم‌آبی خفیف (۰/۴۷۴) و شدید (۰/۳۹۰) نسبت به آبیاری شاهد (۰/۵۵۵ میلی‌گرم) به ترتیب ۱۴/۶ و ۲۹/۷ درصد و محتوای کاروتنوئید تحت تنش کم‌آبی خفیف (۰/۳۳۶) و شدید (۰/۲۶۳) نسبت به تیمار آبیاری شاهد (۰/۴۲۲ میلی‌گرم) به ترتیب ۲۰/۳ و ۳۷/۶ درصد کاهش یافتند. تولید گونه‌های فعال اکسیژن سبب پراکسیداسیون لیپیدها شده و کاهش میزان کلروفیل در گیاه تحت تنش را به دنبال دارد (Xiao et al., 2008). نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که رنگدانه‌های فتوسنتزی در اثر تنش کم‌آبی و شوری تخریب می‌شوند و این تخریب تحت تنش کم‌آبی بیشتر است (سارانی ملاک و همکاران، ۱۴۰۱). در پژوهشی بر ۲۳ ژنوتیپ گندم، کاهش محتوای کلروفیل و کاروتنوئید در اثر تنش کم‌آبی در تمام ژنوتیپ‌ها مشاهده شد (Samieadel et al., 2023). آنزیم کاتالاز تحت تنش کم‌آبی خفیف (۰/۴۷۳) و شدید (۰/۵۵۱) نسبت به تیمار آبیاری شاهد (۰/۳۵۳) واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) به ترتیب ۳۴ و ۵۶ درصد، آنزیم آسکوربات پراکسیداز تحت تنش کم‌آبی خفیف (۳/۰۴) و شدید (۳/۵۷) نسبت به تیمار آبیاری شاهد (۲/۴۲ واحد آنزیم) به شاهد (۲/۴۲ واحد آنزیم) به ترتیب ۲۶/۶ و ۴۷/۵ درصد و آنزیم گایاکول پراکسیداز تحت تنش کم‌آبی خفیف (۳/۰۰) و شدید (۳/۳۵) نسبت به تیمار آبیاری شاهد (۲/۳۹ واحد آنزیم) به ترتیب ۲۵/۵ و ۴۰/۱ درصد افزایش یافتند. فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز تحت تنش کم‌آبی افزایش می‌یابند (سارانی ملاک و همکاران، ۱۴۰۱). مالون دی‌آلدئید تحت تنش کم‌آبی خفیف

(۲/۷۴) و شدید (۳/۱۸) نسبت به تیمار آبیاری شاهد (۲/۱۶) میکرومول در میلی‌لیتر) به ترتیب ۲۶/۸ و ۴۷/۲ درصد افزایش یافت. در پژوهشی بر چهار رقم جوی دو ردیفه و شش ردیفه نیز افزایش مالون دی‌آلدئید در اثر تنش کم‌آبی مشاهده شد (Bardehji et al., 2023). پرولین تحت تنش کم‌آبی خفیف (۳۳/۸) و شدید (۳۹/۶) نسبت به تیمار آبیاری شاهد (۲۴/۳) میکرومول در گرم وزن تازه) به ترتیب ۳۹ و ۶۴ درصد افزایش یافت. پرولین، یک ترکیب فعال اسمزی است که به تعدیل پتانسیل اسمزی گیاه کمک می‌کند و میزان آن با افزایش شدت تنش افزایش می‌یابد (Passioura, 1988). افزایش پرولین تحت تنش کم‌آبی در گیاهانی نظیر ذرت، جو، چمانوش و خارمریم گزارش شده است (سارانی ملاک و همکاران، ۱۴۰۱، Bardehji et al., 2023). غلظت کربوهیدرات‌های محلول تحت تنش کم‌آبی خفیف (۱۳۵) و شدید (۱۴۴) نسبت به تیمار آبیاری شاهد (۱۲۳ میلی‌گرم در گرم وزن تازه) به ترتیب ۹/۷۵ و ۱۷ درصد افزایش یافت. متابولیسم و تجمع کربوهیدرات‌های محلول در شرایط تنش به افزایش فعالیت  $\beta$ -آمیلاز و تجمع نشاسته و فروکتان‌ها در ریشه، اندام هوایی و آمیلولپلاست‌ها برای تأمین انرژی ضروری نسبت داده می‌شود (Fernandez et al., 2010). پژوهش‌های پیشین روی کنجد و گندم نیز نشان‌دهنده افزایش میزان کربوهیدرات‌های محلول در اثر تنش کم‌آبی است.

**تأثیر اکوتیپ:** نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اکوتیپ بر تمام صفات در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین (۱۱/۵) و کمترین (۹/۰۴) کیلو گرم در متر مربع) عملکرد زیست‌توده به ترتیب مربوط به اکوتیپ‌های اصفهان و امیدیه بود (جدول ۵). بیشترین بیشینه کارایی کوانتومی فتوسیستم II (Fv/Fm) (۰/۷۸۷)، محتوای نسبی آب برگ (۸۲/۵ درصد) و کلروفیل *a* (۰/۸۳۶ میلی‌گرم در گرم وزن تر) در اکوتیپ کهگیلویه و بویراحمد و کمترین کارایی کوانتومی فتوسیستم II (۰/۷۲۷)، محتوای نسبی آب برگ (۷۱/۱ درصد) و کلروفیل *a* (۰/۵۲۸ میلی‌گرم در گرم وزن تر) در اکوتیپ امیدیه مشاهده شد.

اکوتیپ‌های اصفهان و کهگیلویه و بویراحمد از نظر عملکرد زیست‌توده تفاوت معنی‌داری نداشتند. نتایج پژوهشی بر ۲۶ اکوتیپ خارمریم نشان داد که بین اکوتیپ‌های مورد مطالعه از نظر عملکرد زیست‌توده و محتوای سیلیمارین اختلاف معنی‌داری وجود دارد (Majidi et al., 2021). بیشترین میزان کلروفیل  $b$  (۰/۵۱۲ میلی‌گرم در گرم وزن تر) و کاروتنوئید (۰/۳۹۸ میلی‌گرم در گرم وزن تر) در اکوتیپ مجارستان و کمترین میزان کلروفیل  $b$  (۰/۳۷۸ میلی‌گرم) و کاروتنوئید (۰/۲۶۶ میلی‌گرم) در اکوتیپ امیدیه مشاهده شد. تأثیر اکوتیپ بر رنگدانه‌های فتوسنتزی با نتایج سایر پژوهشگران بر گیاهان سیاهدانه (صیدی و همکاران، ۱۴۰۰) و ذرت (مفاخری و همکاران، ۱۴۰۱) همخوانی دارد. بیشترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز (۰/۵۶۳ واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه)، آسکوربات پراکسیداز (۴/۱۴ واحد آنزیم) و گایاکول پراکسیداز (۳/۶۶ واحد آنزیم) متعلق به اکوتیپ امیدیه و کمترین میزان کاتالاز (۰/۳۷۰ واحد آنزیم)، آسکوربات پراکسیداز (۲/۲۴ واحد آنزیم) و گایاکول پراکسیداز (۲/۲۸ واحد آنزیم) متعلق به اکوتیپ اصفهان بود. بیشترین و کمترین غلظت مالون دی‌آلدئید به ترتیب در اکوتیپ‌های اصفهان (۳/۰۴) و امیدیه (۲/۳۴ میکرومول در میلی‌لیتر) مشاهده شد. بیشترین و کمترین میزان پرولین به ترتیب در اکوتیپ‌های امیدیه (۳۶/۱ میکرومول در میلی‌لیتر) و مجارستان (۲۹/۳) مشاهده شد. اکوتیپ‌های مجارستان و اصفهان از نظر این صفت تفاوت معنی‌داری نداشتند. این اختلاف‌ها در میزان مالون دی‌آلدئید و پرولین را می‌توان به تفاوت‌های ژنتیکی بین اکوتیپ‌ها نسبت داد. تأثیر اکوتیپ‌های مختلف بر میزان پرولین در سایر پژوهش‌ها بر گیاهان کرچک (شریفی سلطانی و همکاران، ۱۴۰۱) و سیاهدانه (صیدی و همکاران، ۱۴۰۰) نیز مشاهده شده است. بیشترین و کمترین میزان کربوهیدرات‌های محلول به ترتیب در اکوتیپ‌های کهگیلویه و بویراحمد (۱۴۷ میلی‌گرم در گرم وزن تازه) و اصفهان (۱۲۶ میلی‌گرم) مشاهده شد. اکوتیپ‌های اصفهان و مجارستان از نظر این صفت تفاوت معنی‌داری نداشتند.

