Plant Prod., 2026, 48(4), 645 - 665
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.48374.2229
Received: 19 November 2024
Accepted: 30 March 2025

Plant Productions

Research Article

Assessment of drought tolerance in various ecotypes of peppermint (*Mentha piperita*) through morphological and biochemical traits

Ghader Rostami[1], Mohammad Moghaddam[2*], Leila Samiei [2], Sadrollah Ramezani[3]

1. Ph. D Student, Department of Horticultural Science and Landscape Architecture, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2. Associate Professor, Department of Horticultural Science and Landscape Architecture, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
3. Assistant Professor, Department of Landscape Engineering, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Citation: Rostami, G., Moghaddam, M., Samiei, L., Ramezani, S. (2026). Assessment of drought tolerance in various ecotypes of peppermint (*Mentha piperita*) through morphological and biochemical traits. *Plant Productions*, 48(4), 645- 665.

Abstract

Introduction

Peppermint (*Mentha piperita*), an important medicinal plant belonging to the Lamiacea family, is widely used for its essential oil in the food, pharmaceutical, cosmetics, baking, chewing gum, soft drinks, and additive industries. However, peppermint is exposed to varouse abiotic stresses drought during its growth period, particularly drought stress. Ecotypes of medicinal plants have evolved diverse adaptive mechanisms to tolerate harsh environmental conditions, making peppermint a valuable genetic resource for the development of drought-tolerant products in water-limited regions. Given that arid and semi-arid climates dominate much of Iran, this study was conducted to evaluate the effects of drought stress on the growth and biochemical characteristics of peppermint and to identify the most drought-tolerant ecotypes

Materials and Methods

To evaluate drought tolerance in different peppermint (Mentha piperita L.) ecotypes, a pot experiment was conducted as a factorial arrangement based on a completely randomized design with three replications during the 2022 growing season. The experiment was carried out in the research greenhouse of the Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad. The first factor was drought stress at two levels: 70% field capacity (mild stress) and 50% field capacity (severe stress). The second factor consisted of six peppermint ecotypes collected from different regions of Iran: Mazandaran, Mahan (Kerman), Tabas, Sarakhs, Khash, and Qazvin. Plant identification was performed at the Research Institute of Plant Sciences, Ferdowsi University of Mashhad. Drought stress treatments were applied for two months, and morphological and biochemical traits were measured at the flowering stage.

* **Corresponding Author:** Mohammad Moghaddam
E-mail: m.moghadam@um.ac.ir

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Results and Discussion

The results indicated that the interaction effect of drought stress and ecotype was significant for all measured traits. Increasing drought stress led to reductions in plant height, number of branches, leaf length and width, number and length of inflorescences, stem diameter, leaf and stem dry weight, photosynthetic pigment content (chlorophyll a, chlorophyll b, and total chlorophyll), and relative water content of leaves across all ecotypes. The highest values for these traits were observed under mild stress, whereas the lowest values occurred under severe stress. The substantial reduction in soil moisture at 50% field capacity likely limited water and mineral availability for the peppermint ecotypes, ultimately resulting in reduced growth. Under severe drought stress, Mazandaran and Sarakhs ecotypes showed marked increases in antioxidant activity (32% and 39.67%, respectively), carotenoid concentration (138% and 131%), total phenol content (30.53% and 29.65%), and total flavonoid content (38.34% and 33.36%) compared with mild stress conditions. Cluster analysis and biplot results grouped the drought-tolerant ecotypes (Sarakhs and Mazandaran) into the same cluster, while the remaining ecotypes (Mahan [Kerman], Tabas, Khash, and Qazvin) were classified as drought-sensitive. These findings suggest that Sarakhs and Mazandaran ecotypes activated non-enzymatic antioxidant defense mechanisms, leading to the accumulation of phenolic and flavonoid compounds and enhanced antioxidant capacity, thereby mitigating oxidative damage under drought stress. Furthermore, the grouping of ecotypes did not fully correspond to their geographical origins, indicating that factors beyond climate such as genetic exchange, introduction of plant material, and genetic erosion, also contribute to the observed diversity.

Conclusion

The effects of mild and severe drought stress on peppermint ecotypes indicated that Sarakhs and Mazandaran ecotypes exhibit the highest adaptability under drought conditions. Their tolerance is associated with increased phenolic compound accumulation, improved leaf water retention, and reduced damage from ion leakage compared with other ecotypes. Therefore, Sarakhs and Mazandaran ecotypes can be recommended as drought-tolerant genotypes and are suitable candidates for further physiological and breeding studies.

Key words: Drought stress, Growth, Phenolic compounds, Photosynthetic pigments, Relative water content

تولیدات گیاهی، ۱٤۰٤، ٤۸(٤)، ٦٤٥ -٦٦٥
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.48374.2229
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۰

تولیدات گیاهی
مقاله پژوهشی

ارزیابی تحمل به خشکی در اکوتیپ‌های مختلف نعناع فلفلی (*Mentha piperita*) با استفاده از صفات مورفوفیزیولوژیک و بیوشیمیایی

قادر رستمی[۱]، محمد مقدم[۲*]، لیلا سمیعی[۲]، صدراله رمضانی[۳]

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم باغبانی و مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- دانشیار، گروه علوم باغبانی و مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۳- استادیار، گروه مهندسی فضای سبز، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده

نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) یکی از گیاهان دارویی مهم خانوادهٔ نعناعیان است که به‌دلیل داشتن ترکیبات مؤثر، در صنایع مختلف غذایی، دارویی، آرایشی و بهداشتی کاربرد فراوانی دارد. پراکندگی و گسترش کشت این گیاه در جهان آن را در معرض تنش‌های غیرزیستی مانند خشکی قرار داده است. با توجه به این که توده‌ها و اکوتیپ‌های مختلف در شرایط نامساعد محیطی سازگاری‌هایی به‌دست آورده‌اند، می‌توانند به‌عنوان منابع ژنتیکی ارزشمند برای بهبود عملکرد این گیاه در مناطق کم‌آب مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین، با توجه به شرایط خشک و نیمه‌خشک بیشتر مناطق ایران، این مطالعه به منظور ارزیابی اثر سطوح مختلف تنش خشکی بر ویژگی‌های رشدی و بیوشیمیایی در جهت انتخاب اکوتیپ‌های برتر نعناع فلفلی طراحی و اجرا شده است. این آزمایش گلدانی به صورت فاکتوریل بر پایهٔ طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانهٔ تحقیقاتی دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در سال زراعی ۱٤۰۰ اجرا شد. عامل اول شامل تنش خشکی در دو سطح ۷۰ (تنش ملایم) و ۵۰ (تنش شدید) درصد ظرفیت زراعی خاک و عامل دوم شامل شش اکوتیپ نعناع فلفلی (مازندران، ماهان کرمان، طبس، سرخس، خاش و قزوین) بود که از مناطق مختلف ایران جمع‌آوری شده بودند. اعمال تنش خشکی به مدت دو ماه صورت گرفت و صفات مورفولوژیک و بیوشیمیایی در مرحلهٔ گلدهی اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که برهم‌کنش تنش خشکی و اکوتیپ بر تمامی صفات اثر معنی‌داری داشت. با افزایش تنش خشکی ارتفاع گیاه، تعداد شاخهٔ اصلی و جانبی، طول برگ، عرض برگ، تعداد گلاذین، طول گل-آذین، قطر ساقهٔ اصلی، وزن خشک برگ و ساقه، محتوای کلروفیل a، b و کل و محتوای نسبی آب برگ در اکوتیپ‌های نعناع فلفلی کاهش یافت، به‌طوری‌که بیشترین مقدار این صفات در تنش ملایم و کمترین مقدار در شرایط تنش شدید حاصل شد. این احتمال وجود دارد که کاهش شدید رطوبت خاک در تنش شدید باعث کاهش دسترسی به آب و مواد معدنی برای اکوتیپ‌های نعناع فلفلی شده و در نهایت باعث کاهش شاخص‌های رشدی شده است. تنش خشکی شدید در اکوتیپ‌های مازندران و سرخس سبب افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی (به ترتیب ۳۲ و ۳۹/٦۷ درصد)، محتوای کارتنوئید (به ترتیب ۱۳۸ و ۱۳۱ درصد)، محتوای فنول کل (به ترتیب ۳۰/۵۳

نویسنده مسئول: محمد مقدم
رایانامه: m.moghadam@um.ac.ir

و ۲۹/٦٥ درصد) و فلاونوئید کل (به ترتیب ۳۸/۳٤ و ۳۳/۳٦ درصد) در مقایسه با تنش خشکی ملایم شد. همچنین تجزیه خوشه‌ای و نمودار بای پلات در هر دو شرایط تنش، اکوتیپ‌های متحمل سرخس و مازندران را در یک گروه و اکوتیپ‌های حساس ماهان کرمان، خاش، طبس و قزوین را در گروه دیگر قرار داد. نتایج نشان داد که اکوتیپ‌های سرخس و مازندران بیشترین سازگاری را در شرایط خشکی از طریق افزایش ترکیبات فنولی، حفظ رطوبت نسبی و به دنبال آن کمترین آسیب را از خسارت نشت یونی در مقایسه با سایر اکوتیپ‌ها داشتند. بنابراین، اکوتیپ‌های مازندران و سرخس به عنوان اکوتیپ‌های مقاوم‌تر به خشکی نسبت به سایر اکوتیپ‌ها شناسایی شده و می‌توان آن‌ها را برای مطالعات آتی پیشنهاد کرد.

کلید واژه‌ها: ترکیبات فنولی، تنش خشکی، رشد، رنگیزه‌های فتوسنتزی، محتوای نسبی آب

مقدمه

تیرهٔ نعناعیان (Lamiaceae) یکی از بزرگ‌ترین تیره‌های گیاهی با پراکندگی و گسترش جهانی از قطب شمال تا قطب جنوب است (Keshavarz *et al.*, 2018). این تیره حدودا ۲۳۶ جنس و بیش از ۶۰۰۰ گونه دارد و معمولاً دارای اسانس می‌باشد (Chrysargyris, 2024). نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) یکی از مهم‌ترین گیاه دارویی این تیره می‌باشد(McKay and Blumberg, 2006) . این گیاه به دلیل ارزش تجاری و اسانس بالا، در مناطق معتدل اروپا، هند، آسیا، ایالات متحده و کشورهای مدیترانه‌ای کشت و کار می‌شود (Mahedran and Rahman, 2020). این گیاه که حاصل هیبرید طبیعی *M. aquatic* × *M. spicata* است، دارای خواص دارویی متعددی می‌باشد که شامل تسکین درد، بهبود هضم و سرماخوردگی می‌باشد (Anwar *et al.*, 2019). علاوه بر این اسانس استخراج شده از نعناع فلفلی به طور گسترده در صنایع غذایی، آرایشی و بهداشتی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Shtayeh *et al.*, 2019). به طوری که پراکندگی و توزیع کشت آن در جهان سبب شده که این گیاه با تنش‌های غیرزیستی مانند خشکی در طول فصل رشد مواجه شود (Kheiry *et al.*, 2017). لذا جمع‌آوری ژرم پلاسم گیاهی و گزینش ژنوتیپ‌های برتر از لحاظ عملکرد زیستی، تحمل به تنش‌ها و سایر صفات مطلوب نیاز کارآمد جهت استفاده به‌نژادگران گیاهی دارد (Luo *et al.*, 2019).

