Research Article

Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research

DOI: 10.22092/IJMAPR.2026.370383.3566

Vol. 42, No. 3, Page 497-514 (2026)

Evaluation of drought tolerance and essential oil yield in thyme (*Thymus* spp.) populations using drought tolerance indices

Maryam Alipour[1], Maryam Haghighi[2]* and Mehdi Rahimmalek[3]

1. PhD graduate, Department of Horticulture, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
2*. Corresponding author, Department of Horticulture, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, E-mail: mhaghighi@cc.iut.ac.ir
3. Department of Horticulture, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Received: 13/08/2025 Revised: 25/09/2026 Accepted: 28/09/2026

Abstract

Background and objectives: Thyme (*Thymus* spp.) is an important medicinal and aromatic plant belonging to the Lamiaceae family. It is highly valued for its phenolic compounds and essential oils, which are widely used in the pharmaceutical, food, and cosmetic industries. The genus comprises more than 200 species and exhibits considerable genetic diversity in Iran, providing substantial potential for breeding programs. Drought is a major constraint on thyme production in semi-arid regions and can influence plant growth and essential oil composition. Quantitative indices for assessing drought tolerance, including the stress tolerance index (STI), geometric mean productivity (GMP), mean productivity (MP), harmonic mean (HM), and yield stability index (YSI), can be used to identify drought-tolerant genotypes. Previous studies on different Thymus species demonstrated that GMP and STI exhibit stronger correlations with biomass and essential oil yield than some other indices. Therefore, evaluating different populations under both drought-stress and non-stress conditions is essential for identifying superior genotypes with desirable agronomic and phytochemical characteristics.

Methodology: This study evaluated ten thyme (*Thymus* spp.) populations, comprising nine native Iranian populations and *Th. vulgaris* from Europe as a reference population. The experiment was conducted in pots under greenhouse conditions with natural light and a relative humidity of 65%. A two-factor factorial experiment was arranged in a completely randomized design (CRD) with three replications, each containing five pots per treatment. The potting substrate consisted of a mixture of field soil, sand, and well-rotted manure in a 1:2:3 ratio, with a total substrate weight of 5 kg per pot. Irrigation was managed according to soil field capacity and adjusted daily by weighing the pots. Two irrigation treatments were applied: 100% of field capacity as the control and 40% of field capacity as the drought-stress treatment. Aboveground dry biomass was harvested 50 days after the application of drought stress and subsequently dried. Essential oils were extracted from 100 g of dried plant material using hydrodistillation, and essential oil content was determined as a volumetric percentage. Quantitative drought tolerance indices, including STI, GMP, MP, HM, and the stress susceptibility index (SSI), were calculated. Analysis of variance and mean comparisons using the least significant difference (LSD) test were performed in SAS software. Correlation coefficients, cluster analysis using Ward's method, and biplot diagrams were also employed to assess relationships among the measured traits and classify the populations according to their responses to drought stress.

Results: The results indicated that population, irrigation regime, and their interaction significantly affected aboveground dry biomass, essential oil content, and essential oil yield at the 5% significance level. Drought stress significantly reduced dry biomass in all populations, although the magnitude of the reduction varied among them. *Th. pubescens*, *Th. kotschyanus-2*, and *Th. vulgaris* exhibited the smallest reductions in biomass under drought stress. In contrast,

Copyright: © 2026 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (http://ijmapr.areeo.ac.ir/) and 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 author and source are credited.

essential oil content increased in most populations under drought conditions, with the highest values recorded in *Th. fedtschenkoi* and *Th. kotschyanus-2*. This increase may be attributable to the concentration of secondary metabolites associated with reduced vegetative growth. Analysis of quantitative drought tolerance indices revealed significant differences in drought stress among populations. Based on STI, GMP, HM, the yield index (YI), and the drought resistance index (DI), *Th. kotschyanus-2* and *Th. fedtschenkoi* were identified as the most drought-tolerant populations, whereas *Th. daenensis-1* and *Th. daenensis-2* were the most sensitive. Principal component analysis showed that the first two principal components explained 57.98% of the total variation among the populations. The first component was primarily associated with drought tolerance indices, whereas the second was associated with sensitivity indices. The biplot and cluster analysis jointly classified *Th. kotschyanus-2*, *Th. pubescens*, and *Th. vulgaris* as high-performing, drought-tolerant populations. In contrast, *Th. daenensis-1*, *Th. daenensis-2*, *Th. serpyllum*, and *Th. migricus* were classified as drought-sensitive populations with relatively low performance.

Conclusion: Overall, the findings indicated that thyme populations responded differently to drought stress, with some populations maintaining relatively high performance or increasing essential oil content despite reduced vegetative growth. The STI, GMP, and HM indices were identified as the most reliable criteria for selecting drought-tolerant populations. Based on these indices, Th. kotschyanus-2 and Th. fedtschenkoi were identified as promising candidates for cultivation under drought conditions. These populations may therefore be valuable genetic resources for breeding programs aimed at improving drought tolerance and supporting the sustainable cultivation of thyme in arid and semi-arid regions.

Keywords: *Thyme*, drought stress, drought tolerance indices, essential oil yield, genetic diversity.

ارزیابی تحمل به تنش خشکی در جمعیت‌های مختلف آویشن (*Thymus* spp.) با استفاده از شاخص‌های تحمل به خشکی و عملکرد اسانس

مریم عالی‌پور[۱]، مریم حقیقی[۲*] و مهدی رحیم ملک[۳]

۱- دانش‌آموخته دکتری تخصصی، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

۲*- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، پست‌الکترونیک: mhaghighi@cc.iut.ac.ir

۳- استاد، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲ تاریخ اصلاح نهایی: ۱۴۰۵/۰۷/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۰۶

چکیده

سابقه و هدف: آویشن (*Thymus* spp.) از گیاهان دارویی و معطر مهم خانواده نعناعیان (Lamiaceae) است که به‌دلیل دارا بودن ترکیبات فنولی و اسانس‌های ارزشمند، در صنایع دارویی، غذایی و آرایشی اهمیت دارد. این جنس با بیش از ۲۰۰ گونه، از تنوع ژنتیکی قابل‌توجهی در ایران برخوردار است و ظرفیت بالایی برای برنامه‌های اصلاحی دارد. خشکی از مهمترین عوامل محدودکننده تولید آویشن در مناطق نیمه‌خشک بوده و می‌تواند رشد و ترکیب شیمیایی اسانس را تحت تأثیر قرار دهد. شاخص‌های کمی تحمل به خشکی شامل STI، GMP، MP، HM و YSI ابزارهای مناسبی برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل هستند. مطالعات در گونه‌های مختلف *Thymus*، همبستگی بالاتر GMP و STI با عملکرد زیست‌توده و اسانس را نشان داده‌اند. ازاین‌رو، ارزیابی جمعیت‌های مختلف در شرایط تنش و غیرتنش برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر ضروریست.

مواد و روش‌ها: این مطالعه شامل ده جمعیت آویشن (*Thymus* spp.) ازجمله ۹ جمعیت بومی ایران و *Th. vulgaris* از اروپا به‌عنوان مرجع بود. آزمایش به‌صورت گلدانی در گلخانه با نور طبیعی و رطوبت نسبی ۶۵٪ اجرا گردید. طرح آزمایشی فاکتوریل دو عاملی در قالب کاملاً تصادفی با سه تکرار و هر تکرار شامل ۵ گلدان بود. خاک گلدان‌ها مخلوطی از خاک مزرعه، ماسه و کود دامی پوسیده به نسبت ۱:۲:۳ و ظرفیت نگهداری ۵ کیلوگرم داشت. میزان آب هر گلدان براساس ظرفیت زراعی خاک و وزن روزانه تنظیم شد؛ تیمارها شامل ۱۰۰٪ (شاهد) و ۴۰٪ (تنش خشکی) ظرفیت زراعی بودند. اندام هوایی ۵۰ روز پس از اعمال تنش برداشت و خشک شد. اسانس از نمونه‌های خشک به وزن ۱۰۰ گرم با روش تقطیر با آب استخراج و درصد حجمی آن محاسبه شد. شاخص‌های کمی تحمل به خشکی مانند STI، GMP، MP، HM و SSI محاسبه گردید. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در نرم‌افزار SAS انجام شد و ضریب همبستگی و گروه‌بندی جمعیت‌ها با روش خوشه‌بندی Ward و نمودار بای‌پلات مورد تحلیل قرار گرفت.

نتایج: یافته‌های این پژوهش نشان داد که اثر جمعیت، رژیم آبیاری و برهم‌کنش آنها بر صفات وزن خشک اندام هوایی، درصد و عملکرد اسانس در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. تنش خشکی سبب کاهش معنی‌دار وزن خشک در تمامی جمعیت‌ها شد، اما شدت کاهش در بین آنها متفاوت بود؛ به‌طوری‌که جمعیت‌های *Th. pubescens*، *Th. kotschyanus-2* و *Th. vulgaris* کمترین افت عملکرد را نشان دادند. در مقابل، درصد اسانس در بیشتر جمعیت‌ها تحت تنش خشکی افزایش یافت و بالاترین میزان در *Th. fedtschenkoi* و *Th. kotschyanus-2* مشاهده شد که احتمالاً ناشی از افزایش غلظت متابولیت‌های ثانویه در اثر کاهش رشد رویشی بود. بررسی شاخص‌های کمی تحمل به خشکی نشان داد که جمعیت‌های مورد مطالعه از نظر تحمل به تنش تفاوت معنی‌داری با هم دارند. براساس شاخص‌های STI، GMP، HM، YI و DI، جمعیت‌های *Th. kotschyanus-2* و *Th. fedtschenkoi* متحمل‌ترین و *Th. daenensis-1* و *Th. daenensis-2* حساس‌ترین جمعیت‌ها بودند. تجزیه مؤلفه‌های اصلی نشان داد که دو مؤلفه نخست ۵۷/۹۸ درصد از کل تغییرات را توضیح می‌دهند؛ مؤلفه اول با شاخص‌های مرتبط با تحمل به خشکی و مؤلفه دوم با شاخص‌های حساسیت ارتباط داشت. براساس

بای‌پلات و خوشه‌بندی، جمعیت‌های *Th. kotschyanus-2*، *Th. pubescens* و *Th. vulgaris* در گروه متحمل با عملکرد بالا و *Th. daenensis-1*، *Th. daenensis-2*، *Th. serpyllum* و *Th. migricus* در گروه حساس با عملکرد پایین قرار گرفتند.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی، نتایج این پژوهش نشان داد که جمعیت‌های آویشن واکنش متفاوتی به تنش خشکی داشتند و برخی از آنها توانستند با وجود کاهش رشد رویشی، عملکرد اسانس خود را حفظ یا افزایش دهند. شاخص‌های STI، GMP و HM بهترین معیارها برای شناسایی جمعیت‌های متحمل به خشکی بودند. بر این اساس، جمعیت‌های *Th. kotschyanus-2* و *Th. fedtschenkoi* به‌عنوان جمعیت‌های برتر و پایدار در شرایط خشکی معرفی شدند؛ بنابراین، این جمعیت‌ها می‌توانند در برنامه‌های اصلاحی و توسعه کشت آویشن در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار بگیرند.