**برهمکنش تاریخ کاشت و رژیم آبیاری:** برهمکنش تاریخ کاشت و آبیاری بر محتوای نسبی آب برگ معنی‌دار نبود، اما بر محتوای پرولین در سطح احتمال ۵ درصد و بر سایر صفات در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). تنش کم‌آبی خفیف و شدید در تمام تاریخ‌های کاشت، سبب کاهش عملکرد زیست‌توده، بیشینه کارایی کوانتومی فتوسیستم II (Fv/Fm)، محتوای نسبی آب برگ، غلظت کلروفیل  $a$  و  $b$ ، کاروتنوئید و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و محتوای مالون دی‌آلدئید، پرولین و کربوهیدرات‌های محلول شد (جدول ۶). بیشترین و کمترین عملکرد زیست‌توده به ترتیب ۱۶/۱ و ۳/۸۲ کیلوگرم در متر مربع، در تاریخ کاشت ۲۶ مهر و شرایط آبیاری شاهد و تاریخ کاشت ۲۰ اسفند و تنش کم‌آبی شدید مشاهده شد. عملکرد زیست‌توده به‌عنوان یک صفت پلی‌ژنیک از محیط پیرامون تأثیر زیادی می‌پذیرد و با تغییر تاریخ کاشت و میزان آبیاری می‌توان آن را کنترل کرد (Li and Li, 2004). بیشترین بیشینه کارایی کوانتومی فتوسیستم II (Fv/Fm) (۰/۸۲۱)، کلروفیل  $a$  (۰/۹۶۷ میلی‌گرم در گرم وزن تر) و کلروفیل  $b$  (۰/۶۲۰ میلی‌گرم) در تاریخ کاشت ۲۶ مهر و شرایط آبیاری نرمال و کمترین آن‌ها به ترتیب ۰/۷۱۱، ۰/۵۱۷ و ۰/۳۷۲ در تاریخ‌های کاشت ۲۰ اسفند، ۶ مهر و ۲۰ اسفند و تحت تنش کم‌آبی شدید مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهد که تأخیر در کاشت سبب کاهش پارامترهایی نظیر کلروفیل و در نتیجه کاهش عملکرد زیست‌توده می‌شود. بیشترین (۰/۴۴۰) و کمترین (۰/۲۳۳) میلی‌گرم در گرم وزن تر) میزان کاروتنوئید به ترتیب در تاریخ کاشت ۱۶ آبان و شرایط آبیاری شاهد و ۶ آذر و شرایط تنش کم‌آبی شدید مشاهده شد. بیشترین (۰/۵۹۳) و کمترین (۰/۳۲۹) واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) میزان فعالیت آنزیم کاتالاز به ترتیب در تاریخ کاشت ۲۰ اسفند و شرایط تنش کم‌آبی شدید و ۶ آذر و شرایط آبیاری شاهد مشاهده شد. بیشترین (۴/۰۹) و کمترین (۲/۱۷) واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در تاریخ کاشت ۲۶ مهر و شرایط تنش کم‌آبی شدید و ۲۰ اسفند

جدول ۶- مقایسه میانگین اثرات برهمکنش تاریخ کاشت و رژیم آبیاری بر صفات مختلف اندازه‌گیری شده در گیاه خارمریم

| تاریخ کاشت | آبیاری   | عملکرد زیست‌توده<br>(کیلوگرم بر متر مربع) | Fv/Fm               | کلروفیل <i>a</i>             | کلروفیل <i>b</i>    | کاروتنوئید         | کربوهیدرات        |
|------------|----------|-------------------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|--------------------|-------------------|
|            |          |                                           |                     | (میلی گرم در گرم وزن تر برگ) |                     |                    |                   |
| ۶ مهر      | شاهد     | ۱۳/۶ <sup>b</sup>                         | ۰/۷۹۴ <sup>d</sup>  | ۰/۸۲۱ <sup>d</sup>           | ۰/۵۶۹ <sup>c</sup>  | ۰/۴۳۷ <sup>a</sup> | ۱۳۰ <sup>h</sup>  |
|            | تنش خفیف | ۱۲/۶ <sup>cd</sup>                        | ۰/۷۴۴ <sup>g</sup>  | ۰/۶۳۴ <sup>j</sup>           | ۰/۴۶۲ <sup>fg</sup> | ۰/۳۱۶ <sup>e</sup> | ۱۳۷ <sup>e</sup>  |
|            | تنش شدید | ۱۰/۱ <sup>g</sup>                         | ۰/۷۲۶ <sup>h</sup>  | ۰/۵۱۷ <sup>m</sup>           | ۰/۳۷۷ <sup>i</sup>  | ۰/۲۵۳ <sup>i</sup> | ۱۴۲ <sup>c</sup>  |
| ۲۶ مهر     | شاهد     | ۱۶/۱ <sup>a</sup>                         | ۰/۸۲۱ <sup>a</sup>  | ۰/۹۶۷ <sup>a</sup>           | ۰/۶۲۰ <sup>a</sup>  | ۰/۴۳۷ <sup>a</sup> | ۱۳۲ <sup>g</sup>  |
|            | تنش خفیف | ۱۲/۹ <sup>c</sup>                         | ۰/۷۷۴ <sup>e</sup>  | ۰/۷۷۹ <sup>f</sup>           | ۰/۵۳۱ <sup>d</sup>  | ۰/۳۷۲ <sup>c</sup> | ۱۳۹ <sup>de</sup> |
|            | تنش شدید | ۱۲/۰ <sup>e</sup>                         | ۰/۷۴۲ <sup>g</sup>  | ۰/۶۵۵ <sup>i</sup>           | ۰/۴۵۷ <sup>g</sup>  | ۰/۳۰۱ <sup>f</sup> | ۱۴۵ <sup>b</sup>  |
| ۱۶ آبان    | شاهد     | ۱۳/۵ <sup>b</sup>                         | ۰/۸۱۱ <sup>bc</sup> | ۰/۹۰۶ <sup>b</sup>           | ۰/۵۸۷ <sup>b</sup>  | ۰/۴۳۹ <sup>a</sup> | ۱۲۸ <sup>hi</sup> |
|            | تنش خفیف | ۱۲/۳ <sup>de</sup>                        | ۰/۷۶۰ <sup>f</sup>  | ۰/۷۳۵ <sup>g</sup>           | ۰/۴۷۵ <sup>f</sup>  | ۰/۳۶۸ <sup>c</sup> | ۱۳۹ <sup>de</sup> |
|            | تنش شدید | ۱۱/۳ <sup>f</sup>                         | ۰/۷۲۶ <sup>h</sup>  | ۰/۵۸۲ <sup>k</sup>           | ۰/۳۸۴ <sup>ij</sup> | ۰/۲۶۹ <sup>h</sup> | ۱۴۴ <sup>b</sup>  |
| ۶ آذر      | شاهد     | ۱۲/۰ <sup>e</sup>                         | ۰/۸۰۷ <sup>g</sup>  | ۰/۸۵۴ <sup>c</sup>           | ۰/۵۵۹ <sup>c</sup>  | ۰/۴۲۹ <sup>b</sup> | ۱۲۸ <sup>hi</sup> |
|            | تنش خفیف | ۱۰/۸ <sup>f</sup>                         | ۰/۷۴۸ <sup>fg</sup> | ۰/۷۰۰ <sup>h</sup>           | ۰/۵۱۰ <sup>e</sup>  | ۰/۳۳۴ <sup>d</sup> | ۱۳۵ <sup>f</sup>  |
|            | تنش شدید | ۹/۲۵ <sup>h</sup>                         | ۰/۷۲۵ <sup>h</sup>  | ۰/۵۵۳ <sup>l</sup>           | ۰/۳۹۷ <sup>i</sup>  | ۰/۲۳۳ <sup>j</sup> | ۱۴۰ <sup>cd</sup> |
| ۲۰ اسفند   | شاهد     | ۶/۲۵ <sup>i</sup>                         | ۰/۸۱۶ <sup>ab</sup> | ۰/۸۰۰ <sup>e</sup>           | ۰/۴۳۹ <sup>h</sup>  | ۰/۳۶۹ <sup>c</sup> | ۹۹/۵ <sup>j</sup> |
|            | تنش خفیف | ۵/۳۷ <sup>j</sup>                         | ۰/۷۵۰ <sup>g</sup>  | ۰/۶۵۹ <sup>i</sup>           | ۰/۳۹۱ <sup>ij</sup> | ۰/۲۸۸ <sup>g</sup> | ۱۲۷ <sup>i</sup>  |
|            | تنش شدید | ۳/۸۲ <sup>k</sup>                         | ۰/۷۱۰ <sup>i</sup>  | ۰/۵۴۰ <sup>l</sup>           | ۰/۳۳۷ <sup>k</sup>  | ۰/۲۵۹ <sup>i</sup> | ۱۴۹ <sup>a</sup>  |

