Crop Science Research in Arid Regions

homepage: https://cropscience.uoz.ac.ir/

Research Article
Volume 7, Issue 4, 2025, P. 685-703

# Effect of foliar application of stress modifiers on yield and yield components of cumin (*Cuminum cyminum* L.) at different levels of drought stress

**Habib Noori [a], Seyyed Gholamreza Mousavi [*b], Mohammadjavad Seghatoleslami [b], Mansour Fazeli Rostampour [c]**

[a] Ph.D. Student, Department of Agriculture, Birjand Branch, Islamic Azad University, Birjand, Iran
[b] Department of Agriculture, Birjand Branch, Islamic Azad University, Birjand, Iran
[c] Horticultural Crops Research Department, Sistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Zabol, Iran

[*]Corresponding Author: Moosavi@iaubir.ac.ir

Received: 16 July 2025 Accepted: 9 September 2025 **DOI: 10.22034/CSRAR.2025.534625.1503**

**How to cite this article:**
Noori, H., Mousavi, S.M., Seghatoleslami, M. and Fazeli Rostampourc, M., 2025. Effect of foliar application of stress modifiers on yield and yield components of cumin (*Cuminum cyminum* L.) at different levels of drought stress. *Crop Science Research in Arid Regions, 7*(4), 685-703. https://doi.org/10.22034/csrar.2025.534625.1503

## Abstract

**Introduction:** Drought stress is one of the most important challenges in agriculture, causing significant economic losses by reducing plant growth, yield loss, and changes in effective compounds. Reducing the adverse effects of water deficit stress on plants is one of the most important challenges in agriculture in arid and semi-arid regions, which requires scientific, managerial, and technological solutions. Cumin (*Cuminum cyminum* L.), as a valuable medicinal plant, is highly sensitive to water deficit, and drought stress can affect both the quantity and quality of its essential oil. Therefore, finding effective solutions to reduce the negative effects of drought through the use of stress modifiers (such as jasmonic acid, paclobutrazol, salicylic acid, chitosan, abscisic acid micronutrients such as silica and selenium, root growth-promoting bacteria (PGPR), mycorrhizal fungi and organic compounds such as seaweed extract and humic acid) is of great importance. Stress modulators in crop plants are substances that help plants to resist environmental stresses such as drought, salinity, extreme temperatures and diseases. These modulators maintain plant performance and health under stress conditions by strengthening the plant's defense system, improving water and nutrient absorption and reducing oxidative damage.

**Materials and Methods:** In order to investigate the effect of foliar spraying of stress modifiers on yield and yield components as well as water use efficiency of cumin, an experiment was conducted in the 2019-2020 crop year at the Birjand Islamic Azad University Research Farm. The experiment was conducted in split plots in a randomized complete block design with three replications. Drought stress at three levels (40, 70 and 100% of plant water requirement in terms of the percentage of

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

evapotranspiration of the reference plant defined as control, moderate water deficit and severe water deficit) was considered as the main factor and foliar spraying at five levels (control "no foliar spraying", foliar spraying with salicylic acid (300 mg/L), jasmonic acid (60 µmol/L), paclobutrazol (100 mg/L) and chitosan (50 mg/L) was considered as the secondary factor. Due to the possibility of leaching, the amount of nitrogen fertilizer was added to the soil in two stages (half of the fertilizer at planting and the other half after planting as a slurry at the four-leaf stage from the urea fertilizer source), and phosphorus fertilizer (pure $P_2O_5$ from the triple superphosphate source) and potash fertilizer (from the potassium sulfate source) based on soil tests and the recommended rates of P=60, N=30, and K=60 pure kg/ha. The green cumin seeds required for the experiment were obtained from the native seed mass of Birjand, at a rate of 20 kg/ha from Sistan Bazr Zabol Company (registration number 1974). To implement irrigation regimes at three levels of 100, 70, and 40 percent of plant water requirement, first the reference evapotranspiration rate ($ET_0$) was calculated using the standard Penman-Monteit equation based on FAO-56 guidelines and daily meteorological data (including temperature, relative humidity, solar radiation, and wind speed). Then, by multiplying $ET_0$ by the cumin plant coefficient (Kc), the actual plant water requirement (ETc) was determined. For foliar spraying, the compounds used were mixed with appropriate solvents and applied as foliar sprays twice during the growing season, the first time after one irrigation before stress application and the second time at the beginning of the reproductive stage of the plants according to the design plan. Cumin was harvested in the first half of May 2020, when the plants turned yellow and the umbels turned brown. Water use efficiency was determined by dividing the seed yield obtained to the irrigation water applied. Data analysis was performed using SAS software (ver. 9.4) and tables and charts were drawn using Word and Excel software. Mean data was compared with Duncan multiple range test method.

**Results and Discussion:** The results indicated that drought stress significantly reduced growth traits such as plant height (52.3%) and the number of umbels per plant (29.4%). The greatest number of lateral branches was recorded under non-stress conditions with paclobutrazol foliar application. Drought stress also decreased the number of seeds per umbel (34.02%) and water use efficiency (22.2%). The maximum seed yield (533 kg $ha^{-1}$) was obtained under non-stress conditions with paclobutrazol foliar application. Under severe drought stress, jasmonic acid and paclobutrazol resulted in the highest seed yields. Although the essential oil percentage increased under severe drought stress, foliar application of jasmonic acid reduced it. The highest essential oil yield and water use efficiency were observed under moderate drought stress with jasmonic acid foliar application

**Conclusion:** In general, the use of growth modifiers, especially jasmonic acid and salicylic acid, can help reduce the negative effects of drought stress and improve the yield of cumin.

**Keywords:** Cumin, Essential oil, Growth regulator, Medicinal plants, Water use efficiency

تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک/ جلد هفتم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۴، ص ۷۰۳-۶۸۵

مقاله پژوهشی

# اثر محلول‌پاشی تعدیل‌کننده‌های تنش بر عملکرد و اجزای عملکرد زیره سبز در شرایط تنش خشکی

**حبیب نوری[۱]، سیّدغلامرضا موسوی*[۲]، محمّدجواد ثقه‌الاسلامی[۲]، منصور فاضلی رستم‌پور[۳]**

۱- دانشجوی دکتری زراعت، گروه کشاورزی، واحد بیرجند، دانشگاه آزاد اسلامی، بیرجند، ایران

۲- گروه کشاورزی، واحد بیرجند، دانشگاه آزاد اسلامی، بیرجند، ایران

۳- بخش تحقیقات زراعی و باغی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سیستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زابل، ایران

* مسئول مکاتبه: Moosavi@iaubir.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸ **DOI: 10.22034/CSRAR.2025.534625.1503**

## چکیده

با هدف بررسی اثر محلول‌پاشی تعدیل‌کننده‌های تنش بر عملکرد و اجزای عملکرد زیره سبز در شرایط تنش خشکی، پژوهشی در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه آزاد اسلامی بیرجند در سال زراعی ۱۳۹۹–۱۳۹۸ انجام شد. آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل اصلی شامل سه سطح تنش خشکی (۱۰۰، ۷۰ و ۴۰ درصد نیاز آبی) و عامل فرعی شامل پنج سطح محلول‌پاشی (عدم محلول‌پاشی، محلول‌پاشی با سالیسیلیک‌اسید (۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر)، جاسمونیک‌اسید (۶۰ میکرومول در لیتر)، پاکلوبوترازول (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و کیتوزان (۵۰ میلی‌گرم در لیتر)) بود. نتایج نشان داد تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار در صفات رشدی مانند ارتفاع (۵۲/۳٪) و چتر در بوته (۲۹/۴٪) شد. بیشترین شاخه جانبی در شرایط بدون تنش و با محلول‌پاشی پاکلوبوترازول حاصل شد. تنش خشکی باعث کاهش تعداد دانه در چتر (۳۴/۰۲٪) و کارایی مصرف آب (۲۲/۲٪) شد. بیشترین عملکرد دانه (۵۳۳ کیلوگرم در هکتار) در شرایط بدون تنش و با محلول‌پاشی پاکلوبوترازول به‌دست آمد. در شرایط تنش شدید، جاسمونیک‌اسید و پاکلوبوترازول بهترین عملکرد دانه را نشان دادند. اگرچه درصد اسانس در تنش شدید افزایش یافت، ولی محلول‌پاشی با جاسمونیک‌اسید آن را کاهش داد. بالاترین عملکرد اسانس و کارایی مصرف آب نیز با محلول‌پاشی جاسمونیک‌اسید در تنش متوسط مشاهده شد. در مجموع، استفاده از تعدیل‌کننده‌های رشد به ویژه جاسمونیک‌اسید و سالیسیلیک‌اسید می‌توانند به کاهش اثرات منفی تنش خشکی و بهبود عملکرد زیره سبز کمک کنند.

**واژه‌های کلیدی:** اسانس، زیره سبز، تنظیم‌کننده رشد، کارآیی مصرف آب، گیاهان دارویی

## مقدمه

کمبود آب در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، مهم‌ترین عامل محدودکننده در تولید محصولات کشاورزی به‌شمار می‌رود. در این مناطق، وقوع تنش خشکی به‌طور متوسط موجب کاهش عملکرد محصولات زراعی در حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد می‌شود. به‌منظور مقابله با این پدیده و کاهش آثار نامطلوب آن بر تولید، راهبردهای گوناگونی در حوزه‌های به‌زراعی و به‌نژادی مورد توجه قرار گرفته است. این اقدامات با هدف ارتقای کارایی مصرف آب و افزایش تحمل گیاهان به تنش خشکی انجام می‌شوند. در میان رویکردهای موجود، استفاده از ارقام و گونه‌های گیاهی بومی یا سازگار با شرایط اقلیمی این مناطق، یکی از مؤثرترین و در عین حال کم‌هزینه‌ترین راهکارها محسوب می‌شود (Bahrami *et al.*, 2023). یکی از گیاهان سازگار با شرایط خشک و نیمه‌خشک، زیره سبز است که در بسیاری از نقاط جهان از جمله ایران، به‌عنوان یک گیاه دارویی کشت می‌شود. این گیاه به‌دلیل ویژگی‌های رشدی خاص خود مانند دوره رشد کوتاه، برگ‌های سوزنی شکل، تکمیل چرخه رشدی پیش از آغاز فصل گرما و هم‌زمانی رشد با بارندگی‌های بهاری، توانسته است عملکرد خوبی حتی در شرایط دیم از خود نشان دهد (Armin and Miri, 2014). در سال‌هایی که بارندگی کافی وجود دارد، زیره سبز در کشت دیم عملکردی مشابه با کشت آبی خواهد داشت (Bahrami *et al.*, 2024). این گیاه به‌دلیل نیاز آبی کم، دوره رشدی کوتاه و سازگاری با اقلیم‌های خشک در استان‌های خراسان‌رضوی، خراسان‌جنوبی، سمنان، یزد، اصفهان و کرمان کشت می‌شود. در ایران سطح زیرکشت زیره سبز ۳۳۱۹۰ هزار هکتار گزارش شده است، که بخش قابل‌توجهی از این میزان در استان خراسان‌رضوی قرار دارد. این استان با ۱۵۴۹۰ هکتار سطح زیر کشت، بزرگ‌ترین

تولیدکننده زیره در کشور محسوب می‌شود؛ به‌طوری‌که از این مقدار، بیش از ۱۳ هزار هکتار به‌صورت آبی و ۲۲۳۲ هکتار به‌صورت دیم کشت می‌شود (Ministry of Agriculture Jihad, 2025).

