

# Morphophysiological Responses of European Borage (*Borago officinalis* L.) to Irrigation Regimes and Foliar Application of Iron Chelate

## ABSTRACT

To investigate the effect of iron chelate spraying on the medicinal plant European borage under water stress conditions, a factorial experiment was conducted in the form of a completely randomized design with three replications under controlled conditions. The investigated factors include different irrigation regimes at four levels (optimum irrigation, mild water deficit stress, moderate water deficit stress, and severe water deficit stress corresponding to irrigation after 20%, 40%, 60%, and 80% depletion of available water in the root zone, respectively) and foliar spraying with 9% iron chelate at four levels (concentrations of 75, 150, 225, and 300 ppm) along with a control (distilled water). The results indicated that the interaction between the investigated factors had a significant effect on morphological traits (stem height, flower number, leaf area, and shoot dry weight) as well as physiological traits (spad, photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate). In general, severe water deficit stress significantly reduced all measured parameters, whereas mild water stress in combination with foliar application of iron (particularly at 75 ppm) enhanced flower number and flower dry weight. The greatest stem height was observed under the 150 ppm iron chelate, while higher concentrations (225 and 300 ppm) exerted negative effects under most conditions. Furthermore, the results showed that the foliar treatment with 75 ppm iron chelate (40.63) under optimum irrigation conditions had the highest spad index and there was no significant statistical difference compared to the statistically with 75 ppm foliar treatment (39.6) under mild water stress conditions. According to the results of this study, under the conditions of water stress and optimal conditions, the use of 75 ppm of iron chelate is recommended for the European borage plant.

**Keywords:** Drought stress, European borage, Foliar application, Iron, Nano fertilizer, Photosynthesis.

## Extended Abstract

### Introduction

The European borage (*Borago officinalis* L.) is a medicinal plant known for its high gamma-linolenic acid content, which is used in pharmaceuticals, and health supplements. The plant is sensitive to water availability, which affects its physiological and biochemical characteristics. Iron is a crucial micronutrient for plants, involved in chlorophyll synthesis and various enzymatic processes. However, under drought stress conditions, iron availability and uptake can be severely compromised. This study aims to investigate the effects of different irrigation regimes and foliar application of iron chelate on the physiological characteristics of European borage under controlled conditions.

### Materials and Methods

This research was conducted as a factorial experiment in a completely randomized design with three replications. The primary factors studied were different irrigation regimes and iron chelate spraying concentrations. The irrigation regimes were set at four levels: optimal irrigation (control), mild water deficit stress, moderate water deficit stress, and severe water deficit stress. Additionally, iron chelate was sprayed at four concentrations: 75, 150, 225, and 300 ppm, with a control treatment of distilled water. The experimental units were grown in controlled conditions to ensure uniformity in temperature, light, and humidity.

### Results and Discussion

The results indicated that the interaction between the investigated factors had a significant effect on morphological traits (stem height, flower number, leaf area, and shoot dry weight) as well as physiological traits (spad, photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate). In general, severe water deficit stress significantly reduced all measured parameters, whereas mild water stress in combination with foliar application of iron (particularly at 75 ppm) enhanced flower number and flower dry weight. The greatest stem height was observed under the 150 ppm iron chelate, while higher concentrations (225 and 300 ppm) exerted negative effects under most conditions. Furthermore, the results showed that the foliar treatment with 75 ppm iron chelate (40.63) under optimum irrigation conditions had the highest spad index and there was no significant statistical difference compared to the statistically with 75 ppm foliar treatment (39.6) under mild water stress conditions.

### Conclusion

The study demonstrates that iron chelate foliar application can mitigate some negative effects of water stress on European borage. Specifically, a 75 ppm concentration of iron chelate is recommended for both optimal irrigation, and mild to moderate water stress conditions. This concentration was found to enhance both chlorophyll content and overall plant health without adverse effects. However, under severe dehydration stress, iron chelate application was less effective, indicating the need for additional strategies to support plant health under extreme water deficit conditions. Future research could explore the combined use of iron chelate with other micronutrients or soil amendments to further enhance drought resistance in European borage.

**Keywords:** Drought stress, European borage, Foliar application, Iron, Nano fertilizer, Photosynthesis.

# پاسخ‌های مورفوفیزیولوژیک گل گاوزبان اروپایی (*Borago officinalis* L.) به رژیم‌های آبیاری

## و محلول‌پاشی کلات آهن

### چکیده

به منظور بررسی تأثیر محلول‌پاشی کلات آهن روی گیاه دارویی گل گاوزبان در شرایط تنش کم‌آبی، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در شرایط کنترل شده اجرا شد. عوامل مورد بررسی شامل رژیم‌های مختلف آبیاری در چهار سطح (آبیاری مطلوب، تنش کم‌آبی ملایم، تنش کم‌آبی متوسط و تنش کم‌آبی شدید به ترتیب آبیاری بعد از تخلیه ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد آب قابل استفاده در محیط ریشه) و محلول‌پاشی با کلات آهن ۹٪ در چهار سطح (غلظت‌های ۷۵، ۱۵۰، ۲۲۵ و ۳۰۰ پی‌پی‌ام) همراه با شاهد (آب مقطر) بود. نتایج نشان داد برهم‌کنش عوامل مورد بررسی بر صفات مورفولوژیک (ارتفاع ساقه، تعداد گل، سطح برگ، وزن خشک اندام‌های مختلف) و فیزیولوژیک (شاخص سبزی‌نگی، سرعت فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای و میزان تعرق) معنی‌دار بود. به طور کلی، تنش شدید کم‌آبی باعث کاهش معنی‌دار تمامی شاخص‌ها شد، در حالی که تنش ملایم در ترکیب با محلول‌پاشی آهن (به ویژه ۷۵ پی‌پی‌ام) موجب بهبود تعداد و وزن خشک گل شد. بیشترین ارتفاع ساقه در تیمار ۱۵۰ پی‌پی‌ام کلات آهن و آبیاری مطلوب به دست آمد، در حالی که غلظت‌های بالاتر (۲۲۵ و ۳۰۰ پی‌پی‌ام) در اغلب شرایط اثر منفی داشتند. همچنین، تیمار محلول‌پاشی با ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن در شرایط آبیاری مطلوب بیشترین شاخص سبزی‌نگی (۴۰/۶۳) را داشت و از لحاظ آماری با تیمارهای محلول‌پاشی ۷۵ پی‌پی‌ام (۳۹/۶) در شرایط تنش کم‌آبی ملایم تفاوت معنی‌داری نداشت. طبق نتایج بدست آمده این پژوهش، در شرایط مواجه با تنش کم‌آبی و شرایط مطلوب، کاربرد ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن در گیاه گل گاوزبان اروپایی توصیه می‌شود.

**کلید واژه‌ها:** آهن، تنش کم‌آبی، فتوسنتز، گل گاوزبان اروپایی، محلول‌پاشی، نانو کود.

### مقدمه

گل گاوزبان اروپایی (*Borago officinalis* L.)، گیاهی یک‌ساله از خانواده *Boraginaceae* است که به دلیل دارا بودن ترکیبات زیست‌فعال نظیر اسیدهای فنولیک، فلاونوئیدها، آنتوسیانین‌ها، آلکالوئیدها، ترپن‌ها و اسیدهای چرب غیراشباع (به ویژه اسید گاما-لینولنیک)، از خواص دارویی متعددی از جمله فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی، ضد التهابی، ضد میکروبی، ضد توموری و ضد چاقی برخوردار بوده و به طور سنتی برای درمان اختلالات تنفسی، مشکلات گوارشی، بیماری‌های التهابی، تپش قلب، فشار خون بالا و علائم یائسگی مورد استفاده قرار گرفته است (Slama et al., 2024). کیفیت و کمیت این ترکیبات به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی، به ویژه تنش‌های غیرزیستی مانند کم‌آبی قرار دارد (Khalid & Teixeira da Silva, 2010).

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌رود که با کاهش جذب آب و عناصر غذایی، ایجاد اختلال در تعادل اسمزی و کاهش فعالیت فتوسنتزی، موجب محدود شدن رشد گیاه و کاهش سنتز متابولیت‌های ثانویه در گیاهان دارویی می‌شود (Farooq et al., 2009).

عنصر آهن (Fe) به عنوان یک ریزمغذی اساسی، نقش حیاتی در فرایندهای زیستی مانند سنتز کلروفیل، تنفس، انتقال الکترون، و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی ایفا می‌کند (Rout & Sahoo, 2015). کمبود آهن با ایجاد اختلال در تجمع کلروفیل و پروتئین‌های حاوی آهن، موجب بروز کلروز بین‌رگبرگی (زردی فضای بین رگبرگ‌ها)، کاهش رشد گیاه و افت کارایی فتوسنتزی می‌شود (Yoneyama, 2021). از طرف دیگر، محلول‌پاشی برگی آهن به عنوان روشی مؤثر برای تأمین کمبود این عنصر در گیاهان به ویژه در شرایط محدودیت رطوبت خاک، معرفی شده است. این روش می‌تواند باعث بهبود جذب عناصر، افزایش سنتز کلروفیل و کاهش اثرات منفی تنش خشکی شود.