ادامه جدول ۶-

| تاریخ کاشت | آبیاری   | کاتالاز                                   | آسکوربات           | گاباکول            | مالون دی‌آلدئید         | پرولین (میکرومول در گرم وزن تر برگ) |
|------------|----------|-------------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------------------|
|            |          | (واحد آنزیم بر میلی گرم پروتئین در دقیقه) |                    |                    | (میکرومول در میلی لیتر) |                                     |
| ۶ مهر      | شاهد     | ۰/۳۴۷ <sup>f</sup>                        | ۲/۳۲ <sup>h</sup>  | ۲/۲۵ <sup>gh</sup> | ۱/۸۵ <sup>k</sup>       | ۲۳/۳ <sup>g</sup>                   |
|            | تنش خفیف | ۰/۴۹۳ <sup>c</sup>                        | ۲/۹۶ <sup>e</sup>  | ۳/۰۰ <sup>de</sup> | ۲/۶۴ <sup>gh</sup>      | ۳۶/۷ <sup>cd</sup>                  |
|            | تنش شدید | ۰/۵۴۲ <sup>b</sup>                        | ۳/۳۰ <sup>d</sup>  | ۳/۲۴ <sup>c</sup>  | ۳/۱۰ <sup>c</sup>       | ۴۰/۰ <sup>b</sup>                   |
| ۲۶ مهر     | شاهد     | ۰/۳۷۷ <sup>e</sup>                        | ۲/۷۴ <sup>f</sup>  | ۲/۳۷ <sup>g</sup>  | ۲/۲۶ <sup>i</sup>       | ۲۶/۰ <sup>g</sup>                   |
|            | تنش خفیف | ۰/۴۶۷ <sup>d</sup>                        | ۳/۱۹ <sup>d</sup>  | ۲/۸۸ <sup>e</sup>  | ۲/۹۳ <sup>de</sup>      | ۳۴/۶ <sup>de</sup>                  |
|            | تنش شدید | ۰/۵۸۸ <sup>a</sup>                        | ۴/۰۹ <sup>a</sup>  | ۳/۴۰ <sup>b</sup>  | ۳/۳۴ <sup>b</sup>       | ۴۳/۲ <sup>a</sup>                   |
| ۱۶ آبان    | شاهد     | ۰/۳۶۸ <sup>e</sup>                        | ۲/۵۲ <sup>g</sup>  | ۲/۹۳ <sup>de</sup> | ۲/۰۲ <sup>j</sup>       | ۲۴/۹ <sup>g</sup>                   |
|            | تنش خفیف | ۰/۴۷۰ <sup>d</sup>                        | ۳/۲۹ <sup>d</sup>  | ۳/۳۸ <sup>bc</sup> | ۲/۶۱ <sup>h</sup>       | ۳۵/۳ <sup>d</sup>                   |
|            | تنش شدید | ۰/۵۳۱ <sup>b</sup>                        | ۳/۷۰ <sup>b</sup>  | ۳/۷۱ <sup>a</sup>  | ۳/۰۴ <sup>cd</sup>      | ۴۰/۵ <sup>bc</sup>                  |
| ۶ آذر      | شاهد     | ۰/۳۲۹ <sup>f</sup>                        | ۲/۳۴ <sup>h</sup>  | ۲/۲۵ <sup>gh</sup> | ۱/۸۵ <sup>k</sup>       | ۲۳/۸ <sup>g</sup>                   |
|            | تنش خفیف | ۰/۴۷۱ <sup>d</sup>                        | ۲/۹۳ <sup>e</sup>  | ۲/۷۱ <sup>f</sup>  | ۲/۳۶ <sup>i</sup>       | ۳۲/۳ <sup>ef</sup>                  |
|            | تنش شدید | ۰/۵۰۳ <sup>c</sup>                        | ۳/۲۴ <sup>d</sup>  | ۳/۰۲ <sup>d</sup>  | ۲/۷۵ <sup>fg</sup>      | ۳۹/۰ <sup>bc</sup>                  |
| ۲۰ اسفند   | شاهد     | ۰/۳۴۳ <sup>f</sup>                        | ۲/۱۷ <sup>h</sup>  | ۲/۱۶ <sup>h</sup>  | ۲/۸۳ <sup>ef</sup>      | ۲۳/۳ <sup>g</sup>                   |
|            | تنش خفیف | ۰/۴۶۶ <sup>d</sup>                        | ۲/۸۴ <sup>ef</sup> | ۳/۰۲ <sup>d</sup>  | ۳/۱۸ <sup>c</sup>       | ۳۰/۰ <sup>f</sup>                   |
|            | تنش شدید | ۰/۵۹۳ <sup>a</sup>                        | ۳/۵۱ <sup>c</sup>  | ۳/۳۹ <sup>b</sup>  | ۳/۶۷ <sup>a</sup>       | ۳۵/۱ <sup>d</sup>                   |

سطوح آبیاری شاهد، تنش خفیف و شدید کمبود آب بر اساس ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد از حداکثر تخلیه مجاز رطوبت قابل دسترس گیاه. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی داری با یکدیگر ندارند.

جدول ۷- مقایسه میانگین اثرات برهمکنش تاریخ کاشت و اکوتیپ بر صفات مختلف اندازه‌گیری شده در گیاه خارمریم

| تاریخ کشت | اکوتیپ              | عملکرد زیست‌توده (کیلوگرم بر مترمربع) | Fv/Fm               | محتوای نسبی آب برگ (%) | کلروفیل <i>a</i> (میلی گرم در گرم وزن تر برگ) | کلروفیل <i>b</i>    | کاروتنوئید          |
|-----------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|------------------------|-----------------------------------------------|---------------------|---------------------|
| ۶ مهر     | اصفهان              | ۱۳/۴ <sup>cd</sup>                    | ۰/۷۵۴ <sup>g</sup>  | ۷۸/۹ <sup>d-g</sup>    | ۰/۶۰۵ <sup>kl</sup>                           | ۰/۴۷۵ <sup>ef</sup> | ۰/۲۹۸ <sup>j</sup>  |
|           | خوزستان - امیدیه    | ۹/۹۳ <sup>i</sup>                     | ۰/۷۰۹ <sup>i</sup>  | ۶۹/۶ <sup>jk</sup>     | ۰/۴۶۲ <sup>n</sup>                            | ۰/۳۴۹ <sup>k</sup>  | ۰/۲۴۲ <sup>n</sup>  |
|           | کهگیلویه و بویراحمد | ۱۳/۰ <sup>de</sup>                    | ۰/۷۸۷ <sup>cd</sup> | ۸۰/۸ <sup>cde</sup>    | ۰/۸۱۷ <sup>de</sup>                           | ۰/۵۲۹ <sup>bc</sup> | ۰/۴۱۳ <sup>b</sup>  |
|           | مجارستان            | ۱۲/۱ <sup>g</sup>                     | ۰/۷۶۸ <sup>f</sup>  | ۷۴/۷ <sup>i</sup>      | ۰/۷۴۵ <sup>i</sup>                            | ۰/۵۲۶ <sup>bc</sup> | ۰/۳۸۸ <sup>e</sup>  |
| ۲۶ مهر    | اصفهان              | ۱۴/۶ <sup>a</sup>                     | ۰/۷۸۶ <sup>d</sup>  | ۸۱/۹ <sup>bc</sup>     | ۰/۷۶۸ <sup>h</sup>                            | ۰/۵۸۰ <sup>a</sup>  | ۰/۳۲۵ <sup>h</sup>  |
|           | خوزستان - امیدیه    | ۱۲/۱ <sup>fg</sup>                    | ۰/۷۳۱ <sup>h</sup>  | ۷۱/۱ <sup>j</sup>      | ۰/۶۱۱ <sup>k</sup>                            | ۰/۴۳۶ <sup>hi</sup> | ۰/۲۸۵ <sup>k</sup>  |
|           | کهگیلویه و بویراحمد | ۱۴/۲ <sup>ab</sup>                    | ۰/۸۲۱ <sup>a</sup>  | ۸۵/۹ <sup>a</sup>      | ۰/۹۴۵ <sup>a</sup>                            | ۰/۵۳۵ <sup>b</sup>  | ۰/۴۰۳ <sup>cd</sup> |
|           | مجارستان            | ۱۳/۸ <sup>bc</sup>                    | ۰/۷۷۹ <sup>de</sup> | ۷۶/۴ <sup>ghi</sup>    | ۰/۸۷۸ <sup>c</sup>                            | ۰/۵۹۲ <sup>a</sup>  | ۰/۴۶۷ <sup>a</sup>  |
| ۱۶ آبان   | اصفهان              | ۱۲/۷ <sup>ef</sup>                    | ۰/۷۷۲ <sup>e</sup>  | ۷۹/۹ <sup>c-f</sup>    | ۰/۶۳۲ <sup>j</sup>                            | ۰/۵۱۴ <sup>c</sup>  | ۰/۲۹۷ <sup>j</sup>  |
|           | خوزستان - امیدیه    | ۹/۹۶ <sup>i</sup>                     | ۰/۷۱۶ <sup>i</sup>  | ۶۸/۲ <sup>kl</sup>     | ۰/۵۹۲ <sup>l</sup>                            | ۰/۳۹۹ <sup>j</sup>  | ۰/۳۱۱ <sup>i</sup>  |
|           | کهگیلویه و بویراحمد | ۱۳/۳ <sup>cd</sup>                    | ۰/۸۰۴ <sup>b</sup>  | ۸۳/۶ <sup>ab</sup>     | ۰/۸۲۵ <sup>d</sup>                            | ۰/۴۹۳ <sup>d</sup>  | ۰/۴۱۸ <sup>b</sup>  |
|           | مجارستان            | ۱۳/۴ <sup>cd</sup>                    | ۰/۷۷۲ <sup>ef</sup> | ۷۷/۳ <sup>fgh</sup>    | ۰/۹۱۵ <sup>b</sup>                            | ۰/۵۲۱ <sup>bc</sup> | ۰/۴۱۰ <sup>bc</sup> |
| ۶ آذر     | اصفهان              | ۱۱/۸ <sup>g</sup>                     | ۰/۷۶۵ <sup>f</sup>  | ۷۶/۵ <sup>ghi</sup>    | ۰/۷۴۸ <sup>i</sup>                            | ۰/۵۸۲ <sup>a</sup>  | ۰/۴۰۰ <sup>d</sup>  |
|           | خوزستان - امیدیه    | ۹/۲۴ <sup>j</sup>                     | ۰/۷۰۹ <sup>i</sup>  | ۶۶/۰ <sup>l</sup>      | ۰/۵۰۷ <sup>m</sup>                            | ۰/۴۲۰ <sup>i</sup>  | ۰/۲۵۵ <sup>m</sup>  |
|           | کهگیلویه و بویراحمد | ۱۱/۱ <sup>h</sup>                     | ۰/۷۹۷ <sup>bc</sup> | ۸۰/۶ <sup>cde</sup>    | ۰/۷۸۹ <sup>fg</sup>                           | ۰/۴۶۳ <sup>fg</sup> | ۰/۳۰۲ <sup>j</sup>  |
|           | مجارستان            | ۱۰/۴ <sup>i</sup>                     | ۰/۷۶۸ <sup>f</sup>  | ۷۵/۸ <sup>hi</sup>     | ۰/۷۶۵ <sup>h</sup>                            | ۰/۴۹۰ <sup>de</sup> | ۰/۳۷۱ <sup>f</sup>  |
| ۲۰ اسفند  | اصفهان              | ۵/۱۲ <sup>l</sup>                     | ۰/۷۶۹ <sup>ef</sup> | ۸۱/۴ <sup>bcd</sup>    | ۰/۶۱۸ <sup>jk</sup>                           | ۰/۳۸۸ <sup>j</sup>  | ۰/۲۶۴ <sup>l</sup>  |
|           | خوزستان - امیدیه    | ۳/۹۹ <sup>m</sup>                     | ۰/۷۷۲ <sup>ef</sup> | ۸۰/۵ <sup>cde</sup>    | ۰/۴۶۹ <sup>n</sup>                            | ۰/۲۸۸ <sup>l</sup>  | ۰/۲۳۶ <sup>n</sup>  |
|           | کهگیلویه و بویراحمد | ۵/۷۷ <sup>k</sup>                     | ۰/۷۲۷ <sup>h</sup>  | ۸۱/۷ <sup>bc</sup>     | ۰/۸۰۲ <sup>ef</sup>                           | ۰/۴۴۹ <sup>gh</sup> | ۰/۳۶۷ <sup>f</sup>  |
|           | مجارستان            | ۵/۶۹ <sup>kl</sup>                    | ۰/۷۶۶ <sup>f</sup>  | ۷۸/۳ <sup>e-h</sup>    | ۰/۷۷۶ <sup>gh</sup>                           | ۰/۴۳۱ <sup>i</sup>  | ۰/۳۵۵ <sup>g</sup>  |

