



Analysis of the response of four *Glycyrrhiza glabra* genotypes to water deficit based on germination traits, early growth, and biochemical adjustments under controlled conditions

Mojtaba Akhavan Armaki ^{1*} Melika Hashemi ² Ebrahim Nafisi ³

1*. University of Tehran

2. University of Tehran

3. University of Tehran

ARTICLE INFO

Article history

Submitted: 2026-04-01

Revised: 2026-07-20

Accepted: 2026-08-31

KEYWORDS

Glycyrrhiza glabra,
Drought stress, Seedling
stage, Germination
indicators, Biochemical
markers.

ABSTRACT

Water deficit is one of the most important environmental stresses affecting the establishment and early growth of medicinal plants, and identifying genotypes adapted to such conditions is a crucial step toward the development of sustainable cultivation systems. In this study, the responses of four *Glycyrrhiza glabra* genotypes to drought stress were evaluated under two controlled environments, including laboratory and greenhouse conditions. In the laboratory experiment, drought stress was induced using polyethylene glycol (PEG 3000) at different osmotic potentials, while in the greenhouse experiment different soil moisture regimes based on percentages of field capacity were applied using a randomized complete block design with four replications. To characterize the response patterns of the genotypes, several traits were measured, including germination percentage, radicle length, plumule length, seed vigor index, chlorophyll content, proline concentration, and soluble sugar content. The results indicated that increasing drought stress significantly reduced germination parameters and seedling growth traits, and chlorophyll content also declined under stress conditions. In contrast, the accumulation of proline and soluble sugars increased under drought stress, suggesting the activation of osmotic adjustment mechanisms and protective responses in the plant. Significant differences were also observed among the genotypes in their responses to drought stress, indicating the presence of variability in their adaptive capacity. Also, a significant difference was observed between genotypes in terms of the severity of drought response, indicating the existence of diversity in their adaptive capacity. Based on the results, the Arak genotype (808) was identified as the most tolerant and the Mazandaran genotype (3151) as the most sensitive genotype; so that the main difference between these two genotypes was in maintaining the germination percentage, seed vigor index and seedling length under severe stress conditions, as well as the amount of soluble sugars accumulation. In summary, the simultaneous use of growth and biochemical indices at the seedling stage can be an efficient approach to identify drought-tolerant genotypes in licorice.

* Corresponding author: mojtaba akhavan armaki

✉ E-mail: mtakhavan@ut.ac.ir





مقاله پژوهشی

تحلیل واکنش چهار ژنوتیپ شیرین بیان (*Glycyrrhiza glabra*) به کمبود آب با تکیه بر نشانگرهای جوانه زنی، رشد اولیه و تنظیمات بیوشیمیایی در شرایط کنترل شده

مجتبی اخوان ارمکی^{۱*}، ملیکا هاشمی^۱، ابراهیم نفیسی^۱

*۱. دکترای تخصصی، دانشگاه تهران.

۲. دکترای تخصصی، دانشگاه تهران.

۳. دکترای تخصصی، دانشگاه تهران.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۵-۰۱-۱۲

بازنگری: ۱۴۰۵-۰۴-۲۹

پذیرش: ۱۴۰۵-۰۶-۰۹

واژگان کلیدی:

شیرین بیان، تنش خشکی، مرحله گیاهچه، شاخص های جوانه زنی، نشانگرهای بیوشیمیایی.

چکیده: کمبود آب از مهم ترین تنش های محیطی مؤثر بر استقرار و رشد اولیه گیاهان دارویی به شمار می رود و شناسایی ژنوتیپ های سازگار با این شرایط، گامی اساسی در توسعه کشت پایدار آن ها است. در این پژوهش، پاسخ چهار ژنوتیپ شیرین بیان (*Glycyrrhiza glabra*) به تنش خشکی در دو محیط کنترل شده شامل آزمایشگاه و گلخانه ارزیابی شد. در بخش آزمایشگاهی، تنش با استفاده از پلی اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ در سطوح مختلف پتانسیل اسمزی اعمال گردید و در گلخانه، رژیم های متفاوت رطوبتی خاک بر مبنای درصد ظرفیت زراعی به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که با افزایش شدت تنش در آزمایشگاه، میانگین درصد جوانه زنی از ۸۹ به ۴۴ درصد، طول گیاهچه از ۱۵۵/۸۱ به ۴۴/۷۱ میلی متر و شاخص بنیه بذر از ۱۴۰/۰۵ به ۲۰/۴۱ کاهش یافت، در حالی که نسبت وزن خشک به وزن تر افزایش پیدا کرد. در گلخانه نیز با کاهش رطوبت از ظرفیت زراعی به ۲۵ درصد FC، میانگین کلروفیل از ۴۳/۰۵ به ۱۰/۴۹، طول گیاهچه از ۶۹۲ به ۲۶۱ میلی متر و درصد سبز شدن از ۸۳/۶۶ به ۴۲ درصد کاهش یافت. در مقابل، میانگین پرولین از ۱/۴۵ به ۱/۷۰ و قندهای محلول از ۰/۲۸ به ۰/۴۳ میکروگرم بر گرم وزن خشک افزایش یافت. اثر متقابل ژنوتیپ × تنش برای بسیاری از صفات معنی دار بود و تفاوت ژنوتیپ ها در حفظ صفات رشدی و شاخص های فیزیولوژیکی در شرایط تنش مشاهده شد. در ژنوتیپ های بررسی شده، اراک (۸۰۸) در میانگین درصد جوانه زنی، شاخص بنیه بذر و درصد سبز شدن، عملکرد مطلوب تری نشان داد، در حالی که یزد (۶-۶) مقادیر پایین تری از برخی شاخص های استقرار اولیه را داشت. در مجموع، استفاده هم زمان از شاخص های رشدی و بیوشیمیایی در مرحله گیاهچه می تواند رویکردی کارآمد برای ارزیابی پاسخ ژنوتیپ های شیرین بیان به کمبود آب باشد.

✉ mtakhavan@ut.ac.ir

Journal homepage: jmpb.znu.ac.ir

*نویسنده مسئول: مجتبی اخوان ارمکی



تحلیل واکنش چهار ژنوتیپ شیرین بیان (*Glycyrrhiza glabra*) به کمبود آب با تکیه بر نشانگرهای جوانه‌زنی، رشد اولیه و تنظیمات بیوشیمیایی در شرایط کنترل شده/ اخوان ارمکی؛ مجتبی، نفیسی؛ ابراهیم، هاشمی، ملیکا.