با وجود مطالعات متعدد در زمینه اثرات تنش خشکی و تغذیه ریزمغذی‌ها، هنوز اطلاعات محدودی درباره تأثیر همزمان سطوح

مختلف آبیاری و محلول پاشی کلات آهن بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و مورفولوژیک گیاه گل‌گاوزبان اروپایی وجود دارد. بررسی این تعامل می‌تواند در درک بهتر پاسخ‌های سازگاری این گیاه دارویی تحت شرایط تنش و نیز تدوین راهکارهای بهینه تغذیه‌ای مؤثر باشد.

## پیشینه پژوهش

تنش خشکی با ایجاد تغییرات چشمگیر در ویژگی‌های مورفولوژیک نظیر کاهش ارتفاع گیاه، سطح برگ و توسعه ریشه، موجب محدودیت رشد و افت عملکرد گیاه می‌شود و با افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، که ترکیباتی واکنش‌پذیر و آسیب‌زا برای ساختارهای سلولی هستند، باعث اختلال در عملکردهای فیزیولوژیک و زیستی گیاه می‌گردد (Akhter Ansari et al., 2019). بر اساس نتایج پژوهش عبداللهی مایوان و همکاران (۱۳۹۷)، سطوح مختلف آبیاری تأثیر معنی‌داری بر رشد و عملکرد گیاه دارویی گل‌گاوزبان اروپایی داشتند؛ به‌طوری‌که کاهش میزان آبیاری منجر به افت شاخص‌های رشدی و عملکردی به دلیل بروز تنش رطوبتی شد.

در شرایط تنش خشکی، کاهش پتانسیل آب سلول و اختلال در فرآیندهای فتوسنتزی و تنفسی باعث نشت الکترون‌ها به اکسیژن و در نتیجه افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) مانند سوپراکسید، پراکسید هیدروژن و رادیکال هیدروکسیل می‌شود (Considine & Foyer, 2021). این ترکیبات واکنش‌پذیر با ایجاد پراکسیداسیون لیپید و تخریب غشاهای سلولی، اکسیداسیون پروتئین‌ها و آسیب به DNA، ساختار و عملکرد سلول را مختل کرده و منجر به بروز آسیب‌های جدی در گیاه می‌شوند (Hura et al., 2022). آهن به‌عنوان کوفاکتور آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نظیر کاتالاز و پراکسیداز عمل کرده و با تسهیل تجزیه گونه‌های فعال اکسیژن به‌ویژه  $H_2O_2$ ، نقشی کلیدی در حفظ تعادل اکسیداسیون-کاهش سلولی ایفا می‌کند. لذا، کمبود آهن در شرایط خشکی با کاهش فعالیت این آنزیم‌ها، توانایی گیاه در حذف ROS را تضعیف کرده و موجب برهم‌خوردن تعادل بین تولید و حذف آن‌ها می‌شود؛ فرآیندی که نهایتاً شدت استرس اکسیداتیو و میزان آسیب سلولی را افزایش می‌دهد (Liu et al., 2022; Yang et al., 2025). همچنین، آهن نقش کلیدی در سنتز کلروفیل و عملکرد پروتئین‌های فتوسنتزی ایفا می‌کند. کمبود این عنصر با اختلال در فرایندهای مذکور، راندمان فتوسنتز را کاهش داده و معمولاً به بروز کلروز بین‌رگبری، توقف یا کندی رشد رویشی، توسعه ناکافی سیستم ریشه و کاهش گلدهی منجر می‌شود. این اختلالات در نهایت سبب افت کمیت و کیفیت عملکرد محصول می‌گردد (Ning et al., 2023). به‌طور کلی، کمبود آهن با برهم زدن فرایندهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی حیاتی در گیاه، از جمله مسیرهای فتوسنتزی و تنفسی، توانایی گیاه را در رشد و تولید به‌شدت محدود می‌کند و کاهش قابل‌توجهی در عملکرد و کیفیت محصولات ایجاد می‌نماید (Tripathi et al., 2018).

پژوهش عبداللهی مایوان و همکاران (۱۳۹۷) مایوان و همکاران (۱۳۹۷) نشان داد که میزان آبیاری تأثیر معنی‌داری بر رشد و عملکرد گیاه دارویی گاوزبان اروپایی دارد؛ به‌طوری‌که با کاهش آب‌دهی و بروز تنش رطوبتی، شاخص‌های رشدی و عملکرد گیاه به‌طور محسوسی کاهش یافت. پژوهشگران نشان داده‌اند که استفاده از کمپلکس‌های آهن در اندازه نانو می‌تواند به‌طور چشمگیری غلظت مواد مغذی معدنی و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی را در گیاهان دارویی افزایش دهد (Tavallali, 2018). همچنین، مطالعات دیگر گزارش کرده‌اند که محلول پاشی آهن روی گیاه *Mirabilis jalapa* L. باعث افزایش قابل توجهی در ارتفاع گیاه، قطر ساقه، تعداد برگ‌ها، وزن پیاز و تعداد گل‌آذین‌ها نسبت به گیاهان کنترل می‌شود (Al-Taher, 2023). همچنین، کاربرد آهن میزان کلروفیل گیاه را افزایش می‌دهد. نتایج Heidarzade و همکاران (۲۰۲۰) در گیاه به‌لیمو (*Lippia citriodora*) Izadi و Rezaie nejad (۲۰۲۰) و در گیاه همیشه بهار (*Calendula officinalise* L.)، اثر مثبت آهن بر میزان کلروفیل گیاه گزارش شده

است. در همین راستا، تأثیر مثبت کاربرد ریزمغذی آهن بر بهبود رشد کمی و کیفی گیاهان دارویی گل گاوزبان باغی (Kheiri et al., 2017) و ریحان شیرین (Ghorbanpour et al., 2016) گزارش شده است.

با توجه به مطالب بالا، این پژوهش با ارزیابی تأثیر محلول پاشی کلات آهن روی گیاه گل گاو زبان اروپایی تحت سطوح مختلف تنش کم آبی انجام شد.

## روش‌شناسی پژوهش

تحقیق حاضر در سال زراعی ۱۳۹۸ در اتاقک رشد گروه زراعت دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس تهران واقع شد. این آزمایش بصورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار و با دو عامل رژیم‌های آبیاری و محلول پاشی نانوکلات آهن به اجرا درآمد. هر واحد آزمایشی دارای ۳ بوته گل گاوزبان در هر گلدان بود. عامل اول مورد بررسی، رژیم‌های مختلف آبیاری شامل آبیاری مطلوب (قطع آبیاری تا تخلیه ۲۰ درصد آب قابل استفاده موجود در منطقه ریشه و سپس آبیاری تا حد ظرفیت مزرعه)، تنش کم آبی ملایم (قطع آبیاری تا تخلیه ۴۰ درصد آب قابل استفاده موجود در منطقه ریشه)، تنش کم آبی متوسط (قطع آبیاری تا تخلیه ۶۰ درصد آب قابل استفاده موجود در منطقه ریشه) و تنش کم آبی شدید (قطع آبیاری تا تخلیه ۸۰ درصد آب قابل استفاده موجود در منطقه ریشه) و عامل دوم محلول پاشی با غلظت‌های مختلف کلات آهن ۹ درصد شامل پنج سطح محلول پاشی (شاهد، ۷۵، ۱۵۰، ۲۲۵ و ۳۰۰ پی‌پی‌ام) می‌باشد.

در راستای ایجاد شرایط طبیعی، گلدان‌هایی بزرگ با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و قطر ۳۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شدند تا ریشه‌های گیاه از لحاظ گسترش نفوذ و نیز جذب آب و مواد غذایی با محدودیتی مواجه نشوند. برای پر کردن گلدان‌ها، ۵۰ درصد خاک زراعی با میزان آهن پایین (حد بحرانی آهن در خاک ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد (Murgia et al., 2021))، ۲۵ درصد ماسه بادی و ۲۵ درصد پرلیت استفاده شد. پس از پر کردن همه گلدان‌ها و انتقال آن‌ها به اتاقک رشد برچسب‌های مربوط به هر تیمار و تکرار زده شد.

کاشت بذر گل گاوزبان در تاریخ ۵ آذر ماه صورت گرفت. با توجه به آزمایش خاک (جدول ۱) و غنی بودن خاک مزرعه از پتاسیم نیازی به کوددهی هنگام تهیه بستر نبود. کود فسفر به میزان ۱ گرم به هر گلدان اضافه شد. کود نیتروژن به میزان ۲۷۵/۰ گرم با توجه به نیاز گیاه طی سه مرحله داده شد. میزان آب مصرفی برای جوانه‌زنی بذور تا قبل از اعمال تنش و برای استقرار گیاه به میزان لازم (هر چهار روز یکبار) انجام گرفت. میزان روشنایی و تاریکی اتاقک رشد به ترتیب ۱۶ و هشت ساعت بود و همچنین میانگین درجه حرارت و رطوبت به ترتیب ۲۸ درجه سانتی‌گراد و ۶۰ درصد تنظیم شد.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی-شیمیایی خاک مورد استفاده

| اسیدیته خاک (pH) | کربن آلی | TNV  | نیتروژن | بافت خاک | رس   | سیلت | شن   | رطوبت نقطه پژمردگی | ظرفیت زراعی | پتاسیم              | فسفر | آهن  |
|------------------|----------|------|---------|----------|------|------|------|--------------------|-------------|---------------------|------|------|
|                  |          | %    |         |          |      |      | %    |                    |             | mg kg <sup>-1</sup> |      |      |
| ۷/۹۸             | ۰/۲۳۴    | ۱۳/۵ | ۰/۰۲۵   | لوم رسی  | ۳۹/۰ | ۳۹/۵ | ۲۱/۵ | ۷/۴۶               | ۲۴/۰۱       | ۱۸۱                 | ۴/۷  | ۱/۸۲ |

برای تعیین مقدار مطلوب نیتروژن و فسفر مورد نیاز گل گاوزبان از میزان توصیه شده برای این گیاه با توجه به تجزیه گیاهی و مقدار لازم برای رشد مناسب این گیاه که توسط نقدی بادی و همکاران (۱۳۸۶) بیان گردیده است، استفاده شد.