با وجود مقاومت نسبی زیره سبز به تنش خشکی، بالاترین عملکرد این گیاه در شرایط عدم وجود تنش خشکی گزارش شده است. در ارزیابی عملکرد ۱۵ اکوتیپ مختلف زیره سبز در شرایط آزمایش نرمال و تنش خشکی نشان داده شده است، که تنش خشکی به‌طور معنی‌داری موجب کاهش عملکرد دانه و اجزای عملکرد آن در اکوتیپ‌های زیره سبز گردید و علاوه بر این، تنش خشکی موجب افزایش درصد اسانس و کاهش عملکرد کلی اسانس زیره سبز نسبت به شرایط آبیاری نرمال شد (Bazr Afshan *et al.*, 2025). مطالعات نشان داده‌اند که تنش خشکی تأثیر قابل‌توجهی بر صفات رویشی، عملکرد بذر، درصد و عملکرد اسانس زیره سبز داشته است، به‌گونه‌ای که با افزایش شدت تنش خشکی، این صفات به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند (Bahrami *et al.*, 2024). در بررسی تأثیر تنش خشکی بر صفات زراعی ۴۹ اکوتیپ زیره از مناطق مختلف ایران در شرایط تنش و بدون تنش گزارش شده است، تنش آبی پس از گلدهی (با رطوبت ۳۰٪ ظرفیت زراعی) باعث کاهش معنی‌دار در اکثر صفات به‌ویژه عملکرد دانه (با کاهش میانگین ۳۳/۶٪) می‌گردد و وزن هزار دانه (با کاهش میانگین ۳/۸ درصدی) کمترین تأثیر را از تنش خشکی می‌بینند. در بین اکوتیپ‌ها، بانه از خراسان‌شمالی بیشترین عملکرد را در شرایط بدون تنش و اسفراین کمترین عملکرد را در شرایط تنش نشان دادند (Safari *et al.*, 2015). نتایج بررسی شده در گیاه زیره سبز نشان داد که تنش کمبود آب، سبب کاهش میزان رنگیزه کلروفیل a گردید (Sartip and Sirousmehr, 2017). درحالی‌که میزان پرولین و کربوهیدرات را افزایش داد، و نیز در آزمایش دیگری تأثیر تنش کم‌آبی بر برخی از صفات فیزیولوژی، با استفاده از ارقام زیره سبز تحت شرایط تنش کم‌آبی و نرمال را مورد آزمون قرار دادند و اظهار داشتند که اثر تنش کم‌آبی بر کلیه صفات مورد بررسی شامل غلظت اسیدآمینه پرولین، محتوای قندهای محلول، اسانس، کلروفیل a، کلروفیل b، کاروتنوئید، محتوی نسبی آب برگ و عملکرد دانه معنی‌دار بود. آن‌ها اظهار داشتند با اعمال تنش، غلظت کلروفیل a، b، کاروتنوئید، محتوی نسبی آب برگ و عملکرد دانه کاهش یافت و بر غلظت پرولین، قندهای محلول و اسانس درصد افزوده شد (Kazemi *et al.*, 2018). در بررسی واکنش اجزای عملکرد، ترکیب اسیدهای چرب، ترکیبات اسانس و میزان فنل کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی اسانس زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) به تنش خشکی نشان داده شد، که تنش متوسط آبی در مقایسه با شرایط شاهد موجب افزایش تعداد چتر در بوته، تعداد چترک در چتر و عملکرد بذر شد، درحالی‌که این صفات در تنش شدید آبی کاهش یافتند. آنالیز ترکیب اسیدهای چرب نشان داد که اسیدپتروسلینیک با ۵۵/۹٪ بیشترین درصد را دارا بود و پس از آن اسیدپالمیتیک (۲۳/۸۲٪) و اسیدلینولئیک (۱۲/۴۰٪) در رتبه‌های بعدی قرار داشتند. تنش آبی منجر به افزایش درصد اسیدپالمیتیک شد. عملکرد اسانس بر اساس وزن خشک ۱/۶۴٪ بود و در شرایط تنش متوسط آبی به‌میزان ۱/۴ برابر افزایش یافت. با این حال تحت تنش شدید آبی، عملکرد اسانس به‌میزان ۱۹/۳۷ درصد نسبت به نمونه‌های شاهد کاهش یافت. همچنین، ترکیب شیمیایی اسانس در اثر تنش تغییر یافت، به‌گونه‌ای که از γ- ترپینن/ فنیل- ۱،۲- اتان‌دی‌ال در بذرهای شاهد به γ- ترپینن/ کومین‌آلدئید در بذرهای تحت تنش تغییر یافت (Rebey *et al.*, 2012).

کاهش اثرات نامطلوب تنش کمبود آب بر گیاهان یکی از مهم‌ترین چالش‌های کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که نیازمند راهکارهای علمی، مدیریتی و فناورانه است. کاربرد تعدیل‌کننده‌ای تنش، به‌ویژه در شرایط تنش رطوبتی به‌عنوان یک راهبرد مؤثر جهت افزایش مقاومت و پایداری عملکرد گیاهان زراعی توصیه شده است. تعدیل‌کنندگان تنش خشکی موادی هستند که با کاهش اثرات منفی ناشی از کمبود آب در گیاهان به افزایش مقاومت آن‌ها در برابر خشکی کمک می‌کنند (Timachi *et al.*, 2020; Borzouyi *et al.*, 2021; Tiamchi *et al.*, 2023). این ترکیبات شامل هورمون‌های گیاهی مانند آبسیسیک‌اسید، سالیسیلیک‌اسید، جیبرلیک‌اسید و اتیلن، همراه با میکروارگانیسم‌های محرک رشد گیاه (PGPR) مانند باکتری‌های جنس *Pseudomonas* و *Bacillus* هستند (Travaglia *et al.*, 2010; Timachi *et al.*, 2023; Lamlom *et al.*, 2025; Nazir *et al.*, 2024; Kazemi

(Oskuei *et al.*, 2024).

این عوامل از طریق القاء پاسخ‌های دفاعی، بهبود جذب آب و مواد معدنی، تعدیل فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تنظیم اسموتیک سلولی، به حفظ تورگور سلولی و پایداری غشای سلولی در شرایط تنش کمک می‌کنند (Singh *et al.*, 2015). استفاده از این تعدیل‌کنندگان در مدیریت تنش خشکی به‌عنوان راهکاری پایدار و مؤثر در کشاورزی مدرن مطرح است. در بررسی تأثیر اسیدسالیسیلیک و سولفات روی بر صفات کمی و محتوای اسانس گیاه زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) تحت شرایط مختلف رژیم‌های آبیاری (آبیاری پس از ۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشت تبخیر کلاس A (به‌ترتیب معادل شرایط بدون تنش، تنش ملایم و تنش شدید)) نشان داده شده است که با افزایش شدت تنش آبی، عملکرد دانه و اجزای عملکرد کاهش یافته، اما درصد اسانس در اندام‌های گیاه افزایش یافت. کاربرد اسیدسالیسیلیک و سولفات روی در تمامی سطوح رطوبتی منجر به بهبود عملکرد دانه و اجزای عملکرد شد. اگرچه تنش ملایم نسبت به شرایط بدون تنش باعث کاهش ۶ درصدی عملکرد دانه گردید، اما استفاده توأمان از ۶۰ کیلوگرم در هکتار سولفات روی و اسیدسالیسیلیک توانست اثرات منفی تنش را تعدیل کرده و عملکرد اسانس را به‌میزان ۶/۵ کیلوگرم در هکتار افزایش دهد (Jalalzadeh *et al.*, 2024). محققان در پژوهشی نشان دادند، در زیره سبز اگرچه تنش خشکی منجر به کاهش محتوای کلروفیل a شده، درحالی‌که مقادیر پرولین و کربوهیدرات‌های محلول افزایش می‌گردد اما محلول‌پاشی اسیدسالیسیلیک به‌ویژه در غلظت ۱ میلی‌مولار، موجب افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی و هیدرات‌های کربن شد (Sartip and Sirousmehr, 2017). بیشترین عملکرد دانه در تیمار آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی همراه با محلول‌پاشی ۱ میلی‌مولار اسیدسالیسیلیک به‌دست آمد. در مطالعه تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری و تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی بر عملکرد، اجزای آن و میزان اسانس رازیانه گزارش شده است، کمبود آب منجر به کاهش قابل‌توجه تعداد چتر در بوته، تعداد چترک در چتر، تعداد میوه در چترک، وزن هزار میوه، عملکرد بیولوژیکی و در نهایت عملکرد میوه شد. متیل‌جاسمونات، یونیکونازول و پرولین به‌طور قابل‌توجهی این پارامترهای اندازه‌گیری شده در گیاهان رازیانه را در مقایسه با شاهد افزایش دادند. اثرات بهبود یافته تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی در گیاهان تحت تنش خشکی بیشتر بود، زیرا باعث افزایش عملکرد اجزای آن و میزان اسانس میوه در مقایسه با شاهد شد. محلول‌پاشی برگی، به‌ویژه متیل‌جاسمونات و یونیکونازول محتوای آنتول را تحت تنش خشکی افزایش داد (Peymaei *et al.*, 2024). در زمینه تأثیر پاکلوبوترازول بر گیاه زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.)، مطالعات محدودی انجام شده است. در یک مطالعه، تأثیر پاکلوبوترازول بر عملکرد و کیفیت اسانس در زیره سیاه بررسی شد. نتایج نشان داد که کاربرد پاکلوبوترازول با غلظت ۵۰ ppm بیشترین میزان اسانس ثابت (۷۴/۳۸٪) را در مقایسه با سایر تیمارها تولید کرد. این افزایش به نقش پاکلوبوترازول در فعال‌سازی مسیرهای بیوسنتز ترکیبات ثانویه نسبت داده شد (Anil Kumar *et al.*, 2021). در آزمایشی که به‌منظور بررسی تأثیر کاربرد کیتوزان بر روی ویژگی‌های رشد و نمو گیاه ریحان نشان داد، سطوح مختلف کیتوزان باعث افزایش وزن تر ریشه و ساقه، قندهای محلول، پرولین، فنل و فلاونوئید گیاهان در شرایط تنش و غیرتنش گردید (Malekpoor *et al.*, 2016).

با وجود مطالعات انجام‌شده در زمینه تأثیر تنظیم‌کننده‌های رشد مختلف بر کاهش اثرات تنش خشکی در گیاهان دارویی، سازوکارهای بیوشیمیایی پاسخ گیاه زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) به کاربرد تعدیل کننده‌های تنش تحت شرایط تنش خشکی به‌طور سیستماتیک و جامع بررسی نشده است. اگرچه شواهدی از تأثیر مثبت این ترکیبات بر افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه در گونه‌های مشابه مانند زیره سیاه گزارش شده، اما فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (مانند کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز) و تجمع متابولیت‌های محافظت‌کننده اسمولیتی (نظیر پرولین و گلیسین بتائین) در گیاه زیره سبز به‌طور هم‌زمان و در تعامل با سطوح مختلف تنش آبی، به‌عنوان یک خلأ تحقیقاتی قابل‌توجه باقی مانده است. پر کردن این شکاف دانش می‌تواند به تدوین راهکارهای دقیق و مبتنی بر مکانیسم برای بهبود پایدار عملکرد و کیفیت متابولیتی این گیاه ارزشمند در شرایط محدودیت منابع آب کمک شایانی نماید. با توجه به اهمیت زیره سبز و مواجه این گیاه با تنش خشکی در طی دوره رشد، یافتن مناسب‌ترین تعدیل‌کننده تنش در بهبود عملکرد کمی و کیفی این گیاه می‌تواند مفید واقع

شود؛ بنابراین، هدف از این مطالعه بررسی واکنش کمی و کیفی زیره سبز به محلول‌پاشی تعدیل‌کننده‌های تنش در شرایط تنش خشکی بود.

## مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد بیرجند واقع در کیلومتر ۵ جاده بیرجند به زاهدان در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ اجرا شد. در این تحقیق رژیم آبیاری در سه سطح (۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه بر حسب درصد تبخیر و تعرق گیاه مرجع) به‌عنوان عامل اصلی و محلول‌پاشی در ۵ سطح (شاهد (عدم محلول‌پاشی)، محلول‌پاشی با سالیسیلیک‌اسید (۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر)، جاسمونیک‌اسید (۶۰ میکرومول در لیتر)، پاکلوبوترازول (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و کیتوزان (۵۰ میلی‌گرم در لیتر)) به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شد.

هر کرت فرعی شامل شش ردیف کاشت به طول ۳ متر، فاصله بین ردیف‌های کاشت ۲۰ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها روی ردیف ۵ سانتی‌متر بود. به‌منظور جلوگیری از اختلاط آب کرت‌های مجاور، فاصله بین هر تکرار ۳ متر و فاصله بین هر دو کرت اصلی ۱ متر در نظر گرفته شد. کشت بذور بر روی خطوط کاشت به‌صورت ردیفی در عمق ۱/۵ تا ۲ سانتی‌متر در خطوطی با فاصله ۲۰ سانتی‌متر به‌صورت ردیفی در تاریخ ۲۰ آذر ۱۳۹۸ انجام شد. بذور حدود ۱۲ ساعت قبل از کاشت در آب خیسانده شدند. برای کاشت ابتدا شیاری به عمق ۲-۱/۵ سانتی‌متر در روی خطوط کاشت ایجاد و سپس بذرهای زیره سبز با دست به‌صورت نواری در درون شیار قرار داده شد. پس از قرار دادن بذرها در شیارهای ایجاد شده، روی بذرها با لایه‌ای از ماسه‌بادی به‌منظور تسهیل در جوانه‌زنی پوشانده شد و نخستین آبیاری بی‌درنگ پس از کاشت و پس از آن آبیاری تا استقرار کامل گیاه به‌طور مرتّب در همه واحدهای آزمایشی و بدون اعمال تیمارهای تنش، هر هفت روز یک‌بار به‌روش غرقابی انجام گرفت. تیمارهای تنش آبیاری از مرحله سه تا چهار برگی بر اساس نوع تیمار تنش خشکی اعمال شد.

به‌منظور اجرای این آزمایش پس از برنامه‌ریزی و انتخاب زمین مناسبی که در سال قبل آیش بود، در اواسط مهرماه سال ۱۳۹۸ عملیات شخم و تسطیح زمین انجام و سپس در اواخر آبان‌ماه برای نرم‌کردن خاک و کلوخه‌ها دو بار دیسک زده شد و مرزبندی کرت‌ها به‌وسیله نیروی کارگری انجام و نقشه طرح پیاده شد. مقدار مصرف کود شیمیایی نیتروژن به‌دلیل امکان وقوع آبشویی، در دو مرحله (نیمی از کود در هنگام کاشت و نیمی دیگر پس از کاشت به‌صورت سرک در مرحله چهار برگی از منبع کود اوره) و کود شیمیایی فسفر ($P_2O_5$ خالص از منبع سوپر فسفات تریپل) و کود شیمیایی پتاس (از منبع سولفات پتاسیم) بر اساس آزمایش خاک و میزان توصیه شده به خاک اضافه شد. بذر زیره سبز مورد نیاز آزمایش از توده بذری بومی بیرجند، از شرکت سیستان بذر زابل (به شماره ثبت ۱۹۷۴) تهیه گردید.

**جدول ۱- ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک محل آزمایش**

**Table 1- Chemical and physical properties of the soil at the research site**

| عمق Depth (cm) | فسفر P ppm | پتاسیم K (mg/kg) | نیتروژن N % | شن Sand | رس Clay % | سیلت Silt | هدایت الکتریکی EC(dS m$^{-1}$) | pH |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0-30 | 6.41 | 219.4 | 0.029 | 56.4 | 17.6 | 26 | 1.20 | 7.94 |

جهت اجرای رژیم‌های آبیاری در سه سطح ۱۰۰، ۷۰ و ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه، ابتدا میزان تبخیر و تعرق مرجع ($ET_o$) با استفاده از معادله استاندارد پنمن- مانتیث بر اساس دستورالعمل FAO-56 و داده‌های هواشناسی روزانه (شامل دما، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی و سرعت باد) محاسبه شد. سپس با ضرب $ET_o$ در ضریب گیاهی ($K_c$) زیره سبز، نیاز آبی واقعی گیاه ($ET_c$) تعیین گردید. بر این اساس، تیمار ۱۰۰ درصد به‌منزله تأمین کامل نیاز آبی ($ET_c$)، تیمار ۷۰ درصد معادل ۷۰ درصد $ET_c$ و تیمار ۴۰ درصد معادل ۴۰ درصد $ET_c$ آبیاری شد. حجم آب مورد نیاز هر کرت با در نظر گرفتن مساحت کرت‌ها و عمق مؤثر ریشه، محاسبه و از طریق سیستم آبیاری سطحی به‌طور جداگانه اعمال شد. نحوه آبیاری به‌گونه‌ای

بود که مقدار آب خروجی از شیلنگ در هر کرت با استفاده از کنتور حجمی نصب شده در محل خروج آب قابل کنترل بود، بنابراین در هر نوبت آبیاری با توجّه به سطوح آبیاری مقدار لازم آب در هر کرت وارد گردید. برای محلول‌پاشی، ترکیبات مورد استفاده پس از ترکیب با حلال‌های مناسب و به‌صورت محلول‌پاشی برگی دو بار در فصل رشد، اوّلی به‌فاصله یک آبیاری قبل از اعمال تنش و دیگری آغاز مرحله زایشی گیاهان بر اساس نقشه طرح به کرت‌های در حال تنش اعمال گردید. برای تهیه غلظت‌های مشخص از ترکیب جاسمونیک‌اسید، ابتدا مقدار مورد نیاز از این ماده در ۱۰ میلی‌لیتر لتانول حل‌شده و سپس محلول با آب مقطر استریل به حجم مورد نظر رسانده شد. برای تهیه محلول‌های سالیسیلیک‌اسید از اتانول و آب گرم استفاده شد. به‌منظور بهبود جذب برگی کیتوزان، از تریتون X100با میزان ۰/۰۱ درصد به‌عنوان کاتالیزور استفاده شد. محلول‌پاشی با افشانه دستی پس از پشت سر گذاشتن گرمای روزانه و در هنگام غروب آفتاب در ساعت ۵ بعدازظهر، در هوای ملایم و صاف انجام شد. محلول‌پاشی به‌نحوی صورت گرفت که تمام سطح برگ با محلول مورد نظر کاملاً خیس شد. گیاهان شاهد با آب مقطر محلول‌پاشی شدند.

کارایی مصرف آب از تقسیم عملکرد اقتصادی (کیلوگرم در هکتار) به آب مصرفی (مترمکعب در هکتار) طبق رابطه ۱ محاسبه گردید

$$WUE = D / Wp + Wi \qquad (۱)$$

در این رابطه D عملکرد اقتصادی، Wp آب بارندگی و Wi آب آبیاری است.

جهت تعیین اجزای عملکرد شامل ارتفاع نهایی، تعداد چتر در بوته، تعداد دانه در چتر، تعداد ۱۰ بوته به‌صورت تصادفی انتخاب و صفات مورد نظر اندازه‌گیری شد. عملیات برداشت زیره سبز در نیمه اول اردیبهشت ۱۳۹۹، زمانی انجام گرفت که بوته‌ها زرد شدند و چترها به رنگ قهوه‌ای درآمدند. در انتهای فصل رشد پس از رسیدگی فیزیولوژیکی و قبل از رسیدگی کامل پس از حذف دو ردیف کناری و نیز نیم‌متر از ابتدا و انتهای هر کرت به‌عنوان اثر حاشیه، مابقی سطح کرت برداشت و دانه‌ها از چتر جدا شد. پس از توزین گیاهان و دانه‌های جداشده، داده‌های مذکور برای محاسبه عملکردهای دانه و زیست‌توده استفاده شد. جهت استخراج اسانس از دانه‌های زیره سبز در آزمایشگاه پژوهشکده شیمی تهران توسط دستگاه اسانس‌گیر، ابتدا ۵۰ گرم دانه گیاه آسیاب شده و سپس به‌مدّت دو ساعت با روش تقطیر با آب اسانس‌گیری شدند. بازده اسانس (درصد اسانس) پس از رطوبت‌زدایی آب آن توسط سولفات سدیم خشک با توزین مجدّد، درصد اسانس (بازده اسانس) محاسبه شد. عملکرد اسانس از حاصل‌ضرب عملکرد بذر و درصد اسانس بر حسب کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری ( Ver 9.4) SAS انجام شد. مقایسات میانگین بر اساس چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد.

## نتایج و بحث

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، تنش خشکی بر اکثر صفات مورد مطالعه از جمله ارتفاع بوته، تعداد شاخه جانبی، تعداد چتر در بوته، تعداد دانه در چتر، وزن هزار دانه، عملکرد اقتصادی، درصد اسانس، عملکرد اسانس و کارایی مصرف تأثیر معنی‌داری داشت. همچنین نوع تعدیل‌کننده تنش به‌جز ارتفاع بوته، سایر صفات مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار داد. برهمکنش تنش و نوع تعدیل‌کننده بر تعداد شاخه جانبی، وزن هزار دانه، عملکرد اقتصادی، درصد اسانس و عملکرد اسانس تأثیر معنی‌داری داشت و سایر صفات مورد بررسی را تحت تأثیر قرار نداد (جدول ۲).

## ارتفاع بوته

نتایج نشان داد که افزایش شدت تنش موجب کاهش قابل‌توجه ارتفاع بوته شد. در مقایسه با شرایط شاهد (۳۴/۶۴ سانتی‌متر)، تنش متوسط منجر به کاهش ۱۸/۷ درصدی و تنش شدید منجر به کاهش ۵۲/۳ درصدی در ارتفاع بوته شد. کاهش ارتفاع بوته تحت شرایط تنش را می‌توان به مجموعه‌ای از عوامل فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی نسبت داد. تنش‌های محیطی به‌ویژه تنش آبی، منجر به کاهش پتانسیل آب در گیاه شده و جذب آب و مواد معدنی را مختل می‌کنند. این وضعیت باعث کاهش فشار تورژسانس در سلول‌ها می‌شود که برای کشیدگی و رشد

سلولی ضروری است. از سوی دیگر، تنش باعث افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌گردد که به غشای سلولی، پروتئین‌ها و آنزیم‌های دخیل در رشد آسیب می‌زنند. همچنین کاهش در فتوسنتز به‌دلیل بسته شدن روزنه‌ها و کاهش سنتز کلروفیل، موجب کاهش تولید انرژی و مواد فتوسنتزی لازم برای رشد می‌شود.

در مجموع، این اختلالات رشد و تقسیم سلولی را محدود کرده و در نهایت منجر به کاهش ارتفاع بوته می‌شوند. این یافته با نتایج حاصل از پژوهش‌های دیگر محققان در گیاه زیره سبز، مطابقت دارد (Sartip and Sirousmehr, 2017; Timachi *et al.*, 2020; Bahrami *et al.*, 2024).