مقدمه

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد، نمو و تولید محصولات گیاهی در بسیاری از مناطق جهان، به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. تغییرات اقلیمی و افزایش دمای جهانی نیز موجب تشدید کمبود منابع آب و افزایش فراوانی دوره‌های خشکسالی شده است (IPCC 2022, FAO 2023). این تنش با تأثیر بر فرایندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان، موجب کاهش جوانه‌زنی، اختلال در رشد ریشه و اندام‌های هوایی و در نهایت، کاهش عملکرد گیاهان می‌شود (Gupta et al., 2020). در شرایط کمبود آب، گیاهان با کاهش پتانسیل آب سلولی، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش فتوسنتز و تغییر در متابولیسم کربوهیدرات‌ها مواجه می‌شوند (Farooq et al., 2017). گیاهان برای مقابله با تنش خشکی سازوکارهای مختلفی را به کار می‌گیرند که از جمله آن‌ها می‌توان به تغییرات مورفولوژیکی، تنظیم اسمزی و فعال شدن سیستم‌های دفاعی اشاره کرد. یکی از مهم‌ترین پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاهان در شرایط تنش، تجمع ترکیبات اسمولیتی، مانند پرولین و قندهای محلول است که نقش مهمی در حفظ ساختار پروتئین‌ها، پایداری غشاها و تنظیم فشار اسمزی سلول دارند (Szabados and Savouré, 2010). همچنین کاهش محتوای کلروفیل و اختلال در سیستم فتوسنتزی، از پیامدهای رایج تنش خشکی در بسیاری از گونه‌های گیاهی است (Flexas et al., 2004). مطالعات مختلف نشان داده‌اند که افزایش پرولین و قندهای محلول می‌تواند به‌عنوان یکی از شاخص‌های فیزیولوژیکی تحمل به خشکی در گیاهان مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور در دو شرایط آزمایشگاه و گلخانه انجام گرفت. ژنوتیپ‌های مورد آزمایش از گونه دارویی شیرین بیان شامل البرز (۳۰۴)، یزد (۶-۶)، کردستان (۶۰۰۰) و اراک (۸۰۸) بودند. بذر این ژنوتیپ‌ها از بخش بانک ژن در مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور تهیه شدند.

۱- آزمایشگاه

تیمار تنش خشکی به مدت ۳۱ روز با افزودن ۵ میلی‌لیتر محلول پلی‌اتیلن گلیکول ۳۰۰۰ به پتری‌دیش‌های حاوی

(Hasanuzzaman et al., 2019). گزارش شده است که تنش خشکی می‌تواند موجب کاهش رشد گیاهچه، کاهش محتوای کلروفیل و افزایش تجمع ترکیبات اسمولیتی در گیاهان شود (حسینی و همکاران، ۱۳۹۹). همچنین بررسی‌های انجام شده بر گیاهان دارویی نشان داده است که پاسخ‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی این گیاهان به شدت تنش و تفاوت‌های ژنتیکی بین ژنوتیپ‌ها وابسته است (احمدی و همکاران، ۱۴۰۰). به همین دلیل، شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی می‌تواند نقش مهمی در مدیریت کشت گیاهان دارویی در مناطق خشک و نیمه‌خشک داشته باشد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۹).

گیاه شیرین بیان (*G. glabra*) یکی از مهم‌ترین گونه‌های خانواده Fabaceae است که کاربردهای وسیعی در زمینه بهداشتی، دارویی و صنایع غذایی دارد. این گیاه با ریشه‌های غنی از گلیسیریزین، فلاونوئیدها و ساپونین‌ها، خواص دارویی متعددی از جمله ضدالتهابی و ضد میکروبی دارد و در صنایع داروسازی و غذایی کاربرد گسترده‌ای یافته است؛ علاوه بر این، قابلیت تثبیت نیتروژن و بهبود حاصلخیزی خاک، این گیاه را به گزینه‌ای ارزشمند برای توسعه کشاورزی پایدار تبدیل کرده است (Naseri et al., 2022).

هدف از این پژوهش، بررسی خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاهچه چهار ژنوتیپ *G. glabra* در شرایط تنش خشکی در دو محیط آزمایشگاه و گلخانه و شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل‌تر به این تنش بوده است.

شرایط گلخانه: آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور ژنوتیپ (۴ سطح) و تنش خشکی (۴ سطح) و با چهار تکرار اجرا شد. **شرایط آزمایشگاه:** آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور ژنوتیپ (۴ سطح) و تنش خشکی (۴ سطح) و با چهار تکرار اجرا شد.

بذرهای در محیط ژرمیناتور اعمال گردید (Michel and Kaufmann, 1973; Verslues et al., 2006).

۱۰ تایی) انتخاب و در پتری‌دیش‌ها قرار داده شدند (ISTA, 2023). برای جلوگیری از عبور هوا به داخل پتری‌دیش، با پارافیلیم در پتری‌دیش‌ها بسته شد و سپس پتری‌دیش‌ها به محیط ژرمیناتور با دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد (دمای بهینه برای سبز شدن شیرین‌بیان بر اساس پیش‌آزمایش‌های اولیه و منابع موجود) و با ۱۶ ساعت روشنائی و ۸ ساعت تاریکی (ریتیم نوری استاندارد ۲۴ ساعته) انتقال داده شدند (ISTA, 2023). نمونه‌ها به مدت ۳۱ روز در ژرمیناتور نگهداری (مدت‌زمان کافی برای تکمیل فرایند سبز شدن و رشد اولیه گیاهچه در شیرین‌بیان بر اساس پیش‌آزمایش‌ها) و سپس فاکتورهای مورد نظر اندازه‌گیری شدند.

بذرهایی که زودتر جوانه زده‌اند، سهم بیشتری در مقدار شاخص دارند (Maguire, 1962).

طول ریشه‌چه و ساقه‌چه: اندازه‌گیری با خط‌کش میلی‌متری از محل اتصال بذر تا انتهای ریشه‌چه و ساقه‌چه.

نسبت طول ریشه‌چه به ساقه‌چه: محاسبه از تقسیم طول ریشه‌چه بر طول ساقه‌چه.