تنش خشکی از جمله تنش‌هایی غیر زیستی مهم است که با اثرگذاری بر رشد و نمو گیاهان می‌تواند باعث کاهش رشد و عملکرد گیاه شود (Ashrafia *et al.*, 2018). گونه‌ها و اکوتیپ‌های مختلف گیاهی از نظر تحمل به خشکی دامنهٔ وسیعی را نشان می‌دهند که به دلیل سازگاری‌های فیزیولوژیک، ریخت‌شناسی و بیوشیمیایی آن‌ها می‌باشد، به‌طوری‌که تقریباً ۷۰ درصد عملکرد محصولات می‌تواند به وسیلهٔ تنش خشکی کاهش پیدا کنند (Hussain *et al.*, 2019). بیشتر محققان اثر تنش خشکی روی رشد، عملکرد و فعالیت‌های متابولیکی گیاهان را گزارش کردند (Kapoor *et al.*, 2020).

گونه‌های نعناع در لایه‌های سطحی خاک دارای سیستم ریشه‌ای افشان می‌باشند، از این رو عدم دسترسی به میزان رطوبت کافی در این منطقه از خاک باعث کاهش شاخص‌های رشدی و عملکردی می‌گردد (Marcum and Hanson, 2006). همچنین نظامی و همکاران (Nizami *et al.*, 2017) در آزمایشی اثرات تنش خشکی روی ویژگی‌های رشدی سه گونهٔ نعناع (*M. longifolia, M. spicata* و *M. piperita*) را بررسی و اظهار کردند که در هر سه گونه، تنش خشکی باعث کاهش شاخص‌های رشدی شد، هر چند گونهٔ نعناع خوراکی (*M. spicata*) در شرایط تنش شدید

نسبت به دو گونهٔ دیگر، رشد بهتری داشت. در واقع، تنش خشکی با کاهش سطح برگ، سبب استفاده ناکارآمد از انرژی نوری جذب شده و کاهش سرعت فتوسنتز می‌شود. این شرایط منجر به تولید بیش از حد گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر شده و در نهایت کاهش رشد و عملکرد گیاه را به دنبال دارد (Bellasio *et al.*, 2018).

محتوای نسبی آب برگ یکی از پارامترهای مهم وضعیت آبی گیاه است که می‌تواند تحت تأثیر مراحل رشدی گیاه و محیط تغییر داشته باشد و یکی از شاخص‌های مهم برای ارزیابی اکوتیپ‌های متحمل به خشکی محسوب می‌شود (Ahluwalia *et al.*, 2021). همچنین اثر تنش خشکی بر محتوای کلروفیل و کارتنوئید متنوع بوده و به شرایط محیطی، ژنوتیپ و حتی رقم بستگی دارد (Mensah *et al.*, 2006). به‌طوری‌که تنش خشکی به واسطهٔ افزایش فعالیت آنزیم‌های کلروفیلاز و آنتی‌اکسیدانی، ترکیبات فنلی و کاهش جذب نیتروژن از غلظت کلروفیل برگ می‌کاهد (Tambussi *et al.*, 2016). گیاهان هنگامی که با تنش خشکی مواجهه می‌شوند متابولیت‌های ثانویه بیشتری را نسبت به شرایط بدون تنش تولید و ذخیره می‌کنند (Selmar and Klenwachter, 2013). کارتنوئیدها، رنگیزه‌های گیاهی با خاصیت آنتی-اکسیدانی هستند که با جذب رادیکال‌های اکسیژن واکنش‌گر باعث محافظت کلروفیل در برابر تنش کم آبی می‌شوند (Inze and Montagu, 2017). در همین راستا سورنی و همکاران (Soorni *et al.*, 2019) گزارش کردند در اکوتیپ‌های زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) تنش خشکی باعث کاهش صفات رشدی، رنگیزه‌های فتوسنتزی و افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی و ترکیبات فنلی شد و بین اکوتیپ‌ها تفاوت معنی‌داری از این نظر وجود داشت *et* Zarrinabadi *al*. (2018). گزارش کردند که کم‌ترین محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی و محتوای نسبی آب برگ در ژنوتیپ‌های حساس به خشکی همیشه‌بهار (*Calendula officinalis*) بود. به نژادگران برای دست‌یابی به نمونه‌های متحمل به خشکی، به دنبال تنوع در منابع ژنتیکی محصولات هستند. اکوتیپ‌ها و توده‌ها به‌دلیل این که در شرایط نامساعد محیطی مجموعه‌ای از سازگاری‌ها را طی مدت طولانی کسب نموده‌اند، یکی از منابع مهم ژنتیکی برای بهبود محصولات در مناطق خشکی می‌باشند (Sadeghzadeh-Ahari *et al.*, 2009).

بنابراین، با توجه به شرایط خشک و نیمه‌خشک بیشتر مناطق ایران، این مطالعه به منظور ارزیابی اثر سطوح مختلف تنش خشکی بر ویژگی‌های رشدی و بیوشیمیایی نعناع فلفلی و انتخاب اکوتیپ‌های برتر اجرا شد.

مواد و روش‌ها

به منظور ارزیابی تحمل به خشکی اکوتیپ‌های مختلف نعناع فلفلی، آزمایشی گلدانی به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانهٔ تحقیقاتی دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در سال زراعی ۱۴۰۰ اجرا شد. عامل اول شامل تنش خشکی در دو سطح ۷۰ (تنش ملایم) و ۵۰ (تنش شدید) درصد ظرفیت زراعی خاک و عامل دوم شامل شش اکوتیپ نعناع فلفلی بود که از مناطق مختلف ایران جمع آوری و مورد ارزیابی قرار گرفتند. اکوتیپ‌های جمع‌آوری شده شامل مازندران، ماهان کرمان، طبس، سرخس، خاش و قزوین بودند. شناسایی گیاهان در پژوهشکدهٔ علوم گیاهی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. خاک مورد استفاده در گلدان‌ها از نسبت ۵۰ درصد خاک مزرعه، ۲۵ درصد خاکبرگ و ۲۵ درصد ماسه تشکیل شده بود که قبل از اجرای آزمایش ویژگی‌های آن مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۱). در اسفندماه سال ۱۴۰۰، تعداد پنج عدد ریزوم به طول پنج سانتی‌متر از اکوتیپ‌های مختلف

نعناع فلفلی در گلدان‌های با قطر دهانه ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر در عمق پنج سانتی‌متری خاک کشت شدند. گلدان‌ها در شرایط یکسان در دمای روزانه ۲۵-۳۰ و شبانه ۱۸-۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد قرار گرفتند. آبیاری به صورت روزانه تا استقرار کامل گیاهان صورت گرفت به‌طوری‌که خاک گلدان‌ها مرطوب باشد. زمانی که ارتفاع گیاه به ۱۵ سانتی‌متر رسید اقدام به اعمال تیمارهای تنش خشکی گردید. برای اعمال تنش خشکی از دستگاه رطوبت سنج (EXTECH MO75, USA) استفاده شد. برای این منظور قبل از اعمال تنش خشکی ظرفیت زراعی خاک تعیین گردید. بدین صورت که ابتدا خاک مورد نظر اشباع از آب شد و وزن آن هر روز یادداشت برداری گردید. زمانی که خاک مورد نظر به وزن ثابتی رسید رطوبت آن با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج اندازه‌گیری شد. سپس خاک اشباع شده به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و وزن خشک آن یاداشت شد. دستگاه رطوبت سنج برای خاک خشک عدد صفر را نشان داد، اختلاف دو وزن خاک (اشباع – خشک) آب مورد نیاز برای ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک را نشان می‌دهد. اعمال تنش خشکی به مدت دو ماه و تا زمانی که گیاهان به گلدهی رسیدند صورت گرفت و فاکتورهای مورفولوژیک و بیوشیمیایی در مرحلهٔ گلدهی اندازه‌گیری شدند.

صفات مورفولوژیک اندازه‌گیری شده شامل ارتفاع بوته، تعداد شاخهٔ اصلی، تعداد شاخهٔ جانبی، طول برگ، عرض برگ، قطر ساقهٔ اصلی، طول گل‌آذین اصلی، تعداد گل‌آذین، وزن خشک برگ و ساقه بود. طول اندام‌های هوایی بر حسب سانتی‌متر، قطر ساقه بر حسب میلی‌متر و همچنین وزن خشک اندام هوایی (برگ و ساقه) با ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم سنجیده شد. برای به دست آوردن وزن خشک اندام هوایی، نمونه‌ها در آون در دمای ۷۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت قرار گرفت و سپس بر حسب گرم تعیین شد (Epstein and Rains, 1987).

اندازه‌گیری محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، b، کل و کارتنوئید) با استفاده از روش درس و همکاران (Ders *et al*., 1998) انجام شد. اندازه‌گیری محتوای فنل کل به روش سینگلتون و روسی (Singleton and Rossi, 1965)، محتوای فلاونوئید کل از روش چانگ و همکاران (Chang *et al*., 2002) ، فعالیت آنتی‌اکسیدانی با روش مون و ترائو (Moon and Terao, 1998)، محتوای رطوبت نسبی آب برگ از روش بارس و ویترلی (Barrs and Weaterley, 1962) و نشت یونی به روش مارکوم (Marcum, 1998) انجام شد.

تجزیه واریانس داده‌ها توسط نرم افزار JMP8 انجام گرفت. مقایسه میانگین‌ها نیز براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. برای تجزیه خوشه‌ای با استفاده از صفات مورد بررسی از معیار مربع فاصلهٔ اقلیدوسی و از روش وارد (Ward) استفاده گردید. برای رسم نمودار بای پلات و کلاستر از نرم افزار Statgraphics Centurion 19 استفاده شد.