در هر ستون میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

و شرایط آبیاری شاهد و بیشترین (۳/۷۱) و کمترین (۲/۱۶) واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) میزان فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز در تاریخ کاشت ۱۶ آبان و شرایط تنش کم‌آبی شدید و ۲۰ اسفند و شرایط آبیاری شاهد مشاهده شد. بیشترین (۳/۶۷) و کمترین (۱/۸۵) میکرومول در میلی‌لیتر) میزان مالون دی‌آلدئید به ترتیب در تاریخ کاشت ۲۰ اسفند و شرایط تنش کم‌آبی شدید و ۶ آذر و شرایط آبیاری شاهد مشاهده شد. بیشترین (۴۳/۳) و کمترین (۲۳/۴) میکرومول در گرم وزن تازه) میزان پرولین به ترتیب در تاریخ کاشت ۲۶ مهر و شرایط تنش کم‌آبی شدید و ۶ مهر و شرایط آبیاری شاهد مشاهده شد. بیشترین (۱۴۹) و کمترین (۹۹/۵) میلی‌گرم بر گرم وزن تر) میزان کربوهیدرات‌های محلول به ترتیب در تاریخ کاشت ۲۰ اسفند و شرایط تنش کم‌آبی شدید و همان تاریخ کاشت و شرایط آبیاری شاهد مشاهده شد. نتایج پژوهشی روی گیاه کینوا نشان می‌دهد که رنگیزه‌های فتوسنتزی، کربوهیدرات‌های محلول، پرولین و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی تحت تأثیر برهمکنش تاریخ کاشت و آبیاری قرار می‌گیرند، اما این برهمکنش تأثیر معنی‌داری بر مالون

و شرایط آبیاری شاهد و بیشترین (۳/۷۱) و کمترین (۲/۱۶) واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) میزان فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز در تاریخ کاشت ۱۶ آبان و شرایط تنش کم‌آبی شدید و ۲۰ اسفند و شرایط آبیاری شاهد مشاهده شد. بیشترین (۳/۶۷) و کمترین (۱/۸۵) میکرومول در میلی‌لیتر) میزان مالون دی‌آلدئید به ترتیب در تاریخ کاشت ۲۰ اسفند و شرایط تنش کم‌آبی شدید و ۶ آذر و شرایط آبیاری شاهد مشاهده شد. بیشترین (۴۳/۳) و کمترین (۲۳/۴) میکرومول در گرم وزن تازه) میزان پرولین به ترتیب در تاریخ کاشت ۲۶ مهر و شرایط تنش کم‌آبی شدید و ۶ مهر و شرایط آبیاری شاهد مشاهده شد. بیشترین (۱۴۹) و کمترین (۹۹/۵) میلی‌گرم بر گرم وزن تر) میزان کربوهیدرات‌های محلول، پرولین و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی تحت تأثیر برهمکنش تاریخ کاشت و آبیاری قرار می‌گیرند، اما این برهمکنش تأثیر معنی‌داری بر مالون

ادامه جدول ۷-۷

| تاریخ کشت | اکوتیپ              | کاتالاز                                   | آسکوربات | گایاکول | مالون دی‌آلدئید | پرولین                       | کربوهیدرات                   |
|-----------|---------------------|-------------------------------------------|----------|---------|-----------------|------------------------------|------------------------------|
|           |                     | (واحد آنزیم بر میلی گرم پروتئین در دقیقه) |          |         |                 | (میکرومول در گرم وزن تر برگ) | (میلی گرم در گرم وزن تر برگ) |
|           | اصفهان              | ۰/۳۶۰ij                                   | ۲/۰۲ij   | ۲/۲۲jk  | ۲/۹۴cd          | ۲۸/۳g-j                      | ۱۳۰ij                        |
| ۶         | خوزستان - امیدیه    | ۰/۵۶۴b                                    | ۴/۲۸a    | ۳/۵۵c   | ۲/۰۶h           | ۴۱/۰a                        | ۱۳۹ef                        |
| مهر       | کهگیلویه و بویراحمد | ۰/۵۱۴c                                    | ۲/۹۷de   | ۳/۰۲de  | ۲/۴۰g           | ۳۷/۶bc                       | ۱۴۴d                         |
|           | مجارستان            | ۰/۴۰۴fg                                   | ۲/۱۷hij  | ۲/۵۴hi  | ۲/۷۳ef          | ۲۶/۶j                        | ۱۳۲hi                        |
|           | اصفهان              | ۰/۳۸۹gh                                   | ۲/۶۲f    | ۲/۰۴l   | ۳/۴۱b           | ۳۳/۲def                      | ۱۳۱hi                        |
| ۲۶        | خوزستان - امیدیه    | ۰/۶۰۴a                                    | ۴/۲۶a    | ۳/۷۶b   | ۲/۳۸g           | ۳۷/۵bc                       | ۱۴۱e                         |
| مهر       | کهگیلویه و بویراحمد | ۰/۴۸۵d                                    | ۳/۵۵c    | ۳/۱۰d   | ۲/۶۲f           | ۳۵/۹bcd                      | ۱۴۹b                         |
|           | مجارستان            | ۰/۴۳۰e                                    | ۲/۹۳de   | ۲/۶۳gh  | ۲/۹۷c           | ۳۱/۸ef                       | ۱۳۲hi                        |
|           | اصفهان              | ۰/۳۸۳ghi                                  | ۲/۳۸g    | ۲/۶۷gh  | ۲/۹۲cd          | ۳۱/۲fg                       | ۱۳۲hi                        |
| ۱۶        | خوزستان - امیدیه    | ۰/۵۶۱b                                    | ۴/۱۶a    | ۴/۰۵a   | ۲/۱۶h           | ۳۸/۳ab                       | ۱۳۸f                         |
| آبان      | کهگیلویه و بویراحمد | ۰/۴۸۲d                                    | ۳/۳۷c    | ۳/۶۰bc  | ۲/۴۰g           | ۳۴/۷cde                      | ۱۴۶c                         |
|           | مجارستان            | ۰/۴۰۰g                                    | ۲/۷۷ef   | ۳/۰۵de  | ۲/۷۶ef          | ۳۰/۱f-i                      | ۱۳۳h                         |
|           | اصفهان              | ۰/۳۵۶j                                    | ۲/۱۹ghi  | ۲/۱۰kl  | ۲/۶۶ef          | ۳۰/۸fgh                      | ۱۲۸j                         |
| ۶         | خوزستان - امیدیه    | ۰/۵۴۷b                                    | ۳/۸۴b    | ۳/۴۷c   | ۱/۸۵i           | ۳۷/۲bc                       | ۱۳۶g                         |
| آذر       | کهگیلویه و بویراحمد | ۰/۴۶۵d                                    | ۳/۰۱d    | ۲/۷۵fg  | ۲/۱۵h           | ۳۱/۳fg                       | ۱۴۴d                         |
|           | مجارستان            | ۰/۳۷۱hij                                  | ۲/۳۲gh   | ۲/۳۲j   | ۲/۶۲f           | ۲۷/۵ij                       | ۱۳۱i                         |
|           | اصفهان              | ۰/۳۵۹j                                    | ۱/۹۸j    | ۲/۳۸gh  | ۳/۲۷b           | ۲۷/۹hij                      | ۱۱۱k                         |
| ۲۰        | خوزستان - امیدیه    | ۰/۵۴۱b                                    | ۴/۱۷a    | ۳/۴۷c   | ۳/۲۵b           | ۲۶/۷j                        | ۱۳۱hi                        |
| اسفند     | کهگیلویه و بویراحمد | ۰/۵۴۴b                                    | ۲/۹۵de   | ۲/۹۱ef  | ۲/۷۹de          | ۳۲/۶ef                       | ۱۵۱a                         |
|           | مجارستان            | ۰/۴۲۵ef                                   | ۲/۲۶gh   | ۲/۶۸gh  | ۳/۵۹a           | ۳۰/۷fgh                      | ۱۰۷l                         |

در هر ستون میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

دی‌آلدئید نداشت (توکل افشاری و همکاران، ۱۴۰۲).