واژه‌های کلیدی: آویشن، تنش خشکی، شاخص‌های تحمل به خشکی، عملکرد اسانس، تنوع ژنتیکی.

مقدمه

آویشن ازجمله مهمترین گیاهان معطر و دارویی خانواده نعناعیان (Lamiaceae) است که به‌دلیل داشتن اسانس‌های غنی و متابولیت‌های ثانویه متعدد در صنایع غذایی، دارویی و آرایشی-بهداشتی کاربرد فراوان دارد. جنس *Thymus* شامل حدود ۲۱۴ گونه و ۳۶ زیرگونه در مجموعه‌ای در حدود ۲۵۰ تَکسون گزارش شده است و پراکنش اصلی آن در ناحیه مدیترانه‌ای و بخش‌هایی از اروپا و غرب آسیاست؛ در ایران نیز تنوع ژنتیکی و وجود گونه‌های بومی مهمی از این جنس گزارش شده است که آن را به یک منبع ارزشمند برای مطالعات فیتوفارماکولوژی و اصلاح گیاهان دارویی تبدیل می‌کند (Rosenova *et al*., 2025). خانواده نعناعیان به‌عنوان یکی از خانواده‌های بزرگ گیاهی با بیش از چند هزار گونه، از نظر ترکیبات آروماتیک، فنولوژی و توانایی تولید اسانس‌ها بسیار متنوع و قابل‌توجه است؛ ویژگی‌های مورفولوژیکی مانند ساقه چهارتایی و برگ‌های متقابل همراه با فراوانی ترکیبات فنولی و ترپنوئیدی، علت اصلی کاربردهای دارویی و صنعتی این خانواده است. مطالعات مروری اخیر نشان می‌دهد که گونه‌های نعناعیان نه‌تنها منابع غنی از ترکیبات زیست‌فعال‌اند، بلکه به‌عنوان گونه‌هایی با ظرفیت بالای اهلی‌سازی و توسعه کشت تجاری در مناطق خشک نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند (Mansinhos *et al*., 2024).

تنش خشکی یکی از محدودکننده‌های اصلی تولید گیاهان دارویی در مناطق نیمه‌خشک است و می‌تواند همزمان اثر متضادی بر صفات رویشی (مانند وزن خشک) و صفات کمی-کیفی (مانند درصد و عملکرد اسانس) داشته باشد. گزارش‌های اخیر نشان می‌دهد که واکنش گونه‌های *Thymus* به خشکی وابسته به شدت و مدت تنش و نیز به ویژگی‌های ژنتیکی هر گونه است؛ در برخی مطالعات درصد اسانس تحت تنش خفیف تا متوسط افزایش یافته، در حالی که تنش شدید منجر به کاهش درصد اسانس و عملکرد کلی اسانس شده است. این نوسان‌ها ناشی از تغییرات در سطح برگ، غلظت متابولیت‌ها و سازوکارهای حفاظتی فیزیولوژیک است (Tan & Gören., 2024).

گیاهان دارویی، به دلیل ویژگی‌های ژنتیکی و وجود برخی متابولیت‌های ثانویه، نسبت به سایر گیاهان توانایی بیشتری در تحمل تنش‌ها دارند و به‌عنوان گزینه‌های مناسبی برای کشت و کار در شرایط تنش‌زا شناخته می‌شوند (Omidbaigi, 2015). با توجه به نیاز روزافزون صنایع به اسانس‌های با کیفیت و حفظ جمعیت‌های طبیعی گونه‌های وحشی، بهبود روش‌های کشت و انتخاب ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی اهمیت یافته است. در این راستا، استفاده از شاخص‌های کمی تحمل به خشکی (مانند STI، GMP، MP، SSI، YSI و HM) برای ارزیابی و شناسایی ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالا در شرایط تنش و غیرتنش، در سال‌های اخیر مورد بازنگری و استفاده گسترده قرار گرفته است؛ مطالعات جدید معیارها و کارآمدی این شاخص‌ها را در گونه‌های مختلف نشان داده و روش‌های تلفیقی را برای افزایش دقت انتخاب پیشنهاد کرده‌اند (Sun *et al*., 2023).

با توجه به مشاهدات Fernandez (۱۹۹۲) ژنوتیپ‌ها

براساس واکنش‌شان به شرایط محیطی به چهار گروه تقسیم‌بندی شدند: گروه A شامل ژنوتیپ‌هایی است که در هر دو محیط با تنش و بدون تنش عملکرد خوبی دارند. گروه B شامل ژنوتیپ‌هایی می‌شود که فقط در محیط بدون تنش عملکرد مناسبی دارند. گروه C به ژنوتیپ‌هایی تعلق دارد که در شرایط تنش عملکرد خوبی نشان می‌دهند. گروه D شامل ژنوتیپ‌هایی است که در هر دو محیط عملکرد ضعیفی دارند. برای ارزیابی واکنش ژنوتیپ‌ها در شرایط مختلف و تعیین مقاومت و حساسیت آنها، شاخص‌های متعددی معرفی شده است. بهترین معیار انتخاب، معیاری است که بتواند گروه A را به‌طور واضح از سه گروه دیگر متمایز کند. شاخص‌های تحمل (TOL) و میانگین حسابی (MP) توسط Rosielle و Hamblin (۱۹۸۱) تعریف شد. مقادیر کمتر شاخص TOL نشان‌دهنده تحمل بالاتر ژنوتیپ در برابر تنش می‌باشد. برخلاف شاخص TOL، در شاخص MP مقادیر کمتر نشان‌دهنده حساسیت بالاتر ژنوتیپ‌ها به شرایط تنش است. این دو محقق نشان دادند که در بیشتر آزمایش‌های مقایسه‌ای عملکرد، همبستگی بین MP و Yp و بین MP و Ys مثبت بوده است، بنابراین انتخاب براساس شاخص MP بیشتر باعث افزایش عملکرد ژنوتیپ‌ها تحت هر دو شرایط تنش و بدون تنش خواهد شد. هنگامی‌که اختلاف نسبی زیادی بین Yp و Ysوجو دارد، شاخص MP دارای یک اریب به‌طرف ظرفیت عملکرد (Yp) خواهد بود. ازاین‌رو، برای رفع این مشکل، شاخص GMP توسط Fernandez (۱۹۹۲) ارائه شد. این شاخص براساس میانگین هندسی عملکرد ژنوتیپ‌ها تحت شرایط تنش و بدون تنش محاسبه می‌شود، ازآنجایی‌که این شاخص حساسیت کمتری به مقادیر بسیار متفاوت Yp و Ys دارد می‌تواند مؤثرتر از شاخص MP باشد، همچنین، Fernandez (۱۹۹۲) نیز شاخص دیگری تحت عنوان شاخص تحمل به تنش (STI) را پیشنهاد کرد که این شاخص توانایی شناسایی ژنوتیپ‌ها با ظرفیت عملکرد بالا را در شرایط بدون تنش و عملکرد بالا در شرایط تنش دارد. مقادیر بالاتر شاخص‌های STI و GMP نمایانگر تحمل بالاتر ژنوتیپ‌ها به تنش است. از سوی دیگر، Lan (۱۹۹۸) شاخص خشکی (DI) را معرفی کرد. شاخص‌های DI و STI نه‌تنها توان ژنوتیپ‌ها برای تولید عملکرد بالا در شرایط تنش را در نظر می‌گیرند بلکه عملکرد مناسب در شرایط مطلوب را نیز ملاک قرار می‌دهند. مطالعات انجام شده توسط Fischer و Maurer (۱۹۷۸) شاخص حساسیت به تنش (SSI) را برای شناسایی ژنوتیپ‌های حساس به تنش ارائه کردند. این شاخص براساس عملکرد هریک از ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش و بدون تنش و میانگین عملکرد تمامی ژنوتیپ‌ها در این دو شرایط طراحی شده است. مانند شاخص TOL، مقادیر بالای این شاخص دلالت بر حساسیت ژنوتیپ‌ها به تنش است. طبق تحقیقات Bouslamaو Schapaugh (۱۹۸۴) شاخص پایداری عملکرد (YSI) مطرح شد که عملکرد در شرایط تنش، یک رقم را با توجه به عملکرد غیر تنش آن ارزیابی می‌کند و می‌تواند شاخص مناسبی برای شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی باشد، بنابراین ارقامی با YSI بالاتر انتظار می‌رود که در هر دو شرایط عملکرد بالاتری داشته باشند. پیش‌بینی می‌شود ژنوتیپ‌های دارای YSI بالا، عملکرد بالایی تحت تنش و عملکرد پایینی تحت شرایط بدون تنش داشته باشند. شاخص عملکرد (YI) رتبه‌دهی را تنها بر پایه عملکرد حالت تنش انجام می‌دهد، بنابراین نمی‌تواند ژنوتیپ‌هایی را که در شرایط تنش و غیر تنش عملکرد خوبی دارند، شناسایی کند (Gavuzzi *et al*., 1997). ژنوتیپ‌های با مقادیر بالای میانگین هارمونیک (HM) مطلوب هستند. شاخص انتخاب بهینه، معیاری است که ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا را در شرایط تنش و غیر تنش شناسایی می‌کند (Fernandez, 1992).