نتایج و بحث

اثر ساده تنش خشکی و اکوتیپ‌های مختلف نعناع فلفلی و برهم‌کنش بین آن‌ها، روی تمامی صفات موروفولوژیک، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول‌های ۲ و۳). همچنین، برهم‌کنش آن‌ها بر میزان کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل‌کل، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و میزان فلاونوئیدکل در سطح احتمال یک درصد و بر میزان فنل‌کل، محتوای آب نسبی برگ و نشت یونی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری را نشان دادند (جدول ۳)

جدول۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1. Physico-chemical properties of soil

Soil texture	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	pH	EC (dSm^{-1})
Clay loam	41	30	29	7.9	1.2

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات مورفولوژیکی در اکوتیپ‌های نعناع فلفلی (*Mentha piperita*) تحت تنش خشکی

Table 2. Analysis of variance for studied morphological traits in peppermint (*Mentha piperita*) ecotypes under drought stress

S.O.V	Df	Mean squares									
		Plant height	Number of main branches	Number of lateral branches	Leaf length	Leaf width	Inflorescence length	Number of flowers	Diameter of the main stem	Leaf dry weight	Stem dry weight
Drought	1	3098.77**	20.25**	182.25**	26.69**	8.14**	48.72**	257.83**	11.06**	108.02**	47.21**
Ecotype	5	389.57**	22.71**	49.91**	4.97**	3.24**	64.64*	122.62**	6.82**	57.76**	30.65**
Drought×Ecotype	5	82.84**	6.26**	4.31**	1.02**	0.27**	2.93**	20.44**	0.48**	17.07**	3.58**
Error	24	1.61	0.40	0.72	0.08	0.04	0.13	0.48	0.007	0.08	0.03
CV (%)		30.65	29	25.41	27.12	20.19	26.31	30.12	15.14	18.74	19.21

**Significant at 1% level of probability ** معنی‌دار بودن در سطح احتمال یک درصد

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات بیوشیمیایی در اکوتیپ‌های نعناع فلفلی (*Mentha piperita*) تحت تنش خشکی

Table 3. Analysis of variance for studied biochemical traits in peppermint (*Mentha piperita*) ecotypes under drought stress

S.O.V	Df	Mean squares								
		Chlorophyll a content	Chlorophyll b content	Total chlorophyll content	Carotenoid content	Total phenol content	Total flavonoid content	Antioxidant activity	Relative water content	Electrolyte Leakage
Drought	1	55.74**	46.17**	203.39**	16.54**	46.12**	82.18**	8148.40**	3574.64**	3154.13**
Ecotype	5	4.76**	5.56**	18.11**	0.36*	3.60**	6.80**	65.80**	103.54**	92.01**
Drought×Ecotype	5	1.19**	1.85**	3.84**	0.55**	0.17*	1.35**	82.26**	2.67*	21.15*
Error	24	0.09	0.34	0.31	0.12	0.05	0.31	2.22	5.88	6.26
CV (%)	1	28	26.64	23	27.23	17.07	19.83	20.63	24.55	23.06

**، * به ترتیب معنی‌دار بودن در سطح احتمال یک و پنج درصد

**, * Significant at 1 and 5% level of probability, respectively

شاخص‌های رشدی

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش شدت تنش خشکی ارتفاع گیاه در همهٔ اکوتیپ‌های نعناع فلفلی کاهش معنی‌داری را نسبت به تنش ملایم داشت، به‌طوری‌که بیشترین ارتفاع گیاه در تنش خشکی ملایم و شدید به ترتیب با میانگین ۶۴ و ۴۰/۳۳ سانتی‌متر در اکوتیپ ماهان کرمان گزارش شد و کمترین میزان این شاخص نیز در تنش خشکی شدید با میانگین ۲۶ سانتی‌متر در اکوتیپ طبس حاصل شد،که تفاوت بیشترین و کمترین میزان این شاخص برابر با ۵۹/۳ درصد بود (جدول ۴). بیشترین تعداد شاخهٔ اصلی و جانبی در تنش ملایم به‌ترتیب برای شاخهٔ اصلی در اکوتیپ مازندران و برای شاخهٔ جانبی در اکوتیپ‌های مازندران و سرخس مشاهده شد. کمترین تعداد شاخه‌های اصلی در اکوتیپ‌های قزوین و خاش با میانگین ۲/۶۶ عدد و کمترین تعداد شاخهٔ جانبی در اکوتیپ قزوین با میانگین ۵/۶۶ عدد ثبت گردید (جدول ۴). بیشترین تعداد شاخهٔ اصلی و جانبی نیز در اکوتیپ مازندران و کمترین میزان این صفات در اکوتیپ قزوین مشاهده شد، به‌طوری‌که از لحاظ تعداد شاخهٔ اصلی اختلاف معنی‌داری بین اکوتیپ‌های ماهان کرمان، طبس، سرخس و قزوین مشاهده نشد؛ اما تعداد شاخهٔ اصلی این چهار اکوتیپ نسبت به اکوتیپ مازندران کاهش قابل توجهی نشان داد (جدول ۴). همچنین طول و عرض برگ در همهٔ اکوتیپ‌های نعناع فلفلی در تنش شدید کاهش معنی‌داری نسبت به تنش ملایم داشت، به‌طوری‌که بیشترین طول و عرض برگ در تنش ملایم مربوط به اکوتیپ‌های سرخس و قزوین و کمترین آن در اکوتیپ طبس حاصل شد و در تنش شدید نیز بیشترین مقدار این صفات در اکوتیپ قزوین به دست آمد به‌طوری که به غیر از طبس با سایر اکوتیپ‌ها تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۴). طبق جدول مقایسه میانگین، بیشترین طول و تعداد گل‌آذین در تنش ملایم و شدید در اکوتیپ مازندران دیده شد (جدول ۴). بیشترین قطر ساقه در تنش خشکی ملایم و شدید به ترتیب با میانگین ۵/۵۳ و ۳/۳۱ میلی‌متر در اکوتیپ قزوین مشاهده شد. همچنین کمترین مقدار این صفت در سطوح مختلف تنش خشکی مربوط به اکوتیپ طبس بود که نسبت به بیشترین مقدار در تنش خشکی ملایم و شدید کاهش ۶۸ درصدی داشته است (جدول ۴). مقایسه میانگین برهمکنش تنش خشکی و اکوتیپ‌های مختلف نعناع فلفلی نشان داد که با افزایش شدت تنش از میزان وزن خشک برگ و ساقه کاسته می‌شود؛ به‌طوری‌که بیشترین مقدار این صفات در شرایط تنش خشکی ملایم در اکوتیپ مازندران به ترتیب با میانگین ۱۵/۵۰ و ۹/۶۴ گرم و در شرایط تنش خشکی شدید در همین اکوتیپ با میانگین ۵/۳۵ و ۴/۷۸ گرم به دست آمد (جدول ۴). همچنین کمترین وزن خشک برگ در تنش ملایم مربوط به اکوتیپ‌های ماهان کرمان، طبس، خاش و قزوین و برای وزن خشک ساقه به ترتیب اکوتیپ‌های طبس و خاش با میانگین ۱/۹۱ و ۱/۸۱ گرم بود. از طرفی در تنش شدید نیز کمترین مقدار وزن خشک برگ و ساقه در اکوتیپ طبس به دست آمد. واکنش گیاه به شرایط تنش کم آبی، تغییرات موروفولوژیکی و بیوشیمیایی برخی از اندام‌ها می‌باشد (Gupta and Huang, 2014). همان‌طوری‌که گیاهان در شرایط بدون تنش بیشترین ارتفاع، تعداد شاخهٔ جانبی، طول و عرض برگ و عملکرد را دارند در شرایط تنش خشکی نیز با کاهش سطح سبزینه کل گیاه باعث کاهش میزان فتوسنتز می‌شوند (Gao *et al.*, 2018). به عبارتی اختلاف ارتفاع گیاهان می‌تواند علاوه بر ویژگی‌های ژنتیکی، تحت شرایط محیطی نظیر رطوبت و نور نیز قرار بگیرد (Kheiry *et al.*, 2017) به‌طوری‌که نتایج پژوهش حاضر نشان داد در شرایط تنش خشکی شدید ارتفاع تمامی اکوتیپ‌های نعناع فلفلی نسبت به تنش ملایم (۷۰ درصد ظرفیت زراعی) کاهش یافت.

محققان دلیل کاهش ارتفاع گیاه در شرایط کم آبی را کاهش فشار آماس و به‌دنبال آن کاهش تقسیم سلولی و بزرگ شدن سلول‌ها می‌دانند. به این صورت که با افزایش شدت تنش، فشار آماس سلول‌های محافظ روزنه و هدایت روزنه‌ای کاهش یافته و به‌دنبال آن ارتفاع گیاه، سرعت رشد، فتوسنتز و عملکرد آن کاهش می‌یابد (Baghalian *et al.*, 2011). به‌طوری‌که در پژوهشی ملکی فراهانی و عبدالهی

(Maleki Farahani and Abdulahi, 2014) با بررسی دو گونهٔ بالنگو(*Lallemantia royleana* and *ibrica*) در شرایط تنش خشکی اظهار داشتند که در هر دو گونه ارتفاع، طول گل‌آذین، تعداد گل‌آذین، تعداد شاخهٔ جانبی با افزایش شدت تنش کاهش می‌یابد که علت آن را سوخت و ساز کمتر و سطح برگ کمتر و در نهایت فتوسنتز کمتر گزارش کردند. همچنین نتایج تحقیق حاضر نشان داد میزان شاخص‌های رشدی اکوتیپ‌های نعناع فلفلی در تنش ملایم کمتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد که با نتایج آزمایشات گلستانی (Golestani, 2021) روی اکوتیپ‌های بادرشبو و محتشمی (Mohtashami, 2023) روی اکوتیپ‌های بالنگو شهری مطابقت دارد. در پژوهش حاضر احتمال می‌رود که کاهش شدید رطوبت خاک در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی سبب کاهش فراهمی آب و مواد معدنی برای اکوتیپ‌های نعناع فلفلی شده و در نهایت باعث کاهش تعداد شاخهٔ اصلی و جانبی و ارتفاع شاخه‌ها شده است. همچنین نتایج مطالعه سیدی و همکاران (Saydyi *et al*., 2022) بر روی سطوح مختلف رطوبت خاک (۱۰۰، ۵۰ و ۳۵ درصد ظرفیت زراعی) در اکوتیپ‌های مختلف سیاهدانه نشان داد که تنش خشکی شدید باعث کاهش معنی‌دار شاخص‌های رشدی آن‌ها شد. در پژوهش حاضر با افزایش شدت تنش خشکی، وزن خشک اکوتیپ‌های نعناع فلفلی کاهش معنی‌داری را نسبت به تنش ملایم داشت. محققان علت افزایش وزن خشک و عملکرد گیاهان را در شرایط فراهمی آب، دسترسی ریشه گیاهان به آب کافی دانسته‌اند. زیرا در این شرایط گسترش تارهای کشنده در خاک بیشتر شده و جذب آب به همراه عناصر غذایی بیشتر موجب رشد بهتر گیاه می‌شود (Chen *et al*., 2011). همچنین در شرایط تنش خشکی، کاهش مادهٔ خشک می‌تواند به دلیل فشار آماس سلولی ناشی از کاهش سطح برگ گیاه باشد (Zhang *et al*., 2018) اوکوانی و همکاران (Okwany *et al*., 2011) با بررسی اثر تنش خشکی بر عملکرد گیاه نعناع سبز گزارش کردند که با کاهش میزان رطوبت خاک وزن خشک اندام هوایی نسبت به شاهد کاهش داشت. نتایج سایر محققان نیز حاکی از آن است که کاهش قابل توجه میزان رطوبت دسترس ریشه گیاهان از طریق کاهش معنی‌دار رشد و فتوسنتز گیاه منجر به کاهش شدید عملکرد می‌گردد (Cheng *et al*., 2018).