## تعداد شاخه جانبی

اثرمتقابل شدت تنش× نوع تعدیل‌کننده رشد نشان داد، هرچه شدت تنش افزایش پیدا کرد، تعداد شاخه‌های جانبی کاهش می‌یابد، اما استفاده از تعدیل‌کننده‌های رشد به‌ویژه پاکلوبوترازول و سالیسیلیک‌اسید توانست تا حدی این کاهش را جبران کند و رشد شاخه‌زایی را بهبود بخشد. بیشترین تعداد شاخه جانبی زیره سبز در شرایط بدون تنش و محلول‌پاشی پاکلوبوترازول با میانگین ۶/۲۳ عدد در هر بوته به‌دست آمد، که نسبت به عدم محلول‌پاشی در همین شدت تنش (۵/۴۷ شاخه) افزایش قابل‌توجهی داشته است.

پس از آن، محلول‌پاشی با سالیسیلیک‌اسید با میانگین ۵/۹۳ عدد در هر بوته و کیتوزان با ۵/۵۷ عدد در هر بوته تعداد شاخه جانبی بیشتری داشتند. در تنش متوسط، تعداد شاخه‌های جانبی در تمام تعدیل‌کننده رشد کاهش یافت و بیشترین تعداد شاخه جانبی با محلول‌پاشی پاکلوبوترازول با میانگین ۴/۵۳ عدد در هر بوته بود. کمترین تعداد شاخه جانبی در شرایط عدم محلول‌پاشی با میانگین ۴/۰۷ عدد در هر بوته تعلق داشت.

در شرایط تنش شدید آبی، تعداد شاخه‌های جانبی به‌طورکلی کاهش چشمگیری داشت؛ کمترین مقدار مربوط به شرایط عدم محلول‌پاشی با میانگین ۲/۱۰ عدد در هر بوته بود. بیشترین مقدار در این شرایط با محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید با ۳/۱۰ عدد در هر بوته بود (شکل ۱).

**جدول ۲- تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه**

**Table 2- Analysis of variance of the studied traits**

| منابع تغییرات Source of variation | درجه آزادی df | ارتفاع بوته Plant height | شاخه جانبی Lateral branches | تعداد چتر در بوته Umbels per plant | تعداد دانه در چتر Seeds per umbel | وزن هزار دانه 1000 seed weight | عملکرد دانه Grain yield | درصد اسانس Essential oil content | عملکرد اسانس Essential oil yield | کارایی مصرف آب Water use efficiency |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| تکرار Replication | 2 | $114^{ns}$ | $0.7636^{ns}$ | $22.8^{*}$ | $29.92^{ns}$ | $0.447^{*}$ | $24512^{*}$ | $0.266^{ns}$ | $19.7^{**}$ | $0.003^{**}$ |
| تنش خشکی Drought stress (A) | 2 | $1265^{**}$ | $25.5^{**}$ | $153^{**}$ | $168^{**}$ | $5.8^{**}$ | $316154^{**}$ | $19.1^{**}$ | $16.9^{**}$ | $0.002^{**}$ |
| خطای a Ea | 4 | 71.5 | 0.57 | 2.13 | 6.45 | 0.09 | 2588 | 0.174 | 0.238 | 0.0001 |
| تعدیل‌کننده تنش Stress modulator(B) | 4 | $19.4^{ns}$ | $1.05^{**}$ | $14.2^{*}$ | $27.1^{**}$ | $0.602^{**}$ | $32497^{**}$ | $0.333^{**}$ | $8.4^{**}$ | $0.003^{**}$ |
| A×B | 8 | $2.83^{ns}$ | $0.428^{*}$ | $7.2^{ns}$ | $3.35^{ns}$ | $0.083^{*}$ | $6335^{**}$ | $0.321^{**}$ | $3.42^{*}$ | $0.0002^{ns}$ |
| خطای b Eb | 24 | 10.5 | 0.209 | 3.44 | 1.69 | 0.031 | 1234 | 0.0231 | 1.32 | 0.0001 |
| ضریب تغییرات Coefficient of variation (%) | | 12.28 | 10.49 | 10 | 7.9 | 4.76 | 13.5 | 6.39 | 22.5 | 15.4 |

nsغیر معنی دار، * و ** به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱

ns: not significant; * and **: significant at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively

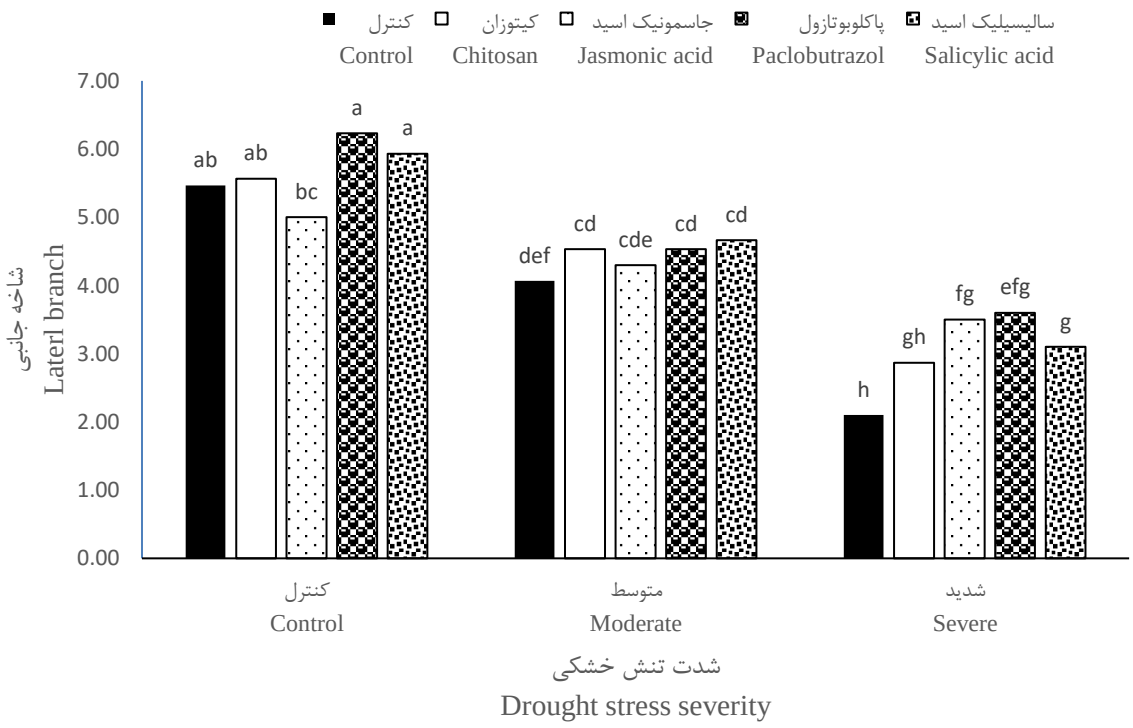
**جدول ۳- اثر تنش خشکی و نوع تعدیل‌کننده تنش بر صفات ارتفاع بوته، تعداد چتر در بوته، تعداد دانه در چتر و کارایی مصرف آب**

**Table 3- Effect of drought stress and type of stress moderator on plant height, umbels per plant, seed grain per umbels and water use efficiency**

| فاکتورهای آزمایشی Experimental factors | ارتفاع بوته Plant height (Cm) | تعداد چتر در بوته Number of umbels per plant | تعداد دانه در چتر Number of seeds per umbel | کارایی مصرف آب water use efficiency ($Kg/m^3$) |
|---|---|---|---|---|
| **تنش خشکی Drought stress** | | | | |
| شاهد Control | 34.64 a | 21.79 a | 19.4 a | 0.09 a |
| متوسط Moderate | 28.17 b | 18.50 b | 17.2 a | 0.08 b |
| شدید Severe | 16.51 b | 15.38 c | 12.8 b | 0.07 c |
| **نوع تعدیل کننده تنش Stress modulator type** | | | | |
| عدم محلول پاشی Control | -- | 16.54 b | 13.9 c | 0.05 c |
| کیتوزان Chitosan | --- | 18.56 a | 16.1 b | 0.08 b |
| جاسمونیک اسید Jasmonic acid | --- | 19.99 a | 18.6 a | 0.10 a |
| پاکلوبوتازول Paclobutrazol | --- | 19.04 a | 16.5 b | 0.08 b |
| سالیسیلیک اسید Salicylic acid | --- | 18.64 a | 17.1 b | 0.09 b |

در هر ستون میانگین‌های با حروف مشترک، بر اساس آزمون دانکن در سطح ۰/۰۵ تفاوت معنی‌داری ندارند

Means within a column followed by the same letters are not significantly different based on Duncan test at 0.05 Probability level.




**شکل ۱- برهمکنش شدت تنش و نوع تعدیل‌کننده تنش بر تعداد شاخه جانبی**

**Figure 1- Interaction of stress intensity and type of stress modifier on the number of lateral branches**

با توجه به تأثیر مثبت تعدیل‌کننده‌های تنش بر تعداد شاخه جانبی در این آزمایش، به‌نظر می‌رسد تعدیل‌کننده‌های رشد توانسته‌اند با تأمین به موقع عناصر مورد نیاز گیاه در طی فصل رشد برای شکل‌گیری ساختار رویشی و زایشی گیاه می‌توانند شرایط بهینه‌ای را برای افزایش تعداد ساقه اصلی گیاه فراهم آورند و در شرایط یکسان محیطی فراهم آوردن عناصر غذایی برای گیاه و تولید حجم سبزینه‌ای بالا می‌تولند باعث افزایش رشد گیاه و متعاقباً تعداد شاخه فرعی گیاه شود. نتایج مشابهی نیز توسط سایر محققین، و تأثیر سالیسیلیک‌اسید بر خصوصیات زراعی گیاهان دارویی ماریتغال حاصل گردید و نتایج مشخص کرد که محلول‌پاشی با تنظیم‌کننده‌های رشد موجب حصول بالاترین تعداد شاخه جانبی در شرایط تنش کم‌آبی شد (Timachi *et al.*, 2023; Mousavoey *et al.*, 2021).

## تعداد چتر در بوته

افزایش شدت تنش منجر به کاهش معنی‌دار در تعداد چتر در بوته شد. به‌طوری‌که شرایط عدم تنش (شاهد) بیشترین تعداد چتر (۲۱/۹) را داشت که از نظر آماری در سطح ۵ درصد با شرایط تنش متوسط و تنش شدید اختلاف معنی‌داری داشت. تنش متوسط و تنش شدید، به‌ترتیب موجب کاهش ۱۵/۱ و ۲۹/۴ درصدی در تعداد چترها نسبت به آبیاری کامل گردید (جدول ۳). احتمالاً علت افزایش تعداد چتر در بوته تحت تیمار آبیاری کامل می‌تواند در نتیجهٔ بهبود رشد ریشه، جذب عناصر غذایی و به تبع آن افزایش فتوسنتز و تولید مواد پرورده و تسهیم بهتر مواد در مخازن در این تیمار باشد. در گزارش‌های متعددی کاهش معنی‌دار تعداد چتر در بوته در زیره سبز تحت تاثیر تنش بیان شده است، که در این گزارش‌ها با اعمال تنش کمبود آب تعداد چتر زیره سبز کاهش می‌یابد، این کاهش به‌دلیل ریزش گل و سقط دانه‌های تازه تشکیل شده است که باعث کاهش تعداد چتر و دانه می‌شود (Rebey *et al.*, 2012).