#### برهمکنش تاریخ کاشت و اکوتیپ: برهمکنش تاریخ

کاشت و اکوتیپ بر تمام صفات در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). بیشترین و کمترین عملکرد زیست‌توده به ترتیب در اکوتیپ‌های اصفهان در تاریخ کاشت ۲۶ مهر (۱۴/۶) و امیدیه در تاریخ کاشت ۲۰ اسفند (۳/۹۹) کیلو گرم در متر مربع مشاهده شد (جدول ۷). در کشت پاییزه، ارقام و اکوتیپ‌های مقاوم به سرما به دلیل فراهم بودن دوره

رشد مناسب، عملکرد بالاتری نسبت به کاشت بهاره دارند. در تاریخ‌های کاشت دیر هنگام، احتمال کاهش عملکرد به علت بارندگی‌های بیشتر و از بین رفتن بوته‌ها وجود دارد (Basra and Basra, 1997). بیشترین Fv/Fm (۰/۸۲۱) و بیشترین محتوای نسبی آب برگ (۸۵/۹ درصد) در اکوتیپ کهگیلویه و بویراحمد در تاریخ کاشت ۲۶ مهر، و کمترین Fv/Fm (۰/۷۰۹) و محتوای نسبی آب برگ (۶۶/۰ درصد) در اکوتیپ امیدیه در تاریخ کاشت ۶ آذر مشاهده شد. بیشترین و کمترین میزان

کلروفیل  $a$  به ترتیب در اکوتیپ‌های کهگیلویه و بویراحمد در تاریخ کاشت ۲۶ مهر ( $0/945$  میلی گرم در گرم وزن تر) و امیدیه در تاریخ کاشت ۶ مهر ( $0/462$ ) مشاهده شد. بیشترین میزان کلروفیل  $b$  ( $0/592$  میلی گرم در گرم وزن تر) و کاروتنوئید ( $0/467$  میلی گرم در گرم وزن تر) در تاریخ کاشت ۲۶ مهر در اکوتیپ مجارستان، و کمترین میزان کلروفیل  $b$  ( $0/289$ ) و کاروتنوئید ( $0/237$ ) در تاریخ کاشت ۲۰ اسفند و در اکوتیپ امیدیه مشاهده شد. بیشترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز ( $0/604$  واحد آنزیم بر میلی گرم پروتئین در دقیقه)، آسکوربات پراکسیداز ( $4/28$ ) و گایاکول پراکسیداز ( $4/05$ ) در اکوتیپ امیدیه و به ترتیب در تاریخ کاشت‌های ۲۶ مهر، ۶ مهر و ۱۶ آبان و کمترین میزان آنزیم کاتالاز ( $0/356$  واحد آنزیم)، آسکوربات پراکسیداز ( $1/98$ ) و گایاکول پراکسیداز ( $2/04$ ) در اکوتیپ اصفهان و به ترتیب در تاریخ کاشت‌های ۶ آذر، ۲۰ اسفند و ۲۶ مهر مشاهده شد. نتایج پژوهشی بر گیاه گلرنگ نشان داد که برهمکنش تاریخ کاشت و رقم بر رنگیزه‌های فتوسنتزی، آنزیم‌های آنتی اکسیدانی و محتوای نسبی آب برگ در سطح احتمال یک درصد معنی دار بوده است (بهادری و همکاران، ۱۴۰۰). افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی در برخی ژنوتیپ‌ها و اکوتیپ‌های گیاهان مختلف به دلیل تأخیر در کاشت نیز گزارش شده است. برای مثال، در پژوهشی بر گیاه گلرنگ، تأخیر در کاشت سبب افزایش ۱۶ درصدی فعالیت آنزیم پراکسیداز در یکی از ارقام شد (صالحی و همکاران، ۱۳۹۸). بیشترین و کمترین میزان مالون دی‌آلدئید به ترتیب در اکوتیپ‌های مجارستان در تاریخ کاشت ۲۰ اسفند ( $3/59$  میکرومول در میلی لیتر) و امیدیه در تاریخ کاشت ۶ آذر ( $1/85$  میکرومول) مشاهده شد. بیشترین و کمترین میزان پرولین به ترتیب در اکوتیپ‌های امیدیه ( $41/0$  میکرومول در گرم وزن تازه) و مجارستان ( $26/7$ ) هر دو در تاریخ کاشت ۶ مهر مشاهده شد. بیشترین و کمترین میزان کربوهیدرات‌های محلول به ترتیب در اکوتیپ‌های کهگیلویه و بویراحمد ( $152$  میلی گرم بر گرم وزن تر) و مجارستان ( $107$ ) در تاریخ کاشت ۲۰ اسفند مشاهده شد. تغییر معنی دار در میزان پرولین و

کربوهیدرات‌های محلول برگ در ژنوتیپ‌های مختلف کلزا (شیرانی‌راد و همکاران، ۱۴۰۱) و گندم (کمائی و همکاران، ۱۳۹۶) در تاریخ‌های کاشت متفاوت نیز در سایر پژوهش‌ها مشاهده شده است.

#### برهمکنش رژیم آبیاری و اکوتیپ: برهمکنش اکوتیپ و

آبیاری بر محتوای پرولین تأثیر معنی‌داری نداشت، اما بر محتوای نسبی آب برگ (در سطح احتمال ۵ درصد) و سایر صفات (در سطح احتمال ۱ درصد) معنی دار بود (جدول ۴). این نتایج نشان‌دهنده واکنش متفاوت اکوتیپ‌ها به رژیم‌های آبیاری مختلف است. تنش کم‌آبی خفیف و شدید باعث کاهش عملکرد زیست‌توده، بیشینه کارایی کوانتومی فتوسیستم II (Fv/Fm)، محتوای نسبی آب برگ، کلروفیل  $a$  و  $b$  و کاروتنوئید و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی و محتوای مالون دی‌آلدئید و کربوهیدرات‌های محلول در تمام اکوتیپ‌ها شد (جدول ۸). بیشترین و کمترین عملکرد زیست‌توده به ترتیب در اکوتیپ اصفهان تحت آبیاری شاهد ( $13/1$  کیلوگرم گرم در متر مربع) و اکوتیپ امیدیه تحت تنش شدید کم‌آبی ( $7/87$  کیلوگرم) مشاهده شد. بیشترین و کمترین درصد کاهش عملکرد زیست‌توده تحت تنش کم‌آبی خفیف نسبت به آبیاری شاهد به ترتیب در اکوتیپ مجارستان ( $13/$ ) و اکوتیپ اصفهان ( $10/5/$ ) و تحت تنش کم‌آبی شدید به ترتیب در اکوتیپ مجارستان ( $28/1/$ ) و اکوتیپ کهگیلویه و بویراحمد ( $20/5/$ ) به‌دست آمد. کاهش عملکرد دانه با افزایش تنش کم‌آبی به علت کاهش اجزای عملکرد، قابل پیش‌بینی است. به‌طور مشابه در پژوهشی بر سورگوم و ذرت، کاهش عملکرد در سه ژنوتیپ سورگوم دانه‌ای، سه ژنوتیپ سورگوم علوفه‌ای و یک ژنوتیپ ذرت در شرایط تنش کم‌آبی مشاهده شد (Asadi and Eshghizadeh, 2021). میزان این کاهش در اکوتیپ‌ها و ژنوتیپ‌های مختلف بسته به حساسیت آن‌ها متفاوت بود (Smart and Bingham, 1974). بیشترین و کمترین محتوای کلروفیل  $b$  به ترتیب در اکوتیپ اصفهان تحت آبیاری نرمال ( $0/602$  میلی گرم در گرم وزن تر) و اکوتیپ امیدیه تحت تنش شدید کم‌آبی ( $0/284$ ) و بیشترین و کمترین

جدول ۸- مقایسه میانگین پیامدهای برهمکنش رژیم آبیاری و اکوتیپ بر صفات مختلف اندازه‌گیری شده در گیاه خارمریم

| آبیاری   | اکوتیپ              | عملکرد زیست‌توده<br>(کیلوگرم بر متر مربع) | Fv/Fm              | محتوای نسبی<br>آب برگ (%) | کلروفیل <i>a</i><br>(میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ) | کلروفیل <i>b</i><br>(میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ) | کاروتنوئید         |
|----------|---------------------|-------------------------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------|
| شاهد     | اصفهان              | ۱۳/۱ <sup>a</sup>                         | ۰/۸۱۵ <sup>c</sup> | ۸۴/۳ <sup>b</sup>         | ۰/۸۰۷ <sup>c</sup>                               | ۰/۶۰۲ <sup>a</sup>                               | ۰/۳۹۴ <sup>c</sup> |
|          | خوزستان - امیدیه    | ۹/۸۰ <sup>de</sup>                        | ۰/۷۵۸ <sup>f</sup> | ۷۳/۷ <sup>de</sup>        | ۰/۶۶۴ <sup>de</sup>                              | ۰/۴۶۹ <sup>e</sup>                               | ۰/۳۴۳ <sup>d</sup> |
|          | کهگیلویه و بویراحمد | ۱۳/۰ <sup>a</sup>                         | ۰/۸۴۰ <sup>a</sup> | ۸۶/۶ <sup>a</sup>         | ۱/۰۳ <sup>a</sup>                                | ۰/۵۸۰ <sup>b</sup>                               | ۰/۴۶۴ <sup>b</sup> |
|          | مجارستان            | ۱۲/۸ <sup>a</sup>                         | ۰/۸۲۷ <sup>b</sup> | ۷۹/۳ <sup>c</sup>         | ۰/۹۷۳ <sup>b</sup>                               | ۰/۵۶۹ <sup>b</sup>                               | ۰/۴۸۸ <sup>a</sup> |
| تنش خفیف | اصفهان              | ۱۱/۷ <sup>b</sup>                         | ۰/۷۶۶ <sup>e</sup> | ۷۹/۶ <sup>c</sup>         | ۰/۶۷۵ <sup>d</sup>                               | ۰/۵۰۹ <sup>c</sup>                               | ۰/۳۰۹ <sup>e</sup> |
|          | خوزستان - امیدیه    | ۹/۰۶ <sup>h</sup>                         | ۰/۷۲۲ <sup>g</sup> | ۷۱/۴ <sup>f</sup>         | ۰/۵۱۷ <sup>g</sup>                               | ۰/۳۸۲ <sup>g</sup>                               | ۰/۲۴۹ <sup>g</sup> |
|          | کهگیلویه و بویراحمد | ۱۱/۲ <sup>bc</sup>                        | ۰/۷۷۶ <sup>d</sup> | ۸۳/۰ <sup>b</sup>         | ۰/۸۱۱ <sup>c</sup>                               | ۰/۴۹۴ <sup>d</sup>                               | ۰/۳۹۰ <sup>c</sup> |
|          | مجارستان            | ۱۱/۱ <sup>c</sup>                         | ۰/۷۵۶ <sup>f</sup> | ۷۸/۵ <sup>c</sup>         | ۰/۸۰۲ <sup>c</sup>                               | ۰/۵۰۹ <sup>c</sup>                               | ۰/۳۹۴ <sup>c</sup> |
| تنش شدید | اصفهان              | ۹/۸۰ <sup>e</sup>                         | ۰/۷۲۶ <sup>h</sup> | ۷۵/۴ <sup>d</sup>         | ۰/۵۴۱ <sup>f</sup>                               | ۰/۴۱۱ <sup>f</sup>                               | ۰/۲۴۷ <sup>g</sup> |
|          | خوزستان - امیدیه    | ۹/۸۸ <sup>i</sup>                         | ۰/۷۰۲ <sup>h</sup> | ۶۸/۳ <sup>g</sup>         | ۰/۴۰۳ <sup>h</sup>                               | ۰/۲۸۴ <sup>h</sup>                               | ۰/۲۰۵ <sup>h</sup> |
|          | کهگیلویه و بویراحمد | ۱۰/۳ <sup>d</sup>                         | ۰/۷۴۷ <sup>g</sup> | ۷۷/۹ <sup>c</sup>         | ۰/۶۶۳ <sup>e</sup>                               | ۰/۴۰۸ <sup>f</sup>                               | ۰/۲۸۷ <sup>f</sup> |
|          | مجارستان            | ۹/۲۲ <sup>f</sup>                         | ۰/۷۲۹ <sup>h</sup> | ۷۱/۸ <sup>ef</sup>        | ۰/۶۷۲ <sup>de</sup>                              | ۰/۴۵۸ <sup>e</sup>                               | ۰/۳۱۳ <sup>e</sup> |