وزن تر و خشک گیاهچه: توزین گیاهچه‌ها با ترازوی دقیق (۰/۰۰۱ گرم) بلافاصله پس از خارج‌سازی (وزن تر) و پس از خشک کردن در آون ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت (وزن خشک) (Rashid et al., 2015).

سانتی‌متر خاک نرم و الک‌شده روی آن‌ها ریخته شد. تنش گلدانی به روش وزنی اعمال شد. ابتدا ظرفیت زراعی (FC) تعیین و سپس تیمارهای ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد FC اعمال گردید. رطوبت هر گلدان دو بار در هفته با توزین کنترل و در صورت نیاز، با افزودن آب تا وزن متناظر با سطح رطوبتی تیمار تنظیم شد؛ بنابراین، منظور از «دو بار در هفته»، دفعات پایش و تنظیم رطوبت بود و تیمار خشکی به‌صورت پیوسته در سطح تعیین‌شده حفظ شد (Blum, 2011; Verslues et al., 2006). پس از یک ماه، از هر گلدان، ۴ گیاهچه به‌صورت تصادفی برداشت و صفات مورد نظر اندازه‌گیری شدند.

پتانسیل اسمزی محلول‌های پلی‌اتیلن گلیکول ۳۰۰۰ با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد (Michel and Kaufmann, 1973):

$$\Psi_s = -(1.18 \times 10^{-2}) \times C - (1.18 \times 10^{-4}) \times C^2 + (2.67 \times 10^{-4}) \times C \times T + (8.39 \times 10^{-7}) \times C^2 \times T$$

که در آن Ψ_s پتانسیل اسمزی (بار)، C غلظت PEG (گرم بر لیتر) و T دمای محیط (درجه سانتی‌گراد) است. بر این اساس، غلظت‌های ۱۵۰، ۲۴۰ و ۳۲۰ گرم در لیتر، به‌ترتیب پتانسیل‌های اسمزی ۳-، ۶- و ۹- بار را ایجاد نمودند.

از هر ژنوتیپ، ۳۰۰ بذر خالص جداسازی شد و پس از ضدعفونی، از میان آن‌ها ۴۰ بذر سالم و یکنواخت (۴ تکرار

صفات اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه:

درصد جوانه‌زنی: شمارش تعداد بذرهای جوانه‌زده (ظهور ریشه‌چه به طول حداقل ۲ میلی‌متر) در روزهای مختلف و محاسبه درصد نهایی در پایان دوره (ISTA, 2023).

سرعت جوانه‌زنی: سرعت جوانه‌زنی بر اساس شاخص سرعت جوانه‌زنی Maguire (۱۹۶۲) محاسبه شد. برای هر تکرار، تعداد بذرهای جوانه‌زده در هر روز شمارش و شاخص سرعت جوانه‌زنی از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$SGI = \Sigma(G_i / D_i)$$

که در آن SGI شاخص سرعت جوانه‌زنی، G_i تعداد بذرهای جوانه‌زده در روز i ام و D_i تعداد روزهای سپری‌شده از شروع آزمون تا روز i ام است؛ بنابراین،

۲- گلخانه

در ابتدا از هر ژنوتیپ، ۴ تکرار ۳۰ تایی بذر (با هدف ارزیابی سبز شدن و رشد گیاهچه در شرایط خاک) در عمق ۳ سانتی‌متری خاک در داخل هر گلدان کاشته شدند. گلدان‌های پلاستیکی، دارای قطر ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۱ سانتی‌متر و ۳ سوراخ برای زهکشی بودند. برای تسهیل خروج آب، مقداری شن درشت با قطر ۱۰ تا ۱۲ میلی‌متر در ته گلدان‌ها قرار گرفت. خاک برای حذف سنگ، کلوخ و سایر مواد اضافی سرند شد تا مقدار خاک خالص در همه گلدان‌ها یکسان باشد. ترکیب خاک گلدان‌ها شامل یک‌چهارم کود پوسیده گیاهی، یک‌چهارم ماسه و یک‌دوم خاک زراعی بود. پس از کاشت بذر، یک

۳- اندازه‌گیری خصوصیات فیزیولوژیکی در گلخانه

تحلیل واکنش چهار ژنوتیپ شیرین بیان (*Glycyrrhiza glabra*) به کمبود آب با تکیه بر نشانگرهای جوانه‌زنی، رشد اولیه و تنظیمات بیوشیمیایی در شرایط کنترل‌شده / اخوان ارمکی؛ مجتبی، نفیسی؛ ابراهیم، هاشمی، ملیکا.

دمای گلخانه در طول دوره آزمایش بین ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد در روز و ۱۵ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد در شب متغیر بود. رطوبت نسبی حدود ۶۰-۷۰ درصد و شدت نور طبیعی با فتوسنتز فعال (PAR) حدود ۸۰۰-۱۰۰۰ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه بود. گیاهان به مدت یک ماه در شرایط مذکور نگهداری شدند.

برای اندازه‌گیری شاخص کلروفیل از دستگاه کلروفیل‌سنج ساخت شرکت Minolta ژاپن استفاده گردید (Minolta, 1989; Ling et al., 2011).

کاملاً توسعه‌یافته از انتهای ساقه (برگ جوان ولی کامل) استفاده شد. اندازه‌گیری‌ها در زمان نمونه‌برداری از همه سطوح رطوبتی، شامل تیمار شاهد و تیمارهای تنش انجام گرفت و از هر گلدان، ۴ برگ به‌طور تصادفی اندازه‌گیری شد. محتوای قند گیاهان تحت تنش خشکی و گیاهان شاهد (بدون تنش) با استفاده از روش آنترن و دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. تیمار شاهد در شرایط رطوبت ظرفیت زراعی نگهداری شد و نمونه‌برداری از برگ‌های شاهد هم‌زمان با سایر تیمارها انجام گرفت.