نتایج حاصل از بررسی اثر تعدیل‌کننده‌های رشد گیاهی بر تعداد چتر در بوته نشان داد که استفاده از این مواد منجر به افزایش معنی‌دار تعداد چترها نسبت به عدم محلول‌پاشی شد. بیشترین افزایش با محلول‌پاشی جاسمونیک‌اسید با میانگین ۱۹/۹۹ چتر بود که نسبت به عدم محلول‌پاشی، ۲۰/۸۵٪ افزایش نشان داد. پس از آن، محلول‌پاشی با پاکلوبوتازول با ۱۹/۰۴ چتر (۱۵٪/۱۳ افزایش)، سالیسیلیک اسید با ۱۸/۶۴ چتر (۱۲٪/۷ افزایش) و کیتوزان با ۱۸/۵۶ چتر (۱۲٪/۲۱ افزایش) قرار داشتند (جدول ۳). این یافته‌ها بیانگر نقش مؤثر تنظیم‌کننده‌های رشد در بهبود ویژگی‌های زایشی گیاه از جمله افزایش تعداد چتر در بوته هستند. نتایج گزارش شده متعددی توسط پژوهشگران نیز نشان‌دهنده تأثیر افزایش تنظیم‌کننده‌های رشد بر تحت تأثیر قرار دادن تعداد چتر در بوته است. در بررسی برهمکنش تنش کمبود آب و سالیسیلیک‌اسید بر تعداد چتر در بوته رازیانه معنی‌دار شد. بدین صورت که تیمار کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط آبیاری کامل بیش‌ترین تعداد چتر در بوته را به خود اختصاص داد (Salarpour and Farahbakhsh, 2016).

## تعداد دانه در چتر

بررسی اثر تنش بر تعداد دانه در چتر نشان داد که این صفت به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر سطوح مختلف تنش کاهش یافت. در شرایط شاهد، میانگین تعداد دانه در چتر برابر ۱۹/۴ عدد بود، درحالی‌که در تنش متوسط این مقدار با کاهشی معادل ۱۱/۳۴ درصد به ۱۷/۲ عدد رسید و در تنش شدید با کاهش ۳۴/۰۲ درصدی به ۱۲/۸ عدد کاهش یافت (جدول ۳). این کاهش می‌تواند ناشی از اختلال در فرآیند گرده‌افشانی، لقاح، یا رشد بذر تحت تنش باشد. تنش‌های محیطی معمولاً با کاهش فعالیت فتوسنتزی، افزایش تنفس و اختلال در تعادل تنظیم‌کننده‌های رشدی همراه هستند که همگی منجر به کاهش توان تولیدمثلی گیاه و در نتیجه کاهش تعداد دانه در چتر می‌شوند. احتمالاً علت افزایش تعداد دانه در چتر تحت تیمار، دور آبیاری کامل می‌تواند در نتیجهٔ بهبود رشد ریشه، جذب عناصر غذایی و به تبع آن افزایش فتوسنتز و تولید مواد پرورده و تسهیم بهتر مواد در مخازن در این تیمار باشد. در اثر تنش کم‌آبی به‌علت کمبود آب مورد نیاز جهت فعالیت‌های فیزیولوژیکی گیاه، رشد گیاه و همچنین رشد برگ‌ها کاهش می‌یابد که با کاهش سطح فتوسنتزکننده، میزان فتوسنتز کاهش می‌یابد و گیاه جهت حفظ حیات خود به حالت نیمه‌فعال درآمده و انتقال مواد فتوسنتزی به اندام‌های دیگر از جمله چترها و بذرها کاهش یافته و در نتیجه تجمع مواد فتوسنتزی

در بذرها کم و تعداد دانه در چتر نیز کاهش می‌یابد (Zlatev and Lidon, 2012).

از دیگر دلایل کاهش تعداد دانه در چتر به‌هنگام تنش کم‌آبی می‌توان به کاهش تعداد گل‌ها و کم شدن تعداد گل‌هایی که به دانه تبدیل می‌شوند، اشاره نمود. کاهش تعداد دانه در چتر با اعمال تنش کم‌آبی در زیره سبز نیز گزارش شده است (Safari *et al.*, 2015; Timachi *et al.*, 2023).

استفاده از تعدیل‌کننده‌های مختلف موجب افزایش تعداد دانه در چتر نسبت به شرایط عدم محلول‌پاشی شد. در میان تعدیل‌کننده‌های مختلف، محلول‌پاشی با جاسمونیک‌اسید با ۳۴/۳۴ درصد افزایش نسبت به عدم محلول‌پاشی، بیشترین تأثیر مثبت را بر افزایش تعداد دانه داشت. پس از آن، محلول‌پاشی با سالیسیلیک‌اسید، پاکلوبوتازول و کیتوزان نیز به‌ترتیب موجب افزایش ۲۳/۴۵، ۱۹/۳۵ و ۱۵/۹۰ درصدی نسبت به عدم محلول‌پاشی شدند (جدول ۳).

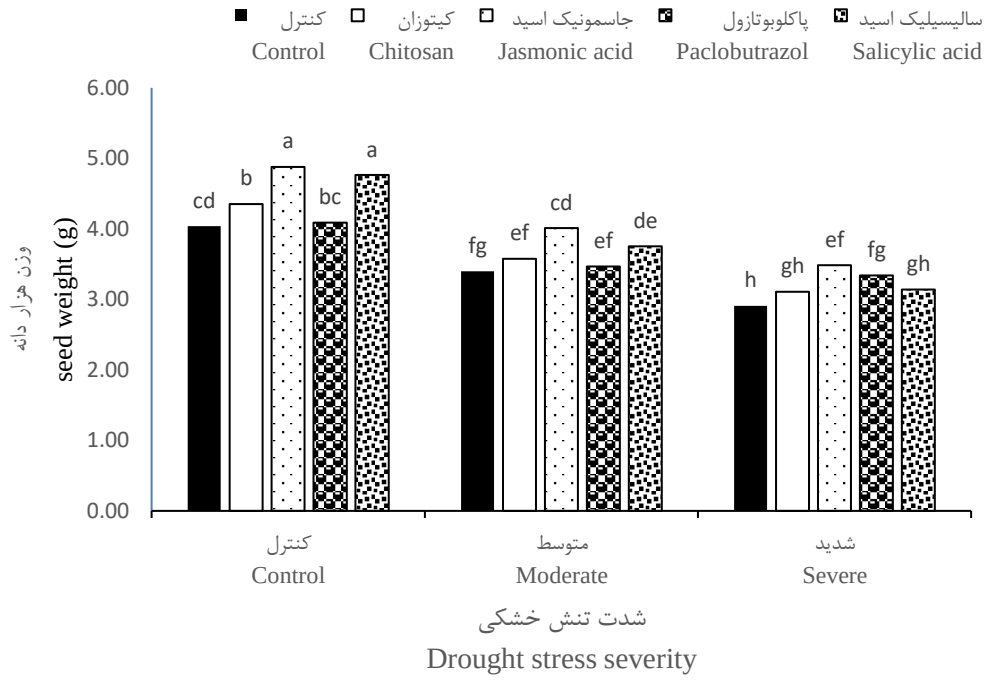
این افزایش احتمالاً به‌دلیل نقش تعدیل‌کننده‌ها در بهبود تحمل گیاه به تنش، تحریک رشد زایشی، بهبود فتوسنتز و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی است که منجر به تقویت تشکیل دانه و کاهش خسارت ناشی از شرایط نامساعد محیطی می‌شود. نتایج بیانگر اثربخشی این ترکیبات در افزایش عملکرد گیاه و بهبود شاخص‌های زایشی است. نتایج بررسی در گیاه زیره سبز، نشان داد که تیمار محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید دارای اثر بهتری می‌باشد. در گیاهان محلول‌پاشی شده با سالیسیلیک‌اسید صفاتی از قبیل تعداد دانه در چتر و تعداد دانه در بوته وزن هزار دانه و عملکرد دانه تفاوت معنی‌داری داشتند (Rahimi *et al.*, 2013).

## وزن هزار دانه

استفاده از تعدیل‌کننده‌های مختلف سبب افزایش وزن هزار دانه در هر سه سطح تنش (کنترل، متوسط و شدید) نسبت به تیمار شاهد در شرایط عدم محلول‌پاشی شد. در میان تعدیل‌کننده‌های مختلف، محلول‌پاشی با جاسمونیک‌اسید بیشترین اثر افزایشی را نشان داد، به‌طوری‌که وزن هزار دانه را در شرایط تنش شدید تا ۲۰/۷۹ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. محلول‌پاشی با سالیسیلیک‌اسید نیز افزایش قابل‌توجهی در وزن هزار دلنه داشت به‌نحوی که سبب افزایش بیش از ۱۷ درصدی در تنش شدید را موجب شد (شکل ۲). کاهش معنی‌دار وزن هزار دلنه با افزایش شدت تنش این گونه توجیه شود که در اثر کم‌آبی رشد رویشی گیاه به حداقل رسیده و از این‌رو منبع قوی برای پر شدن مخازن فیزیولوژیکی (دانه زیره سبز) در گیاه وجود نداشته و این امر باعث شده است که نه تنها تعداد چتر در بوته و تعداد دانه در چتر کاهش یابد، بلکه وزن هزار دانه نیز به‌طور معنی‌داری با افزایش تنش کم‌آبی کاهش یابد. دلیل کاهش وزن هزار دانه با افزایش تنش، احتمالاً می‌تواند ناشی از کاهش فتوسنتز و متابولیسم گیاهی و اختلال در پر شدن دانه باشد.

در کل در این بررسی به‌نظر می‌رسد به‌علت فراهمی بیشتر رطوبت در تیمار کنترل برای گیاه و نیز نقش رطوبت در رشد سبزینه‌ای گیاه و اهمیت آن در پایداری اندام‌های فتوسنتزکننده سبب گردید که در حین پر شدن دانه‌ها نیز فتوسنتز در سطح مناسبی حفظ گردد و در نتیجه، پر شدن دلنه‌ها با شدت بیشتری ادامه یابد که متعاقب آن بیشترین وزن دانه در این تیمار مشاهده گردید و به‌عبارت دیگر محدودیت رطوبت در طی رشد موجب کاهش انتقال مواد فتوسنتزی و در نتیجه چروک شدن دانه می‌شود و عدم تنش باعث می‌شود دوره پر شدن دانه طولانی‌تر شود و مواد فتوسنتزی بیشتری به دانه‌ها اختصاص یابد. کاهش وزن هزار دلنه تحت تأثیر تنش کمبود آب توسط سایر محققین از جمله در زیره سبز، در سیاه‌دانه و در کینوا تأیید گردیده است (Jami *et al.*, 2015; Gültekin *et al.*, 2025; Zamani *et al.*, 2023).

از طرفی به‌نظر می‌رسد تعدیل‌کننده‌های تنش با تأثیر بر انتقال بیشتر مواد فتوسنتزی از برگ‌ها به دانه‌ها وزن هزار دانه را در گیاه زراعی افزایش می‌دهد (Singh *et al.*, 2015). در آغاز پر شدن دانه‌ها که اکثر آنها در مرحله پر شدن هستند، ادامه ارسال آسیمیلات کافی به این دانه‌ها با افزایش سقط دانه‌های دیگر مقدور نیست. در این زمان، فتوسنتز برگ و انتقال مواد فتوسنتزی نیز توسط کمبود آب کاهش یافته است. از طرفی در غیاب فتوسنتز جاری، نمو دانه متکی به آسیمیلات‌های ذخیره‌ای در گیاه است. نتایج بررسی در گیاه زیره سبز، نشان داد که تیمار محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید باعث افزایش وزن هزار دانه گردید (Esfini Farahani *et al.*, 2012).