محلول پاشی نانو کلات آهن در سه نوبت صورت گرفت: اولین محلول پاشی در مرحله پنج برگی (یک هفته قبل از شروع تنش)، مرحله دوم قبل از گلدهی و مرحله سوم ۵۰ درصد گلدهی (بعد از دو هفته از مرحله دوم) انجام شد. برای تعیین زمان و حجم آبیاری و همچنین مقدار نفوذ عمقی آب، از دستگاه Time-Domain Reflectometry یا TDR استفاده شد.

پس از سومین محلول پاشی و اعمال تنش کم آبی، سطح برگ با دستگاه Leaf Area Meter (مدل DELTA-T DEVICES، ساخت انگلستان) اندازه گیری شد. در زمان برداشت، ارتفاع سه گیاه موجود در هر گلدان با خط کش اندازه گیری و میانگین آن بر حسب سانتی متر محاسبه گردید. همچنین، تعداد گل در هر گلدان در طول فصل شمارش و ثبت شد. اندازه گیری وزن های اندام های هوایی نیز در انتهای فصل رشدی با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ گرم صورت پذیرفت. شاخص سبزینگی برگ ها به صورت غیر تخریبی با دستگاه Chlorophyll Meter SPAD-502 (Minolta، ساخت ژاپن) و میزان سرعت فتوسنتز، هدایت روزنه ای و میزان تعرق نیز با دستگاه لایکور (LI-400, LI-COR Inc، ساخت آمریکا) بر روی جوان ترین برگ بالغ ثبت گردید. در نهایت برای ارزیابی تیمارهای مورد استفاده، داده ها با استفاده از نرم افزار SAS تجزیه شد. برای مقایسه میانگین ها از آزمون حداقل تفاوت معنی دار (LSD) در سطح ۵ درصد احتمال استفاده شد.

## یافته های پژوهشی و بحث

### نتایج تجزیه واریانس ها

بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳)، اثر رژیم های آبیاری، محلول پاشی کلات آهن و برهم کنش آن ها بر اغلب صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک گل گاوزبان اروپایی در سطح احتمال یک درصد و در برخی موارد در سطح پنج درصد معنی دار بود. در بین صفات مورفولوژیک، ارتفاع گیاه تحت تأثیر برهم کنش دو عامل در سطح یک و اثر اصلی رژیم های آبیاری در سطح احتمال پنج درصد قرار گرفت. تعداد گل در بوته، وزن خشک ساقه، برگ، گل، سرشاخه و اندام های هوایی همگی از نظر اثرات اصلی رژیم آبیاری و محلول پاشی و نیز اثر متقابل آن ها در سطح یک درصد معنی دار بودند. سطح برگ نیز از نظر رژیم آبیاری و برهم کنش آن با محلول پاشی در سطح یک درصد و از نظر اثر اصلی محلول پاشی در سطح پنج درصد معنی دار شد. در بین صفات فیزیولوژیک، شاخص سبزینگی (SPAD)، سرعت فتوسنتز، هدایت روزنه ای و میزان تعرق همگی تحت تأثیر اثرات اصلی و برهم کنش دو عامل در سطح احتمال یک درصد قرار گرفتند.

جدول ۳. تجزیه واریانس صفات مختلف گاوزبان اروپایی تحت تأثیر رژیم‌های آبیاری و محلول‌پاشی کلات آهن

| میانگین مربعات |                |              |               |             |                     |            |                |             |              |          |             | درجه آزادی | منابع تغییرات    |
|----------------|----------------|--------------|---------------|-------------|---------------------|------------|----------------|-------------|--------------|----------|-------------|------------|------------------|
| میزان تعرق     | هدایت روزنه‌ای | سرعت فتوسنتز | شاخص سبزی‌نگی | سطح برگ     | وزن خشک اندام هوایی | وزن خشک گل | وزن خشک سرشاخه | وزن خشک برگ | وزن خشک ساقه | تعداد گل | ارتفاع ساقه |            |                  |
| ۲۳/۴۴**        | ۰/۹۸**         | ۴۰۶/۳۲**     | ۹/۹۶**        | ۲۱۹۵۵۸/۹۰** | ۷/۲۴**              | ۰/۰۱۹**    | ۰/۱۱**         | ۲/۳۰**      | ۱/۷۵**       | ۱۱۹/۵۰** | ۱۰۷/۱۶*     | ۳          | رژیم آبیاری (I)  |
| ۱/۴۳**         | ۰/۰۶۴**        | ۱۹/۱۳**      | ۹/۴۵**        | ۲۳۴۵۵/۶۷*   | ۵/۰۶**              | ۰/۰۴۲**    | ۰/۱۴**         | ۲/۷۵**      | ۱/۰۷**       | ۲۹۷/۵۶** | ۳۲/۹۶       | ۴          | محلول‌پاشی (F)   |
| ۰/۵۳**         | ۰/۰۲۷**        | ۱۴/۱۵**      | ۱۹/۰۲**       | ۵۱۷۰۶/۸۸**  | ۴/۷۵**              | ۰/۰۲۹**    | ۰/۱۰**         | ۴/۰۹**      | ۱/۰۱**       | ۱۸۲/۱۲** | ۸۸/۳۸**     | ۱۲         | I×F              |
| ۰/۰۲۶          | ۰/۰۰۰۹۰        | ۲/۶۹         | ۰/۷۳          | ۸۴۸۹/۱۲     | ۰/۰۸                | ۰/۰۰۰۱۲    | ۰/۰۰۰۲         | ۰/۳۲        | ۰/۰۳۳        | ۰/۱۵     | ۳۱/۵۱       | ۴۰         | خطای آزمایش      |
| ۱۰/۷۸          | ۱۰/۳۶          | ۲۳/۵۹        | ۲/۳۴          | ۲۴/۳۵       | ۴/۷۸                | ۱۱/۷۰      | ۵/۴۰           | ۱۷/۰۰       | ۷/۸۵         | ۴/۸۲     | ۱۹/۹۹       | –          | ضریب تغییرات (%) |

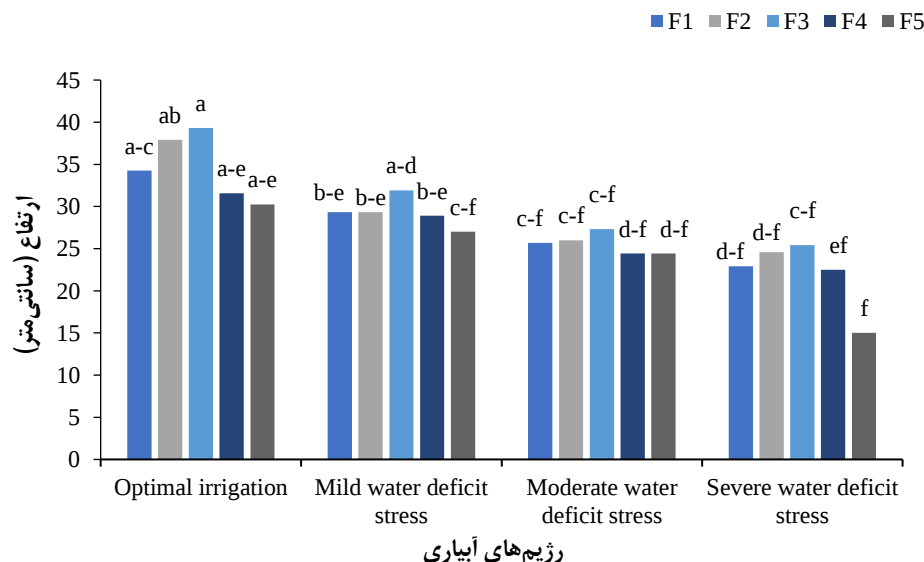
بدون علامت، \* و \*\* به ترتیب به معنی عدم معنی‌دار بودن، معنی‌دار در سطح پنج و یک درصد می‌باشد.