نتایج

۱- درصد جوانه‌زنی (آزمایشگاه) و درصد سبز شدن (گلخانه)

نتایج تجزیه واریانس نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار (در سطح ۱ درصد) تنش خشکی، ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ × تنش بر درصد جوانه‌زنی در آزمایشگاه و درصد سبز شدن در گلخانه است (جدول ۱ و ۴). مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل نشان داد که در شرایط بدون تنش، بالاترین درصد جوانه‌زنی مربوط به ژنوتیپ اراک (۸۰۸) با ۹۵ درصد و پایین‌ترین مربوط به ژنوتیپ مازندران (۳۱۵۱) با ۸۲ درصد بود. با افزایش شدت تنش به سطح ۹- بار (در آزمایشگاه) و ۷۵٪ FC (در گلخانه)، درصد جوانه‌زنی در ژنوتیپ اراک به‌ترتیب به ۵۲ و ۴۸ درصد کاهش یافت، در حالی که این مقادیر برای ژنوتیپ مازندران به ۳۸ و ۳۵ درصد رسید. این نتایج نشان می‌دهد که ژنوتیپ اراک با حفظ بهتر درصد جوانه‌زنی در شرایط تنش شدید، متحمل‌ترین ژنوتیپ و ژنوتیپ مازندران با کاهش چشمگیر اثر متقابل ژنوتیپ × تنش برای شاخص بنیه بذر در هر دو محیط معنی‌دار بود (جدول ۱ و ۴). در شرایط بدون تنش،

جوانه‌زنی، حساس‌ترین ژنوتیپ به تنش خشکی بودند (جدول‌های ۲ و ۵).

۲- طول گیاهچه و نسبت طول ریشه‌چه به ساقه‌چه
اثر متقابل ژنوتیپ × تنش خشکی بر طول گیاهچه و نسبت طول ریشه‌چه به ساقه‌چه در هر دو محیط معنی‌دار بود (جدول ۱ و ۴). در شرایط تنش شدید (۹- بار و ۷۵٪ FC)، ژنوتیپ اراک با طول گیاهچه ۲/۵۱ میلی‌متر (آزمایشگاه) و ۲۸۹ میلی‌متر (گلخانه)، عملکرد بهتری نسبت به ژنوتیپ مازندران با طول گیاهچه ۷/۳۸ میلی‌متر (آزمایشگاه) و ۲۳۴ میلی‌متر (گلخانه) داشت. همچنین نسبت طول ریشه‌چه به ساقه‌چه در ژنوتیپ مازندران با افزایش تنش، افزایش بیشتری نشان داد که نشان‌دهنده تلاش این ژنوتیپ برای جذب آب از طریق افزایش رشد ریشه در شرایط تنش است؛ هرچند این افزایش نتوانست افت سایر صفات را جبران کند (جدول‌های ۲ و ۵).

۳- شاخص بنیه بذر

ژنوتیپ‌های اراک (۱۴۰/۰۵) و کردستان (۹۴/۹۲)، بالاترین و ژنوتیپ مازندران (۶۲/۷۷)، پایین‌ترین شاخص بنیه بذر را

اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ تنش بر محتوای پرولین، قند و کلروفیل در گلخانه معنی‌دار بود (جدول ۴). با افزایش تنش خشکی، محتوای پرولین و قند در تمام ژنوتیپ‌ها افزایش یافت؛ اما میزان افزایش در ژنوتیپ‌های مقاوم بیشتر بود. در تنش ۷۵٪ FC، ژنوتیپ فیروزکوه با ۱/۹۶ میکروگرم بر گرم وزن خشک، بالاترین و ژنوتیپ یزد با ۱/۴۹ میکروگرم بر گرم وزن خشک، پایین‌ترین میزان پرولین را داشتند. همچنین ژنوتیپ اراک با ۰/۵۰ میکروگرم بر گرم وزن خشک و ژنوتیپ مازندران با ۰/۴۹ میکروگرم بر گرم وزن خشک، به‌ترتیب بیشترین و کمترین میزان قند را در تنش شدید نشان دادند. محتوای کلروفیل در تنش ۷۵٪ FC، از ۴۳/۰۵ در شرایط بدون تنش به ۱۰/۴۹ کاهش یافت. با این حال، ژنوتیپ فیروزکوه با ۱۲/۳۷ و ژنوتیپ اراک با ۱۱/۴۵، بالاترین میزان کلروفیل را حفظ کردند، در حالی که ژنوتیپ مازندران با ۸/۹۲ کمترین میزان کلروفیل را در تنش شدید داشت (جدول‌های ۵ و ۶).

داشتند. در تنش شدید (۹- بار)، شاخص بنیه بذر ژنوتیپ اراک به ۴۰/۴۱ کاهش یافت، در حالی که این مقدار برای ژنوتیپ مازندران به ۱۲/۸۳ رسید. این نتایج نشان می‌دهد که ژنوتیپ اراک با حفظ بهتر بنیه بذر در شرایط تنش، مقاومت بیشتری به خشکی دارد (جدول‌های ۳ و ۶).

۴- وزن خشک و نسبت وزن خشک به وزن تر گیاهچه

اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ تنش بر وزن خشک و نسبت وزن خشک به وزن تر گیاهچه در هر دو محیط معنی‌دار بود (جدول ۱ و ۴). در شرایط تنش شدید، وزن خشک گیاهچه در ژنوتیپ اراک نسبت به ژنوتیپ مازندران کمتر کاهش یافت (به‌ترتیب ۰/۰۳ و ۰/۰۱ گرم در آزمایشگاه). نسبت وزن خشک به وزن تر گیاهچه در تمام ژنوتیپ‌ها با افزایش تنش افزایش یافت؛ اما این افزایش در ژنوتیپ مازندران بیشتر بود (از ۰/۱۲ به ۰/۲۳ در آزمایشگاه) که نشان‌دهنده کاهش بیشتر وزن تر و تجمع مواد خشک در پاسخ به تنش است (جدول‌های ۲ و ۵).