مشخص شده است که بین شاخص‌های GMP، MP و STIبا عملکرد گیاه و بین خودشان همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد که نشان‌دهنده برتری این شاخص‌ها در انتخاب ژنوتیپ‌های برتر از لحاظ عملکرد در شرایط تنش‌زا است. شاخص تحمل تنش‌های غیرزنده (ATI) را نیز Mousavi و همکاران (۲۰۰۸) معرفی کردند.

با توجه به مشاهدات Dorrani-Nejad و همکاران

(۲۰۱۹) بر روی ۱۵ ژنوتیپ زیره سبز، شاخص‌های MP، STI و GMP را به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص‌ها برای شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی معرفی کردند. در بررسی گیاه آویشن دنایی‌Golestani (۲۰۲۱) نشان داد که شاخص‌های HM، GMP، MP، YI و STI به‌عنوان بهترین شاخص‌ها برای گروه‌بندی اکوتیپ‌های متحمل و حساس محسوب می‌شوند. همچنین در مطالعه‌ای دیگر توسط Khorshidi و همکاران (۲۰۱۵) بر روی *Thymus daenensis* و اکوتیپ‌های مرتبط، نشان داده‌اند که شاخص‌های GMP، STI، MP و HM به‌خوبی با وزن خشک و معیارهای عملکردی مرتبط بوده و برای شناسایی اکوتیپ‌های مقاوم مناسب‌اند؛ این مطالعات پیشنهاد کردند که ترکیب چند شاخص (به‌ویژه GMP و STI) دقت انتخاب را افزایش می‌دهد.

از آنجا که ترکیب شیمیایی اسانس و پاسخ به تنش درون جنس *Thymus* بین اکوتیپ‌ها بسیار متغیر است، مطالعات مقایسه‌ای بین جمعیت‌ها (در شرایط کنترل و تنش) برای تعیین منابع ژنتیکی مناسب برای اهلی‌سازی و برنامه‌های اصلاحی ضروریست. علاوه بر این، توسعه روش‌های کشت پایدار و تعیین جمعیت‌هایی که هم توان حفظ عملکرد ماده خشک و هم عملکرد و کیفیت اسانس را در شرایط تنش حفظ می‌کنند، می‌تواند به کاهش فشار برداشت از منابع طبیعی و افزایش بهره‌وری در مناطق خشک کمک نماید (Etri & Pluhár, 2024).

با توجه به نکات ذکرشده، هدف این مطالعه بازبینی‌شده عبارت است از: ارزیابی شاخص‌های کمی تحمل به خشکی و شناسایی جمعیت‌های *Thymus* که توانایی حفظ عملکرد و کیفیت اسانس را در شرایط تنش خشکی و شرایط مطلوب دارند، که نتایج آن علاوه بر کاربرد اصلاحی، می‌تواند راهنمایی برای توسعه کشت تجاری و مدیریت پایدار منابع ژنتیکی آویشن در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم نماید.

مواد و روش‌ها

این مطالعه بر روی ده جمعیت آویشن (*Thymus* spp) شامل ۹ جمعیت بومی ایران و *Th. vulgaris* از اروپا به‌عنوان مرجع انجام شد (جدول ۱). بذر جمعیت‌های بومی آویشن از بانک ژن گیاهی مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور (تهران) تهیه شد. شناسایی و تأیید گونه‌ها توسط دکتر احمد مظفریان و براساس فلور ایران انجام گردید. بذر گونه *Th. vulgaris* نیز به‌عنوان گونه شاهد از منبع اروپایی معتبر خریداری گردید. آزمایش به‌صورت گلدانی در گلخانه‌های تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان و تحت شرایط نور طبیعی و رطوبت نسبی حدود ۶۵٪ اجرا شد. طرح آزمایشی به‌صورت فاکتوریل دو عاملی و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و هر تکرار شامل ۵ گلدان برای هر تیمار، طراحی گردید. عامل اول شامل ده جمعیت آویشن و عامل دوم شامل دو سطح آبیاری ۱۰۰ درصد (شاهد) و ۴۰ درصد (تنش خشکی) ظرفیت زراعی خاک (FC = Field capacity) بود.

جدول ۱- نام، محل جمع‌آوری، کد بانک بذر و کد اختصاصی جمعیت‌های ارزیابی شده در پژوهش

Table 1. Name, collection location, seed bank code, and specific code of the populations evaluated in the study

Row	Population	Collection location	Institute of forests and rangelands bank code	Population specific code
1	*Th. migricus*	Shahdieh, Yazd	33918	Tm
2	*Th. fallax*	Shahdieh, Yazd	33916	Tf
3	*Th. serpyllum*	Shahdieh, Yazd	33920	Ts
4	*Th. pubesence*	Shahdieh, Yazd	39341	Tp
5	*Th. daenensis-1*	Daran, Isfahan	18209	Td_1
6	*Th. daenensis-2*	Khorramabad, Lorestan	1110	Td_2
7	*Th. fedtschenkoi*	Miandoab, West Azerbaijan	17969	Tfed
8	*Th. kotschyanus-1*	Qazvin, Qazvin	17090	$TKot_1$
9	*Th. kotschyanus-2*	Qazvin, Qazvin	12953	$TKot_2$
10	*Th. vulgaris*	London, England	14287	Tv

در این مطالعه از گلدان‌هایی به قطر دهانه ۲۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر استفاده شد که هریک ظرفیت نگهداری ۵ کیلوگرم خاک را داشتند. ترکیب خاک شامل مخلوطی از خاک مزرعه، ماسه و کود دامی پوسیده به نسبت ۱:۲:۳ دارای بافت لومی-شنی با ظرفیت زراعی حدود ۲۹٪ بود. برای تعیین میزان آب مورد نیاز هر گلدان در هر مرحله آبیاری، ابتدا ظرفیت زراعی خاک مشخص شد. این کار با استفاده از روش وزنی انجام شد (Pourmeidani *et al*., 2017). به این منظور، ۱۰ گلدان مشابه با گلدان‌های آزمایشی تا حد اشباع آبیاری شدند و سطح آنها با پلاستیک پوشانده شد. پس از گذشت ۴۸ ساعت، وزن گلدان‌ها هر ساعت یکبار ثبت شد و زمانی که وزن ثابت گردید، نمونه‌ای از خاک هر گلدان تهیه و توزین شد. برای تعیین وزن خشک خاک، نمونه‌ها به دمای ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد در آون منتقل شده و به‌مدت ۴۸ ساعت خشک شدند. نتایج این مرحله برای محاسبه ظرفیت زراعی خاک و تنظیم میزان آب مورد نیاز هر گلدان در طول آزمایش استفاده شد.

پس از کاشت بذرها، گلدان‌ها در شرایط گلخانه‌ای با دمای ۲۴ ± ۲ درجه سانتی‌گراد در طول روز و ۱۵ ± ۲ درجه سانتی‌گراد در طول شب قرار گرفتند. تا زمان استقرار اولیه نهال‌ها، همه گلدان‌ها به میزان ظرفیت زراعی خاک آبیاری شدند. با شروع تیمارهای آبیاری (۱۰۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی)، گلدان‌ها پس از کاهش ۲۰ درصد از وزن اولیه خود آبیاری شدند. برای این منظور، وزن گلدان‌ها به‌صورت روزانه اندازه‌گیری می‌شد و در صورت کاهش وزن کمتر از مقدار تعیین شده برای هر تیمار، میزان آب مورد نیاز به گلدان‌ها اضافه می‌گردید. برای تعیین وزن خشک اندام هوایی، بوته‌ها ۵۰ روز پس از اعمال تنش خشکی در مرحله رشد رویشی برداشت شدند. سپس نمونه‌ها در شرایط سایه و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد خشک شده و با استفاده از ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم وزن‌گیری شدند. در این تحقیق با استفاده از وزن خشک اندام هوایی در شرایط بدون تنش و شرایط تنش خشکی شاخص‌های کمی تحمل به خشکی شامل شاخص‌های تحمل به تنش (STI)، تحمل (TOL)، میانگین تولید (MP)، میانگین هندسی تولید (GMP)، شاخص پایداری عملکرد (YSI)، شاخص عملکرد (YI)، میانگین هارمونیک (HM)، شاخص خشکی (DI)، شاخص تحمل تنش‌های غیرزنده (ATI) و شاخص حساسیت به تنش (SSI)، با استفاده از روابط (۱-۱۰) محاسبه گردیدند.