محتوای کلروفیل a، b، کل و کارتنویید

ارزیابی محتوای کلروفیل a در بین تمامی اکوتیپ‌های مورد بررسی نشان داد که بیشترین مقدار این صفت در اکوتیپ‌های مازندران (۷/۶۱ میلی‌گرم برگرم وزن‌تر)، و سرخس (۷/۲۹ میلی‌گرم برگرم وزن‌تر) تحت اثر تنش ملایم و کمترین مقدار آن در اکوتیپ طبس (۲/۵۴ میلی‌گرم برگرم وزن‌تر) تحت شرایط تنش شدید مشاهده شد (جدول ۵). مقایسهٔ میانگین برهم‌کنش داده‌ها نشان داد بیشترین محتوای کلروفیل b و کل به ترتیب با میانگین ۷/۶۳ و ۱۴/۹۵ میلی‌گرمبرگرم وزن‌تر در اکوتیپ سرخس در شرایط تنش ملایم و کمترین مقدار این شاخص در اکوتیپ‌های مناطق قزوین و خاش تحت شرایط تنش شدید مشاهده شد، به عبارتی ارزیابی مقادیر کلروفیل b و کلروفیل کل در اکوتیپ‌های قزوین و خاش کاهش معنی‌دار آماری این صفات را در تنش شدید نسبت به شرایط تنش ملایم نشان داد (جدول ۵). از سوی دیگر نتایج برهم‌کنش داده‌ها نشان داد که با افزایش تنش خشکی، محتوای کارتنوئید اکوتیپ‌های مختلف نعناع فلفلی روند افزایشی را نشان داد، به‌طوری‌که بیشترین مقدار این شاخص تحت تنش شدید برای اکوتیپ‌های مازندران (۲/۸۳ میلی‌گرم برگرم وزن تر) و سرخس (۲/۸۰ میلی‌گرم برگرم وزن تر) و کمترین میزان کارتنوئید در تنش ملایم برای اکوتیپ خاش (۰/۲۶ میلی‌گرم برگرم وزن‌تر) به دست آمد. هرچند بین بقیه اکوتیپ‌ها در همین سطح تنش اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۵). بنابراین با توجه به نتایج این تحقیق، تنش خشکی باعث کاهش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، b و کل) اکوتیپ‌های مختلف نعناع فلفلی شد. به طوری که بیشترین میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی در شرایط تنش شدید در اکوتیپ‌های مازندران و سرخس مشاهده شد که این امر نشان می‌دهد این اکوتیپ‌ها در مقابل تنش، واکنش

خوبی داشته و توانسته میزان کلروفیل بیشتری را نسبت به سایر اکوتیپ‌ها در خود حفظ کنند. کاهش محتوای کلروفیل بافت گیاه در شرایط تنش خشکی می‌تواند ناشی از افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلاز و در نتیجه تخریب کلروفیل از یک سو و جلوگیری از سنتز رنگیزه‌های فتوسنتزی از سوی دیگر باشد (Emami Bistgani *et al*., 2024). مشابه نتایج تحقیق حاضر، بقائی زاده و همکاران (Baghizadeh *et al*., 2019) گزارش کردند که غلظت کلروفیل a، b و کل در اکوتیپ‌های مختلف لوبیا تحت تنش خشکی در مقایسه با شاهد کاهش معنی‌داری یافت و بین اکوتیپ‌های از این لحاظ تفاوت قابل ملاحظه‌ای وجود داشت. در پژوهش حاضر بر خلاف محتوای کلروفیل a، b و کل، خشکی شدید باعث افزایش معنی‌دار غلظت کارتنوئید در تمامی اکوتیپ‌های مختلف نعناع فلفلی شد. احتمال بر این است که ویژگی‌های ژنتیکی گیاه در حصول این نتایج دخیل بوده و تنوع ژنتیکی بین اکوتیپ‌های نعناع فلفلی باعث پاسخ‌های متفاوت آن‌ها به تنش خشکی شده است (Saremirad and Mostafavi, 2020 ; Maleki nejad and Majidi, 2015). بنابراین در این شرایط بر میزان کارتنوئید به عنوان عامل محافظت کنندهٔ کلروفیل در برابر اکسیداسیون نوری، افزوده می‌شود تا از تخریب بیشتر کلروفیل ممانعت شود (Kiran *et al*., 2019). قلی‌زاده و همکاران (Golizadeh *et al*., 2018) گزارش کردند که همزمان با افزایش تنش خشکی محتوای کلروفیل در ۲۱ ژنوتیپ گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) کاهش معنی‌داری پیدا می‌کند و اکوتیپ‌های مختلف از این نظر باهم متفاوت هستند که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. همچنین توحیدی و همکاران(Tohidi *et al*., 2021) گزارش کردند که تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار رنگیزه‌های فتوسنتزی در ۱۰ اکوتیپ گیاه دارویی کلپوره شد که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. این کاهش در محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی توسط سایر محققان نیز گزارش شده و دلایل احتمالی افزایش تخریب آن‌ها و یا کاهش ساخت آن‌ها در شرایط تنش خشکی، اختلال در فعالیت آنزیمی مسئول ساخت این رنگدانه‌ها می‌باشد (Kazemi *et al*., 2017).

محتوای فنل و فلاونوئید کل و فعالیت آنتی-اکسیدانی

برهم‌کنش تیمارها بر محتوای فنل کل برگ اکوتیپ‌های نعناع فلفلی نشان داد که با افزایش تنش خشکی، مقدار فنول کل افزایش معنی‌داری داشت. به‌طوری‌که بیشترین محتوای فنل کل در تنش و ملایم به ترتیب با میانگین ۱۰/۵۸ و ۸/۱۶ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر در اکوتیپ سرخس مشاهده شد (جدول ۵). تنش خشکی سبب افزایش میزان فلاونوئید در اکوتیپ‌های مختلف نعناع شد، به‌طوری‌که بیشترین میزان فلاونوئید در تنش شدید در اکوتیپ مازندران (۱۳/۱۷ میلی‌گرم برگرم وزن تر) و سرخس (۱۲/۲۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) مشاهده شد که نسبت به تنش ملایم به ترتیب افزایش ۳۳/۳۶ و ۳۸/۳۴ درصدی داشت که به لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با اکوتیپ‌های تحت تنش ملایم داشتند. کمترین میزان فلاونوئید در تنش ملایم برای اکوتیپ‌های ماهان کرمان و خاش به دست آمد. هرچند بین اکوتیپ‌های طبس، ماهان کرمان و خاش تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد؛ اما ارزیابی محتوای فلاونوئید کل در این اکوتیپ‌ها کاهش معنی‌دار آماری این شاخص را در تنش ملایم نسبت به شرایط تنش شدید نشان داد (جدول ۵). همچنین برهم‌کنش داده‌ها نشان داد (جدول ۵) که با افزایش شدت تنش خشکی میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی در اکوتیپ‌های مختلف نعناع فلفلی نسبت به تنش ملایم افزایش معنی‌داری یافت، به‌طوری‌که در تنش ملایم اکوتیپ مازندران (۷۰/۸ درصد) و در تنش شدید ، اکوتیپ‌های سرخس (۹۴/۴۶ درصد) و مازندران (۹۴ درصد) فعالیت آنتی‌اکسیدانی داشتند.

جدول ٤- مقایسه میانگین صفات مورفولوژیکی در اکوتیپ‌های نعناع فلفلی (*Mentha piperita*) تحت تنش خشکی

Table 4. Mean comparison for studied morphological traits in peppermint (*Mentha piperita*) ecotypes under drought stress

Drought stress (% FC)	Ecotype	Plant height (cm)	Number of main branches	Number of branches	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Inflorescence length (cm)	Number of flowers	Diameter of the main stem (mm)	Leaf dry weight (g)	Stem dry weight (g)
70	Mazandaran	62.66^{b}	9^{a}	15^{a}	4.25^{c}	2.20^{c}	12^{a}	19.33^{a}	3.23^{c}	15.50^{a}	9.64^{a}
	Mahan Kerman	64^{a}	5.33^{c}	9^{cd}	5^{b}	2.58^{b}	9.25^{b}	14^{b}	3.09^{d}	3.31^{c}	3.09^{d}
	Tabas	38.66^{e}	4.33^{c}	12.33^{b}	2.41^{e}	1.02^{e}	2.25^{f}	2.03^{gh}	1.78^{h}	3.61^{c}	1.81^{f}
	Sarkhs	51.33^{c}	5.33^{c}	15^{a}	5.83^{a}	3.16^{a}	3.25^{e}	10^{c}	3.87^{b}	5.41^{b}	5.75^{b}
	Khash	39^{e}	2.66^{d}	13^{b}	5^{b}	2.08^{c}	5.16^{d}	6.33^{e}	2.36^{f}	3.66^{c}	1.91^{f}
	Qazvin	44.33^{d}	2.66^{d}	5.66^{f}	5.50^{a}	3.33^{a}	3.08^{e}	5.16^{ef}	5.53^{a}	3.79^{c}	2.98^{d}
50	Mazandaran	33.66	7^{b}	9.33^{c}	3.25^{d}	1.58^{d}	8.08^{c}	8.33^{d}	2.46^{f}	5.35^{b}	4.78^{c}
	Mahan Kerman	40.33^{e}	2.16^{d}	6.33^{ef}	3.16^{d}	1.41^{d}	5.16^{d}	5.33^{ef}	2.01^{g}	2.10^{de}	1.47^{g}
	Tabas	26.66^{h}	2.33^{d}	6.66^{ef}	1.91^{f}	0.60^{f}	1.16^{g}	1.06^{h}	1.06^{j}	1.20^{f}	0.82i
	Sarkhs	31^{g}	2.33^{d}	9.33^{c}	3.25^{d}	1.58^{d}	1.66f^{g}	4.66^{f}	2.86^{e}	2.23^{d}	2.30^{e}
	Khash	29^{g}	4.66^{c}	7.66^{de}	3.16^{e}	0.91^{ef}	3.08^{e}	2.33^{g}	1.52^{i}	1.70^{e}	0.90^{hi}
	Qazvin	29^{g}	1.83^{d}	3.66^{g}	3.58^{d}	2.58^{b}	1.87^{f}	1.91^{gh}	3.31^{c}	1.91^{de}	1.16^{gh}

حروف غیرمشترک در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال یک درصد بیانگر اختلاف معنی‌دار است.

Non-similar letters in each column represent significant differences based on LSD test at 1% level.