۵- محتوای پرولین، قند و کلروفیل

جدول ۱- مقادیر درجه آزادی و میانگین مربعات صفات اندازه‌گیری‌شده در *G.glabra* در محیط آزمایشگاه

منابع تغییرات	درجه آزادی	درصد	سرعت	طول ساقه‌چه	طول ریشه‌چه	نسبت ریشه‌چه	طول گیاهچه	شاخص بنیه بذر	وزن تر گیاهچه	وزن خشک گیاهچه	نسبت خشک خشک
تیمار خشکی	۳	۶۳۳۴**	۱۸۲۳**	۹۸۲۴**	۹۳۰۹**	۰/۱۰۶۳ ^{NS}	۳۸۰۸۱**	۴۴۸۴۰**	۰/۰۳۶۹**	۰/۰۰۰۰۳ ^{NS}	۰/۰۳۷۷**
ژنوتیپ	۳	۴۴۹۳**	۱۴۹۲**	۳۷۶*	۱۲۲/۶ ^{NS}	۰/۳۲۵۹*	۸۹۵*	۷۶۹۳**	۰/۰۱۴۸**	۰/۰۰۱۰**	۰/۰۴۵۸**
ژنوتیپ در خشکی	۹	۵۵۸**	۹۹/۶**	۱۷۷ ^{NS}	۴۲۱/۷**	۰/۲۸۱۶**	۸۷۷/۴**	۱۰۳۲**	۰/۰۰۱۶*	۰/۰۰۰۱**	۰/۰۰۸۱**
خطا	۴۸	۱۲۲/۷	۲۷/۸۸	۱۱۰/۷	۸۸/۲۹	۰/۱۰۰	۲۹۳/۳	۲۴۸/۶	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱۹
ضرب تغییرات		۱۶/۰۷	۱۹/۷۲	۲۰/۰۹	۱۸/۴۹	۳۰/۶۶	۱۶/۵۹	۱۹/۸۷	۱۶/۳۱	۱۶/۶۷	۲۶/۳۹

*** = معنی‌دار در سطح ۱ درصد ** = معنی‌دار در سطح ۵ درصد NS؛ غیرمعنی‌دار

جدول ۲- مقایسه میانگین چهار تیمار تنش خشکی برای صفات اندازه‌گیری‌شده در *G.glabra* در محیط آزمایشگاه

تیمار خشکی	درصد	سرعت	طول ساقه‌چه	طول ریشه‌چه	نسب ریشه‌چه	طول گیاهچه	شاخص بنیه بذر	وزن تر گیاهچه	وزن خشک گیاهچه	نسبت خشک خشک
بدون تنش	a۸۹	a۳۷/۲۷	a۷۷/۵۳	a۷۸/۲۹	a۱/۰۱	a۱۵۵/۸۱	a۱۴۰/۰۵	a۰/۲۲	a۰/۰۳	c۰/۱۲
۳- بار	b۷۹/۷۵	b۳۳/۳۹	b۶۶/۰۱	b۶۱/۶۹	a۱/۰۱	b۱۲۷/۷۱	b۱۰۳/۴۰	b۰/۱۷	a۰/۰۲	c۰/۱۴
۶- بار	c۶۳	c۲۲/۷۲	c۴۴/۵۴	c۳۹/۹۳	a۰/۹۷	c۸۴/۴۷	c۵۳/۴۴	c۰/۱۳	a۰/۰۲	b۰/۱۹
۹- بار	d۴۴	d۱۳/۶۸	d۲۱/۳۶	d۲۳/۳۶	a۱/۱۵	d۴۴/۷۱	d۲۰/۴۱	c۰/۱۲	a۰/۰۳	a۰/۲۳

میانگین تیمارهایی که دارای حروف مشابهی هستند، بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن، ۵ درصد از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

تحلیل واکنش چهار ژنوتیپ شیرین بیان (*Glycyrrhiza glabra*) به کمبود آب با تکیه بر نشانگرهای جوانه‌زنی، رشد اولیه و تنظیمات بیوشیمیایی در شرایط کنترل‌شده/ اخوان ارمکی؛ مجتبی، نفیسی؛ ابراهیم، هاشمی، ملیکا.

جدول ۳- مقایسه میانگین صفات مربوط به سبز شدن در ژنوتیپ‌های *G. glabra* در محیط آزمایشگاه

نام	درصد	سرعت	طول	نسب ریشه‌چه	طول	شاخص	وزن	وزن خشک	وزن خشک
جوانه‌زنی	جوانه‌زنی	ساقه‌چه	ریشه‌چه	به ساقه‌چه	گیاهچه	بنیه بذر	تر گیاهچه	گیاهچه	به تر گیاهچه
Alborz (304)	c55/75	c21/93	b48/15	a49/73	ab1/11	b97/88	b62/77	bc0/15	c0/02
Yazd (6-6)	c54	d16/03	b48/99	a47/63	a1/20	b96/63	b58/30	b0/16	a0/03
Kordestan (6000)	b78	b13/39	ab53/61	a51/84	b0/93	ab105/54	a94/92	c0/13	d0/01
Arak (808)	a88	a37/71	a58/68	a54/08	b0/90	a112/75	a101/31	a0/20	b0/03

میانگین تیمارهایی که دارای حروف مشابهی هستند، بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن، ۵ درصد از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

جدول ۴- مقادیر درجه آزادی و میانگین مربعات صفات اندازه‌گیری‌شده در چهار ژنوتیپ گونه *G. glabra* در شرایط تنش خشکی

در محیط گلخانه

منابع تغییرات	درجه آزادی	درصد سبز شدن	طول ریشه‌چه	طول ساقه‌چه	طول گیاهچه	شاخص بنیه بذر	نسب ریشه‌چه به ساقه‌چه	وزن تر گیاهچه	وزن خشک گیاهچه	شاخص خشک به تر گیاهچه	میزان کلروفیل	میزان پرولین	میزان قند
تیمار خشکی	۳	۵۳۶/۳۳**	۴۸۷۰۰**	۳۰۰۰۳۷**	۵۸۵۷۸۵**	۸۲۴۱۷۷**	۰/۱۷**	۶۳۶**	۳۵/۵۳**	۰/۰۷**	۳۸/۳۹**	۳۴۶۸**	۰/۰۸**
ژنوتیپ	۳	۸۴۱**	۵۶۴۶**	۲۶۲۱۵**	۱۲۷۳۴**	۴۸۳۸۳**	۰/۱۹**	۳۱/۴۹*	۷/۷۳**	۰/۰۲**	۹/۱۸**	۱۲۴**	۰/۰۵**
ژنوتیپ در خشکی	۹	۵۴/۳۳ ^{ns}	۳۳۵۳**	۶۲۰۷**	۹۹۳۰**	۶۷۸۴*	۰/۰۲*	۱۱/۱۲ ^{ns}	۲/۹۸**	۰/۰۱**	۰/۶۶ ^{ns}	۴۳/۶۳**	۰/۰۰۷ ^{ns}
خطا	۴۸	۷۳/۱۱	۶۰۲	۹۲۲	۱۹۵۳	۳۱۷۶	۰/۱۴	۷/۵۳	۰/۳۰	۰/۰۰۴	۰/۹۶	۱۵/۴۱	۰/۰۰۱
ضریب تغییرات		۱۱/۱۷	۱۴/۷۱	۱۰/۱۰	۹/۴۵	۱۶/۳۳	۱۹/۶۹	۳۴/۵۵	۲۶/۸۸	۲۳/۶۶	۲۲/۵۵	۱۲/۸۹	۲/۵۱