**شکل ۲- برهمکنش شدت تنش و نوع تعدیل‌کننده تنش بر وزن هزار دانه**

**Figure 2- Interaction of stress intensity and type of stress modifier on 1000 seed weight**

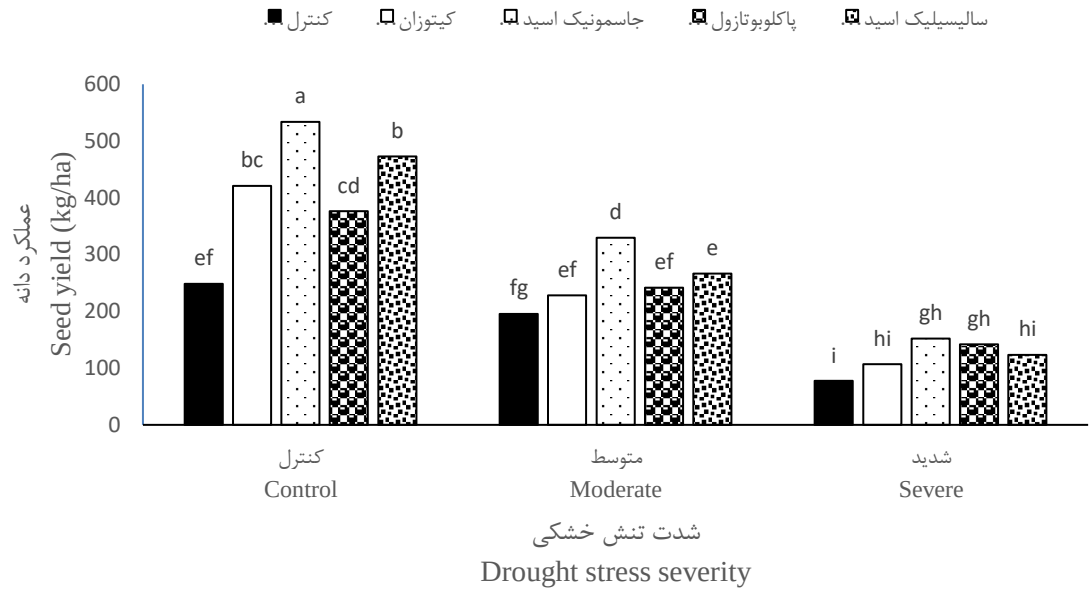
## عملکرد دانه

بالاترین عملکرد دانه مربوط به شرایط عدم تنش (شاهد) و محلول‌پاشی با پاکلوبوترازول بود که به ۵۳۳ کیلوگرم در هکتار رسید، این مقدار به‌طور قابل ملاحظه‌ای از سایر تیمارها بالاتر بود. پس از آن، محلول‌پاشی با سالیسیک‌اسید (۴۷۲) و کیتوزان (۴۲۱ کیلوگرم در هکتار) عملکرد بالاتری نسبت به شاهد داشتند. در شرایط تنش متوسط محلول‌پاشی با جاسمونیک‌اسید در مقایسه با سایر تعدیل‌کننده‌های عملکرد دانه بیشتری را تولید کرد. درحالی‌که محلول‌پاشی با پاکلوبوترازول، سالیسیک‌اسید و کیتوزان اگرچه در مقایسه با عدم محلول‌پاشی عملکرد دانه بیشتری را تولید کردند، اما از نظر آماری اختلاف آماری معنی‌داری نداشتند. در شرایط تنش شدید هم روندی مشابه با تنش متوسط مشاهده شد اما اختلاف آماری معنی‌دار بین تعدیل‌کننده‌های مختلف مشاهده نشد (شکل ۳). کاهش عملکرد دانه در شرایط تنش کم‌آبی می‌تواند ناشی از کاهش اجزای عملکرد شامل تعداد چتر در بوته، تعداد دانه در چتر و کاهش وزن هزار دانه زیره سبز باشد. بی‌تردید نقش مهم و اساسی آب در ساختار کلروفیل و نقش آن در افزایش رشد گیاه در این تفسیر موثر است. در زمان پر شدن دانه، تنش کم‌آبی از طریق تقلیل فتوسنتز باعث کاهش عملکرد دانه می‌شود؛ بنابراین نیاز مقصد برای پر شدن دانه از طریق انتقال مجدد مواد فتوسنتزی ذخیره شده تأمین می‌گردد. از طرف دیگر، کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش مقاومت گیاه را در برابر کمبود آب افزایش داده و در نتیجه عملکرد را بهبود می‌دهد. تعدیل‌کننده‌های تنش گیاه به‌طور گسترده‌ای به‌صورت طبیعی و سنتزی در محصولات کشاورزی به‌عنوان عاملی در جهت بهبود گیاهان زراعی استفاده می‌شوند (Pospíšilová *et al.*, 2000).

## درصد اسانس

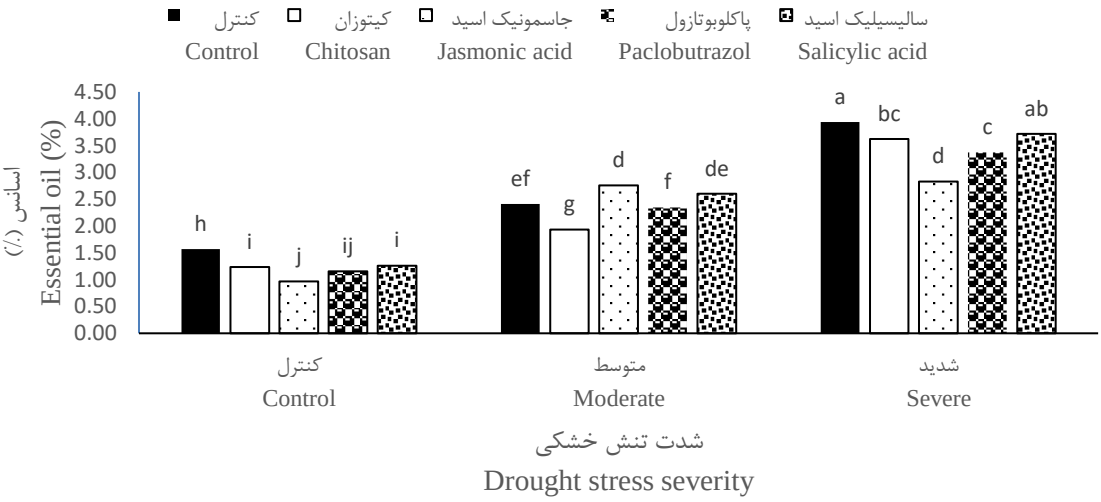
اثرمتقابل رژیم آبیاری و تعدیل‌کننده‌های رشد بر درصد اسانس نشان داد که درصد اسانس در شرایط تنش شدید (۴۰ درصد آبیاری) به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و تیمارهای مختلف نیز واکنش متفاوتی نشان دادند. در شرایط آبیاری کامل (۱۰۰٪ تبخیر و تعرق)، بالاترین درصد اسانس مربوط به عدم محلول‌پاشی بود (۱/۵۷ درصد) اما کاربرد سایر تنظیم‌کننده‌ها مانند جاسمونیک‌اسید (۰/۹۷ درصد) و پاکلوبوترازول (۱/۱۶ درصد) موجب کاهش قابل‌توجه درصد اسانس نسبت به عدم

محلول‌پاشی شد. در تنش متوسط، درصد اسانس با محلول‌پاشی جاسمونیک‌اسید (۲/۷۶ درصد) و سالیسیلیک‌اسید (۲/۲۶۰ درصد) نسبت به عدم محلول‌پاشی (۲/۲۴۱ درصد) به‌ترتیب حدود ۱۴/۵ و ۷/۹ درصد افزایش نشان دادند. در شرایط تنش شدید بیشترین درصد اسانس در عدم محلول‌پاشی (۳/۹۴ درصد) به‌دست آمد، اما محلول‌پاشی با سالیسیلیک‌اسید ۳/۷۲ درصد و کیتوزان (۳/۶۲ درصد)، درصد اسانس خوبی داشتند. در مقابل، جاسمونیک‌اسید در این سطح از آبیاری با کاهش حدود ۲۸ درصد نسبت به عدم محلول‌پاشی همراه بود (شکل ۴). در بررسی بر روی گیاه زیره سبز اظهار داشتند که بیشترین درصد اسانس در آبیاری مطلوب حاصل شد که با نتایج آزمایش حاضر مطابقت دارد (Mohammadi *et al.*, 2018). پژوهشگران دیگری نیز تأثیر مثبت تنش کم‌آبی را بر افزایش درصد اسانس زیره سبز، رازیانه و آنیسون گزارش کردند (Armin and Miri, 2014; Bahrami *et al.*, 2024; Peymaei *et al.*, 2024; Heidari *et al.*, 2012).