جدول ۵- مقایسه میانگین صفات بیوشیمیایی در اکوتیپ‌های نعناع فلفلی (*Mentha piperita*) تحت تنش خشکی

Table 5. Mean comparison for studied biochemical traits traits in peppermint (*Mentha piperita*) ecotypes under drought stress

Drought stress (% FC)	Ecotype	Chlorophyll a content ($mg.g^{-1}$ FW)	Chlorophyll b content ($mg.g^{-1}$ FW)	Total chlorophyll content ($mg.g^{-1}$ FW)	Carotenoid content ($mg.g^{-1}$ FW)	Total phenol ($mg.g^{-1}$ FW)	Total flavonoid content ($mg.g^{-1}$ FW)	Antioxidant activity (%)	Relative water content (%)	Electrolyt Leakage (%)
70	Mazandaran	7.61^{a}	4.93^{b}	12.54^{b}	1.19^{d}	6.55^{gh}	9.52^{cd}	70.80^{d}	61.33^{a}	34.93^{ef}
	Mahan Kerman	6.18^{b}	5.01^{b}	11.20^{c}	1.40^{cd}	6.90^{g}	7.15^{e}	64.60^{f}	52^{bc}	34.05^{ef}
	Tabas	5.66^{b}	4.47^{bcd}	10.13^{d}	1.22^{d}	7.57^{f}	6.88^{e}	51.86^{i}	49.66^{c}	$38.20d^{e}$
	Sarkhs	7.29^{a}	7.63^{a}	14.95^{a}	1.21^{d}	8.16^{e}	9.20^{d}	67.63^{e}	60.17^{a}	31.94^{f}
	Khash	5.87^{b}	4.86^{bc}	10.74^{cd}	0.26^{e}	6.23^{h}	7.75^{e}	58.30^{h}	54.76^{b}	37.92^{de}
	Qazvin	5.03^{c}	3.93^{cde}	8.96^{e}	1.20^{d}	6.20^{h}	8.81^{d}	61.33^{g}	53.13^{bc}	40.38^{d}
50	Mazandaran	3.93^{c-e}	3.65^{def}	8.14^{ef}	2.83^{a}	8.55^{de}	13.17^{a}	94^{a}	36.57^{e}	54.23^{b}
	Mahan Kerman	3.25^{f}	2.89^{fg}	6.15^{g}	2.00^{bc}	8.86^{cd}	10.27^{bc}	92.46^{ab}	36.42^{e}	56.66^{ab}
	Tabas	2.54^{g}	2.85^{fg}	5.39^{g}	2.48^{ab}	9.64^{b}	10.16^{bc}	93.10^{ab}	31.83^{fg}	55.21^{b}
	Sarkhs	4.04^{de}	3.42^{ef}	7.46^{f}	2.80^{a}	10.58^{a}	12.27^{a}	94.46^{a}	41.66^{d}	45.22^{c}
	Khash	3.67^{ef}	2.18^{gh}	5.85^{g}	2.51^{ab}	9.10^{c}	10.54^{b}	89.83^{c}	35.66^{ef}	57.60^{ab}
	Qazvin	3.65^{ef}	1.70^{h}	5.35^{g}	2.00^{bc}	8.46^{de}	11.03^{b}	$91.23b^{c}$	29.33^{g}	60.83^{a}

حروف غیرمشترک در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال یک درصد بیانگر اختلاف معنی‌دار است.

Non-similar letters in each column represent significant differences based on LSD test at 1% level.

در تحقیقی تنش خشکی باعث افزایش مقادیر ظرفیت آنتی اکسیدانی، فنل کل و فلاونوئید در گیاه مریم گلی (*Salvia officinalis*) شد که با تحقیق حاضر مطابقت داشت (Ghias *et al*., 2021). یکی از راه‌حل‌های مناسب گیاهان در واکنش به تنش خشکی، استفاده از سیستم‌های غیرآنزیمی می‌باشند که قادر هستند غلظت گونه‌های واکنش‌گر و اثرات تخریبی آن را تا حدودی کاهش دهند که ترکیبات آنتی‌اکسیدان غیر آنزیمی شامل فلاونوئیدها، و سایر ترکیبات فنلی هستند (Andre *et al*., 2009). در بسیاری از پژوهش‌ها گزارش شده است که محتوای کلی ترکیبات آنتی‌اکسیدانی در شرایط تنش افزایش می‌یابند (Ghahremani *et al*., 2020). امینی فرد و همکاران (Aminifard *et al*., 2020) در تحقیقی گزارش کردند که فعالیت آنتی‌اکسیدانی، محتوای فنل کل و فلاونوئید کل برگ شنبلیله در واکنش به تنش خشکی افزایش می‌یابد که به دلیل رابطهٔ مستقیم بین افزایش فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیالیاز (PAL) و غلظت ترکیبات فنلی، مقدار سنتز این ترکیبات در شرایط تنش خشکی در مقایسه با گیاهان بدون تنش به شدت افزایش داشته است که این فرایند ارتباط مستقیم با ظرفیت آنتی‌اکسیدانی آن‌ها دارد. در پژوهش حاضر محتوای فنول کل، فلاونوئید و فعالیت آنتی‌اکسیدانی در اثر تنش خشکی در اکوتیپ‌های مختلف نعناع فلفلی بالا رفت و البته این افزایش در تنش شدید بیشتر از تنش ملایم بود، زیرا زمانی که گیاه با تنش کم آبی مواجهه می‌شود تعداد زیادی از گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر از جمله آنیون سوپراکسید و رادیکال هیدروکسیل و پراکسید هیدروژن تولید می‌گردد، که احتمال بر این است در اغلب گیاهان سیستم‌های غیرآنزیمی برای از بین بردن این رادیکال‌ها فعال می‌شوند (Jubany-Marí *et al*., 2010). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در پژوهش حاضر در اکوتیپ‌های مختلف نعناع فلفلی قبل از آن که سیستم آنزیمی وارد عمل شود گیاه با فعال کردن مسیر غیرآنزیمی در جهت مقابله با تنش شدید محتوای فلاونوئید کل خود را بالا برده‌اند. مشابه نتایج این پژوهش، محققان گزارش کردند که تولید فلاونوئیدها در گیاه همیشه بهار (Zarrinabadi *et al*., 2018) با افزایش تنش خشکی افزایش می‌یابد. طبق تحقیقات احمدی و امیدی (Ahmadi and Omidi, 2018) اثر تنش خشکی بر روی جمعیت‌های مختلف بالنگو شیرازی سبب افزایش معنی‌دار فنل کل در برگ‌های این گیاه شد، که مطابق با یافته‌های پژوهش حاضر می‌باشد. همچنین در بررسی اکوتیپ‌های مختلف گیاه دم شیر (*Leonurus cardiaca* L.) مشاهده شد که با افزایش تنش خشکی ترکیبات فنلی افزایش یافت و بین اکوتیپ‌ها از این نظر تفاوت وجود داشت و اکوتیپ مقاوم‌تر میزان بالاتری از این ترکیبات را نشان داد (Borna *et al*., 2021). به عبارتی در پژوهش حاضر نظر بر این است که انباشت ترکیباتی از قبیل فنل‌کل، فلاونوئید کل و افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در اکوتیپ‌های سرخس و مازندران در راستای تعدیل اثرهای مخرب تنش اکسیداتیو و افزایش تحمل این گیاه به تنش خشکی انجام شده است.

محتوای نسبی آب برگ

با افزایش شدت تنش خشکی از محتوای نسبی آب برگ اکوتیپ‌های مختلف نعناع فلفلی کاسته شد، به‌طوری‌که بیشترین محتوای نسبی آب برگ در اکوتیپ‌های مازندران و سرخس، در تنش ملایم حاصل گردید که به ترتیب افزایش ۶۷/۷۰ و ۴۴/۴۳ درصدی نسبت به تنش شدید داشته است و کمترین آن در اکوتیپ طبس مشاهده شد که نسبت به اکوتیپ مازندران و سرخس، به ترتیب ۱۹/۰۲ و ۱۷/۴۶ درصد کاهش یافته بود. در تنش شدید نیز اکوتیپ سرخس و قزوین با میانگین داده‌های ۴۱/۶۶ و ۲۹/۳۳ درصد به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار رطوبت نسبی برگ را داشتند (جدول ۵). اندازه‌گیری وضعیت آب بافت گیاهی به عنوان یک شاخص مهم در شناسایی واکنش گیاهان به تنش خشکی می‌باشد. افزایش

میزان محتوای رطوبت نسبی برگ و کاهش سرعت از دست رفتن آن، نشان دهنده سازگاری گیاهان به تنش خشکی می‌باشد و این شاخص می‌تواند به عنوان یک معیار گزینش گیاهان در جهت تحمل به تنش مورد استفاده قرار گیرد (Rezaei Chyanh *et al*., 2012). در پژوهش حاضر تنش خشکی باعث کاهش محتوای نسبی آب برگ اکوتیپ‌های مختلف نعناع فلفلی شد هرچند در تنش خشکی ملایم و شدید اکوتیپ‌های مازندران و سرخس نسبت به بقیه اکوتیپ‌ها بیشترین مقدار این شاخص را به خود اختصاص دادند. کاهش محتوای رطوبت نسبی برگ در اثر رطوبت پایین خاک مربوط به بسته شدن روزنه‌ها می‌باشد و دلیل انسداد روزنه مربوط به هورمون آبسیزیک اسید (ABA) است که در شرایط تنش در ریشه تولید شده و در سلول‌های محافظ روزنه تجمع می‌کند، و در نهایت باعث کاهش سرعت فتوسنتر می‌شود. بنابراین هرچه محتوای نسبی آب برگ در یک اکوتیپ در شرایط تنش کم آبی بالا باشد بیانگر تحمل آن به شرایط تنش است (Espindola *et al*., 2024). به‌طوری‌که حفظ آب گیاه می‌تواند برای یک اکوتیپ مزیت محسوب شود (Parida *et al*., 2008). در همین راستا عزیزی و همکاران (Azizi *et al*., 2021) با بررسی صفات فیزیولوژیکی اکوتیپ‌های مختلف خرفه (*Portulaca oleracea* L.) در شرایط تنش خشکی نشان دادند که اکوتیپ‌های قم و کلات نسبت به سایر اکوتیپ‌ها محتوای رطوبت نسبی برگ بالایی داشته و از حساسیت کمتری نسبت به تنش کم آبی برخوردار بوده و به‌عنوان اکوتیپ‌های متحمل به خشکی انتخاب شدند که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت داشت. بنابراین احتمال بر این است که بالا بودن رطوبت نسبی آب برگ در برخی اکوتیپ‌های متحمل نعناع فلفلی به دلیل وجود سازکارهای کاهش دهندهٔ تلفات آب با کنترل بیشتر و دقیق در باز و بسته کردن روزنه‌ها و یا به وسیلهٔ جذب آب بیشتر از طریق توسعهٔ و گسترش ریشه‌ها باشد(Sarhadi *et al*., 2016) .