** = معنی‌دار در سطح ۱ درصد * = معنی‌دار در سطح ۵ درصد ns = غیرمعنی‌دار

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های اثر سطوح خشکی برای صفات مورد سنجش در چهار ژنوتیپ گونه *G. glabra* در شرایط تنش

خشکی در محیط گلخانه

تیمار خشکی	درصد سبز شدن	طول ریشه‌چه	طول ساقه‌چه	طول گیاهچه	شاخص بنیه بذر	نسب ریشه‌چه به ساقه‌چه	وزن تر گیاهچه	وزن خشک گیاهچه	شاخص خشک به تر گیاهچه	میزان کلروفیل	میزان پرولین	میزان قند
۰	a83/66	a237	a455	a692	a616	b0/55	a15/54	a3/93	b0/26	a4/93	a43/05	d1/45
۲۵	a80/33	b178	b369	b548	b436	b0/49	10/58 b	b2/53	b0/23	b3/56	b39/88	c1/54
۵۰	b55	c141	c225	c366	c223	a0/66	c3/87	c1/07	b0/28	c2/06	c28/37	b1/58
۷۵	b42	d109	d152	d261	d104	a0/72	d1/78	d0/66	a0/38	c1/50	d10/49	a1/70

میانگین تیمارهایی که دارای حروف مشابهی هستند، بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن، ۵ درصد از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

جدول ۶- مقایسه میانگین صفات مربوط به سبز شدن در ژنوتیپ‌های *G. glabra* در محیط گلخانه

نام	درصد سبز شدن	طول	طول	طول	شاخص	نسبت	وزن تر	وزن	وزن خشک شاخص	میزان	میزان	میزان
شدن	ریشه‌چه ساقه‌چه	ریشه‌چه	بنیه بذر	ریشه‌چه به	گیاهچه	خشک	به تر	پنجه‌زنی	کلروفیل	پرولین	قند	
Alborz (304)	c۶۴	a۱۹۳	c۲۶۶	b۴۵۹	b۲۹۴	a۰/۷۱	a۹/۱۹	a۳/۰۵	a۰/۳۴	a۴/۱۲	b۲۶/۶۰	a۰/۴۹ b۱/۶۱
Yazd (6-6)	c۵۱	b۱۴۹	a۳۵۸	a۵۰۸	b۳۰۱	c۰/۴۵	b۶/۶۰	c۱/۴۸	c۰/۲۴	b۲/۵۶	a۳۰/۱۷	b۰/۲۱ d۱/۴۷
Kordestan (6000)	b۷۳	b۱۶۲	b۲۹۱	b۴۵۴	a۳۸۳	b۰/۶۱	b۶/۸۶	bc۱/۷۰	cb۰/۲۸	b۲/۸۷	a۳۲/۶۴	b۰/۲۰ a۱/۶۶
Arak (808)	a۸۵	b۱۶۰	۲۸۵	b۴۴۶	a۴۰۱	ab۰/۶۴	a۹/۱۱	b۱/۹۶	ab۰/۳	b۲/۵	a۳۲/۳۷	a۰/۵۰ c۱/۵۳
	bc											

میانگین تیمارهایی که دارای حروف مشابهی هستند، بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن، ۵ درصد از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

بحث

تنش اکسیداتیو، به حفظ عملکرد سلولی در شرایط کم‌آبی کمک می‌کند

(Bates *et al.*, 1973; Farooq *et al.*, 2009; Ashraf and Foolad, 2007).

از سوی دیگر، تفاوت مشاهده‌شده میان ژنوتیپ‌های مورد بررسی نشان‌دهنده وجود تنوع ژنتیکی قابل توجه در پاسخ به تنش خشکی در گونه شیرین بیان است. این تنوع ژنتیکی می‌تواند نقش مهمی در شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل و استفاده از آن‌ها در برنامه‌های اصلاحی ایفا کند. ژنوتیپ‌هایی که در شرایط تنش توانایی حفظ بهتر صفات رشدی و افزایش بیشتر ترکیبات تنظیم‌کننده اسمزی را دارند، معمولاً از کارایی بالاتری در حفظ وضعیت آبی سلول‌ها و پایداری فرایندهای فیزیولوژیکی برخوردار هستند؛ بنابراین، ارزیابی هم‌زمان شاخص‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی در مرحله گیاهچه می‌تواند روشی مؤثر برای غربالگری ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی در گیاهان دارویی باشد و به توسعه کشت پایدار این گونه‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمک کند (Blum, 2011; Chaves *et al.*, 2003; Verslues *et al.*, 2006).

در این مطالعه، ژنوتیپ اراک (۸۰۸) به‌عنوان متحمل‌ترین و ژنوتیپ مازندران (۳۱۵۱) به‌عنوان حساس‌ترین ژنوتیپ به تنش خشکی شناسایی شدند. تفاوت اصلی بین این دو ژنوتیپ در شاخص‌های زیر مشاهده گردید: (۱) درصد جوانه‌زنی در تنش شدید: ژنوتیپ اراک ۵۲ درصد در

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش خشکی تأثیر معنی‌داری بر بسیاری از صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاهچه‌های شیرین بیان داشت. کاهش درصد جوانه‌زنی، کاهش طول ریشه و ساقه‌چه و همچنین کاهش محتوای کلروفیل در شرایط تنش، ازجمله مهم‌ترین تغییرات بود. این نتایج نشان می‌دهد که کمبود آب می‌تواند به‌طور مستقیم بر فرایندهای اولیه رشد گیاهچه اثر بگذارد و از استقرار موفق گیاه جلوگیری کند. کاهش رشد اندام‌های رویشی در شرایط تنش خشکی در بسیاری از گیاهان گزارش شده است و به کاهش تقسیم و طویل شدن سلول‌ها در اثر کاهش پتانسیل آب نسبت داده می‌شود (Farooq *et al.*, 2017).