سطوح آبیاری شاهد، تنش خفیف و شدید کمبود آب بر اساس ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد از حداکثر تخلیه مجاز رطوبت قابل دسترس گیاه. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

جدول ۸- مقایسه میانگین پیامدهای برهمکنش رژیم آبیاری و اکوتیپ بر صفات مختلف اندازه‌گیری شده در گیاه خارمریم

| آبیاری   | اکوتیپ              | کاتالاز            | آسکوربات           | گایاکول           | مالون دی‌آلدئید<br>(میکرومول در میلی‌لیتر) | کربوهیدرات<br>(میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ) |
|----------|---------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| شاهد     | اصفهان              | ۰/۲۹۰ <sup>h</sup> | ۱/۸۳ <sup>j</sup>  | ۱/۸۷ <sup>i</sup> | ۲/۴۸ <sup>e</sup>                          | ۱۱۵ <sup>h</sup>                           |
|          | خوزستان - امیدیه    | ۰/۴۳۰ <sup>e</sup> | ۳/۱۲ <sup>d</sup>  | ۳/۰۳ <sup>d</sup> | ۱/۸۴ <sup>h</sup>                          | ۱۲۷ <sup>g</sup>                           |
|          | کهگیلویه و بویراحمد | ۰/۳۸۹ <sup>f</sup> | ۲/۶۸ <sup>f</sup>  | ۲/۶۲ <sup>f</sup> | ۲/۰۱ <sup>g</sup>                          | ۱۳۶ <sup>e</sup>                           |
|          | مجارستان            | ۰/۳۰۳ <sup>h</sup> | ۲/۰۴ <sup>i</sup>  | ۲/۰۶ <sup>h</sup> | ۲/۳۰ <sup>f</sup>                          | ۱۱۵ <sup>h</sup>                           |
| تنش خفیف | اصفهان              | ۰/۳۶۳ <sup>g</sup> | ۲/۲۷ <sup>h</sup>  | ۲/۳۶ <sup>g</sup> | ۳/۱۶ <sup>b</sup>                          | ۱۲۶ <sup>g</sup>                           |
|          | خوزستان - امیدیه    | ۰/۶۰۴ <sup>b</sup> | ۴/۳۳ <sup>b</sup>  | ۳/۸۱ <sup>b</sup> | ۲/۲۵ <sup>f</sup>                          | ۱۳۸ <sup>d</sup>                           |
|          | کهگیلویه و بویراحمد | ۰/۵۱۰ <sup>c</sup> | ۳/۰۸ <sup>de</sup> | ۳/۰۳ <sup>d</sup> | ۲/۵۸ <sup>e</sup>                          | ۱۴۸ <sup>b</sup>                           |
|          | مجارستان            | ۰/۴۱۷ <sup>e</sup> | ۲/۵۰ <sup>g</sup>  | ۲/۷۹ <sup>e</sup> | ۳/۰۰ <sup>c</sup>                          | ۱۲۹ <sup>f</sup>                           |
| تنش شدید | اصفهان              | ۰/۴۵۶ <sup>d</sup> | ۲/۶۱ <sup>fg</sup> | ۲/۶۲ <sup>f</sup> | ۳/۴۸ <sup>a</sup>                          | ۱۳۸ <sup>d</sup>                           |
|          | خوزستان - امیدیه    | ۰/۶۵۶ <sup>a</sup> | ۴/۹۸ <sup>a</sup>  | ۴/۱۴ <sup>a</sup> | ۲/۹۲ <sup>cd</sup>                         | ۱۴۶ <sup>c</sup>                           |
|          | کهگیلویه و بویراحمد | ۰/۵۹۴ <sup>b</sup> | ۳/۷۵ <sup>c</sup>  | ۳/۵۸ <sup>c</sup> | ۲/۸۲ <sup>d</sup>                          | ۱۵۶ <sup>a</sup>                           |
|          | مجارستان            | ۰/۴۹۹ <sup>c</sup> | ۲/۹۳ <sup>e</sup>  | ۳/۰۸ <sup>d</sup> | ۳/۵۰ <sup>a</sup>                          | ۱۳۶ <sup>e</sup>                           |

سطوح آبیاری شاهد، تنش خفیف و شدید کمبود آب بر اساس ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد از حداکثر تخلیه مجاز رطوبت قابل دسترس گیاه. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون ال‌اس‌دی اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

شد و این افزایش در ژنوتیپ‌های مقاوم به تنش بیشتر بود (Ashraf and Foolad *et al.*, 2007).

### نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که تنش‌های کم‌آبی خفیف و شدید باعث کاهش عملکرد زیست‌توده، کارایی کوانتومی فتوسیستم II (Fv/Fm)، محتوای نسبی آب برگ، کلروفیل و کاروتنوئید می‌شود. اکوتیپ‌ها به‌طور متفاوتی به تنش کم‌آبی واکنش نشان دادند؛ برخی مقاوم‌تر و برخی حساس‌تر بودند. تحت تنش کم‌آبی، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی به عنوان راهکار دفاعی گیاه مشاهده شد. تغییرات در محتوای کلروفیل و کاروتنوئید به شدت تنش بستگی داشت. بیشترین عملکرد زیست‌توده در اکوتیپ‌های اصفهان و کهگیلویه و بویراحمد (۱۱/۵ کیلوگرم در متر مربع) مشاهده شد. با توجه به عملکرد زیست‌توده بالاتر در تاریخ کشت پاییزه نسبت به تاریخ کشت بهار در تمام اکوتیپ‌های مورد مطالعه، کشت گیاه خارمریم در شرایط آب و هوایی مشابه اصفهان، در فصل پاییز مناسب‌تر است. بین تاریخ‌های کشت متفاوت پاییزه، تاریخ کشت اواخر مهر (۲۶ مهر) تا اواسط آبان (۱۶ آبان) پیشنهاد می‌شود. با توجه به دارا بودن محتوای نسبی آب برگ، کارایی کوانتومی فتوسیستم II (Fv/Fm)، کلروفیل و کاروتنوئید بالاتر در اکوتیپ کهگیلویه و بویراحمد، انجام مطالعات بیشتر زراعی و اصلاحی بر روی این اکوتیپ پیشنهاد می‌شود. درک عمیق‌تر از پاسخ‌های فیزیولوژیک اکوتیپ‌های گیاه خارمریم به سطوح مختلف تنش آب می‌تواند به بهبود روش‌های آبیاری و مدیریت تنش در کشاورزی کمک کند.

کاروتنوئید به ترتیب در اکوتیپ مجارستان تحت آبیاری شاهد (۰/۴۸۸ میلی‌گرم در گرم وزن تر) و اکوتیپ امیدیه تحت تنش شدید کم‌آبی (۰/۲۰۵) مشاهده شد. تغییرات کلروفیل و کاروتنوئید تحت تنش کم‌آبی بستگی به نوع گیاه، طول دوره و شدت تنش دارد (Antolin *et al.*, 1995). نتایج پژوهشی بر چهار ژنوتیپ گیاه جو نشان‌دهنده معنی‌داری برهمکنش ژنوتیپ و آبیاری بر صفات کلروفیل *a*، کلروفیل *b* و کاروتنوئید بود (Bardehji *et al.*, 2023). بیشترین میزان فعالیت کاتالاز (۰/۶۵۶ واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه)، آسکوربات پراکسیداز (۴/۹۸) و گایاکول پراکسیداز (۴/۱۵) در اکوتیپ امیدیه تحت تنش شدید کم‌آبی و کمترین میزان فعالیت کاتالاز (۰/۲۹۰ واحد آنزیم)، آسکوربات پراکسیداز (۱/۸۳) و گایاکول پراکسیداز (۱/۸۷) در اکوتیپ اصفهان تحت آبیاری شاهد مشاهده شد. برهمکنش رژیم آبیاری و ژنوتیپ بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، غلظت کلروفیل و کاروتنوئید و محتوای نسبی آب برگ در گلرنگ (بهادری و همکاران، ۱۴۰۰) و کلزا (دوامی و همکاران، ۱۴۰۰) نیز مشاهده شده است. بیشترین و کمترین محتوای مالون دی‌آلدئید به ترتیب در اکوتیپ مجارستان تحت تنش شدید کم‌آبی (۳/۵۰ میکرومول در میلی‌لیتر) و اکوتیپ امیدیه تحت آبیاری شاهد (۱/۸۴) مشاهده شد. اثر برهمکنش اکوتیپ و آبیاری بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و محتوای مالون دی‌آلدئید در گیاه زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) نیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شده است (سورنی و همکاران، ۱۳۹۹). بیشترین و کمترین کربوهیدرات‌های محلول به ترتیب در اکوتیپ کهگیلویه و بویراحمد تحت تنش شدید کم‌آبی (۱۵۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و اکوتیپ اصفهان تحت آبیاری شاهد (۱۱۶) مشاهده شد. در گیاه کلزا، تأخیر در آبیاری سبب افزایش محتوای کربوهیدرات‌های محلول در ژنوتیپ‌ها

### منابع

ابهری، عباس، گالشی، سراله، لطیفی، ناصر، و کلاته، مهدی (۱۳۸۶). تأثیر برخی پارامترهای رشد بر عملکرد ژنوتیپ‌های گندم (*Triticum aestivum* L.) در شرایط تنش خشکی. *علوم کشاورزی و منابع طبیعی*، ۱۴ (۶)، ۸۱-۹۲.