## صفات مورفولوژیک

### ارتفاع ساقه

بر اساس نتایج حاصل از بررسی برهم‌کنش رژیم‌های آبیاری و محلول‌پاشی کلات آهن بر ارتفاع ساقه گل‌گاوزبان اروپایی (شکل ۱)، بیشترین ارتفاع ساقه در شرایط آبیاری مطلوب مشاهده شد. در این شرایط، تیمار ۱۵۰ پی‌پی‌ام کلات آهن (F3) بیشترین مقدار را به خود اختصاص داد و با تیمارهای F1، F2 و F4 اختلاف معنی‌داری نداشت، اما به طور معنی‌داری از تیمار F5 (۳۰۰ پی‌پی‌ام) برتر بود. با افزایش شدت تنش آبی، ارتفاع ساقه کاهش یافت؛ به طوری که در تنش کم‌آبی ملایم نیز تیمار F3 بیشترین و تیمار F5 کمترین مقدار را نشان داد. در تنش متوسط، اختلاف معنی‌دار بین بیشتر تیمارها از بین رفت. در تنش شدید، کمترین ارتفاع ساقه در تیمار F5 مشاهده شد. به طور کلی، افزایش شدت تنش آبی موجب کاهش ارتفاع ساقه شد و استفاده از غلظت متوسط کلات آهن (۱۵۰ پی‌پی‌ام) بیشترین تأثیر مثبت را بر رشد داشت، در حالی که غلظت بالای ۳۰۰ پی‌پی‌ام اثر منفی آشکاری بر رشد نشان داد.

نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان داد که ارتفاع ساقه گل‌گاوزبان اروپایی تحت تأثیر همزمان رژیم آبیاری و غلظت کلات آهن قرار می‌گیرد و مصرف بهینه آهن می‌تواند نقش مهمی در بهبود رشد ایفا کند. بیشترین ارتفاع ساقه در غلظت ۱۵۰ پی‌پی‌ام کلات آهن مشاهده شد، در حالی که غلظت بالاتر از این مقدار، به‌ویژه ۳۰۰ پی‌پی‌ام، اثر منفی بر رشد داشت. این روند را می‌توان با نقش حیاتی آهن در سنتز کلروفیل، فعالیت آنزیم‌های تنفسی و فرایندهای فتوسنتزی توضیح داد که در غلظت‌های مناسب باعث افزایش توان فتوسنتزی و بهبود رشد رویشی می‌شود، اما در مقادیر بیش از حد می‌تواند منجر به بروز سمیت، افزایش اکسیداسیون و اختلال در جذب عناصر غذایی نظیر منگنز، روی و فسفر گردد (Harish et al., 2023). همچنین، کاهش ارتفاع ساقه در شرایط تنش کم‌آبی، به دلیل کاهش فشار تورژسانس سلولی، مهار تقسیم و توسعه سلولی و افزایش تجمع هورمون‌های رشد مهارکننده مانند آبسزیک اسید اتفاق می‌افتد (Wahab et al., 2022).

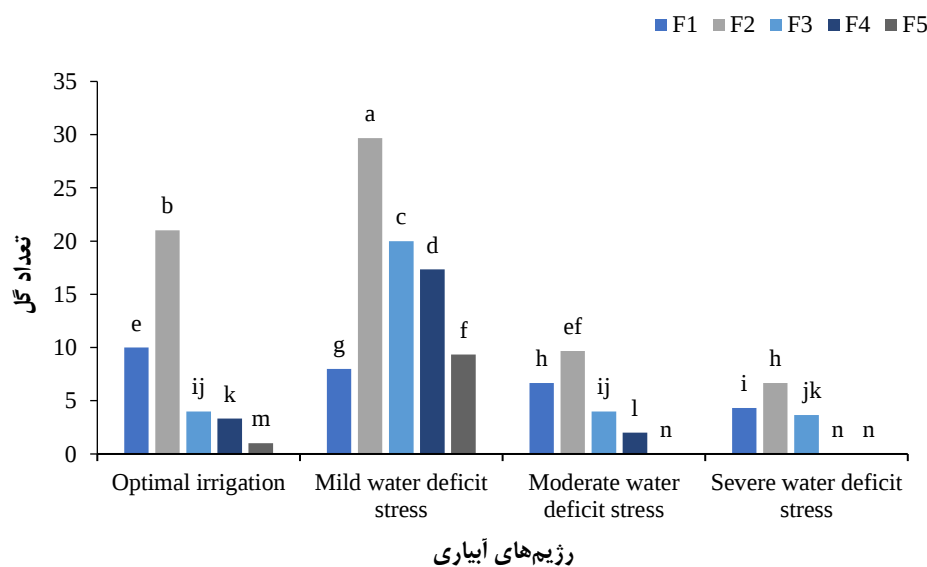


شکل ۱. برهم‌کنش رژیم‌های آبیاری در سطوح مختلف محلول‌پاشی کلات آهن روی ارتفاع ساقه گل‌گاوزبان اروپایی (حروف مشترک نشان از عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد. F1: آب مقطر، F2: ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F3: ۱۵۰ پی‌پی‌ام کلات آهن، F4: ۲۲۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F5: ۳۰۰ پی‌پی‌ام کلات آهن).

### تعداد گل در بوته

نتایج مقایسه میانگین‌ها (شکل ۲) نشان داد بیشترین تعداد گل در تیمار تنش کم‌آبی ملایم همراه با محلول‌پاشی ۷۵ پی‌پی‌ام

کلات آهن (F2) مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با سایر تیمارها داشت. پس از آن، تیمار آبیاری مطلوب با محلول‌پاشی ۷۵ پی‌پی‌ام (F2) در رتبه بعدی قرار گرفت. کمترین تعداد گل مربوط به تنش شدید کم‌آبی با محلول‌پاشی‌های F4 و F5 هر دو مشاهده شد. شرایط تنش کم‌آبی ملایم همراه با محلول‌پاشی کلات آهن (به‌ویژه غلظت ۷۵ پی‌پی‌ام) بیشترین تأثیر مثبت را بر افزایش تعداد گل در گیاه گل‌گاوزبان اروپایی داشت. این موضوع احتمالاً به این دلیل است که تنش ملایم، بدون ایجاد آسیب جدی به گیاه، می‌تواند نوعی تحریک فیزیولوژیک ایجاد کند که در کنار تأمین کافی عناصر ریزمغذی مانند آهن، منجر به بهبود فرایندهای متابولیک و افزایش تولید گل شود (Swain et al., 2023). در شرایط تنش شدید کم‌آبی، کاهش تعداد گل عمدتاً به دلیل اختلالات فیزیولوژیک و متابولیک رخ می‌دهد. بسته شدن روزنه‌ها برای کاهش تبخیر، ورود CO<sub>2</sub> و در نتیجه فتوسنتز را محدود کرده و تولید مواد فتوسنتزی کاهش می‌یابد (Bjerring Jensen et al., 2024). همچنین، کاهش جریان آب در آیندها جذب و انتقال عناصر غذایی، از جمله آهن، را مختل می‌کند. در چنین شرایطی، گیاه انرژی و منابع خود را به سمت حفظ بقا و اندام‌های حیاتی هدایت کرده و فرایند رشد و تمایز گل‌ها متوقف یا محدود می‌شود. علاوه بر این، تنش شدید با افزایش گونه‌های فعال اکسیژن و آسیب به سلول‌های مرستمی و زایشی، توان گل‌دهی را به شدت کاهش می‌دهد؛ به‌طوری‌که حتی محلول‌پاشی آهن نیز نمی‌تواند این افت را جبران کند (Martín-Cardoso & San Segundo, 2025).

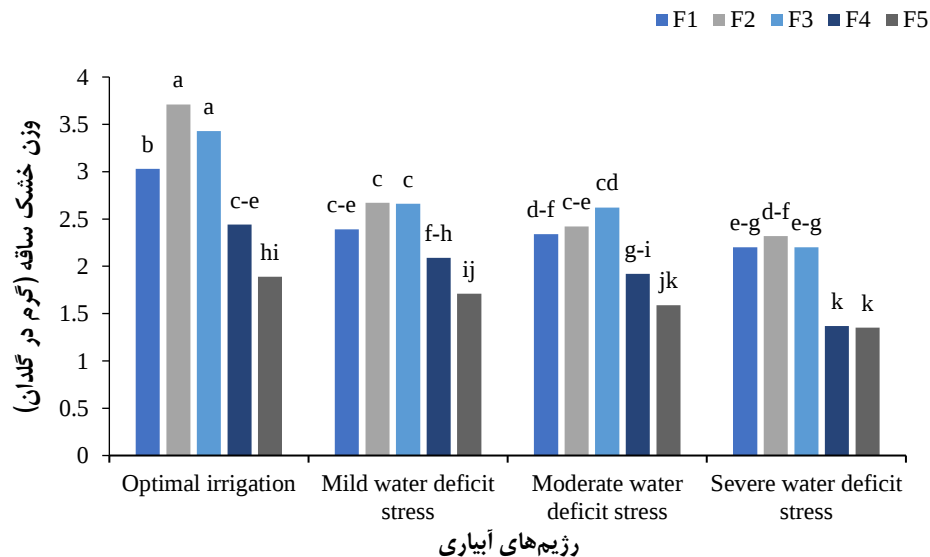


شکل ۲. برهمکنش رژیم‌های آبیاری در سطوح مختلف محلول‌پاشی کلات آهن روی تعداد گل، گل‌گاوزبان اروپایی (حروف مشترک نشان از عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد. F1: آب مقطر، F2: ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F3: ۱۵۰ پی‌پی‌ام کلات آهن، F4: ۲۲۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F5: ۳۰۰ پی‌پی‌ام کلات آهن).