کاهش صفات رشدی مانند طول ریشه‌چه و ساقه‌چه در شرایط تنش خشکی را می‌توان به کاهش پتانسیل آب در محیط رشد و محدود شدن جذب آب توسط بذر و گیاهچه نسبت داد. کاهش دسترسی به آب باعث اختلال در فرایندهای فیزیولوژیکی، ازجمله تقسیم و طویل شدن سلولی، کاهش فعالیت آنزیم‌ها و محدود شدن سنتز ترکیبات ضروری برای رشد می‌شود. در چنین شرایطی، بسیاری از گیاهان با فعال‌سازی سازوکارهای سازگاری تلاش می‌کنند تعادل اسمزی سلول‌ها را حفظ کنند. افزایش تجمع پرولین و قندهای محلول که در این پژوهش نیز مشاهده شد، یکی از مهم‌ترین پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاهان در برابر تنش خشکی محسوب می‌شود. این ترکیبات با نقش تنظیم‌کننده‌های اسمزی، پایدارکننده ساختار غشاهای پروتئین‌ها و همچنین کاهش‌دهنده‌های آسیب‌های ناشی از

تحلیل واکنش چهار ژنوتیپ شیرین بیان (*Glycyrrhiza glabra*) به کمبود آب با تکیه بر نشانگرهای جوانه‌زنی، رشد اولیه و تنظیمات بیوشیمیایی در شرایط کنترل‌شده / اخوان ارمکی؛ مجتبی، نفیسی؛ ابراهیم، هاشمی، ملیکا.

مقابل ژنوتیپ مازندران ۳۸ درصد در آزمایشگاه؛ ۲) شاخص بنیه بذر در تنش شدید: اراک ۴۰/۴۱ در مقابل مازندران ۱۲/۸۳؛ ۳) محتوای قند در تنش شدید: اراک ۰/۵۰ در مقابل مازندران ۰/۴۹ میکروگرم بر گرم وزن خشک و ۴) محتوای کلروفیل در تنش شدید: اراک ۱۱/۴۵ در مقابل مازندران ۸/۹۲. این تفاوت‌ها نشان می‌دهند که ژنوتیپ اراک با حفظ بهتر صفات رشدی و افزایش بیشتر ترکیبات تنظیم‌کننده اسمزی (به‌ویژه قندهای محلول)، سازگاری بالاتری با شرایط تنش دارد؛ در مقابل، ژنوتیپ مازندران با کاهش شدیدتر شاخص‌های رشدی و تجمع کمتر قندهای محلول، حساسیت بیشتری به کمبود آب دارد.

یکی از مهم‌ترین پاسخ‌های مشاهده‌شده در این پژوهش، افزایش تجمع پرولین در شرایط تنش خشکی بود. پرولین به‌عنوان اسمولیتی سازگار، نقش مهمی در تنظیم فشار اسمزی، حفاظت از ساختار غشاها و کاهش آسیب‌های ناشی از تنش اکسیداتیو دارد (Szabados and Savouré, 2010). افزایش محتوای پرولین در شرایط تنش خشکی در بسیاری از گونه‌های گیاهی گزارش شده است و به‌عنوان یکی از شاخص‌های فیزیولوژیکی تحمل به خشکی شناخته می‌شود (Hasanuzzaman et al., 2019). نتایج مطالعات داخلی نیز نشان داده‌اند که تجمع پرولین در شرایط تنش خشکی می‌تواند به‌عنوان یکی از مکانیسم‌های سازگاری گیاهان با کمبود آب باشد (صالحی و کاظمی، ۱۳۹۸).

در این مطالعه، تنش خشکی همچنین موجب کاهش محتوای کلروفیل در گیاهچه‌ها شد. کاهش کلروفیل ممکن است به دلیل تخریب رنگیزه‌های فتوسنتزی، کاهش سنتز کلروفیل و یا افزایش فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده کلروفیل در شرایط تنش باشد (Flexas et al., 2004). کاهش کلروفیل در شرایط تنش خشکی در مطالعات متعددی گزارش شده است و به‌عنوان یکی از شاخص‌های آسیب فتوسنتزی در گیاهان تحت تنش شناخته می‌شود (Gupta et al., 2020). پژوهش‌های انجام‌شده در ایران نیز کاهش محتوای کلروفیل در گیاهان تحت تنش خشکی را تأیید کرده‌اند (رحیمی و همکاران، ۱۴۰۱).

همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که پاسخ ژنوتیپ‌های مختلف شیرین بیان به تنش خشکی متفاوت بود. برخی ژنوتیپ‌ها توانستند با حفظ بهتر صفات رشدی و افزایش تجمع ترکیبات اسمولیتی، تحمل بیشتری نسبت به تنش نشان دهند. این تفاوت‌ها احتمالاً ناشی از تنوع ژنتیکی موجود بین ژنوتیپ‌ها و تفاوت در سازوکارهای فیزیولوژیکی سازگاری با تنش خشکی است. مطالعات مختلف نیز نشان داده‌اند که تفاوت‌های ژنتیکی بین ژنوتیپ‌ها می‌تواند نقش مهمی در تعیین میزان تحمل گیاهان به تنش‌های محیطی داشته باشد (Blum, 2011).

یکی از محدودیت‌های این مطالعه، تعداد کمتر از استاندارد بذرهای مورد استفاده در آزمایشگاه (۴۰ بذر در مقایسه با حداقل ۴۰۰ بذر توصیه‌شده توسط ISTA) بود که می‌تواند بر قدرت تعمیم‌پذیری نتایج تأثیرگذار باشد. با این حال، نتایج این پژوهش مقدماتی می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای طراحی آزمایش‌های گسترده‌تر با تعداد بذر بیشتر و مطابق با استانداردهای بین‌المللی، مورد استفاده قرار گیرد. به‌طور کلی، نتایج این تحقیق نشان داد که بررسی صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی می‌تواند ابزار مناسبی برای ارزیابی تحمل به خشکی در ژنوتیپ‌های مختلف گیاهان دارویی باشد. شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل می‌تواند در برنامه‌های اصلاحی و توسعه کشت این گیاه در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش خشکی تأثیر معنی‌داری بر ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاهچه‌های چهار ژنوتیپ گونه دارویی شیرین بیان (*G. glabra*) دارد. اعمال سطوح مختلف تنش خشکی موجب کاهش صفاتی نظیر درصد جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه و همچنین محتوای کلروفیل شد که نشان‌دهنده حساسیت مرحله استقرار اولیه گیاه به کمبود آب است. در مقابل، افزایش میزان تجمع پرولین و قندهای محلول در شرایط تنش نشان داد که این ترکیبات به‌عنوان شاخص‌های مهم پاسخ‌های سازگاری گیاه در تنظیم اسمزی و کاهش اثرات مخرب تنش خشکی عمل می‌کنند.