- اسدی‌صنم، سمانه، زواره، محسن، پیردشتی، همت‌اله، سفیدکن، فاطمه، نعمت‌زاده، قهربانعلی، و هاشم‌پور، ابودر (۱۳۹۲). تغییر برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی گیاه دارویی سرخارگل (*Echinacea purpurea* (L.) Moench) در پاسخ به تاریخ کشت و دوره غرقاب خاک. *دو ماهنامه علمی پژوهشی تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران*، ۳۱(۲)، ۳۱۵-۳۳۱.
- امامی، طاهره (۱۴۰۱). اثر بیوپار و اسید سالیسیلیک بر صفات فیزیولوژیک و عملکرد گیاه دارویی سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.) در شرایط عدم تنش و تنش خشکی. *تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک*، ۴(۱)، ۲۲۹-۲۴۳. <https://doi.org/10.22034/csrar.2022.320762.1172>
- بهادری، فاطمه، بیژن‌زاده، احسان، و بهپوری، علی (۱۴۰۰). بررسی اثرات کاشت تأخیری و قطع آبیاری بر صفات بیوشیمیایی، محتوای نسبی آب و عملکرد دو رقم گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.). *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۴(۳)، ۶۰۵-۶۱۸. <https://doi.org/10.22077/escs.2020.3173.1810>
- توکل‌افشاری، مسیح، نظامی، احمد، احمدی لاهیجانی، محمد جواد، نباتی، جعفر، و کریم‌زاده سورشجانی، هدایت‌الله (۱۴۰۲). اثر تاریخ کاشت و کم‌آبیاری بر ویژگی‌های فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و عملکرد کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd) در مشهد. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۶(۲)، ۴۰۳-۴۱۸. <https://doi.org/10.22077/escs.2022.4695.2056>
- دوامی، پیمان، علوی فاضل، مجتبی، لک، شهرام، حبیبی، داوود، و مظفری، افشین (۱۴۰۰). ارزیابی ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی چهار رقم کلزا (*Brassica napus* L.) زمستانه در شرایط قطع آبیاری و تأخیر کاشت. *پژوهش‌های علوم کشاورزی پایدار*، ۱(۲)، ۱-۲۱.
- دهشیری، امید، و پاک‌نیت، حسن (۱۳۹۱). ارزیابی ژنوتیپ‌های کلزا از نظر محتوای کلروفیل و کاروتنوئیدها و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در شرایط تنش خشکی. *مجله تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی*، ۳(۱۰)، ۶۹-۷۸. DOR: 20.1001.1.22518517.1392.3.10.7.2
- سارانی ملاک، مصطفی، اله‌دو، مریم، مهرآوران، لیلا، و پیری، حلیمه (۱۴۰۱). تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری روی صفات فیزیولوژی و بیوشیمیایی گیاه دارویی خارمریم (*Silybum marianum*). *تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک*، ۴(۱)، ۱۱۳-۱۲۱. <https://doi.org/10.22034/csrar.2022.322452.1175>
- سورنی، جهاد، روستاخیز، جواد، سلیمی، خالد، و نوری، محسن (۱۳۹۹). اثر تنش خشکی بر صفات عملکردی، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و درصد اسانس برخی اکوتیپ‌های گیاه دارویی زیره‌سبز (*Cuminum cyminum* L.). *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۳(۴)، ۱۱۲۵-۱۱۳۴. <https://doi.org/10.22077/escs.2020.2395.1624>
- شریفی سلطانی، سارا، کاظمی تبار، کمال، رنجبر، غلامعلی، پاک‌دین پاریزی، علی، و نجفی زرینی، حمید (۱۴۰۱). اثر تنش خشکی بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، محتوای پروتئین و برخی صفات مورفولوژیک اکوتیپ‌های مختلف کرچک (*Ricinus communis* L.). *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۱۱(۴۷)، ۲۶۷-۲۸۱. DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.7.6
- شیرانی‌راد، امیرحسین، گوهریان، علیرضا، و عینی نرگسه، حامد (۱۴۰۱). تأثیر سلنیوم و روی بر صفات فیزیولوژیک و عملکرد ژنوتیپ‌های کلزا در تاریخ‌های کاشت مطلوب و تأخیری. *تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک*، ۴(۲)، ۳۵۱-۳۶۹. <https://doi.org/10.22034/csrar.2022.351327.1256>
- صالحی، فرشاد، راهنما قهفرخی، افراسیاب، مسکرباشی، موسی، و مهدیخانلو، خسرو (۱۳۹۸). اثر تنش گرمای آخر فصل بر برخی صفات زراعی، فیزیولوژیک و عملکرد روغن ارقام گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) در شرایط آب و هوایی اهواز. *نشریه پژوهش‌های زراعی ایران*، ۱۷(۳)، ۴۹۲-۵۰۳. <https://doi.org/10.22067/gsc.v17i3.76975>
- صیدی، زهرا، عباسی، نصرت‌الله زارع، محمدجواد، و زارعی، بتول (۱۴۰۰). اثر کود زیستی نیتروکسین بر ویژگی‌های فیزیولوژیک چهار اکوتیپ سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) در شرایط تنش خشکی. *روابط خاک و گیاه*، ۱۲(۲)، ۱۹-۳۲.

<https://doi.org/10.47176/jspi.12.1.20141>

عباسی دهکردی، نسرین، رفیعی‌الحسینی، محمد، دانش شهرکی، عبدالرزاق، و بدل‌زاده، افسانه (۱۴۰۰). اثر تاریخ کاشت و کاربرد کودهای دامی، شیمیایی بر برخی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک و اسانس بادرشبو (*Dracocephalum moldavica* L.). تولید

گیاهان زراعی، ۱۵(۱)، ۳۹-۵۶. <https://doi.org/10.22069/EJCP.2022.19086.2422>

عبدالله‌زارع، سودابه، فاتح، اسفندیار، و آینه‌بند، امیر (۱۳۹۱). بررسی اثر تاریخ‌های مختلف کشت و روش‌های مختلف تغذیه‌ای (شیمیایی و آلی) بر عملکرد و اجزاء عملکرد گیاه خار مریم (*Silybum marianum* L.). تولیدات گیاهی (مجله علمی کشاورزی)، ۳۵(۱)، ۱۲۹-۱۴۳.

عوض کوچکی، علیرضا، و راشد محصل، محمد حسین (۱۳۸۸). اصول و عملیات دیمکاری. جهاد دانشگاهی دانشگاه فردوسی مشهد. مشهد.

غلامی‌زالی، علی، و احسان‌زاده، پرویز (۱۳۹۸). پاسخ فیزیولوژیکی، آنتی‌اکسیدانی و عملکرد سه ژنوتیپ رازیانه به استعمال خارجی پرولین در شرایط تنش رطوبتی. فرآیند و کارکرد گیاهی، ۸(۳۲)، ۱-۱۸. DOR: 20.1001.1.23222727.1398.8.32.17.5

قاسمی، احمد، و ارفع‌نیا، حامد (۱۴۰۰). تأثیر تنش خشکی و تاریخ کاشت بر صفات مورفوفیزیولوژیک و عملکرد دو رقم ارزن. نشریه مدیریت و تولید پایدار، ۱۱(۱)، ۱۳۳-۱۴۸. <https://doi.org/10.22069/ejsms.2021.18495.1982>

قربانی، رضا، کوچکی، علیرضا، حسینی، آزاده، جهانی، مریم، اسدی، قربانعلی، عاقل، حسن، و محمدآبادی، علی‌اصغر (۱۳۸۹). بررسی اثرات تاریخ کشت، زمان و روش‌های کنترل علف‌های هرز بر تراکم و زیست‌توده علف‌های هرز در زیره سبز. نشریه پژوهش‌های

زراعی/ایران، ۸(۱)، ۱۲۰-۱۲۷. <https://doi.org/10.22067/GSC.V8I1.7400>

کمانی، حسین، عیسوند، حمیدرضا، دانشور، ماشالله، و نظریان، فرهاد (۱۳۹۶). بررسی اثر تاریخ کاشت، کود زیستی فسفات و محلول‌پاشی روی و بور بر عملکرد دانه و برخی صفات فیزیولوژیک گندم. فرآیند و کارکرد گیاهی، ۸(۲۹)، ۵۹-۷۴.

DOR: 20.1001.1.23222727.1398.8.29.15.7

گلی، امیرحسین، کدیور، مهدی، بهرامی، بهمن، و سبزه‌علیان، محمدرضا (۱۳۸۶). خصوصیات فیزیکی و شیمیایی روغن دانه ماریتیغال. فصلنامه علوم و صنایع غذایی ایران، ۴(۴)، ۲۷-۳۱.

مفاخری، خسرو، ولیزاده، مصطفی، و محمدی، سید ابوالقاسم (۱۴۰۱). بررسی الگوی ایزوزیمی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و شاخص‌های فیزیولوژیکی در ژنوتیپ‌های ذرت تحت تنش کم آبی. پژوهشنامه اصلاح گیاهان زراعی، ۱۴(۴۳)، ۶۴-۷۵.