(رابطه-۱)

$$STI = \frac{Y_s \times Y_p}{\bar{Y}_p^2} \quad \text{(Fernandez, 1992)}$$

(رابطه-۲)

$$ToL = Y_p - Y_s \quad \text{(Rosielle \& Hamblin, 1981)}$$

(رابطه-۳)

$$MP = \frac{Y_p + Y_s}{2} \quad \text{(Rosielle \& Hamblin, 1981)}$$

(رابطه-۴)

$$GMP = \sqrt{Y_p \times Y_s} \quad \text{(Fernandez, 1992)}$$

(رابطه-۵)

$$YSI = \frac{Y_s}{Y_p} \quad \text{(Bouslama \& Schapaugh, 1984)}$$

(رابطه-۶)

$$YI = \frac{Ys}{\bar{Y}s} \quad \text{(Gavuzzi } \textit{et al}\text{., 1997)}$$

(رابطه-۷)

$$HM = \frac{2(Yp \times Ys)}{(Yp + YS)} \quad \text{(Schneider } \textit{et al}\text{., 1997)}$$

(رابطه-۸)

$$DI = \frac{Ys \times (\frac{Ys}{Yp})}{\bar{Y}s} \quad \text{(Lan, 1998)}$$

(رابطه-۹)

$$ATI = \left[\frac{Yp - Ys}{\frac{\bar{Y}_p}{\bar{Y}_s}}\right] \times [\sqrt{Yp \times Ys}] \quad \text{(Mousavi } \textit{et al}\text{., 2008)}$$

(رابطه-۱۰)

$$SSI = \frac{1 - (Y_s \div Y_p)}{1 - (\bar{Y}_s \div \bar{Y}_p)} \quad \text{(Fischer \& Maurer, 1978)}$$

در این روابط، Ys: وزن خشک اندام هوایی در محیط تنش، Yp: وزن خشک اندام هوایی در محیط شاهد، $\bar{Y}_s$: میانگین وزن خشک اندام هوایی در محیط تنش و $\bar{Y}_p$: میانگین وزن خشک اندام هوایی در محیط شاهد می‌باشد.

برای استخراج اسانس، از نمونه‌های خشک به وزن ۱۰۰ گرم استفاده شد. اسانس با کمک دستگاه کلونجر و به روش تقطیر با آب به مدت ۶ ساعت استخراج گردید و بعد درصد حجمی اسانس محاسبه شد (Charles & Simon, 1990). براساس وزن ماده خشک گیاهان، عملکرد کل اسانس هر بوته نیز محاسبه گردید.

پس از اندازه‌گیری صفات و محاسبه شاخص‌های مختلف تحمل به خشکی، تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام شد. همچنین، ضریب همبستگی پیرسون بین عملکرد گیاه و شاخص‌های تنش محاسبه شد. برای گروه‌بندی جمعیت‌ها نیز از روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی با حداقل واریانس (Ward) و نرم‌افزار برخط (https://www.chiplot.online) استفاده گردید. نمودار بای‌پلات با نرم‌افزار Statgraphics ترسیم شد.

نتایج

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) نشان داد که اثر جمعیت و رژیم آبیاری و اثر متقابل جمعیت × رژیم آبیاری بر صفات وزن خشک اندام هوایی، درصد اسانس و عملکرد اسانس در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود.

جدول ۲- تجزیه واریانس عملکرد ماده خشک، درصد و عملکرد اسانس جمعیت‌های آویشن (*Thymus* spp.) تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

Table 2. ANOVA for dry matter yield, essential oil content, and essential oil yield of *Thymus* spp. populations under different irrigation regimes

S.O.V.	d.f.	M.S.		
		Dry matter yield	Essential oil percentage	Essential oil yield
Population	9	1.24**	0.29**	195.74**
Irrigation	1	6.75**	0.08**	353.19**
Population × Irrigation	9	0.20**	0.31**	40.01**
Experimental error	40	0.006	0.006	0.79
C.V. (%)		8.30	8.41	9.24

**: significant at 1% probability level.

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین وزن خشک در تیمار *Th. pubescens* تحت شرایط کنترل به‌دست آمد و کمترین مقدار مربوط به *Th. daenensis-2* در شرایط تنش خشکی بود. به‌طورکلی، تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار وزن خشک در تمامی گونه‌ها شد، اما شدت کاهش در گونه‌ها متفاوت بود. گونه‌های *Th. pubescens*، *Th. kotschyanus-2* و *Th. vulgaris* در مقایسه با سایر جمعیت‌ها، مقاومت نسبی بالاتری به خشکی نشان دادند و کاهش وزن خشک در آنها کمتر بود (جدول ۳). نتایج نشان داد که بیشترین درصد اسانس در شرایط تنش خشکی به *Th. fedtschenkoi* و *Th. kotschyanus-2* تعلق داشت. در مقابل، کمترین مقدار اسانس در *Th. daenensis-2* مشاهده شد (جدول ۳). اثرهای متقابل جمعیت × رژیم آبیاری بر عملکرد اسانس نیز معنی‌دار بود. بیشترین عملکرد اسانس در شرایط کنترل از گونه *Th. vulgaris* و *Th. kotschyanus-2* به‌دست آمد. در شرایط تنش خشکی، بالاترین عملکرد اسانس مربوط به *Th. kotschyanus-2* و *Th. fedtschenkoi* بود. کمترین عملکرد اسانس نیز در *Th. daenensis-2* مشاهده شد. در مجموع، با وجود کاهش وزن خشک، برخی گونه‌ها مانند *Th. fedtschenkoi* و *Th. kotschyanus-2* توانستند عملکرد اسانس بالایی را تحت تنش خشکی حفظ کنند که نشان‌دهنده توان فیزیولوژیکی بالاتر در سنتز ترکیبات اسانسی در این جمعیت‌هاست (جدول ۳).

جدول ۳- مقایسه میانگین عملکرد ماده خشک، درصد اسانس و عملکرد اسانس جمعیت‌های آویشن (***Thymus* spp.**) تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

Table 3. Mean comparison of dry matter yield, essential oil content, and essential oil yield of *Thymus* spp. populations under different irrigation regimes

Population	Irrigation regime (%FC)	Dry matter yield (g.plant^{-1})	Essential oil (%)	Essential oil yield (mg.plant^{-1})
Th. migricus	100	0.89^{f-h}	0.96^{d-f}	8.63^{d}
	40	0.31^{kl}	0.73^{f-i}	2.30^{gh}
Th. fallax	100	0.86^{f-h}	0.96^{d-f}	8.28^{de}
	40	0.56^{ij}	1.33^{a-c}	7.55^{d-f}
Th. serpyllum	100	1.19^{de}	0.57^{h-j}	6.80^{d-f}
	40	0.30^{kl}	0.92^{d-g}	2.72^{gh}
Th. pubescens	100	2.23^{a}	0.77^{f-h}	17.35^{b}
	40	0.76^{g-i}	1.23^{a-c}	9.43^{d}
Th. daenensis-1	100	0.51^{jk}	1.10^{c-e}	5.70^{ef}
	40	0.22^{l}	0.50^{ji}	1.11^{h}
Th. daenensis-2	100	0.69^{h-j}	0.70^{g-i}	4.89^{fg}
	40	0.20^{l}	0.33^{j}	0.66^{h}
Th. fedtschenkoi	100	1.28^{cd}	0.74^{f-i}	9.54^{d}
	40	0.98^{e-g}	1.40^{ab}	13.70^{c}
Th. kotschyanus-1	100	1.49^{c}	0.86^{e-g}	12.93^{c}
	40	0.80^{g-i}	1.16^{b-d}	9.37^{d}
Th. kotschyanus-2	100	2.03^{ab}	1.10^{c-e}	22.46^{a}
	40	1.18^{de}	1.46^{a}	17.36^{b}
Th. vulgaris	100	1.87^{b}	1.27^{a-c}	23.84^{a}
	40	1.03^{ef}	0.74^{f-i}	7.70^{de}

Means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).

ارزیابی شاخص‌های تحمل به تنش در جمعیت‌های آویشن

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که برای تمام شاخص‌های مورد بررسی بین جمعیت‌های مختلف گیاه آویشن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد وجود دارد (جدول ۴)، که نشان‌دهنده این است که جمعیت‌های مختلف از لحاظ تحمل و حساسیت به تنش خشکی متفاوت هستند.

جدول ۴- تجزیه واریانس شاخص‌های کمی تحمل به خشکی و وزن خشک اندام هوایی در شرایط بدون تنش و تنش در جمعیت‌های آویشن (***Thymus* spp.**)

Table 4. ANOVA for quantitative drought tolerance indices and shoot dry weight under non-stress and drought stress conditions in *Thymus* spp. populations

S.O.V.	d.f.	M.S.											
		Yp	Ys	STI	TOL	MP	GMP	YSI	YI	HM	DI	ATI	SSI
Population	9	1.04**	0.40**	0.70**	0.40**	0.10**	0.59**	0.08**	0.98**	3.61**	0.50**	4.60**	0.32**
Experimental error	20	0.007	0.005	0.005	0.014	0.003	0.003	0.005	0.012	0.046	0.015	0.043	0.021
C.V. (%)		6.77	11.31	12.32	17.75	17.75	6.80	15.69	11.31	11.31	23.22	14.96	14.37

**: significant at 1% probability level.

Shoot dry weight under control treatment (Yp), shoot dry weight under stress conditions (Ys), stress tolerance indices (STI), tolerance (TOL), mean production (MP), geometric mean production (GMP), yield stability index (YSI), yield index (YI), harmonic mean (HM), drought index (DI), abiotic stress tolerance index (ATI), and stress sensitivity index (SSI).