**شکل ۳- برهمکنش شدت تنش و نوع تعدیل‌کننده تنش برعملکرد دانه**

**Figure 3- Interaction of stress intensity and type of stress modifier on seed yield**

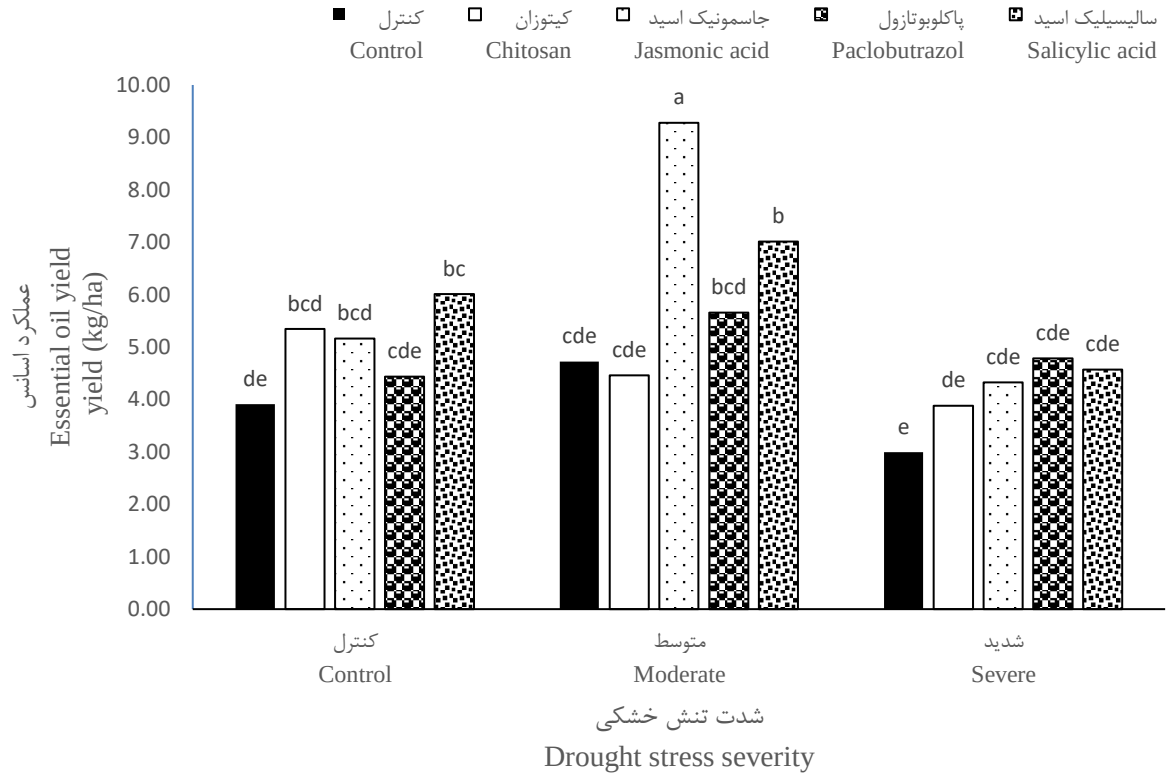



**شکل ۴- برهمکنش شدت تنش و نوع تعدیل‌کننده تنش بر درصد اسانس**

**Figure 4- Interaction of stress intensity and type of stress modifier on essential percent**

## عملکرد اسانس

بررسی برهمکنش شدت تنش و نوع تعدیل‌کننده تنش نشان داد که کاربرد تعدیل‌کننده‌های رشد گیاهی در شرایط مختلف تنش، تأثیر قابل‌توجهی بر افزایش عملکرد اسانس نسبت به شاهد داشته است. تحت شرایط تنش متوسط، محلول‌پاشی با جاسمونیک‌اسید با عملکرد ۹/۲۸ کیلوگرم در هکتار بیشترین اثر را داشته و افزایش بیش از دو برابری (تقریباً ۹۶/۶۱٪) نسبت به عدم محلول‌پاشی (۴/۷۲ کیلوگرم در هکتار) نشان داد. در شرایط شاهد (بدون تنش)، بالاترین عملکرد اسانس مربوط به محلول‌پاشی با سالیسیلیک اسید با مقدار ۶/۰۱ کیلوگرم در هکتار (افزایش ۵۳/۷٪ نسبت به عدم محلول‌پاشی) و پس از آن محلول‌پاشی با کیتوزان با ۵/۳۴ کیلوگرم در هکتار (افزایش ۳۶/۵٪) بود. در شرایط تنش شدید نیز، محلول‌پاشی با پاکلوبوتازول با تولید عملکرد اسانس معادل ۴/۷۸ کیلوگرم در هکتار بیشترین اثر را داشت که نسبت به عدم محلول‌پاشی معادل ۵۹/۳۳٪ افزایش داشت و پس از آن سالیسیلیک‌اسید با ۴/۵۷ کیلوگرم در هکتار و جاسمونیک‌اسید با ۴/۳۳ کیلوگرم در هکتار قرار داشتند (شکل ۵). این کاهش احتمالاً به‌دلیل افت شدید عملکرد دانه در شرایط تنش آبی، به‌رغم کاهش مصرف آب بوده است؛ چرا که بهره‌وری آب زمانی بهینه می‌شود که کاهش عملکرد کمتر از میزان کاهش در آب مصرفی باشد؛ بنابراین، مدیریت صحیح آبیاری برای حفظ عملکرد و افزایش بهره‌وری آب امری کلیدی محسوب می‌شود.




**شکل ۵- برهمکنش شدت تنش و نوع تعدیل‌کننده تنش بر عملکرد اسانس**

**Figure 5- Interaction of stress intensity and type of stress modifier on essential yield**

## کارایی مصرف آب

تنش آبی اثر منفی قابل‌توجهی بر کارایی مصرف آب داشت و با افزایش شدت تنش، این شاخص کاهش یافت. در شرایط شاهد، کارایی مصرف آب برابر ۰/۰۹ کیلوگرم بر متر مکعب بوده که بیشترین مقدار را نشان می‌دهد. با اعمال تنش در سطح متوسط، این شاخص به ۰/۰۸ کیلوگرم بر متر مکعب کاهش یافت (کاهش حدود ۱۱/۱٪) و در شرایط تنش شدید به ۰/۰۷ کیلوگرم بر متر مکعب رسید (کاهش ۲۲/۲٪ نسبت به شاهد).

این کاهش تدریجی بیانگر آن است که تنش خشکی موجب کاهش توان گیاه در استفاده مؤثر از آب برای تولید محصول می‌شود. کاهش WUE تحت تنش، می‌تواند ناشی از بسته شدن روزنه‌ها، کاهش فتوسنتز، افزایش تنفس نوری و کاهش انتقال مواد فتوسنتزی باشد. در نتیجه، تولید ماده خشک یا عملکرد کاهش می‌یابد، درحالی‌که مصرف آب ممکن است به همان میزان کاهش نیافته باشد که منجر به افت کارایی می‌شود (Liu *et al.*, 2016). همچنین پژوهشگران پس از بررسی تأثیر آبیاری مطلوب و کم‌آبیاری بر کارایی مصرف آب گشنیز اظهار داشتند که آبیاری بر این صفت در سطح ۱٪ معنی‌دار شد. بیشترین کارایی مصرف آب با میانگین ۰/۴۵ کیلوگرم ماده خشک بر مترمکعب در تیمار اعمال کم‌آبیاری به دست آمد (Farahani *et al.*, 2008).

در نتایج تحقیق دیگری روی زیره سبز گزارش شده است که بالاترین کارایی مصرف آب (۲/۴ کیلوگرم در هکتار در هر میلی‌متر) در تیمار ۷۵ درصد تبخیر و تعرق پتانسیل به‌دست آمد (Yaghi *et al.*, 2024). نتایج مشابهی توسط دیگر محققان نیز گزارش شده است (Ghalibaf *et al.*, 2020).

در میان تعدیل‌کننده‌های رشد، محلول‌پاشی با جاسمونیک‌اسید با مقدار ۰/۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب، بالاترین کارآیی مصرف آب را نشان داد که به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار عدم محلول‌پاشی (۰/۰۵ کیلوگرم بر مترمکعب) بود. محلول‌پاشی با سالیسیلیک‌اسید، پاکلوبوترازول و کیتوزان نیز موجب بهبود کارایی مصرف آب نسبت به عدم محلول‌پاشی شد (جدول ۳).

افزایش کارایی مصرف آب در نتیجه مصرف تعدیل‌کننده‌های رشد مانند جاسمونیک‌اسید، سالیسیلیک‌اسید، پاکلوبوترازول و کیتوزان را می‌توان از نظر فیزیولوژیکی به نقش این ترکیبات در افزایش مقاومت گیاه به تنش‌های خشکی و بهبود استفاده گیاه از منابع آب و مواد غذایی نسبت داد. به‌طور خاص، جاسمونیک‌اسید به‌عنوان یک فیتوهورمون در تنظیم پاسخ‌های گیاه به تنش‌های زیستی و غیر زیستی نقش دارد. این ماده با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، تنظیم باز و بسته شدن روزنه‌ها و کاهش تبخیر بی‌رویه آب از برگ‌ها باعث می‌شود که گیاه با آب کمتری به عملکرد مطلوب‌تری دست یابد (Nazim *et al.*, 2021).

همچنین، افزایش سنتز پروتئین‌های محافظ و تنظیم اسمزی سلولی تحت تأثیر این مواد، موجب حفظ ساختار سلولی و عملکرد فتوسنتزی در شرایط کم‌آبی می‌شود (Timachi *et al.*, 2020).

در مورد کیتوزان و سالیسیلیک‌اسید، این ترکیبات نیز با تحریک تولید متابولیت‌های ثانویه، افزایش توانایی دفاعی و بهبود جذب عناصر غذایی باعث افزایش بهره‌وری مصرف آب می‌شوند (Elshamly and Nassar, 2023).

پاکلوبوترازول نیز از طریق مهار بیوسنتز جیبرلین‌ها و کاهش رشد رویشی بیش از حد، آب بیشتری را به سمت تولید ماده خشک و دانه هدایت می‌کند (Desta and Amare, 2021).

مشابه با نتایج این پژوهش نیز عنوان شده که محلول‌پاشی با اسید سالیسیلیک تحت تنش کمبود آب کارایی مصرف آب گشنیز را بهبود بخشید (Afshari *et al.*, 2023). دلیل آن را می‌توان به نقش تنظیم‌کننده‌های رشد در افزایش وزن خشک نسبت داد که موجب افزایش کارایی مصرف آب برای تولید عملکرد شدند.

## نتیجه‌گیری کلی

در مجموع، نتایج نشان داد که افزایش شدت تنش آبی موجب کاهش معنی‌دار صفات رشدی مانند ارتفاع بوته، تعداد شاخه‌های جانبی و چتر در بوته شد. بیشترین تعداد شاخه جانبی در شرایط بدون تنش و با کاربرد پاکلوبوترازول به‌دست آمد. همچنین، استفاده از تعدیل‌کننده‌ها به‌ویژه سالیسیلیک‌اسید و پاکلوبوترازول، توانست تا حدی کاهش ناشی از تنش را جبران کند. تعداد دانه در چتر و وزن هزار دانه نیز تحت تأثیر منفی تنش قرار گرفتند، اما کاربرد تمامی تعدیل‌کننده‌ها منجر به افزایش این صفات نسبت به شاهد شد. بالاترین عملکرد دانه در شرایط عدم تنش و محلول‌پاشی با پاکلوبوترازول (۵۳۳ کیلوگرم در هکتار) مشاهده شد.

در شرایط تنش شدید، محلول‌پاشی با جاسمونیک‌اسید و پاکلوبوترازول به‌ترتیب با ۱۵۲ و ۱۴۲ کیلوگرم در هکتار بهترین عملکرد را داشتند. درصد اسانس در شرایط تنش شدید افزایش یافت، اما کاربرد جاسمونیک‌اسید باعث کاهش آن شد. بیشترین عملکرد اسانس در تنش متوسط با محلول‌پاشی جاسمونیک‌اسید

حاصل گردید. محلول‌پاشی با جاسمونیک‌اسید بالاترین کارایی مصرف آب (۰/۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب) را در مقایسه با سایر تیمارها نشان داد. در مجموع، استفاده از تعدیل‌کننده‌های رشد به‌ویژه جاسمونیک‌اسید و سالیسیلیک‌اسید می‌تواند به کاهش اثرات منفی تنش خشکی و بهبود عملکرد زیره سبز کمک کند.

## References


Afshari, M., Pazoki, A. and Sadeghipour, O., 2023. Biochemical changes of coriander (*Coriandrum sativum* L.) plants under drought stress and foliar application of salicylic acid and silicon nanoparticles. *Journal of Medicinal plants and By-products, 12(3*), pp.197-207.

Anil Kumar, G., Umesha, K., Vishnuvardhana, S.M. and Shankarappa, T., 2021. Influence of elicitors in enhancing the fixed oil content and yield of black cumin (*Nigella Sativa* L.). *The Pharma Innovation Journal, 10(1)*, pp.559-562.