### وزن خشک ساقه

نتایج نشان داد که تیمار محلول‌پاشی با ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن (۳/۷۱ گرم) و تیمار ۱۵۰ پی‌پی‌ام (۳/۴۳ گرم) در شرایط آبیاری مطلوب بیشترین وزن خشک ساقه را داشت (شکل ۳) و کمترین مقدار آن در تیمارهای محلول‌پاشی با ۳۰۰ پی‌پی‌ام (۱/۳۵ گرم)، ۲۲۵ پی‌پی‌ام (۱/۳۷ گرم) در شرایط تنش کم‌آبی شدید مشاهده شد (شکل ۳) و از لحاظ آماری با تیمارهای محلول‌پاشی ۳۰۰ پی‌پی‌ام (۱/۵۹ گرم) در شرایط تنش کم‌آبی متوسط تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۳). این نتایج نشان داد که آبیاری مطلوب همراه با محلول‌پاشی آهن، به‌ویژه در سطوح ۷۵ و ۱۵۰ پی‌پی‌ام، بیشترین اثر مثبت بر وزن خشک ساقه داشته و با افزایش شدت تنش، این اثر به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است. این موضوع بیانگر آن است که تأمین کامل نیاز آبی گیاه، در کنار فراهمی مناسب آهن، موجب افزایش فتوسنتز، رشد رویشی و انباشت مواد خشک در ساقه می‌شود. با افزایش شدت تنش به

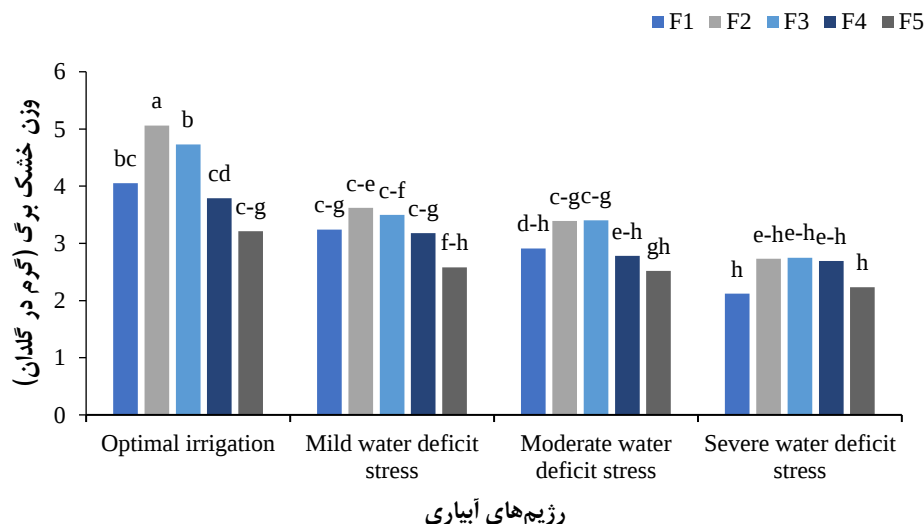
متوسط و به‌ویژه شدید، کاهش چشمگیر وزن خشک ساقه در همه تیمارها رخ داد. این کاهش ناشی از محدودیت جذب آب و عناصر غذایی، کاهش سنتز کلروفیل، اختلال در تقسیم و طویل شدن سلول‌ها و هدایت منابع گیاه به سمت بقا به‌جای رشد ساقه است (Barkaoui & Volaire, 2023).



شکل ۳. برهمکنش رژیم‌های آبیاری در سطوح مختلف محلول‌پاشی کلات آهن روی وزن خشک ساقه گل‌گاوزبان اروپایی (حروف مشترک نشان از عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد. F1: آب مقطر، F2: ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F3: ۱۵۰ پی‌پی‌ام کلات آهن، F4: ۲۲۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F5: ۳۰۰ پی‌پی‌ام کلات آهن).

### وزن خشک برگ

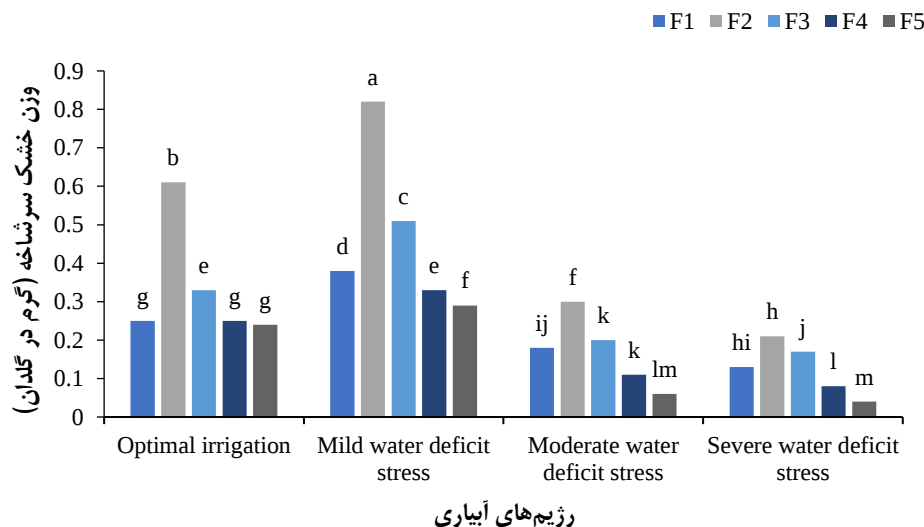
نتایج نشان داد که تیمار محلول‌پاشی با ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن (۵/۰۶ گرم) در شرایط آبیاری مطلوب بیشترین وزن خشک برگ را داشت (شکل ۴) در حالی که کمترین مقدار آن در تیمارهای محلول‌پاشی با ۳۰۰ پی‌پی‌ام (۲/۱۲ گرم) و بدون محلول‌پاشی (۲/۲۳ گرم) در شرایط تنش کم‌آبی شدید مشاهده شد (شکل ۴) و از لحاظ آماری با تیمارهای محلول‌پاشی ۲۲۵ پی‌پی‌ام (۲/۶۹ گرم)، ۱۵۰ پی‌پی‌ام (۲/۷۵ گرم)، ۷۵ پی‌پی‌ام (۲/۷۳ گرم) کلات آهن در شرایط تنش کم‌آبی شدید و تیمارهای محلول‌پاشی ۳۰۰ پی‌پی‌ام (۲/۵۲ گرم)، ۲۲۵ پی‌پی‌ام (۲/۷۸ گرم) و بدون محلول‌پاشی (۲/۹۱ گرم) کلات آهن در شرایط تنش کم‌آبی متوسط و تیمار ۳۰۰ پی‌پی‌ام (۲/۵۸ گرم) کلات آهن در شرایط تنش کم‌آبی ملایم تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۴). با افزایش تنش خشکی مقدار وزن خشک برگ کاهش یافت، البته محلول‌پاشی کلات آهن سبب افزایش وزن خشک برگ گردید. تنش خشکی با کاهش سطح برگ کلزا سبب افت میزان فتوسنتز شده و در نتیجه باعث کاهش وزن خشک گیاه می‌شود (اردشیری و جهان بین، ۱۳۹۷) محلول‌پاشی در زمان رشد رویشی با افزایش سطح برگ باعث افزایش تشعشع دریافتی گردیده است. چون رابطه بین تشعشع دریافتی با تولید ماده خشک خطی است وزن خشک برگ نیز افزایش می‌یابد (جوانمرد و اسدی دانالو، ۱۳۹۶). یکی از راه‌های دفاعی برای جلوگیری از هدررفت بیشتر آب گیاه در شرایط کم‌آبی کاهش تعداد و سطح برگ در گیاه است. مشابه نتایج این پژوهش، گزارش شده است که تنش خشکی باعث کاهش تعداد برگ در گیاه کاسنی (Jazizadeh and Mortezaei Nejad, 2018) و نیز کنجد (Ayoubzadeh et al., 2018) شده است.



شکل ۴. برهمکنش رژیم‌های آبیاری در سطوح مختلف محلول‌پاشی کلات آهن روی وزن خشک برگ گل‌گاوزبان اروپایی (حروف مشترک نشان از عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد. F1: آب مقطر، F2: ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F3: ۱۵۰ پی‌پی‌ام کلات آهن، F4: ۲۲۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F5: ۳۰۰ پی‌پی‌ام کلات آهن).