در شرایط نرمال جمعیت *Th. pubescens*، دارای بالاترین میانگین عملکرد بود، در حالی که جمعیت *Th. daenensis-1* دارای کمترین عملکرد در شرایط نرمال بود. در شرایط تنش خشکی جمعیت *Th. kotschyanus-2* دارای بیشترین عملکرد و جمعیت‌های *Th. daenensis-2*، *Th. daenensis-1*، *Th. serpyllum* و *Th. migricus* دارای کمترین مقدار عملکرد بوده‌اند (جدول ۵). شاخص TOL یکی از شاخص‌های مقاومت به تنش خشکی است که مقادیر پایین آن نشان‌دهنده تحمل ارقام به تنش می‌باشد. با توجه به پارامتر MP و TOL، کمترین تفاوت بین عملکرد در دو شرایط (نرمال و تنش خشکی) برای جمعیت‌های *Th. daenensis-2*، *Th. daenensis-1*، *Th. fallax* و *Th. fedtschenkoi* مشاهده شد، در حالی که جمعیت *Th. pubescens* دارای بیشترین مقدار TOL و MP بود (جدول ۵). جمعیت *Th. kotschyanus-2* بیشترین میزان GMP را داشت و جمعیت‌های *Th. daenensis-2* و *Th. daenensis-1* کمترین میزان را داشتند (جدول ۵). جمعیت‌های *Th. fedtschenkoi* و *Th. fallax* دارای بیشترین مقدار YSI بودند، بنابراین این جمعیت‌ها جزء جمعیت‌های پایدارتر ولی جمعیت‌های *Th. daenensis-2*، *Th. serpyllum*، *Th. pubescens* و *Th. migricus* با مقدار YSI کمتر جزء جمعیت‌های حساس‌تر به تنش خشکی هستند (جدول ۵). با توجه به پارامتر YI و HM کمترین تفاوت مقدار آنها برای جمعیت‌های *Th. daenensis-2*، *Th. daenensis-1*، *Th. migricus* و *Th. serpyllum* مشاهده شد، در حالی که جمعیت *Th. kotschyanus-2* دارای بیشترین مقدار YI و HM بود (جدول ۵). مقادیر بالاتر برای شاخص DI حکایت از تحمل بیشتر جمعیت به تنش خشکی دارد. براساس این شاخص به ترتیب جمعیت‌های *Th. kotschyanus-2* و *Th. fedtschenkoi* متحمل‌ترین و جمعیت‌های *Th. daenensis-2*، *Th. daenensis-1*، *Th. migricus* و *Th. serpyllum* حداقل تحمل به تنش را از خود نشان دادند (جدول ۵). شاخص ATI جمعیت *Th. pubescens* را متحمل‌ترین و جمعیت‌های *Th. daenensis-2*، *Th. daenensis-1* و *Th. fallax* را غیر متحمل‌ترین معرفی می‌کند (جدول ۵).

جدول ۵- مقایسه میانگین شاخص‌های کمی تحمل به خشکی و وزن خشک اندام هوایی در شرایط بدون تنش و تنش در جمعیت‌های آویشن (*Thymus* spp.)

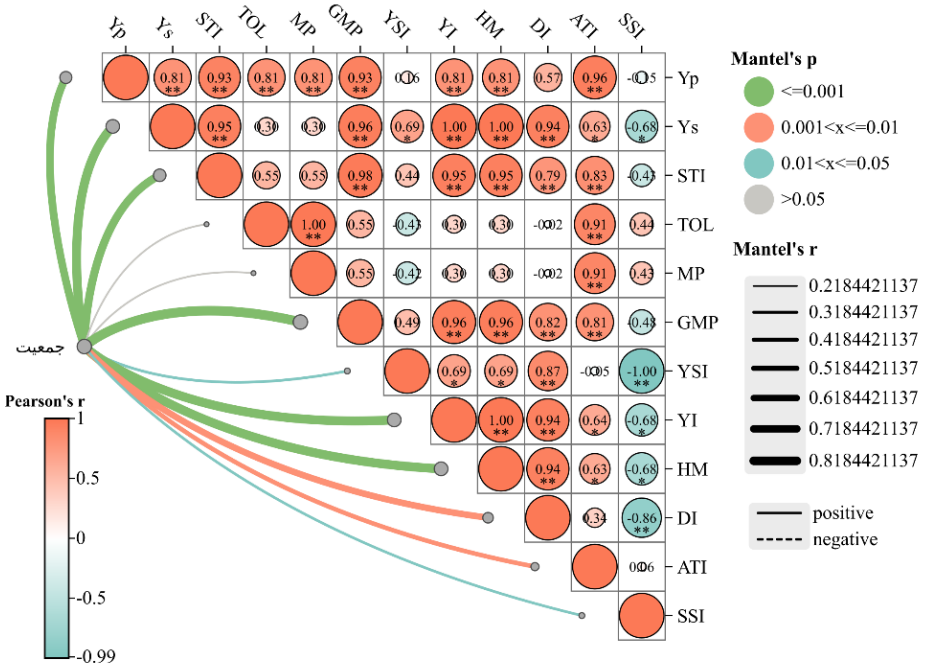
Table 5. Mean comparison of quantitative drought tolerance indices and shoot dry weight under non-stress and drought stress conditions in *Thymus* spp. populations

Population	Yp (g)	Ys (g)	STI	TOL	MP	GMP	YSI	YI	HM	DI	ATI	SSI
Th. migricus	0.89^{f}	0.31^{e}	0.15^{fg}	0.58^{d}	0.29^{d}	0.51^{e}	0.36^{de}	0.48^{e}	0.93^{e}	0.19^{e}	0.61^{e}	1.24^{ab}
Th. fallax	0.86^{f}	0.56^{d}	0.28^{e}	0.29^{e}	0.14^{e}	0.69^{d}	0.65^{ab}	0.88^{d}	1.70^{d}	0.58^{cd}	0.42^{ef}	0.66^{de}
Th. serpyllum	1.19^{e}	0.30^{e}	0.20^{ef}	0.89^{b}	0.44^{b}	0.59^{e}	0.25^{e}	0.47^{e}	0.90^{e}	0.12^{e}	1.08^{d}	1.45^{a}
Th. pubescens	2.23^{a}	0.76^{c}	1^{c}	1.46^{a}	0.73^{a}	1.30^{b}	0.34^{de}	1.20^{c}	2.30^{c}	0.41^{d}	3.93^{a}	1.28^{ab}
Th. daenensis-1	0.51^{h}	0.22^{e}	0.06^{g}	0.29^{e}	0.14^{e}	0.33^{f}	0.43^{cd}	0.35^{e}	0.67^{e}	0.15^{e}	0.20^{f}	1.10^{bc}
Th. daenensis-2	0.69^{g}	0.20^{e}	0.08^{g}	0.49^{de}	0.24^{de}	0.37^{f}	0.29^{e}	0.31^{e}	0.61^{e}	0.09^{e}	0.37^{ef}	1.37^{a}
Th. fedtschenkoi	1.28^{e}	0.98^{b}	0.73^{d}	0.30^{e}	0.15^{e}	1.12^{c}	0.76^{a}	1.54^{b}	2.95^{b}	1.19^{a}	0.68^{e}	0.45^{e}
Th. kotschyanus-1	1.49^{d}	0.80^{c}	0.70^{d}	0.69^{cd}	0.34^{cd}	1.09^{c}	0.53^{bc}	1.26^{c}	2.41^{c}	0.67^{c}	1.55^{c}	0.90^{cd}
Th. kotschyanus-2	2.03^{b}	1.18^{a}	1.40^{a}	0.85^{bc}	0.42^{bc}	1.55^{a}	0.58^{b}	1.85^{a}	3.55^{a}	1.08^{ab}	2.70^{b}	0.81^{d}
Th. vulgaris	1.87^{c}	1.03^{b}	1.13^{b}	0.84^{bc}	0.42^{bc}	1.39^{b}	0.55^{bc}	1.62^{b}	3.10^{b}	0.89^{b}	2.40^{b}	0.87^{cd}

Means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).

Shoot dry weight under control treatment (Yp), shoot dry weight under stress conditions (Ys), stress tolerance indices (STI), tolerance (TOL), mean production (MP), geometric mean production (GMP), yield stability index (YSI), yield index (YI), harmonic mean (HM), drought index (DI), abiotic stress tolerance index (ATI), and stress sensitivity index (SSI).

نتایج حاصل از همبستگی بین عملکرد در شرایط نرمال، عملکرد در شرایط تنش خشکی و شاخص‌های مختلف بیانگر این است که عملکرد در شرایط نرمال با تمام شاخص‌های مورد ارزیابی به‌جز شاخص YSI و SSI همبستگی مثبت و معنی‌داری دارد (شکل ۱). عملکرد در شرایط تنش خشکی با شاخص SSI همبستگی منفی و معنی‌داری دارد (۰/۶۸-) و با سایر شاخص‌ها به‌جز شاخص TOL و MP همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان داد (شکل ۱).



شکل ۱- ضرایب همبستگی بین شاخص‌های کمی تحمل به خشکی و وزن خشک اندام هوایی در شرایط بدون تنش و تنش در جمعیت‌های آویشن (*Thymus* spp.)

Figure 1. Correlation coefficients between quantitative drought tolerance indices and shoot dry weight under non-stress and stress conditions in *Thymus* spp. populations

*** and **: significant at 5 and 1% probability levels, respectively.**

Shoot dry weight under control treatment (Yp), shoot dry weight under stress conditions (Ys), stress tolerance indices (STI), tolerance (TOL), mean production (MP), geometric mean production (GMP), yield stability index (YSI), yield index (YI), harmonic mean (HM), drought index (DI), abiotic stress tolerance index (ATI), and stress sensitivity index (SSI).

برای ترسیم بای‌پلات از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی استفاده گردید. براساس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نشان داد که ۹۸/۵۷ درصد از تغییرات کل داده‌ها مربوط به دو مؤلفه اول می‌باشد (جدول ۶). بنابراین بای‌پلات مربوطه براساس این دو مؤلفه ترسیم گردید (شکل ۲).