نشت یونی

در شرایط تنش ملایم محتوای نشت یونی برگ نعناع فلفلی در همه اکوتیپ‌ها کاهش یافت، به‌طوری‌که مقایسه میانگین برهم‌کنش تنش و اکوتیپ‌ها نشان داد که در شرایط تنش ملایم، کمترین میزان نشت یونی در اکوتیپ سرخس حاصل شد که نسبت به تنش شدید ۲۹/۳۶ درصد کاهش داشت و بیشترین مقدار آن با میانگین ۴۰/۳۸ درصد در اکوتیپ قزوین مشاهده شد که نسبت به کمترین مقدار نشت یونی در تنش ملایم، ۲۶/۴۲ درصد افزایش داشته است. در شرایط تنش شدید هم کمترین میزان نشت یونی در اکوتیپ سرخس با میانگین ۴۵/۲۲ درصد و بیشترین مقدار برای این صفت به ترتیب در اکوتیپ‌های قزوین (۶۰/۸۳ درصد)، خاش (۵۷/۶۰ درصد) و ماهان کرمان (۵۶/۶۶ درصد) مشاهده گردید. در پژوهش حاضر احتمال بر این است که افزایش نشت یونی در اکوتیپ‌های مختلف نعناع فلفلی ناشی از تولید گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر در شرایط تنش اکسیداتیو بوده و پاک سازی آن‌ها خارج از توان دفاعی گیاه می‌باشد که بیانگر آن است سیستم‌های دفاعی برخی اکوتیپ‌ها در برابر تنش اکسیداتیو کافی نمی‌باشد، البته لازم به ذکر است که در بین اکوتیپ‌های نعناع فلفلی، اکوتیپ سرخس در هر دو سطح تنش (ملایم و شدید) واکنش نسبتاً بهتری از نظر حفظ ساختار غشا و نشت یونی از خود نشان داد. کریمی افشار و همکاران (karimi Afshar *et al*., 2016) با بررسی دو اکوتیپ زیره سبز تحت شرایط تنش خشکی اظهار داشتند که با افزایش شدت تنش خشکی محتوای نشت یونی در هر دو اکوتیپ افزایش یافت. در تحقیقی دیگر دلیری و همکاران (Daliri *et al*., 2010) روی اکوتیپ‌های مختلف ماریتیغال نشان دادند که با افزایش تنش خشکی محتوای نشت یونی در همه اکوتیپ‌ها افزایش یافت؛ اما بعضی اکوتیپ‌ها از طریق مکانیسم دفاعی مطلوب تا حدودی ترکیبات گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر را خنثی کرده و سبب کاهش آسیب به غشا و در نهایت کاهش نشت یونی در آن‌ها شد که با یافته‌های حاصل از این پژوهش مطابقت داشت.

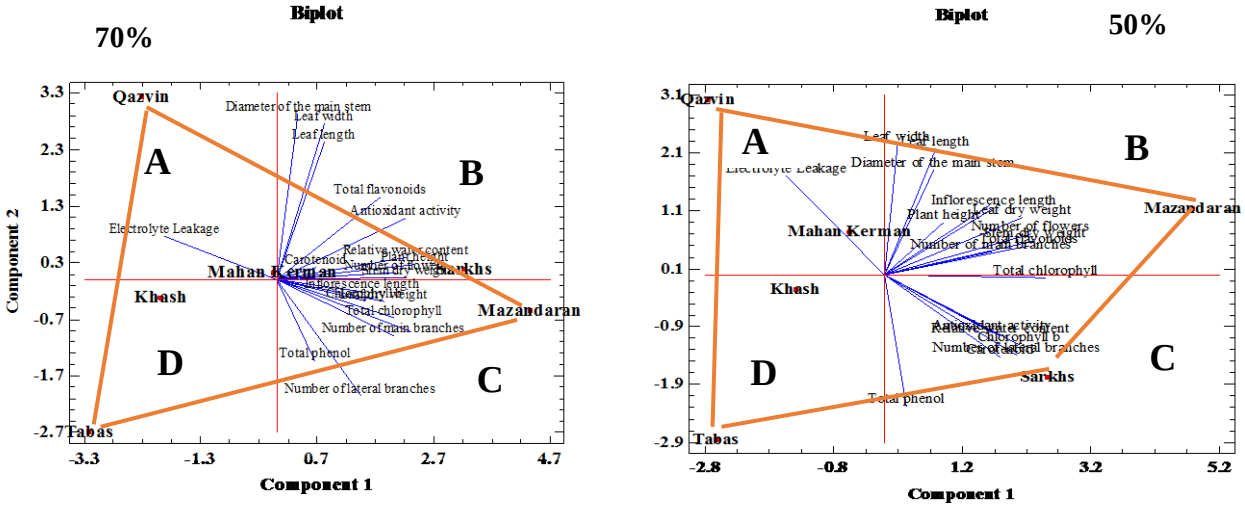
تجزیه بای پلات

در شرایط تنش ملایم

از نمودار بای پلات در مطالعات مربوط به بررسی روابط ژنتیکی بین صفات استفاده می‌شود (Karaman *et al.*, 2019; Stansluos *et al.*, 2023). در پژوهش حاضر برای درک بهتر، نمودار بای پلات به چهار ناحیه مختلف تقسیم شد. به‌طورکه طبق شکل ۱، در شرایط تنش ملایم، ناحیه B و C نمودار به عنوان برترین ناحیه مشخص شد که بیشترین مقدار صفات متمرکز شده در این ناحیه، مربوط به اکوتیپ‌های سرخس و مازندران بود. همچنین در این شرایط اکوتیپ قزوین (ناحیه A نمودار) از نظر طول برگ، عرض برگ و قطر ساقه بیشترین مقدار را دارا بود. همچنین نمودار بای پلات، زاویه بین صفات اندازه‌گیری شده از جمله طول گل‌آذین، کلروفیل b، کلروفیل کل، وزن خشک برگ و تعداد شاخه اصلی را تند نشان می‌دهد که دلالت بر وجود همبستگی بالا بین این شاخص‌ها می‌باشد.

در شرایط تنش شدید

بر اساس نمودار بای پلات (شکل ۱)، اکوتیپ‌های سرخس و مازندران در مجاورت اکثر شاخص‌های رشدی و فیزیولوژیکی (ناحیه B و C) قرا گرفته‌اند که نشان می‌دهد این اکوتیپ‌ها دارای مقادیر بالای این شاخص‌ها می‌باشند. از طرفی اکوتیپ‌های ماهان کرمان، خاش، قزوین و طبس کمترین مقدار را دارا بودند. طبق نتایج فوق اکوتیپ سرخس و مازندران نسبت به سایر اکوتیپ‌ها می‌تواند برتری داشته باشد. همچنین زاویه تند بین تعداد شاخه اصلی، وزن خشک ساقه و فلانوئید کل در ناحیه B نمودار بای پلات و بین فعالیت آنتی‌اکسیدانی، رطوبت محتوای نسبی برگ و کلروفیل b در ناحیه C دلالت بر وجود همبستگی بالا بین این صفات می‌باشد.

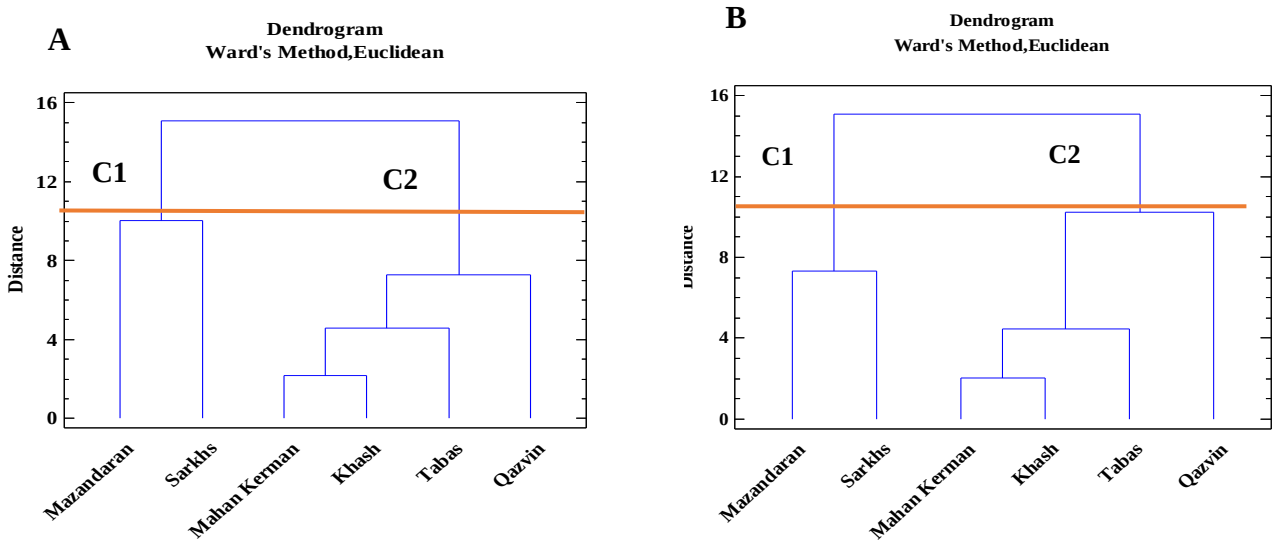


شکل ۱- ارزیابی میزان تحمل به خشکی در اکوتیپ‌های مختلف نعناع فلفلی با استفاده از تجزیه بای پلات تحت شرایط تنش خشکی (۷۰ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی).

Figure 1. Investigation of drought tolerance of different peppermint ecotypes using biplot analysis under drought stress conditions (70 and 50% of field capacity).

نتایج تجزیه خوشه‌ای

برای تعیین قرابت ژنتیکی اکوتیپ‌های مورد بررسی و گروه‌بندی آن‌ها بر اساس میانگین‌های صفات، در دو حالت تنش ملایم و تنش شدید از روش وارد استفاده شد. تجزیه خوشه‌ای در دو حالت مذکور، در فاصله ۱۰/۵ اقلیدوسی، اکوتیپ‌های مورد بررسی را به دو گروه متمایز تقسیم بندی کرد (شکل ۲). هر یک از گروه‌های اول و دوم به ترتیب شامل ۲ و ۴ اکوتیپ بودند. به‌طوری‌که اکوتیپ‌های گروه اول (C1) شامل اکوتیپ مازندران و سرخس بیشترین و گروه دوم (C2) نظیر اکوتیپ ماهان کرمان، خاش، طبس و قزوین کمترین میانگین صفات را دارا بودند. همچنین گروه‌بندی اکوتیپ‌های مختلف نعناع فلفلی به طور کامل با پراکنش جغرافیایی آن‌ها مطابقت نداشت که این مورد نشان دهندهٔ آن است که به غیر از عوامل اقلیمی مربوط به منشا جغرافیایی، دلایل دیگری از قبیل تبادل مواد ژنتیکی، وارد کردن مواد ژنتیکی و فرسایش ژنتیکی در تنوع موجود مؤثر می‌باشد. در پژوهشی ۱۲ اکوتیپ آویشن دنایی را با روش وارد در سه گروه مختلف قرار دادند که گروه‌بندی اکوتیپ‌ها با پراکنش جغرافیای آن ها مطابقت نداشت (Golestani and Sahhafi, 2020). که نتایج این پژوهش با پژوهش حاضر مطابقت داشت.