#### وزن خشک سرشاخه

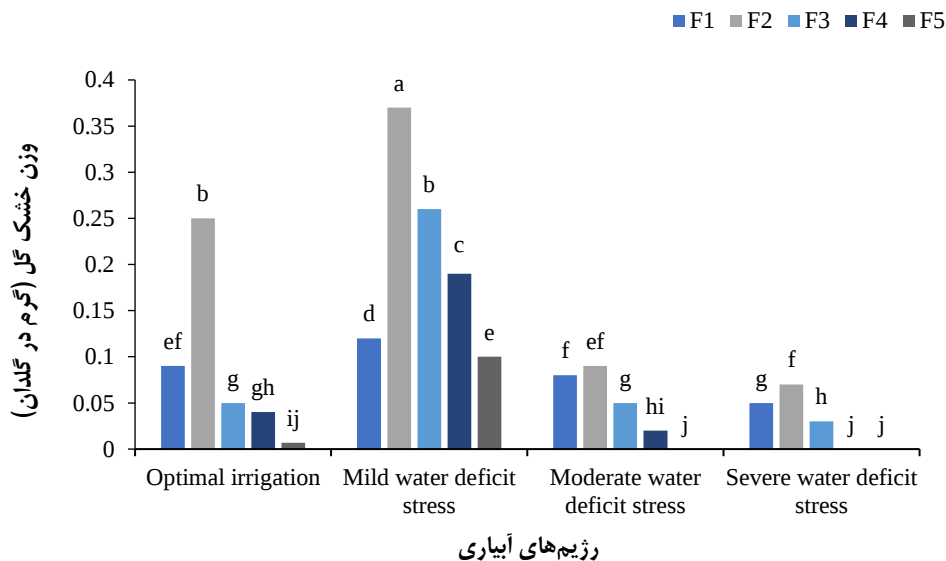
نتایج نشان داد که تیمار محلول‌پاشی با ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن (۰/۸۲ گرم) در شرایط تنش کم‌آبی ملایم بیشترین وزن را داشت (شکل ۵) و کمترین مقدار آن در تیمارهای محلول‌پاشی با ۳۰۰ پی‌پی‌ام در شرایط تنش کم‌آبی شدید (۰/۰۴ گرم) مشاهده شد (شکل ۵) و از لحاظ آماری با تیمار محلول‌پاشی ۳۰۰ پی‌پی‌ام (۰/۰۶ گرم) در شرایط تنش کم‌آبی متوسط تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۵). نتایج شکل ۵ نشان داد که بیشترین وزن خشک سرشاخه گل‌گاوزبان اروپایی در شرایط تنش کم‌آبی ملایم همراه با محلول‌پاشی ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن حاصل شد، که بیانگر نقش ترکیبی تحریک فیزیولوژیک ناشی از تنش ملایم و تأمین کافی آهن در بهبود رشد زایشی است. تنش ملایم می‌تواند با تحریک سازوکارهای دفاعی و بهبود تخصیص مواد فتوسنتزی به اندام‌های زایشی، رشد سرشاخه را افزایش دهد، به شرطی که نیازهای تغذیه‌ای گیاه برطرف شود. در مقابل، در شرایط آبیاری مطلوب، اگرچه گیاه از نظر آبی در وضعیت مطلوب است، اما نبود اثر محرک تنش ممکن است موجب تخصیص کمتر منابع به اندام‌های زایشی شود و بنابراین وزن خشک سرشاخه نسبت به تنش ملایم پایین‌تر باشد. با افزایش شدت تنش به متوسط و شدید، کاهش قابل‌توجه وزن خشک سرشاخه مشاهده شد که علت آن می‌تواند محدودیت جذب آب و مواد غذایی، کاهش سنتز کلروفیل، افت فتوسنتز خالص و اختلال در تقسیم و تولید شدن سلول‌ها باشد. همچنین، در این شرایط، حتی محلول‌پاشی آهن به‌ویژه در غلظت‌های بالا (۲۲۵ و ۳۰۰ پی‌پی‌ام) نتوانست اثرات منفی تنش شدید را جبران کند که احتمالاً به دلیل کاهش انتقال آهن در گیاه و یا بروز اثرات سمی احتمالی ناشی از غلظت زیاد آن در شرایط تنش است. به‌طور کلی، این نتایج اهمیت مدیریت همزمان آب و تغذیه برگی آهن را نشان می‌دهد و تأکید می‌کند که در شرایط تنش ملایم، استفاده از غلظت بهینه آهن (۷۵ پی‌پی‌ام) می‌تواند بیشترین اثر مثبت بر رشد سرشاخه‌ها داشته باشد، در حالی که در تنش شدید، اولویت باید بر کاهش شدت تنش آبی متمرکز شود. پژوهشگران در بررسی تأثیر تنش خشکی بر برخی صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک مرزه (*Satureja hortensis*) دریافتند که بیشترین ماده خشک در بخش هوایی مربوط به تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و کمترین میزان در تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به‌دست آمد که با تیمار ۲۵ درصد اختلاف معنی‌داری نداشت.



شکل ۵. برهمکنش رژیم‌های آبیاری در سطوح مختلف محلول‌پاشی کلات آهن روی وزن خشک سرشاخه گل‌گاوزبان اروپایی (حروف مشترک نشان از عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد. F1: آب مقطر، F2: ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F3: ۱۵۰ پی‌پی‌ام کلات آهن، F4: ۲۲۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F5: ۳۰۰ پی‌پی‌ام کلات آهن).

## وزن خشک گل

نتایج نشان داد که تیمار محلول‌پاشی با ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن (۰/۳۷ گرم) در شرایط کم‌آبی ملایم بیشترین وزن را داشت (شکل ۶) در حالی که کمترین مقدار آن در تیمارهای محلول‌پاشی ۳۰۰ پی‌پی‌ام (۰ گرم)، ۲۲۵ پی‌پی‌ام (۰ گرم) در شرایط تنش کم‌آبی شدید و تیمارهای محلول‌پاشی ۳۰۰ پی‌پی‌ام کلات آهن (۰ گرم) در شرایط تنش کم‌آبی متوسط و تیمار ۳۰۰ پی‌پی‌ام (۰/۰۰۶۷ گرم) کلات آهن در شرایط آبیاری مطلوب تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۶). نتایج نشان داد که تیمار محلول‌پاشی ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن در شرایط کم‌آبی ملایم بیشترین وزن خشک گل را تولید کرد. این موضوع بیانگر آن است که در شرایطی که گیاه با کاهش متوسط دسترسی به آب مواجه است، استفاده از غلظت پایین‌تر کلات آهن می‌تواند باعث بهبود کارایی فتوسنتز، افزایش انتقال مواد فتوسنتزی به اندام‌های زایشی و در نهایت ارتقاء رشد و توسعه گل‌ها شود. در شرایط تنش کم‌آبی شدید، نتایج نشان داد که حتی با مصرف کلات آهن در غلظت‌های مختلف (به‌ویژه ۲۲۵ و ۳۰۰ پی‌پی‌ام)، وزن خشک گل به صفر رسید. این کاهش چشمگیر احتمالاً به دلیل محدودیت شدید در جذب آب و عناصر غذایی، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش فتوسنتز و اختلال در انتقال مواد فتوسنتزی به گل‌ها بوده است. در شرایط آبیاری مطلوب، اگرچه انتظار می‌رود که غلظت‌های بالای کلات آهن موجب افزایش رشد شوند، اما مشاهده شد که محلول‌پاشی با ۳۰۰ پی‌پی‌ام کلات آهن کمترین وزن خشک گل در شرایط مطلوب آبیاری را ایجاد کرد. این نتیجه نشان می‌دهد که مصرف بیش از حد آهن، حتی بدون محدودیت آبی، می‌تواند به بروز سمیت یا اختلالات تغذیه‌ای منجر شود. نتایج به دست آمده با گزارش دهمرده و همکاران (۱۳۹۷) مطابقت داشت.

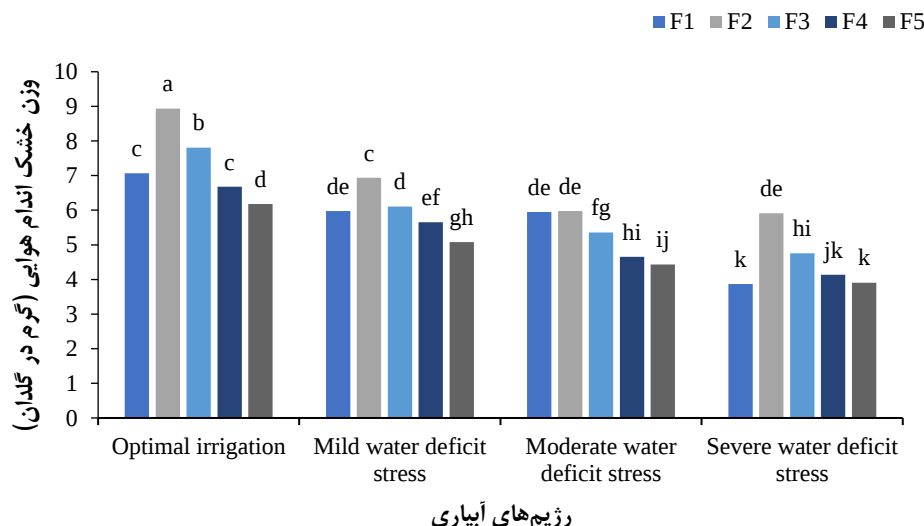


شکل ۶. برهمکنش رژیم‌های آبیاری در سطوح مختلف محلول‌پاشی کلات آهن روی وزن خشک گل، گل‌گاوزبان اروپایی (حروف مشترک نشان از عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد. F1: آب مقطر، F2: ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F3: ۱۵۰ پی‌پی‌ام کلات آهن، F4: ۲۲۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F5: ۳۰۰ پی‌پی‌ام کلات آهن).