جدول ۶ نشان می‌دهد که ۶۷/۱۴ درصد از تغییرات کل داده‌ها مربوط به اولین مؤلفه بوده که دارای همبستگی مثبت و بالایی با وزن خشک اندام هوایی در شرایط بدون تنش و تنش و شاخص‌های STI، GMP، YI، HM و DI داشت. ازآنجایی‌که مقادیر بالای این شاخص‌ها مبین تحمل به تنش و عملکرد می‌باشند می‌توان این مؤلفه را مؤلفه ظرفیت عملکرد و تحمل به تنش نامید. ۳۱/۴۳ درصد از کل تغییرات

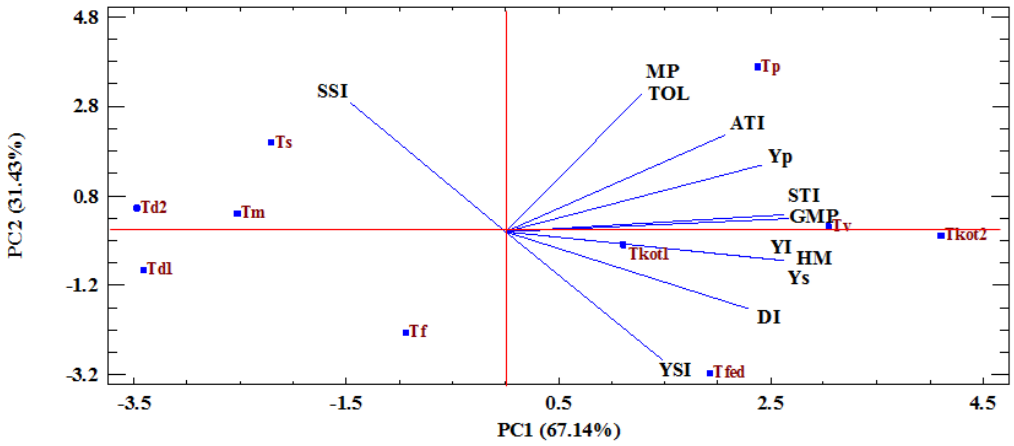
توسط مؤلفه اصلی دوم توجیه می‌شود، این مؤلفه همبستگی مثبت و بالایی با شاخص‌های TOL، MP و SSI و همبستگی منفی بالایی با شاخص YSI داشت. مقادیر بالای شاخص‌های TOL و SSI بیانگر حساسیت به تنش و مقدار بالای شاخص YSI نشان‌دهنده تحمل به تنش می‌باشد، بنابراین می‌توان مؤلفه اصلی دوم را مؤلفه حساسیت به تنش نام‌گذاری کرد. مقادیر بالای مؤلفه اصلی اول بیانگر تحمل به تنش و مقادیر پایین این مؤلفه حساسیت به تنش را نشان می‌دهد. در مورد مؤلفه اصلی دوم مقادیر بالا نشان‌دهنده حساسیت به تنش و مقادیر پایین نمایانگر تحمل به تنش هستند. بر این اساس و با توجه به نمودار بای‌پلات می‌توان نتیجه گرفت که جمعیت‌های *Th. kotschyanus-1*، *Th. kotschyanus-2*، *Th. pubescens*، *Th. fedtschenkoi* و *Th. vulgaris* که در ناحیه اول و چهارم نمودار بای‌پلات قرار گرفته‌اند و در مجاورت بردارهای مربوط به شاخص‌های مهم تحمل به خشکی شامل STI، GMP، YI، HM، YSI، DI و ATI قرار دارند، جزو جمعیت‌های متحمل با ظرفیت عملکرد بالا محسوب شده و جمعیت‌های *Th. daenensis-2*، *Th. daenensis-1*، *Th. serpyllum*، *Th. migricus* و *Th. fallax* که در ناحیه دوم و سوم نمودار مذکور واقع شده‌اند و در مجاورت بردار مربوط به SSI قرار گرفتند جزو جمعیت‌های حساس به خشکی با ظرفیت عملکرد پایین هستند.

جدول ۶- مقادیر ویژه، درصد واریانس تجمعی و بردارهای ویژه حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی جمعیت‌های آویشن (*Thymus* spp.) براساس شاخص‌های کمی تحمل به خشکی و وزن خشک اندام هوایی در شرایط بدون تنش و تنش

Table 6. Eigenvalues, cumulative variance percentage, and eigenvectors derived from principal component analysis of *Thymus* spp. populations based on quantitative drought tolerance indices and shoot dry weight under non-stress and stress conditions

Variable	PC1	PC2
Eigenvalues	8.05	3.77
Variance (%)	67.14	30.43
Cumulative variance (%)	67.14	98.57
Component coefficient for performance and indicators		
Yp	0.31	0.21
Ys	0.34	-0.09
STI	0.34	0.05
TOL	0.16	0.44
MP	0.16	0.44
GMP	0.35	0.04
YSI	0.19	-0.41
YI	0.34	-0.09
HM	0.34	-0.09
DI	0.30	-0.25
ATI	0.27	0.31
SSI	-0.19	0.42

Shoot dry weight under control treatment (Yp), shoot dry weight under stress conditions (Ys), stress tolerance indices (STI), tolerance (TOL), mean production (MP), geometric mean production (GMP), yield stability index (YSI), yield index (YI), harmonic mean (HM), drought index (DI), abiotic stress tolerance index (ATI), and stress sensitivity index (SSI).
Eigenvalues (of the correlation matrix) above 1 are significant.

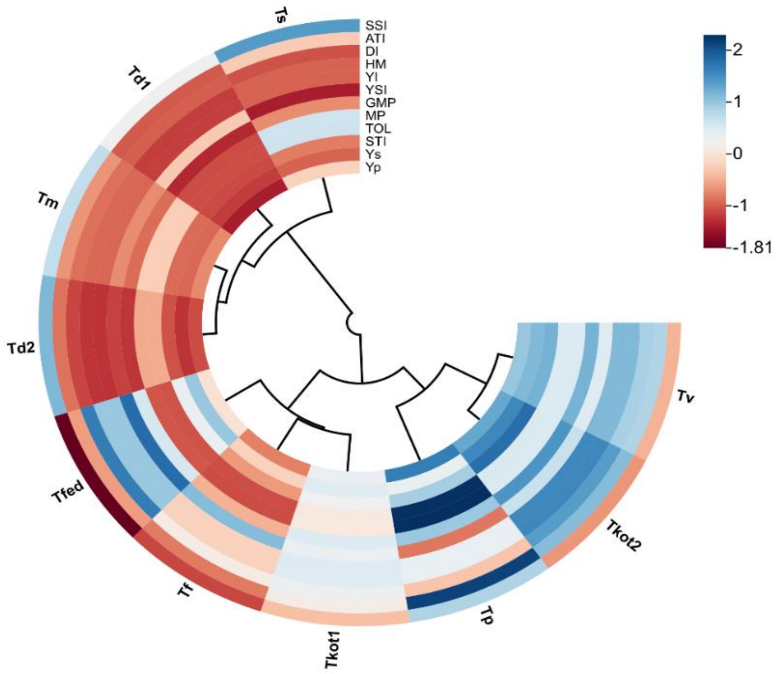


شکل ۲- نمودار بای‌پلات حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی جمعیت‌های آویشن (***Thymus*** **spp.**) براساس شاخص‌های کمی تحمل به خشکی و وزن خشک اندام هوایی در شرایط بدون تنش و تنش

Figure 2. Biplot diagram derived from principal component analysis of *Thymus* spp. populations based on quantitative drought tolerance indices and shoot dry weight under non-stress and stress conditions

Shoot dry weight under control treatment (Yp), shoot dry weight under stress conditions (Ys), stress tolerance indices (STI), tolerance (TOL), mean production (MP), geometric mean production (GMP), yield stability index (YSI), yield index (YI), harmonic mean (HM), drought index (DI), abiotic stress tolerance index (ATI), and stress sensitivity index (SSI).

نتایج تجزیه خوشه‌ای با استفاده از عملکرد در شرایط نرمال، عملکرد در شرایط تنش خشکی و شاخص‌های تحمل برای ده جمعیت مختلف آویشن در شکل ۳ نشان داده شد. هدف از تجزیه خوشه‌ای در به‌نژادی گیاهی دسته‌بندی جمعیت‌های مختلف، پی بردن به فاصله ژنتیکی بین آنها و استفاده از تنوع ژنتیکی موجود در آنها در برنامه‌های اصلاحی است. با توجه به شکل ۳ جمعیت‌های موردبررسی در سه گروه قرار گرفتند. در گروه اول که جمعیت‌های متحمل به تنش و جمعیت‌هایی با عملکرد بالاتر قرار گرفتند ازجمله می‌توان به جمعیت‌های *Th. kotschyanus-2*، *Th. pubescens* و *Th. vulgaris* اشاره کرد (شکل ۳). جمعیت‌های این گروه از نظر تمام شاخص‌های مورد استفاده در تجزیه خوشه‌ای و Yp و Ys مقدار بیشتری در مقایسه با میانگین جامعه داشتند و این مقادیر در مقایسه با دو گروه دیگر بیشتر بود (جدول ۵). بنابراین می‌توان جمعیت‌های این گروه را براساس طبقه‌بندی Fernandez (۱۹۹۲) جزو لاین‌های گروه A (عملکرد بالا در شرایط تنش و بدون تنش) فرض کرد. در گروه دوم جمعیت‌های *Th. kotschyanus-1*، *Th. fedtschenkoi* و *Th. fallax* قرار گرفتند (شکل ۳). مقادیر Yp، Ys و شاخص‌های کمی مورد استفاده برای جمعیت‌های این گروه از مقادیر میانگین جامعه کمتر بود و این مقادیر در حد متوسط دو گروه دیگر قرار داشتند (جدول ۵). بنابراین جمعیت‌های این گروه نیمه‌حساس به خشکی هستند. گروه سوم شامل جمعیت‌های *Th. daenensis-2*، *Th. daenensis-1*، *Th. Serpyllum* و *Th. migricus* است (شکل ۳)؛ جمعیت‌های این گروه از نظر Yp، Ys و تمام شاخص‌های مورد استفاده در تجزیه خوشه‌ای از میانگین جامعه و حتی در مقایسه با دو گروه دیگر پایین‌تر بودند (جدول ۵). بنابراین این جمعیت‌ها را می‌توان به‌عنوان جمعیت‌های حساس به خشکی معرفی نمود و طبق طبقه‌بندی Fernandez (۱۹۹۲) جزو گروه D (عملکرد پایین در محیط تنش و بدون تنش) فرض کرد.