شکل۲- دندروگرام حاصل از تجزیه خوشه‌ای در اکوتیپ‌های نعناع فلفلی بر اساس صفات اندازه‌گیری‌شده تحت شرایط تنش خشکی به میزان ۷۰ (A) و ۵۰ (B) درصد ظرفیت زراعی.

Figure 2. Dendrogram of cluster analysis in peppermint ecotypes based on traits measured under stress conditions of 70 (A) and 50 (B) percent of field capacity.

نتیجه‌گیری

با توجه به یافته‌های این پژوهش، می‌توان نتیجه گرفت که کاهش شاخص‌های رشدی اکوتیپ‌های مختلف نعناع فلفلی در شرایط تنش شدید خشکی، تا حدی به دلیل کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه است که این موضوع باعث کاهش فتوسنتز و در نهایت کاهش شاخص‌های رشدی این اکوتیپ‌ها می‌شود. تغییرات صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی اندازه‌گیری شده در این پژوهش، بسته به سطح تنش و نوع اکوتیپ، بسیار متفاوت بود. در اکوتیپ‌های مازندران و سرخس درشرایط تنش خشکی ملایم، مقدار فعالیت آنتی‌اکسیدانی، ترکیبات فنولی، مقدارکارتنوئید و محتوای نسبی آب برگ در بیشترین مقدار خود نسبت به سایر اکوتیپ‌ها (ماهان کرمان، طبس، خاش و قزوین) بودند. همچنین نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها، تجزیه خوشه‌ای، و بای پلات نشان داد که در هردو شرایط تنش ملایم و شدید، اکوتیپ‌های سرخس و مازندران بیشترین سازگاری را از طریق افزایش ترکیبات فنولی وحفظ محتوای نسبی آب برگ از خود نشان دادند و به دنبال آن کمترین آسیب را از خسارت نشت یونی در مقایسه باسایر اکوتیپ‌ها داشتند. بنابراین اکوتیپ مازندان و سرخس را می‌توان به عنوان اکوتیپ‌های متحمل به خشکی در مقایسه با دیگر اکوتیپ‌ها برای انجام مطالعات بعدی پیشنهاد کرد.

سپاس‌گزاری

از دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد به دلیل در اختیار قراردادن امکانات برای انجام پژوهش حاضر قدردانی می‌گردد.

References

Ahluwalia, O., Singh, P. C., & Bhati, R. (2021). Areviw on drought stress in plants: implication, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. *Resources, Environment and Sustainability*, 5, 2-12. https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100032

Ahmadi, K.h., & Omidi, H. (2018). The effect of drought stress on physiological traits, peroxidase activit and grain yield of five populations of *Lallemantia royleana* Benth. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 34(3), 412-429. https://doi.org/10.22092/ijmapr.2018.115298.2128 [In Persian].

Aminifard, M.H., Ghaderize, H., Bayat, H., & Samadzadeh, A. (2020). Evaluation of antioxidant activity and biochemical characteristics of fenugreek medicinal plant in response to iron sulfate and biopotas under drought stress. *Journal of Plant Environmental Physiology*, 57, 39-52. https://doi.org/20.1001.1.76712423.1399.15.57.4.7 [In Persian].

Andre, C.M., Schafleitner, R., Legay, S., Lefèvre, I., Aliaga, C.A., Nomberto, G., Hoffmann, L., Hausman, J.F., Larondelle, Y., & Evers, D. (2009). Gene expression changes related to the production of phenolic compounds in potato tubers grown under drought stress. *Phytochemistry*, 70(9), 1107-1116. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2009.07.008

Anwar, F., Ali Abbas, A., Mehmood, T., Gilani, A.H., & Rehman, N.U. (2019). Mentha: A genus rich in vital nutra-pharmaceuticals-A review. *Phytotherapy Research*, 33(10), 2548-2570. https://doi.org/10.1002/ptr.6423

Ashrafia, M., Azimi-Moqadama, M.R., Moradib, P., MohseniFarda, E., Shekaria, F. & Kompany-Zareh, M. (2018). Effect of drought stress on metabolite adjustments in drought tolerant and sensitive thyme. *Plant Physiology and Biochemistry*, 132, 391–399. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.09.009

Azizi, E., Jeghal, Y.J., Kermani, M., & Masoomi, A. (2021). Investigation of some physio-morphological traits of purslane (*Portulaca oleracea* L.) landraces under drought stress. *Journal of Plant Environmental Physiology*, 63 (3), 16-34. https://doi.org/10.30495/IPER.2021.679527 [In Persian].

Baghizadeh, A., Mohammadinejad, S., & Rahimi, M. (2019). Evaluation of some biochemical characteristics of some red bean ecotypes under drought stress conditions. *Journal of Crop Breeding*, 11(29), 55-64. https://doi.org/10.29252/jcb.11.29.55 [In Persian].

Baghalian, K., Abdoshah, S.h., Khalighi Sigaroodi, F., & Paknejad, F. (2011). Physiologicaland phytochemical response to drought stress of german chamomile (*Matricaria recutita* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 49, 201- 207. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.11.010

Barrs, H.D., & Weaterley, P.E. (1962). A re-examination of the relative turgidity techniques for the estimating water deficit in leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*, 15, 413-428. https://doi.org/10.1071/BI9620413

Bellasia, C., Quirk, J., & Beerling, D. (2018). Stomatal and non-stomatal limitations in savanna trees and C4 grasses grown at low, ambient and high atmospheric CO_2. *Plant Science*, 274,181-192. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.05.028

Borna, F., Nazeri, V., Ghaziani, F., & Shokrpour, M. (2021). Morphological and physiological response of some Iranian ecotypes of *Leonurus cardiaca* L. to drought stress. *Journal of Horticulture and Postharvest Research*, 4(3), 289-302. https://doi.org/10.22077/JHPR.2020.2918.1108

Chang, C. C., Yang, M. H., Wen, H. M., & Chern, J. C. (2002). Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis*, 10(3), 178-182. https://doi.org/10.38212/2224-6614.2748

Chen, I.C., Hill, J.K., Ohlemuller, R., Roy, D., & Thomas, C. (2011). Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Journal of Science*, 333, 1024-1026. https://doi.org/10.1126/science.1206432

Cheng, L., Han, M., Yang, L.M., Yang, L., Sun, Z., & Zhang, T. (2018). Changes in the physiological characteristics and baicalin biosynthesis metabolism of *Scutellaria baicalensis* georgi under drought stress. *Industrial Crops and Products*, 122, 473–482. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.06.030

Chrysargyris, A., (2024). It runs in the family: The importance of the Lamiaceae family species. *Agronomy*, 14(6), 1274. https://doi.org/10.3390/agronomy14061274

Daliri, R., Shakarpour, M., Asghari, A., Esfandiari, E., & Seyed Sharifi, R. (2010). Evaluation of different maritimegal ecotypes in terms of drought resistance in hydroponic culture environment. *Journal of Science and Techniques of Greenhouse Crops*, 1(1), 9-17. https://civilica.com/doc/1446476/ [In Persian].

Ders, S., Gunes, T., & Sivaci, R. (1998). Spectrophotometric determination of chlorophyll a, b and total carotenoids contents of some algae species using different solvents. *Turkish Journal of Botany*, 22, 13-17 .https://journals.tubitak.gov.tr/botany/vol22/iss1/3

Emami Bistgani, Z., Barker, A.V., & Hashemi, M. (2024). Physiology of medicinal and aromatic plants under drought stress. *The Crop Journal*, 12, 330-339. https://doi.org/10.1016/j.cj.2023.12.003

Epstein, E., & Rains, D.W. (1987). Advances in salt tolerance. *Plant and Soil*, 99, 17-29. https://doi.org/10.1007/BF02370150

Espíndola, L.A. G., Sandoval, A.P., Calzada, R.T., Salcedo, M.R.J., Santos, G.G., & Rivera, J.Q. (2024). Relative water content, chlorophyll index, and photosynthetic pigments on *Lotus corniculatus* L. in response to water deficit. *Plants*, 961(13), 2-15. https://doi.org/10.3390/plants13070961

Gao, Q., Sun, J., Tong, H., Wang, W., Zhang, Y., Zang, G., Ma, D., & Chen, W. (2018). Evaluation of rice drought stress response using carbon isotope discrimination. *Plant Physiology and Biochemistry*, 132, 80-88. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.08.030

Ghahremani, A., Ganji-Moghadam, E., Tatari, M., & Khosroyar, S. (2020). Effect of drought stress (polyethylene glycol) on antioxidant and some physiological traits of paneer-boot (*withania coagulans dunal*). *Scientific-Research Journal of Sabzevar University of Medical Sciences*, 28(2), 274-285. https://www.magiran.com/p2287881 [In Persian].

Ghias, S., Shirmardi, M., Mrftahizadeh, H., & Dehestani Ardakani, M. (2021). Effect of biochar and hydrogel on morphophysiological and biochemical characteristics of common sage (*Salvia officinalis* L.) under drought stress. *Plant Productions*, 45(1), 67-80. https://doi.org/10.22055/ppd.2021.36030.1962 [In Persian].

Golestani, M., & S.R., Sahhafi. (2020). Evaluation of drought tolerance in *Thymus daenensis* subsp. *daenensis* ecotypes. *Journal of Crop Breeding*, 33, 127-139. https://doi.org/10.29252/jcb.12.33.127 [In Persian].

Golestani, M. (2021). Evaluation of yield and some agronomical traits in *Dracocephalum moldavica* L. ecotypes under drought stress condition. *Journal of Crop Breeding*, 12(36), 193-204. https://doi.org/10.52547/jcb.12.36.193 [In Persian].

Golizadeh, A., Dehghani, H., & Khodadadi, M. (2018). The effect of different levels of drought stress on some morphological, physiological and phytochemical characteristics of different stands of coriander (*Coriandrum sativum* L.). *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 12(2), 459-470. https://doi.org/10.22077/escs.2018.1308.1268 [In Persian].