<https://doi.org/10.52547/jcb.14.43.64>

نعمت‌پور، افسانه، و عشقی‌زاده، حمیدرضا (۱۳۹۸). اثر تنش خشکی، تغذیه شیمیایی نیتروژن و تاریخ کاشت بر برخی ویژگی‌های آگروفیزیولوژیک دو رقم ارزن. فرآیند و کارکرد گیاهی، ۸(۳۳)، ۱۷۶-۱۸۶. DOR: 20.1001.1.23222727.1398.8.33.22.2

نوراللهی، مرجان، حسن‌لی، علی‌مراد، قنبریان، غلام‌عباس، و تقوایی، منصور (۱۳۹۵). برآورد ضریب گیاهی (Kc) گیاهان دارویی رزماری، اسطوخودوس و ماریتیغال (خارمریم) با استفاده از بیلان آبی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۰(۱)، ۱۱۷-۱۲۷.

Abenavoli, L., Capasso, R., Milic, N., & Capasso, F. (2010). Milk thistle in liver diseases: Past, present, future. *Phytotherapy Research*, 24(10), 1423-1432. <https://doi.org/10.1002/ptr.3207>

Abreha, K. B., Enyew, M., Carlsson, A. S., Vetukuri, R. R., Feyissa, T., Motlhaodi, T., Ng'uni, D., & Geleta, M. (2022). Sorghum in dryland: Morphological, physiological, and molecular responses of sorghum under drought stress. *Planta*, 255, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03799-7>

Aebi, H. E. (1983). *Catalase, Methods of Enzymatic Analysis*. 3<sup>rd</sup> Ed. Verlag Chemie, Weinheim.

Aghaei, K., Ehsanpour, A. A., & Komatsu, S. (2009). Potato responds to salt stress by increased activity of antioxidant enzymes. *Journal of Integrative Plant Biology*, 51(12), 1095-1103. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2009.00886.x>

Andrzejewska, J., & Skinder, Z. (2006). Yield and quality of raw material of milk thistle (*Silybum marianum* (L.) Gaertn) grown in monoculture and in crop rotation. Part I. reaction of milk thistle to the sowing date. *Herba*

- Polonica*, 52(4), 11-16.
- Antolin, M., Yoller, C., & Sanchez- Diaz, M. (1995). Effects of temporary drought on nitrate- fed and nitrogen fixing alfalfa plants. *Plant Science*, 107(2), 159-165. [https://doi.org/10.1016/0168-9452\(95\)04108-7](https://doi.org/10.1016/0168-9452(95)04108-7)
- Asadi, M., & Eshghizadeh, H. R. (2020). Comparison of growth responses in sorghum genotypes and corn grown in arid regions under different levels of water and nitrogen supplies. *Acta Agrobotanica*, 73(4). <https://doi.org/10.5586/aa.7342>
- Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and prolin in improving plant a biotic stress resistance. *Environment and Experimental Botany*, 59, 206-216. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.12.006>
- Bardehji, S., Soltan, S., Eshghizadeh, H. R., Zahedi, M., Zare, S., Koçak, M. Z., Nouraein, M., Vita, F., & Vergine, M. (2023). Responses of two-row and six-row barley genotypes to elevated carbon dioxide concentration and water Stress. *Agronomy*, 13, 2373. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092373>
- Basra, A. S., & Basra, R. K. (1997). Mechanisms of Environmental Stress Resistance in Plants. Routledge.
- Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207.
- Baydar, H., & Baydar, N. G. (2005). The effects of harvest date, fermentation duration and Tween treatment on essential oil content and composition of industrial oil rose (*Rosa damascena* Mill.). *Industrial Crops and Products*, 21, 251-255. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2004.04.004>
- Belaqziz, S., Khabba, S., Kharrou, M. H., Bouras, E. H., Er-Raki, S., & Chehbouni, A. (2021). Optimizing the sowing date to improve water management and wheat yield in a large irrigation scheme, through a remote sensing and an evolution strategy-based approach. *Remote Sensing*, 13(18), 3789. <https://doi.org/10.3390/rs13183789>
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72, 248-254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Chance, B., & Maehly, A. C. (1955). Assay of catalase and peroxidase. In: Methods in Enzymology. (eds. Colowick, S. P., and Kaplan, N. D.). Pp. 764-791. Academic Press. New York.
- Fernandez, O., B'ethencourt, L., Quero, A., Sangwan, R. S., & Cl'ement, C. (2010). Trehalose and plant stress responses: Friend or foe? *Trends in Plant Science*, 15(7), 409-417. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.04.004>
- Heath, R. L., & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 125, 189-198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1)
- Hetz, E., Liersch, R., & Schieder, O. (1995). Genetic investigations on *Silybum marianum* and *S. eburneum* with respect to leaf colour, outcrossing ratio, and flavonolignan composition. *Planta Medica*, 61(1), 54-57. <https://doi.org/10.1055/s-2006-957999>
- Li, Z. Z., & Li, W. L. (2004). Dry-period irrigation and fertilizer application affect water use and yield of spring wheat in semi-arid regions. *Agricultural Water Management*, 65(2), 133-143. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2003.07.007>
- Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes. In Methods in Enzymology. Academic Press.
- Lowlor, D. W., & Cornic, G. (2002). Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant Cell and Environment*, 25, 275-294. <https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00814.x>
- Majidi, M. M., Shafiei-Koij, F., Pirnajmedin, F., Jami, M., & Radan, Z. (2021). Fatty acid profile, silymarin content and production properties of milk thistle (*Silybum marianum*) germplasm under different water environments. *Crop and Pasture Science*, 72(4), 302-310. <https://doi.org/10.1071/CP20489>
- McCready, R. M., Guggolz, J., Silveira, V., & Owens, H. S. (1950). Determination of starch and amylase in vegetables. *Analytical Chemistry*, 22, 1156-1158.
- Nakano, Y., & Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant Cell Physiology*, 22, 867-880. [doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a076232](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a076232)
- Nasrabadi, S. E., Ghorbani, R., Moghaddam, P. R., & Mahallati, M. N. (2014). Phenological response of milk thistle (*Silybum marianum* [L.] Gaertn.) to different nutrition systems. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 1(4), 148-151. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2014.10.002>
- Passioura, J. B. (1988). Water transport in and to roots. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 39(1), 245-265.
- Samieadel, S., Eshghizadeh, H. R., Nematpour, A., & Majidi, M. M. (2023). Wheat cultivars responses to drought stress and atmospheric CO<sub>2</sub> concentration variability. *Cereal Research Communications*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s42976-023-00474-3>
- Sinaki, M. J., Majidi Heravan, E., Shiranirad, H., Noormohammadi, G., & Zarei, G. H. (2007). The effects of water deficit during growth stages of canola (*Brassica napus* L.). *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science*, 2, 417-422.

- Smart, R. E. & Bingham, G. E. (1974). Rapid estimates of relative water content. *Journal of Plant Physiology*, 53, 258-260. doi.org/10.1104/pp.53.2.258
- Xiao, X., Xu, X., & Yang, F. (2008). Adaptive responses to progressive drought stress in two *Populus cothayana* populations. *Silva Fennica*, 42(5), 705-719.
- Zhang, Y., Zhu, J., Khan, M., Wang, Y., Xiao, W., Fang, T., Qu, J., Xiao, P., Li, C., & Liu, J. (2022). Transcription factors ABF4 and ABR1 synergistically regulate amylase-mediated starch catabolism in drought tolerance. *Plant Physiology*, 191(1), 591-609. doi.org/10.1093/plphys/kiac428
- Zivcak, M., Kalaji, H. M., Shao, H. B., Olsovska, K., & Brestic, M. (2014). Photosynthetic proton and electron transport in wheat leaves under prolonged moderate drought stress. *Journal of Photochemistry and Photobiology B, Biology*, 137, 107-115. https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.01.007

## The growth and biochemical characteristics of milk thistle (*Silybum marianum* L.) ecotypes under the interaction of planting date and irrigation regime

Shiba Samieadel, Hamid Reza Eshghizadeh\*, Morteza Zahedi and Mohammad Mahdi Majidi

Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

(Received: 2024/09/20, Accepted: 2024/12/03)

### Abstract

This study investigated changes in biochemical characteristics of four ecotypes of milk thistle plants (Isfahan, Kohgiluyeh and Boyer Ahmad, Khuzestan-Umidiyeh, and Hungary) in response to three moisture levels (40, 60, and 80% of the maximum allowable depletion of available soil moisture) and five planting dates (September 27th, October 17th, November 6th, November 26th, and March 10th). The experiment was carried out at the research farm of Isfahan University of Technology, Iran, using a split-plot design and a randomized complete block design with three replications. Results showed that changes in planting date and irrigation regime caused significant effects on relative water content and the contents of proline, malondialdehyde, chlorophyll *a* and *b*, and carotenoids and the activities of antioxidant enzymes (catalase, ascorbate peroxidase, and guaiacol peroxidase) in milk thistle leaves. Ecotypes reacted differently to these changes, indicating varying sensitivities to environmental conditions. "Isfahan" and "Kohgiluyeh and Boyer Ahmad" ecotypes had the highest biological yield (11.5 kg/m<sup>2</sup>). Having the highest chlorophyll *a*, carotenoid, relative leaf water content, and quantum efficiency of photosystem II (Fv/Fm), "Kohgiluyeh and Boyer Ahmad" ecotype is recommended to be used in breeding programs to develop cultivars compatible with the country's climate. This research demonstrates that optimizing planting date and irrigation regime can enhance milk thistle crop yield, particularly under enhanced irrigation water demand caused by changing climate. Examining the relationship between plant biochemical characteristics and planting conditions highlights the potential value of these correlations for improving crop production management.

**Keywords:** Biological yield, Chlorophyll, Drought stress, Medical plants, Milk thistle, Relative leaf water content

Corresponding author, Email: hr.eshghizadeh@iut.ac.ir