شکل ۳- تجزیه خوشه‌ای و تعیین روابط جمعیت‌های آویشن (***Thymus*** **spp.**) براساس شاخص‌های کمی تحمل به خشکی و وزن خشک اندام هوایی در شرایط بدون تنش و تنش

Figure 3. Cluster analysis and determination of relationships among *Thymus* spp. populations based on quantitative drought tolerance indices and shoot dry weight under non-stress and stress conditions

Shoot dry weight under control treatment (Yp), shoot dry weight under stress conditions (Ys), stress tolerance indices (STI), tolerance (TOL), mean production (MP), geometric mean production (GMP), yield stability index (YSI), yield index (YI), harmonic mean (HM), drought index (DI), abiotic stress tolerance index (ATI), and stress sensitivity index (SSI).

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین جمعیت‌های آویشن از نظر صفات وزن خشک، درصد و عملکرد اسانس وجود داشت و اثر متقابل بین جمعیت و تنش خشکی نیز معنی‌دار بود. این یافته بیانگر آن است که واکنش جمعیت‌های مختلف آویشن به محدودیت رطوبت، وابسته به ویژگی‌های ژنتیکی هر جمعیت بوده و از الگوی پاسخ یکنواختی پیروی نمی‌کند.

به‌طورکلی، تنش خشکی موجب کاهش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی در تمامی جمعیت‌ها شد؛ با این حال، شدت این کاهش در میان گونه‌ها متفاوت بود. کاهش زیست‌توده در شرایط کم‌آبی، به‌طور عمده ناشی از کاهش فتوسنتز خالص، سطح برگ و سنتز پروتئین‌های ساختاری گزارش شده است (Tan *et al*., 2024; García-Caparrós *et al*., 2019). در این مطالعه، جمعیت‌های *Th. vulgaris*، *Th. kotschyanus-2* و *Th. pubescens* در شرایط تنش توانستند بیشترین میزان وزن خشک را حفظ کنند که بیانگر کارایی بالاتر در استفاده از آب و سازگاری فیزیولوژیکی مطلوب‌تر آنهاست. در مقابل، درصد اسانس در بیشتر جمعیت‌های تحت تنش خشکی افزایش یافت. این افزایش می‌تواند ناشی از تجمع ترکیبات ثانویه

به‌ویژه ترپن‌ها در پاسخ به استرس اکسیداتیو باشد که از سازوکارهای دفاعی گیاه در شرایط کم‌آبی به‌شمار می‌رود (Mansinhos *et al*., 2024; Jangpangi *et al*., 2025). گزارش‌های مشابهی در گونه‌های *Thymus* (Mohammadi *et al*., 2019) و *Origanum vulgare* (Ninou *et al*., 2017) نیز وجود دارد که نشان داده‌اند تنش خشکی ملایم موجب افزایش درصد اسانس ولی کاهش عملکرد کلی می‌شود. عملکرد اسانس به‌عنوان حاصل‌ضرب درصد اسانس در وزن خشک، در اغلب جمعیت‌ها کاهش یافت، اما جمعیت‌های *Th. fedtschenkoi*، *Th. kotschyanus-2* و *Th. vulgaris* تحت تنش خشکی همچنان عملکرد قابل‌توجهی داشتند. این جمعیت‌ها توانستند کاهش زیست‌توده را با افزایش غلظت اسانس تا حدی جبران کنند. چنین رفتاری معمولاً در گیاهانی با کارایی متابولیکی بالا و ظرفیت تنظیم اسمزی مؤثر مشاهده می‌شود (Amani Machiani *et al*., 2023).

براساس شاخص Fernandez (۱۹۹۲)، STI جمعیت *Th. kotschyanus–2* دارای بالاترین مقدار بود؛ بنابراین این جمعیت جزء جمعیت‌های متحمل به تنش خشکی است ولی جمعیت‌های *Th. daenensis-2*، *Th. daenensis-1* و *Th. migricus* با کمترین مقدار STI جزء جمعیت‌های حساس به تنش خشکی هستند. در مورد شاخص تحمل به تنش TOL مشخص شده است که پایین بودن مقدار این شاخص الزاماً به دلیل بالا بودن عملکرد رقم در محیط تنش نیست، زیرا ممکن است عملکرد رقمی در شرایط عادی پایین باشد و در شرایط تنش با کاهش عملکرد کمتری همراه باشد که باعث کوچک شدن شاخص تحمل به تنش شود و این رقم، رقمی متحمل معرفی گردد (Moghaddam & Hadizadeh, 2002). به‌علاوه، بر پایه Fischer و Maurer (۱۹۷۸)، شاخص SSI برای جمعیت *Th. fallax* کمترین مقدار را داشت، ازاین‌رو این جمعیت حساسیت کمتری به تنش خشکی از خود نشان داد؛ در مقابل، جمعیت‌های *Th. serpyllum*، *Th. daenensis-2*، *Th. pubescens* و *Th. migricus* دارای مقادیر بالاتر SSI بودند که نشان‌دهنده حساسیت بیشتر آنها به خشکی است. از آنجا که درصد تغییرات عملکرد در محیط‌های تنش‌زا از دیدگاه فیزیولوژیکی بیشتر اهمیت دارد تا فقط عملکرد زراعی، می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب مبتنی بر SSI موجب گزینش ارقامی می‌شود که ممکن است عملکرد بالایی در محیط تنش‌زا نداشته باشند، اما از لحاظ زراعی نامطلوب باشند. مطالعات جدید نیز در گیاهان خانواده نعناعیان نشان داده‌اند که شاخص‌های STI، GMP و HM همبستگی بالایی با عملکرد متکی بر رشد و تولید اسانس دارند و می‌توانند به‌عنوان معیارهای ترجیحی در انتخاب جمعیت‌های مقاوم مورد استفاده قرار بگیرند (Sun *et al*., 2023).

به‌منظور شناسایی دقیق جمعیت‌های برتر از نظر تحمل به خشکی، ارزیابی جمعیت‌ها فقط براساس یک شاخص کمی، نمی‌تواند نتایج قابل اطمینان و جامعی ارائه دهد؛ بنابراین، بررسی همبستگی بین وزن خشک اندام هوایی در شرایط شاهد و تنش خشکی با شاخص‌های مختلف تحمل، می‌تواند راهکار مناسبی برای تعیین دقت و کارایی این شاخص‌ها باشد. به‌طورکلی، شاخص‌هایی که در هر دو شرایط تنش و بدون تنش همبستگی بالایی با عملکرد زیستی (وزن خشک اندام هوایی) نشان می‌دهند، به‌عنوان شاخص‌های معتبرتر و مؤثرتر در ارزیابی تحمل به خشکی شناخته می‌شوند؛ زیرا این شاخص‌ها قادرند جمعیت‌هایی را که در هر دو محیط دارای عملکرد بالا هستند، به‌درستی تفکیک کنند (Fernandez, 1992).

با توجه به اینکه از بین شاخص‌های محاسبه شده، پنج شاخص STI، GMP، YI، HM و ATI در هردو شرایط تنش و بدون تنش رطوبتی دارای همبستگی بالا و معنی‌دار با عملکرد بوده و یک همبستگی بالا، مثبت و معنی‌دار بین این پنج شاخص مشاهده شد؛ بنابراین به‌عنوان شاخص‌های مناسبی برای تشخیص جمعیت‌های متحمل در این مطالعه معرفی می‌گردند. این شاخص‌ها بهترین شاخص‌ها برای شناسایی و انتخاب جمعیت برتر بودند (Zemede *et al*., 2021). این نتایج با گزارش‌هایی از مطالعات دیگر همخوانی دارد (Golestani, 2021; Dorrani-Nejad *et al*., 2019; Fernandez, 1992). با بهره‌گیری از پنج شاخص کمّی یعنی

STI، GMP، YI، HM و ATI، جمعیت *Th. kotschyanus-2* به‌عنوان ژنوتیپی با عملکرد بالا و تحمل مؤثر به خشکی در این بررسی شناسایی گردید. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که ارزیابی مستقل و جداگانه شاخص‌ها کافی نیست، بلکه برای بررسی دقیق‌تر تحمل به خشکی جمعیت‌ها، لازم است رابطه همبستگی بین وزن خشک اندام هوایی در شرایط بدون تنش و تحت تنش خشکی با این شاخص‌ها تحلیل شود. علاوه بر آن، به‌کارگیری نمودار چندمتغیره‌ای مانند بای‌پلات امکان تفکیک گروه‌های ژنوتیپی را براساس ظرفیت عملکرد و تحمل به تنش فراهم می‌کند (Fernandez, 1992). یافته‌های اخیر نیز تأیید کرده‌اند که شاخص‌های STI و GMP همراه با تحلیل PCA یا بای‌پلات، ابزار مؤثری برای شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم در شرایط خشکی هستند (Sun *et al*., 2023).

به‌طورکلی، توزیع جمعیت‌ها در فضای بای‌پلات بیانگر وجود تنوع ژنتیکی قابل توجه بین جمعیت‌های مختلف نسبت به تنش خشکی است (Alavi *et al*., 2014). زاویه باز بین بردارها در نمودار بای‌پلات نشان‌دهنده همبستگی منفی بین شاخص‌ها، زاویه قائمه نشانه استقلال شاخص‌ها و زاویه نزدیک به هم بیانگر همبستگی مثبت بین شاخص‌هاست (Yan & Kang, 2002). در مطالعه‌ای بر روی *Thymus*، بیش از ۹۹٪ از تغییرات مرتبط با تحمل به خشکی از طریق دو مؤلفه اول در تحلیل مؤلفه‌های اصلی توضیح داده شد که مؤلفه اول تحت عنوان تحمل به خشکی و مؤلفه دوم تحت عنوان حساسیت به خشکی معرفی گردید (Golestani, 2021). همچنین این نتیجه با گزارش‌های سایر محققان در مورد گندم (Sangi *et al*., 2021)، پنبه (Sun *et al*., 2023) و زیره سبز (Dorrani-Nejad *et al*., 2019) همخوانی دارد.