Gupta, B., &, Huang, B. (2014). Mechanism of salinty tolerance in plants: Physiological, biochemical, and molecular. *International Journal of Genomics*, 1-18. https://doi.org/10.1155/2014/701596

Hussain, S., Qadir, T., Khaliq, A., Ashraf, U., Parveen, A., Saqib, M., & Rafiq, M. (2019). Drought stress in plants: An overview on implications, tolerance mechanisms and agronomic mitigation strategies. *Journal of Plant Science Today*, 6(4), 389-402. https://doi.org/10.14719/pst.2019.6.4.578

Inze, D., & Montagu, M.V. (1995). Oxidative stress in plants. *Journal of Current Opinion in Biotechnology*, 6(2), 153-158. https://doi.org/10.1016/0958-1669(95)80024-7

Jubany-Marí, T., Munné-Bosch, S., & Alegre, L. (2010). Redox regulation of water stress responses in field-grown plants. Role of hydrogen peroxide and ascorbate. *Journal of Plant Physiology and Biochemistry*, 48(5), 351-358. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.01.021

Kapoor, D., Bhardwaj, S., Landi, M., Sharma, A., Ramakrishnan, M., & Sharma, A. (2020). The impact of drought in plant metabolism: How to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. *Journal of Applied Sciences*, 10, 2-19. https://doi.org/10.3390/app10165692

Karimi Afshar, A., Baghaizadeh, A., & Mohammadi Nejad, G. (2015). Physiological assessment of drought tolerance in two ecotypes of Cumin (*Cuminum cyminum* L.) under greenhouse conditions. *Science and Technology in Greenhouse Cultivation*. 23(6), 175-184. https://doi.org/10.18869/acadpub.ejgcst.6.3.175 [In Persian].

Karaman, M. (2019). Evaluation of bread wheat genotypes in irrigated and rainfed conditions using biplot analysis. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(1), 1431-1450. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1701_14311450

Kazemi, H., Mortazavian, S.M., & Ghorbani Javid, M. (2017). Physiological responses of cumin (*Cuminum cyminum*) to water defici stress. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 48(4), 1099-1113. https://doi.org/10.22059/IJFCS.2017.211455.654151 [In Persian].

Keshavarz, H., Modarres Sanavy, S.A.M., & Mehdipour Afra, M. (2018). Organic and chemical fertilizer affected yield and essential oil of two Mint species. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 21, 1674-1681. https://doi.org/10.1080/0972060X.2018.1497545

Kheiry, A., Tori, H., & Mortazavi, N. (2017). Effects of drought stress and jasmonic acid elicitors on morphological and phytochemical characteristics of pepermint (*Mentha piperita* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 33, 268-280. https://doi.org/10.22092/ijmapr.2017.106481.1783 [In Persian]

Kiran S. (2019). Effects of Vermicompost on some morphological, physiological and biochemical parameters of lettuce (*Lactuca sativa* var. crispa) under drought stress. *Notulae Botanicae Horticulture Agrobotanic*, 47(2), 352-58. https://doi.org/10.15835/nbha47111260

Luo, L., Xia, H., & Lu, B. (2019). Editorial crop breeding for drought resistance. *Frontiers in Plant Science*, 1-2. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00314

Maleki farahani, S., & Abdulahi, M. (2014). The effect of low irrigation pattern on the growth, yield and yield components of two species of balango (*Lallemantia royleana and iberica*) from Mashhad and Urmia region. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 12(3), 502-515. https://doi.org/10.22067/gsc.v12i3.23978 [In Persian].

Maleki nejad, R., & Majidi, M.M. (2015). Evaluation of Iranian and foreign safflower germplasms under normal and drought stress conditions. *Journal of Crop Breeding*, 7(15), 1-13. http://jcb.sanru.ac.ir/article-1-418-fa.html [In Persian].

Mahendran, G., & Rahman, L.U. (2020). Ethnomedicinal, phytochemical and pharmacological updates on Peppermint (Mentha × piperita L.)-A review. *Phytotherapy Research*, 34(9), 2088-2139. https://doi.org/10.1002/ptr.6664

Marcum, K.B. (1998). Cell membrane the removability and whole-plant heat tolerance of Kentucky bluegrass. *Journal of Crop Science*, 38, 1214-1218. https://doi.org/10.2135/cropsci1998.0011183X003800050017x

Marcum, D., & Hanson, B. (2006). Effect of irrigation and harvest timing on peppermint oil yield in California. *Journal of Agricultural Water Management*, 82, 118–128. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.022

McKay, D. L., & Blumberg, J. B. (2006). A review of the bioactivity and potential health benefits of peppermint tea (*Mentha piperita* L.). *Phytotherapy Research*, 20(8), 619-633. https://doi.org/10.1002/ptr.1936

Mensah, J., Obadoni, B., Eruotor, P., & Onome-Irieguna, F. (2006). Simulated flooding and drought effects on germination, growth, and yield parameters of sesame (*Sesamum indicum* L.). *African Journal of Biotechnology*, 5, 25-40. https://doi.org/10.4314/AJB.V5I13.43092

Mohtasham, R. (2023). Evaluation of morphological characteristics, yield, mucilage, and seed oil in some *Lallemantia iberica* (M.B.) Fisch, & C.A. Mey. ecotypes under dryland conditions. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 39(2), 255-264. https://doi.org/10.22092/ijmapr.2023.359326.3205 [In Persian].

Moon, J.H., & Terao, J. (1998). Antioxidant activity of caffeic acid and dihydrocaffeic acid in lard and human low-density lipoprotein. *Agriculture and Food Chemistry*, 46, 5062-5065. http://dx.doi.org/10.1021/jf98

Neumann, P.M. (2008). Coping mechanisms for crop plants in drought-prone environments. *Annals of Botany*, 101(7), 901-907. https://doi.org/10.1093/aob/mcn018

Nezami, S., Nemati, S.H., Aroei, H., & Bagheri, A.R. (2017). The effect of investigating the effects of drought stress on vegetative characteristics of three mint species. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 9(1), 59-74. https://doi.org/10.22077/ESCS.2016.300 [In Persian].

Okwany, R. O., Peters, T.R., Ringer, K. L., Walsh, D, B., & Rubio, M. (2011). Impact of sustained deficit irrigation on spearmint (*Mentha spicata* L.) biomass production, oil yield, and oil quality. *Journal of Irrigation Science*, 3(3), 213-219. https://doi.org/10.1007/S00271-011-0282-4

Parida, A.K., Dagaonkar, V.S., Phalak, M.S., & Aurangabadkar, L.P. (2008). Differential responses of the enzymes involved in proline biosynthesis and degradation in drought tolerant and sensitive cotton genotypes during drought stress and recovery. *Acta Physiologiae Plantarum*, 30, 619–627. https://doi.org/10.1007/S11738-008-0157-3

Rezaei Chyanh, A., Zehtab, S., Ghasemi Golezani, K., & Delazar, A. (2012). Physiological reaction fennel *(Foeniculum vulgar* L.) to water limitation. *Journal of Agroecology*, 4, 347-355. https://dx.doi.org/10.22067/jag.v4i4.17827 [In Persian].

Sadeghzadeh-Ahari, D. Kashi, A.K., Hassandokht, M.R., Amri, A., & Alizadeh, K.H. (2009). Assessment of drought tolerance in Iranian fenugreek landraces. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 7, 414-419. https://doi.org/10.1234/4.2009.2614

Sarhadi, H., Daneshian, J., Valadabadi, S.A., Sharafabad, H.H., & Afshar Manesh, G. (2016). Studying the effect of low irrigation and nitrogen on physiological traits of henna plant ecotypes (*Lawsonia inermis*) in Jiroft region. *New Finding in Agriculture*, 1, 30-46. https://www.magiran.com/p1481023 [In Persian].

Saremirad, A., & Mostafavi, K. (2020). Study of genetic and phenotypic diversity of sunflower (*Helianthus annus* L.) genotypes for agro-morphological traits under normal and drought stress conditions. *Plant Productions*, 43(2), 227-240. https://doi.org/10.22055/ppd.2020.27588.1671 [In Persian].

Saydi, Z., Abbasi, N., Zarea, M.J., & Zarei, B. (2022). Effects of nitroxin biofertilizer on morpho-physiological characteristics of Blackseed (*Nigella sativa* L.) ecotypes under drought stress. *Journal of Agroecology*, 14(3), 485-507. https://doi.org/10.22067/AGRY.2021.20298.0 [In Persian].

Selmar, D., & Kleinwächter, M. (2013). Influencing the product quality by deliberately applying drought stress during the cultivation of medicinal plants. *Industrial Crops and Products*, 42, 558-566. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.06.020

Shtayeh, M.S.A., Jamous, R.M., Zaitoun, S.Y.A., Khasati, A.I., & Kalbouneh,S.R. (2019) Biological properties and bioactive components of *Mentha spicata* L. essential oil: Focus on potential benefits in the treatment of obesity, alzheimer's disease, dermatophytosis, and drug-resistant infections. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 1-11. https://doi.org/10.1155/2019/3834265

Singleton, V.L., & Rossi, J.A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phoshomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16, 144-158. https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144

Soorni J., J. Roustakhiz, J., Salimi, K.H., & Noori, M. (2019). Effects of drought stress on yield and yield-related traits, antioxidant enzymes and essential oil content of some Cumin (*Cuminum cyminum* L.) ecotypes. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 13(4), 1125-1134. https://doi.org/10.22077/ESCS.2020.2395.1624 [In Persian].

Stansluos, A.A.L., Öztürk, A., Niedbała, G., Türkoˇglu, A., Haliloˇglu, K. Szulc, P., Omrani, A., Wojciechowski, T., & Piekutowska, M. (2023). Genotype–trait (GT) biplot analysis for yield and quality stability in some sweet corn (*Zea mays* L. saccharata. sturt.) genotypes. *Journal of Agronomy*, 158(13), 2-19. https://doi.org/10.3390/agronomy13061538

Tambussi, E. A., Bartoli, C. G., Bettran, J., Guiamet, J. J., & Araus, J. C. (2016). Oxidative damage to thylakoids proteins in water stressed leaves of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Physiologia Plantarum*, 108, 398-404. https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2000.t01-1-100409.x

Tohidi, Z., Sobhanian, H., & Baghizadeh, A. (2021). Evaluation and comparison of ten ecotypes of *Teucrium polium* L. in tolerance to drought stress. *Journal of Plant Environmental Physiology*, 16(62), 123-138. doi: https://doi.org/10.30495/iper.2021.679559 [In Persian].

Uikey, J. (2024). Reviewing of plant belonging to lamiaceae family. *International Journal of Scientific Development and Research*, 9(3), 186-191. https://doi.org/10.5281/zenodo.13309903

Zarrinabadi, I.G., Razmjoo, J., Abdali Mashhadi, A., & mojeni, H.K. (2018). Evaluation of some physiological and biochemical characteristics of pot marigold (*Calendula officinalis*). *Scientific Journal Iranian Society of Plant Physiology*, 8(33), 30-45. http://jispp.iut.ac.ir/article-1-1059-fa.html [In Persian].

Zhang, S., Xu, X., Sun, Y., Zhang, J., & Li, C. (2018). Influence of drought hardening on the resistance physiology of potato seedlings under drought stress. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(2), 336-347. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61758-1