### وزن خشک اندام هوایی

نتایج نشان داد که تیمار محلول‌پاشی با ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن (۸/۹۴ گرم) در شرایط آبیاری مطلوب بیشترین وزن خشک اندام هوایی را داشت (شکل ۷) در حالی که کمترین مقدار آن در تیمارهای محلول‌پاشی با ۳۰۰ پی‌پی‌ام کلات آهن (۳/۹۱ گرم) و بدون محلول‌پاشی (۳/۸۷ گرم) در شرایط تنش کم‌آبی شدید مشاهده شد (شکل ۷) و از لحاظ آماری با تیمارهای محلول‌پاشی ۲۲۵ پی‌پی‌ام (۴/۱۴ گرم) در شرایط تنش کم‌آبی شدید تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۷).

شواهد زیادی وجود دارد که کاهش فراهمی آب سبب کاهش جذب عناصر غذایی، افت شاخص سطح برگ و توان فتوسنتزی گیاه می‌شود. که نتیجه آن کاهش عملکرد ماده خشک گیاهی است؛ بنابراین افزایش ماده خشک تولیدی در گیاهان تحت شرایط آبیاری مطلوب می‌تواند به دلیل گسترش بیشتر سطح برگ و نیز دوام سطح برگ آن باشد که با ایجاد منبع فیزیولوژیک کارآمد به منظور استفاده هر چه بیشتر از نور دریافتی باعث افزایش تولید ماده خشک شده است (زاهدی و علی‌پور، ۱۳۹۷). در شرایط کمبود آهن، میزان فتوسنتز، سرعت تثبیت دی اکسید کربن، ذخیره نشاسته و قند در برگ‌ها کاهش یافته و در نهایت منجر به کاهش رشد گیاه می‌گردد.



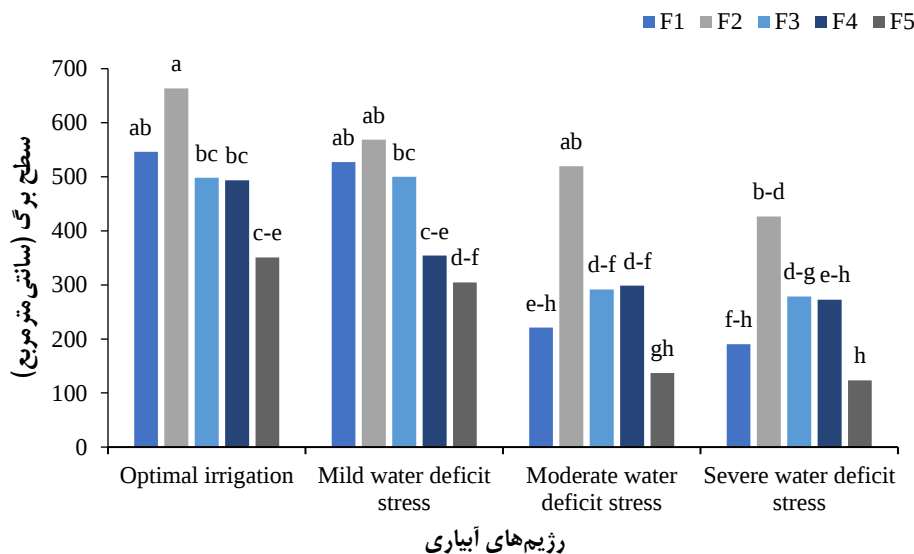
شکل ۷. برهمکنش رژیم‌های آبیاری در سطوح مختلف محلول‌پاشی کلات آهن روی وزن خشک اندام هوایی گل‌گاوزبان اروپایی (حروف مشترک نشان از عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد). F1: آب مقطر، F2: ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F3: ۱۵۰ پی‌پی‌ام کلات آهن، F4: ۲۲۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F5: ۳۰۰ پی‌پی‌ام کلات آهن).

### سطح برگ

نتایج نشان داد که تیمار محلول‌پاشی با ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن (۶۶۳/۶۷ سانتی‌متر مربع) در شرایط آبیاری مطلوب بیشترین سطح برگ را داشت (شکل ۸) و از لحاظ آماری با تیمار بدون محلول‌پاشی (۵۴۶/۳۳ سانتی‌متر مربع)، در شرایط آبیاری مطلوب و محلول‌پاشی با ۷۵ پی‌پی‌ام (۵۶۸/۶۷ سانتی‌متر مربع) و بدون محلول‌پاشی (۵۲۷/۳۳ سانتی‌متر مربع) کلات آهن در شرایط تنش کم‌آبی ملایم تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۸). در حالی که کمترین مقدار سطح برگ در تیمارهای محلول‌پاشی با ۳۰۰ پی‌پی‌ام کلات آهن در شرایط تنش کم‌آبی شدید (۱۲۳/۱۷ سانتی‌متر مربع) مشاهده شد (شکل ۸) و از لحاظ آماری با تیمارهای محلول‌پاشی ۲۲۵ پی‌پی‌ام (۲۷۲/۸۳ سانتی‌متر مربع) و بدون محلول‌پاشی (۱۹۰/۵ سانتی‌متر مربع) کلات آهن در شرایط تنش کم‌آبی شدید و تیمارهای محلول‌پاشی ۳۰۰ پی‌پی‌ام (۱۳۷/۱۷ سانتی‌متر مربع) و بدون محلول‌پاشی (۲۲۰/۸۳ سانتی‌متر مربع) کلات آهن در شرایط تنش کم‌آبی تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۸).

برای جبران کمبود آب، بخشی از مواد فتوسنتزی برای دسترسی به آب بیشتر صرف رشد ریشه گیاه می‌شود. همچنین کاهش ماده خشک در شرایط بدون آبیاری تکمیلی را می‌توان به فشار آماس سلولی ناشی از کاهش سطح برگ نسبت داد. در این شرایط نیز برای جلوگیری از هدررفت آب، سطح برگ کاهش می‌یابد، در نتیجه کاهش فتوسنتز و تولید شیره پرورده و کاهش تولید ماده خشک را در پی خواهد داشت. یکی از راهکارهای گیاه در زمان وقوع تنش کمبود آب، کاهش تعداد و سطح برگ‌ها می‌باشد. برگ به عنوان واحد فتوسنتزی در گیاه نقش ویژه‌ای دارد. گیاهان با تعداد برگ بیشتر در شرایط تنش توان فتوسنتزی بالاتری دارند، اما این موضوع با تعرق بیشتر گیاه در این شرایط در تقابل است. بنابراین، باید بین کاهش میزان تعرق و سطح بحرانی برگ برای فتوسنتز تعادل پایداری وجود داشته باشد (علیخانی و همکاران، ۱۴۰۰).

نتایج نشان داد محلول‌پاشی سولفات آهن بر این صفت تأثیر گذاشته که احتمالاً عکس العمل نقش آهن در افزایش میزان کلروفیل را نشان می‌دهد که به دنبال آن فتوسنتز گیاه افزایش یافته و در نتیجه منجر به افزایش بیشتر شاخص سطح برگ می‌گردد. معمولاً در مرحله زایشی به علت پیری برگ‌ها و همچنین همزمانی تنش کمبود آب با تنش گرمایی، سطح برگ در این مرحله بیش از پیش کاهش می‌یابد.



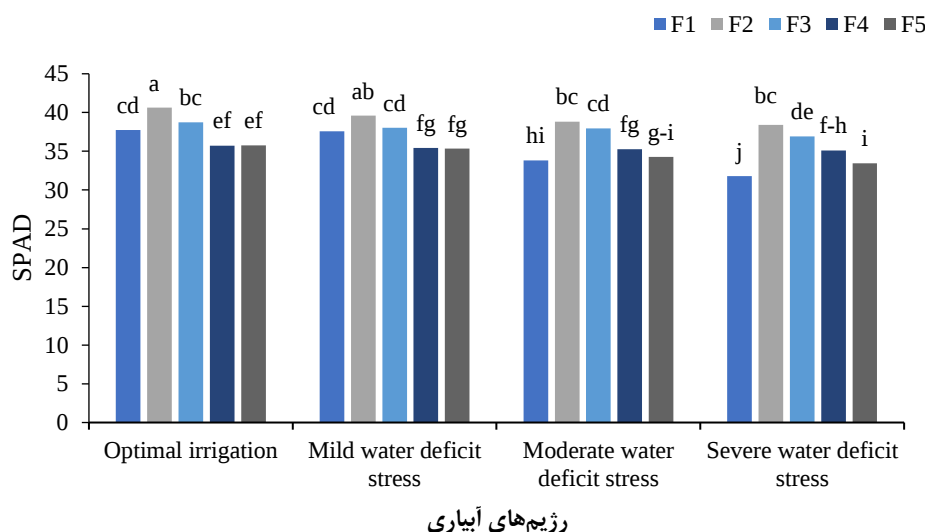
شکل ۸. برهمکنش رژیم‌های آبیاری در سطوح مختلف محلول‌پاشی کلات آهن روی سطح برگ گل‌گاوزبان اروپایی (حروف مشترک نشان از عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد. F1: آب مقطر، F2: ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F3: ۱۵۰ پی‌پی‌ام کلات آهن، F4: ۲۲۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F5: ۳۰۰ پی‌پی‌ام کلات آهن).