نتیجه‌گیری کلی این پژوهش نشان داد که واکنش جمعیت‌های مختلف آویشن به تنش خشکی از نظر صفات رویشی و اسانس، متفاوت و وابسته به ویژگی‌های ژنتیکی هر جمعیت است. تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار وزن خشک گیاه شد، اما در بسیاری از جمعیت‌ها درصد اسانس افزایش یافت که نشان‌دهنده فعال شدن سازوکارهای متابولیکی دفاعی و تجمع ترکیبات ثانویه در پاسخ به تنش است. در مجموع، شاخص‌های STI، GMP و HM بیشترین همبستگی را با عملکرد اسانس و وزن خشک نشان دادند و شاخص‌های مناسبی برای ارزیابی تحمل به خشکی در آویشن محسوب می‌شوند. براساس این شاخص‌ها و عملکرد واقعی، جمعیت‌های *Th. kotschyanus-2*، *Th. fedtschenkoi* و *Th. vulgaris* به‌عنوان جمعیت‌های پایدار و متحمل به خشکی شناسایی شدند. این نتایج بیانگر آن است که انتخاب و کشت جمعیت‌های متحمل همراه با درصد اسانس بالا می‌تواند رویکردی مؤثر برای توسعه کشت پایدار آویشن در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران باشد. علاوه بر این، یافته‌های این مطالعه می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای برنامه‌های اصلاحی و غربال‌گری ژرم‌پلاسم آویشن در شرایط تنش آبی مورد استفاده قرار گیرد.

سپاسگزاری

این پژوهش در قالب طرح تحقیقاتی شماره ۴۰۰۲۵۵۳ با حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران معاونت علمی ریاست جمهوری انجام شد، بدین‌وسیله از حمایت‌های مسئولان صندوق تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

- Alavi, S.R., Darvishzadeh, R., Valizadeh, M., Moghadam, M., Farrokhi, E., Basirnia, A. and Pirzad, A., 2014. Evaluation of drought tolerance indices in various sunflowers cultivars (*Helianthus annuus* L.). Research in Field Crop Journal, 2(1): 16-27. https://rfcj.urmia.ac.ir/article_20013.html
- Amani Machiani, M., Javanmard, A., Ostadi, A. and Alizadeh, K., 2023. Improvement in essential oil quantity and quality of thyme (*Thymus vulgaris* L.) by integrative application of chitosan nanoparticles and arbuscular mycorrhizal fungi under water stress conditions. Plants, 12(7): 1422. https://doi.org/10.3390/plants12071422
- Bouslama, M. and Schapaugh, W.T., 1984. Stress tolerance in soybeans. I. Evaluation of three screening techniques forheat and drought tolerance. Crop Science, 24: 933-937.

https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400050026x
- Charles, D.J. and Simon, J.E., 1990. Comparison of extraction methods for the rapid determination of essential oil content and composition of basil. Journal of the American Society for Horticultural Science, 115(3): 458-462. https://doi.org/10.21273/JASHS.115.3.458
- Dorrani-Nejad, M., Aghighi, S. and Mohammadi-Nejad, G., 2019. The evaluation of the elite genotypes for drought tolerance in cumin (*Cuminum cyminum* L.) using drought tolerance indices. Plant Productions, 42(2): 227-238. http://dx.doi.org/10.22055/ppd.2019.24247.1539
- Etri, K. and Pluhár, Z., 2024. Exploring chemical variability in the essential oils of the *Thymus* genus. Plants, 13(10): 1375. https://doi.org/10.3390/plants13101375
- Fernandez, G.C.J., 1992. Effective selection criteria for assessing stress tolerance: 257-270. In: Kuo, C.G., (Ed.). Proceedings of the International Symposium Onadaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress. Asian Vegetable Research and Development Center Publication, Tainan, 531p. https://doi.org/10.22001/wvc.72511
- Fischer, R.A. and Maurer, R., 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. Australian Journal of Agricultural Research, 29(5): 897-912. http://dx.doi.org/10.1071/AR9780897
- García-Caparrós, P., Romero, M.J., Llanderal, A., Cermeño, P., Lao, M.T. and Segura, M.L., 2019. Effects of drought stress on biomass, essential oil content, nutritional parameters, and costs of production in six Lamiaceae species. Water, 11(3): 573. https://doi.org/10.3390/w11030573
- Gavuzzi, P., Rizza, F., Palumbo, M., Campanile, R.G., Ricciardi, G.L. and Borghi, B., 1997. Evaluation of field and laboratory predictors of drought and heat tolerance in winter cereals. Canadian Journal of Plant Science, 77(4): 523-531. https://doi.org/10.4141/P96-130
- Golestani, M., 2021. Evaluation of *Thymus daenensis* subsp. *daenensis* ecotypes using drought tolerance indices. Environmental Stresses in Crop Sciences, 14(2): 309-319. https://doi.org/10.22077/escs.2020.2816.1731
- Jangpangi, D., Patni, B., Chandola, V. and Chandra, S., 2025. Medicinal plants in a changing climate: Understanding the links between environmental stress and secondary metabolite synthesis. Frontiers in Plant Science, 16: 1587337. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1587337
- Khorshidi, J., Shokrpour, M. and Nazeri, V., 2015. Evaluation of response to water deficit stress in *Thymus daenensis* subsp. *daenensis* using stress tolerance indices. Iranian Journal of Horticultural Science, 46(4): 563-573. https:// doi: 10.22059/ijhs.2015.56905
- Lan, J., 1998. Comparison of evaluating methods for agronomic drought resistance in crops. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 7: 85-87. https://doi.org/1570009750103864576
- Mansinhos, I., Gonçalves, S. and Romano, A., 2024. How climate change-related abiotic factors affect the production of industrial valuable compounds in Lamiaceae plant species: A review. Frontiers in Plant Science, 15: 1370810. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1370810
- Moghaddam, A. and Hadizadeh, M., 2002. Response of corn (*Zea mays* L.) hybrids and their parental lines to drought using different stress tolerance indices. Seed and Plant, 18(3): 255-272. https://doi.org/10.22092/spij.2017.110741
- Mohammadi, H., Amirikia, F., Ghorbanpour, M., Fatehi, F. and Hashempour, H., 2019. Salicylic acid induced changes in physiological traits and essential oil constituents in different ecotypes of *Thymus kotschyanus* and *Thymus vulgaris* under well-watered and water stress conditions. Industrial Crops and Products, 129: 561-574. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.046
- Mousavi, S., Yazdi, S.B., Naghavi, M.R., Zali, A.A., Dashti, H. and Pourshahbazi, A., 2008. Introduction of new indices to identify relative drought tolerance and resistance in wheat genotypes. Desert, 12: 165-178. https://doi.org/10.22059/jdesert.2008.27115
- Ninou, E., Paschalidis, K. and Mylonas, I., 2017. Essential oil responses to water stress in Greek oregano populations. Journal of Essential Oil Bearing Plants, 20(1): 12-23. https://doi.org/10.1080/0972060X.2016.1264278
- Omidbaigi, R., 2015. Production and Processing of Medicinal Plants. Astane Ghods Razavi Press, Mashhad, 348p. (In Persian) https://www.gisoom.com/book/11495748/1
- Pourmeidani, A., Jafari, A.A. and Mirza, M., 2017. Studying drought tolerance in *Thymus kotschyanus* accessions for cultivation in dryland farming and low efficient grassland. Journal of Rangeland Science, 7(4): 331-340. https://oiccpress.com/jrs/article/view/2632
- Rosenova, Y., Boycheva, P., Dyankov, S., Dzhakova, Z., Dzhoglova, V., Todorova, S., Ivanova, S. and Slavov, I., 2025. Chemical composition of *Thymus*

species from bulgarian flora. Diversity, 17(9): 596. https://doi.org/10.3390/d17090596
- Rosielle, A.A. and Hamblin, J., 1981. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment 1. Crop Science, 21(6): 934-946. https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100060033x
- Sangi, S.E., Najaphy, A., Cheghamirza, K. and Mohammadi, R., 2021. Assessment of drought tolerance indices for durum wheat (*Triticum durum* L.) genotypes. Environmental Stresses in Crop Sciences, 14(4): 901-911. https://doi.org/10.22077/escs.2020.3310.1842
- Schneider, K.A., Rosales-Serna, R., Ibarra-Perez, F., Cazares-Enriquez, B., Acosta-Gallegos, J.A., Ramirez-Vallejo, P., Wassimi, N. and Kelly, J.D., 1997. Improving common bean performance under drought stress. Crop Science, 37(1): 43-50. https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700010007x
- Sun, F., Chen, Q., Chen, Q., Jiang, M. and Qu, Y., 2023. Yield-based drought tolerance index evaluates the drought tolerance of cotton germplasm lines in the interaction of genotype-by-environment. PeerJ, 11: e14367. https://doi.org/10.7717/peerj.14367
- Tan, U. and Gören, H.K., 2024. Comprehensive evaluation of drought stress on medicinal plants: A meta-analysis. PeerJ, 12: e17801. https://doi:10.7717/peerj.17801
- Yan, W. and Kang, M.S., 2002. GGE Biplot Analysis: A Graphical Tool for Breeders, Geneticists, and Agronomists. CRC Press, Boca Raton, 271p. https://doi.org/10.1201/9781420040371
- Zemede, A., Mekbib, F., Assefa, K. and Bishaw, Z., 2021. Evaluation of drought tolerance in durum wheat genotypes using drought tolerance indices. Ethiopian Journal of Crop Science, 9(1): 49-66. https://www.ajol.info/index.php/ejcs/article/view/237210