Armin, M. and Miri, H.R., 2014. Effects of glycine betaine application on quantitative and qualitative yield of cumin under irrigated and rain-fed cultivation. *Journal of Essential Oil Bearing Plants, 17(4)*, pp.708-716. https://doi.org/10.1080/0972060x.2014.884949

Bahrami, H., Armin, M., jamimoeini, M. and Abhari, A., 2023. The effect of different irrigation cut-off times on yield and yield components of cumin in weed interference conditions. *Crop Science Research in Arid Regions, 4(2)*, pp.291-304. [In Persian]. https://doi.org/10.22034/csrar.2022.291654.1098

Bahrami, H., Armin ,M., Jamimoeini, M. and Abhari, A., 2024. Yield and essential oil quality of cumin (*Cuminum cyminum* L.) in relation to irrigation regimes under conventional and organic conditions. *National Academy Science Letters, 47(3)*, pp.323-327. https://doi.org/10.1007/s40009-023-01276-1

Bazr Afshan, V ,.Paknejad, F., Fanay, H.R., Habibi, D. and Siavoshi, M., 2025. Exploring the impact of drought stress on the yield and yield components of cumin (*Cuminum cyminum* L.) ecotypes. *Journal of Agroecology, 16(3)*, pp.493-511. [In Persian]. https://doi.org/10.22067/agry.2024.85108.1172

Borzouyi, Z., Armin, M. and Marvi, H., 2021. The effect of time and type of stress moderators on yield and yield components of cotton on conventional and double-cropping systems under saline conditions. *Journal of Cotton Research, 4(1)*, No.28. https://doi.org/10.1186/s42397-021-00103-6

Desta, B. and Amare, G., 2021. Paclobutrazol as a plant growth regulator. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 8(1)*, No.1. https://doi.org/10.1186/s40538-020-00199-z

Elshamly, A. M. and Nassar, S.M., 2023. The impacts of applying cobalt and chitosan with various water irrigation schemes at different growth stages of corn on macronutrient uptake, yield, and water use efficiency. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 23(2)*, pp.2770-2785. https://doi.org/10.1007/s42729-023-01233-3

Esfini Farahani, M., Paknejad, F., Bakhtiari Moghadam, M., Alavi, S. and Hasibi, A., 2012. Effect of different application methods and rates of salicylic acid on yield and yield components of cumin (*Cuminum cyminum* L.). *Iranian Journal of Agronomy and Plant Breeding, 8(3)*, pp.69-72. [In Persian].

Farahani, A., Lebaschi, H., Hussein, M., Hussein, S. A., Reza, V.A. and Jahanfar, D., 2008. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi, different levels of phosphorus and drought stress on water use efficiency, relative water

content and proline accumulation rate of Coriander (*Coriandrum sativum* L.). *Journal of Medicinal Plants Research, 2(6)*, pp.125-131.

Ghalibaf, K., Bannayan Aval, M., Rashed Mohasel, M.H., Valaie, N., Yaghoubi, F. and Rashidi, Z., 2020. Effects of planting date and deficit irrigation on water use efficiency of cumin (*Cuminum cyminum* L.) at two different densities in mashhad conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research, 18(2)*, pp.213-224. [In Persian]. https://doi.org/10.22067/gsc.v18i2.83813

Gültekin, R., Ertek, A., Görgişen, C., Yeter, T ,.Avağ, K. and Yıldırım, Y.E., 2025. Impact of intermittent and deficit irrigation practices in subsurface drip systems on yield and morphological traits of black cumin (*Nigella sativa* L.). *Paddy and Water Environment, 23(3)*, pp.373-388. https://doi.org/10.1007/s10333-025-01021-y

Heidari, N., Pouryousef, M., Tavakkoli, A. and Saba, J., 2012. Effect of drought stress and harvesting date on yield and essential oil production of anise (Pimpinella anisum L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, *28(*1), pp.121-130. [In Persian]. https://doi.org/10.22092/ijmapr.2012.4019

Jalalzadeh, A., Jafar zadeh, M., Dehghanzadeh, H. and Zeinali, H., 2024. Effect of salicylic acid and zinc sulfate on quality and quantity characters of green cumin (*Cuminum cyminum*) under different irrigation regimes. *Iranian Journal of Soil and Water Research, 55(6)*, pp.903-924. [In Persian]. https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.372957.669668

Jami, F., Mehraban, A. and Ganjali, H.R., 2015. The effect of water shortage and foliar application of salicylic acid on quantitative and qualitative performance of cumin herb. *Indian Journal of Science and Technology, 8(27)*, pp.1-8. https://doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i27/71751

Kazemi Oskuei, B., Bandehagh, A., Farajzadeh, D., Asgari Lajayer, B., Shu, W. and Astatkie, T., 2024. Effects of pseudomonas fluorescens fy32 on canola (*Brassica Napus* L) cultivars under drought stress induced by polyethylene glycol. *Journal of Crop Health, 76(1)*, pp.251-260. https://doi.org/10.1186/s12870-024-05879-8

Kazemi, H., Mortazaviyan, S.M.M. and Javid, M.G., 2018. Physiological responses of cumin (*Cuminum cyminum*) to water deficit stress. *Iranian Journal of Field Crop Science, 48(4)*, pp.1099-1113. [In Persian]. https://doi.org/10.22059/ijfcs.2017.211455.654151

Lamlom, S.F., Abdelghany, A.M., Farouk, A.S., Alwakel, E.S., Makled, K.M., Bukhari, N.A., Hatamleh, A.A., Ren, H., El-Sorady, G.A. and Shehab, A.A., 2025. Biochemical and yield response of spring wheat to drought stress through gibberellic and abscisic acids. *BMC Plant Biology, 25(1)*, No.5. https://doi.org/10.1186/s12870-024-05879-8

Liu, E., Mei, X., Yan, C., Gong, D. and Zhang, Y., 2016. Effects of water stress on photosynthetic characteristics, dry matter translocation and WUE in two winter wheat genotypes. *Agricultural Water Management, 167*, pp.75-85. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.12.026

Malekpoor, F., Pirbalouti, A.G. and Salimi, A., 2016. Effect of foliar application of chitosan on morphological and physiological characteristics of basil under reduced irrigation. *Research on Crops, 17(2)*, pp.354-359.

Ministry of Agriculture Jihad., 2025. Agricultural Statistics Yearbook 2023-24, Vol. 3: Report on Horticultural Products, Mushrooms, and Greenhouse Products. Statistics, Information and Communication Technology Center. [In Persian]. https://get.agrodl.ir/statistics/horti/402.pdf

Mohammadi, A., Amini Dehaghi, M. and Fotokian, M.H., 2018. Effects of humic acid foliar application on the quantitative and qualitative characteristics of cumin (*Cuminum cyminum* L.) under different irrigation regimes. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research, 34(1)*, pp.101-114. [In Persian]. https://doi.org/10.22092/ijmapr.2018.115451.2149

Mousavoey, M., Jahanbakhsh, S., Modaresi, M., Parmoon, G., Ebadi, A. and Kohan Mo, M.A., 2021. Effect of salicylic and Jasmonic acid on yield and yield components of Milk thistle (*Silybum marianum* L.) under heat stress conditions. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology), 34(4)*, pp.1061-1075. [In Persian].

Nazim, M., Ali, M., Shahzad, K., Ahmad, F., Nawaz, F., Amin, M., Anjum, S., Nasif, O., Alharbi, S.A. and Fahad, S., 2021. Kaolin and Jasmonic acid improved cotton productivity under water stress conditions. *Saudi Journal of Biological Sciences, 28(11)*, pp.6606-6614. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.07.043

Nazir, F., Peter, P., Gupta, R., Kumari, S., Nawaz, K. and Khan, M.I.R., 2024. Plant hormone ethylene: A leading edge in conferring drought stress tolerance. *Physiologia Plantarum, 176(1)*, e14151. https://doi.org/10.1111/ppl.14151

Peymaei, M., Sarabi, V. and Hashempour, H., 2024. Improvement of the yield and essential oil of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) using external proline, uniconazole and methyl jasmonate under drought stress conditions. *Scientia Horticulturae, 323*, e112488. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112488

Pospíšilová, J., Synková, H. and Rulcová, J., 2000. Cytokinins and water stress. *Biologia plantarum, 43(3)*, pp.321-328. https://doi.org/10.1023/a:1026754404857

Rahimi, A.R., Rokhzadi, A., Amini, S. and Karami, E., 2013. Effect of salicylic acid and methyl jasmonate on growth and secondary metabolites in *Cuminum cyminum* L. *Journal of Biodiversity and Environmental sciences, 3(12)*, pp.140-149.

Rebey, I.B., Jabri-Karoui, I., Hamrouni-Sellami, I., Bourgou, S., Limam, F. and Marzouk, B., 2012. Effect of drought on the biochemical composition and antioxidant activities of cumin (*Cuminum cyminum* L.) seeds. *Industrial Crops and Products, 36(1)*, pp.238-245. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.09.013

Safari, B., Mahdi Mortazavian, S.M., Sadat-Noori, S.A. and Foghi, B., 2015. Effect of water stress on yield and yield components of cumin (*Cuminum cyminum* L.) ecotypes. *Journal of Plant Physiology and Breeding, 5(2)*, pp.51-61. [In Persian].

Salarpour, F. and Farahbakhsh, H., 2016. Effects of salicylic acid on some physiological traits, yield and yield components of fennel (Foeniculum vulgare Mill.) under drought stress. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research, 32(2)*, pp.216-230. [In Persian]. https://doi.org/10.22092/ijmapr.2016.106557

Sartip, H. and Sirousmehr, A.R., 2017. Evaluation of salicylic acid effects on growth, yield and some biochemical characteristics of cumin (*Cuminum cyminum* L.) under three irrigation regimes. *Environmental Stresses in Crop Sciences, 10(4)*, pp.547-558. [In Persian]. https://doi.org/10.22077/escs.2017.21.1007

Singh, M., Kumar, J., Singh, S., Singh, V.P. and Prasad, S.M., 2015. Roles of osmoprotectants in improving salinity and drought tolerance in plants: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 14(3)*, pp.407-426. https://doi.org/10.1007/s11157-015-9372-8

Tiamchi, F., Armin, M., jamimoeini, M. and Abhari, A., 2023. The effect of stress modulator application on seed and essential oil yield of cumin in dryland and irrigated conditions. *Crop Science Research in Arid Regions, 4(2)*, pp.421-435. [In Persian]. https://doi.org/10.22034/csrar.2022.298527.1116

Timachi, F., Armin, M., Jamimoeini, M. and Abhari, A., 2020. Physiological response of cumin to times and type of stress modulator in rain-fed and irrigated conditions. *Russian Journal of Plant Physiology, 67(6)*, pp.1163-1172. https://doi.org/10.1134/s1021443720060175

Timachi, F., Armin, M., Jamimoeini, M. and Abhari, A., 2023. The effect of times and type of stress modulator on quantitative and qualitative yield of cumin under rainfed and irrigated conditions. *Journal of Medicinal plants and By-products, 12(2)*, pp.145-157.

Travaglia, C., Reinoso, H., Cohen, A., Luna, C., Tommasino, E., Castillo, C. and Bottini, R., 2010. Exogenous ABA increases yield in field-grown wheat with moderate water restriction. *Journal of Plant Growth Regulation, 29(3)*, pp.366-374. https://doi.org/10.1007/s00344-010-9147-y

Yaghi, T., Arslan, A. and Saeed, H., 2024. Effect of deficit irrigation technique on black cumin (*Nigella sativa* L.) water use efficiency. *Journal of Agricultural Science and Technology, 26(2)*, pp.449-461. https://doi.org/10.22034/jast.26.2.449

Zamani, Z., Zeidali, E., Alizadeh, H.A. and Fathi, A., 2023. Effect of drought stress and nitrogen chemical fertilizer on root properties and yield in three quinoa cultivars (*Chenopodium quinoa* Willd). *Crop Science Research in Arid Regions, 5(2)*, pp.487-500. [In Persian].

Zlatev, Z. and Lidon, F.C., 2012. An overview on drought induced changes in plant growth, water relations and photosynthesis. *Emirates Journal of Food & Agriculture (EJFA), 24(1)*, 57.-72. https://doi.org/10.9755/ejfa.v24i1.10599