برخی ژنوتیپ‌ها کاهش شدیدتر شاخص‌های رشدی مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهد که پاسخ به تنش خشکی در این گونه به‌شدت وابسته به ویژگی‌های ژنتیکی ژنوتیپ‌ها است.

خشکی در گونه شیرین‌بیان مورد استفاده قرار گیرد. چنین اطلاعاتی می‌تواند در برنامه‌های اصلاحی، مدیریت کشت و توسعه کشت این گیاه دارویی ارزشمند در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور، نقش مهمی ایفا کند.

مقایسه ژنوتیپ‌های مورد بررسی نیز نشان‌دهنده وجود تنوعی قابل توجه در میزان تحمل به تنش خشکی بود. برخی ژنوتیپ‌ها توانستند با حفظ بهتر صفات رشدی و افزایش بیشتر ترکیبات تنظیم‌کننده اسمزی، سازگاری بالاتری با شرایط تنش نشان دهند، در حالی که در مجموع، نتایج این تحقیق نشان‌دهنده آن است که استفاده هم‌زمان از شاخص‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی در مرحله گیاهچه می‌تواند به‌عنوان روشی مؤثر برای شناسایی و غربالگری ژنوتیپ‌های متحمل به

منابع

- Ahmadi, H., Rezaei, M., and Karimi, A. (2021). The effect of drought stress on some physiological and biochemical traits of medicinal plants. *Iranian Journal of Crop Research*, 18(2), 145-156. (In Persian)
- Ashraf, M., and Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 59(2), 206-216.
- Bates, L.S., Waldren, R.P., and Teare, I.D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207.
- Blum, A. (2011). *Plant breeding for water-limited environments*. New York: Springer.
- Chaves, M.M., Maroco, J.P., and Pereira, J.S. (2003). Understanding plant responses to drought—from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, 30, 239-264.
- FAO. (2023). *The state of food and agriculture 2023: Climate-smart agriculture for sustainable food systems*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., and Basra, S.M.A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 185-212.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., and Basra, S. M. A. (2017). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 185-212.
- Flexas, J., Bota, J., Loreto, F., Cornic, G., and Sharkey, T. D. (2004). Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. *Plant Biology*, 6, 269-279.
- Gomez, K.A., and Gomez, A.A. (1984). *Statistical Procedures for Agricultural Research*. 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.
- Gupta, A., Rico-Medina, A., and Caño-Delgado, A. I. (2020). The physiology of plant responses to drought. *Science*, 368(6488), 266-269.
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Anee, T. I., and Fujita, M. (2019). Regulation of ascorbate-glutathione pathway in mitigating oxidative damage in plants under abiotic stress. *Antioxidants*, 8(9), 384.
- Hosseini, S., Mohammadi, N., and Sadeghi, M. (2020). Physiological response of plants to drought stress and mechanisms of tolerance to water deficit. *Journal of Environmental Stresses in Crop Sciences*, 12(1), 1-14. (In Persian)
- IPCC. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press.
- ISTA. (2023). *International Rules for Seed Testing*. International Seed Testing Association, Bassersdorf, Switzerland.
- Karimi, R., Ahmadi, S., and Ghasemi, F. (2020). Evaluation of drought tolerance in some plant species using morphological and physiological indices. *Iranian Journal of Agricultural Research*, 17(4), 233-245. (In Persian)

تحلیل واکنش چهار ژنوتیپ شیرین بیان (*Glycyrrhiza glabra*) به کمبود آب با تکیه بر نشانگرهای جوانه‌زنی، رشد اولیه و تنظیمات بیوشیمیایی در شرایط کنترل‌شده / اخوان ارمکی؛ مجتبی، نفیسی؛ ابراهیم، هاشمی، ملیکا.

- Ling, Q., Huang, W., and Jarvis, P. (2011). Use of a SPAD-502 meter to measure leaf chlorophyll concentration in *Arabidopsis thaliana*. *Photosynthesis Research*, 107, 209–214.
- Maguire, J. D. (1962). Speed of germination—aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, 2(2), 176-177.
- Michel, B.E., and Kaufmann, M.R. (1973). The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiology*, 51, 914–916.
- Minolta. (1989). Chlorophyll Meter SPAD-502: Instruction Manual. Minolta Camera Co., Osaka, Japan.
- Naseri, V., Buzhou, M., and Tengcar, M. (2022). Role of Fabaceae in sustainable 91 agriculture: Case of licorice. *Agricultural Systems*, 196: 103341. DOI: 10.1016/j.agry.2021.103341.
- Rahim, A., Moradi, F., and Naderi, R. (2022). Effect of drought stress on growth and physiological indices of some medicinal plants. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 10(2), 95-108. (In Persian)
- Rashid, M. H. A., Hossain, M. A., and Alam, M. S. (2015). Seed germination and seedling growth of licorice (*Glycyrrhiza glabra* L.) under different osmotic potentials. *Journal of Medicinal Plants Research*, 9(9), 307-315.
- Salehi, M., and Kazemi, A. (2019). Investigation of chlorophyll and proline changes in plants under drought stress conditions. *Journal of Crop Plant Physiology*, 11(3), 67-78. (In Persian)
- Szabados, L., and Savaure, A. (2010). Proline: A multifunctional amino acid. *Trends in Plant Science*, 15(2), 89–97.
- Verslues, P.E., Agarwal, M., Katiyar-Agarwal, S., Zhu, J., and Zhu, J.K. (2006). Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. *The Plant Journal*, 45, 523–539.
- Yemm, E.W., and Willis, A.J. (1954). The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. *Biochemical Journal*, 57, 508–514.