## صفات فیزیولوژیک

### شاخص سبزی‌نگی

نتایج نشان داد که تیمار محلول‌پاشی با ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن (۴۰/۶۳ درصد) در شرایط آبیاری مطلوب بیشترین درجه سبزی‌نگی را داشت (شکل ۹) و از لحاظ آماری با تیمارهای محلول‌پاشی ۷۵ پی‌پی‌ام (۳۹/۶ درصد) در شرایط تنش کم‌آبی ملایم تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۹). در حالی که کمترین مقدار آن در تیمارهای محلول‌پاشی با ۳۰۰ پی‌پی‌ام در شرایط تنش کم‌آبی شدید (۳۱/۸ درصد) مشاهده شد (شکل ۹). نتایج نشان داد که تیمار محلول‌پاشی ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن در شرایط آبیاری مطلوب بیشترین شاخص سبزی‌نگی را ایجاد کرد. این موضوع حاکی از آن است که غلظت بهینه آهن، به‌ویژه در شرایط رطوبتی مناسب، می‌تواند با بهبود سنتز کلروفیل و حفظ فعالیت فتوسنتزی، وضعیت تغذیه‌ای و سلامت برگ‌ها را بهبود بخشد. عدم تفاوت معنی‌دار این تیمار با محلول‌پاشی ۷۵ پی‌پی‌ام در شرایط تنش کم‌آبی ملایم نشان می‌دهد که گیاه گاو زبان اروپایی تا حدی قادر است اثرات محدودیت آبی ملایم را با افزایش کارایی جذب و استفاده از آهن جبران کند. در مقابل، کمترین شاخص سبزی‌نگی در تیمار محلول‌پاشی ۳۰۰ پی‌پی‌ام کلات آهن تحت تنش کم‌آبی شدید مشاهده شد. این کاهش چشمگیر احتمالاً ناشی از هم‌افزایی اثرات منفی تنش آبی شدید و غلظت بالای آهن بوده است؛ به‌طوری که کمبود آب باعث کاهش جذب عناصر و تخریب ساختار کلروپلاست می‌شود، و آهن اضافی نیز ممکن است با ایجاد سمیت اکسیداتیو و اختلال در تعادل عناصر غذایی، شدت آسیب را افزایش دهد. کاهش شاخص سبزی‌نگی در این شرایط بیانگر کاهش کلروفیل و افت ظرفیت فتوسنتزی گیاه است که نهایتاً می‌تواند عملکرد و کیفیت محصول را تحت تأثیر قرار دهد. آهن نقش کلیدی در سنتز کلروفیل و حفظ ساختار کلروپلاست دارد و کمبود آن موجب کاهش محتوای کلروفیل و افت شاخص سبزی‌نگی می‌شود. در محدوده بهینه، افزایش آهن باعث بهبود سبزی‌نگی برگ از طریق ارتقای ظرفیت فتوسنتزی گیاه می‌گردد (Chao & Chao, 2022). به طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهد که حفظ سبزی‌نگی برگ و پایداری سیستم فتوسنتزی در گاو زبان اروپایی، به شدت وابسته به انتخاب غلظت مناسب آهن و مدیریت صحیح آبیاری است. غلظت ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، چه در شرایط آبیاری مطلوب و چه در کم‌آبی ملایم، توانسته

بیشترین سبزی‌نگی را ایجاد کند، در حالی که غلظت‌های بالا به‌ویژه در تنش شدید آبی، اثر منفی بر این شاخص داشته‌اند.



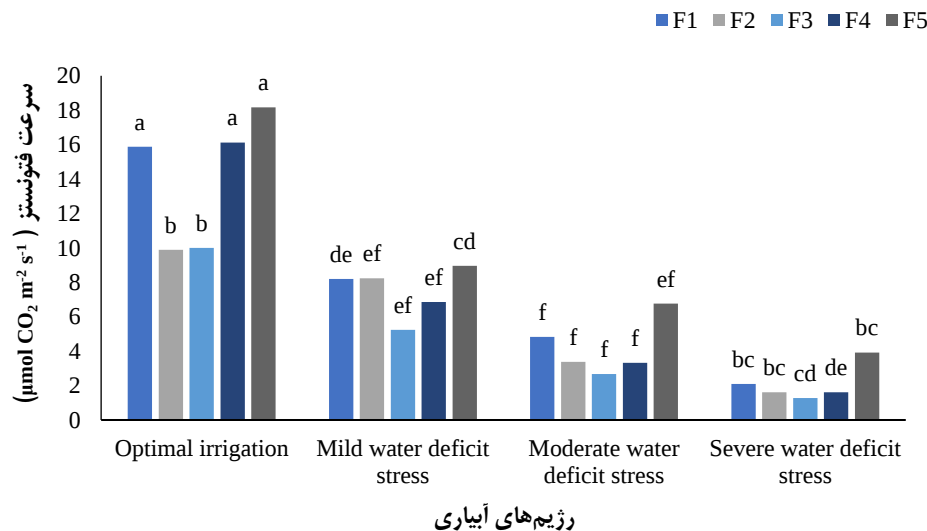
شکل ۹. برهمکنش رژیم‌های آبیاری در سطوح مختلف محلول‌پاشی کلات آهن روی شاخص سطح برگ گل‌گاوزبان اروپایی (حروف مشترک نشان از عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد. F1: آب مقطر، F2: ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F3: ۱۵۰ پی‌پی‌ام کلات آهن، F4: ۲۲۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F5: ۳۰۰ پی‌پی‌ام کلات آهن).

#### سرعت فتوسنتز

نتایج نشان داد که تیمار محلول‌پاشی با پی‌پی‌ام ۳۰۰ کلات آهن (۱۸/۱۷ میکرومول  $CO_2$  بر مترمربع بر ثانیه) در شرایط آبیاری مطلوب بیشترین سرعت فتوسنتز را داشت (شکل ۱۰) و از لحاظ آماری با تیمارهای محلول‌پاشی ۲۲۵ پی‌پی‌ام (۱۶/۱۲ میکرومول  $CO_2$  بر مترمربع بر ثانیه) و بدون محلول‌پاشی (۱۵/۸۷ میکرومول  $CO_2$  بر مترمربع بر ثانیه) کلات آهن در شرایط آبیاری مطلوب تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۱۰). در حالی که کمترین مقدار آن در تیمارهای محلول‌پاشی با ۱۵۰ پی‌پی‌ام در شرایط تنش کم‌آبی شدید (۱/۲۷ میکرومول  $CO_2$  بر مترمربع بر ثانیه) مشاهده شد (شکل ۱۰) و از لحاظ آماری با تیمارهای محلول‌پاشی ۲۲۵ پی‌پی‌ام (۱/۶۲ میکرومول  $CO_2$  بر مترمربع بر ثانیه)، ۷۵ پی‌پی‌ام (۱/۶۱ میکرومول  $CO_2$  بر مترمربع بر ثانیه)، بدون محلول‌پاشی (۲/۰۹ میکرومول  $CO_2$  بر مترمربع بر ثانیه) و ۳۰۰ پی‌پی‌ام (۳/۹۲ میکرومول  $CO_2$  بر مترمربع بر ثانیه) کلات آهن در شرایط تنش کم‌آبی شدید و تیمارهای محلول‌پاشی ۱۵۰ پی‌پی‌ام (۲/۶۷ میکرومول  $CO_2$  بر مترمربع بر ثانیه)، ۲۲۵ پی‌پی‌ام (۳/۳۲ میکرومول  $CO_2$  بر مترمربع بر ثانیه) و ۷۵ پی‌پی‌ام (۳/۳۷ میکرومول  $CO_2$  بر مترمربع بر ثانیه) کلات آهن در شرایط تنش کم‌آبی متوسط تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۹). سرعت فتوسنتز در شدت‌های تنش کم‌آبی متفاوت بود. سرعت فتوسنتز با شروع تنش خشکی کاهش یافت.

مقایسه بین سطوح مختلف تنش نشان داد که با شروع کم‌آبی، سرعت فتوسنتز کاهش یافت و این کاهش در تنش‌های شدید محسوس‌تر بود. تنش خشکی از طریق اختلال در باز و بسته شدن روزنه‌ها، کاهش هدایت روزنه‌ای، تخریب رنگدانه‌ها و پروتئین‌های فتوسنتزی، و کاهش سطح برگ، موجب افت فعالیت فتوسنتزی و در نهایت کاهش عملکرد گیاه می‌شود. کاهش هدایت روزنه‌ای، هرچند به‌عنوان یک سازوکار سازگاری برای کاهش تلفات آب عمل می‌کند، اما باعث افزایش دمای برگ و کاهش ظرفیت فتوسنتز نیز می‌شود. کاربرد آهن مطالعات مشابه، موجب افزایش حجم و وزن خشک ریشه، زیست توده کل، کاروتنوئید و کلروفیل a و b و کل شده است (Izadi and Rezaei Nejad, 2020). این اثرات به بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه، حفظ

ساختار کلروپلاست و پایداری رنگدانه‌های فتوسنتزی کمک کرده و می‌تواند کاهش سرعت فتوسنتز ناشی از تنش کم‌آبی را تا حدودی جبران کند.



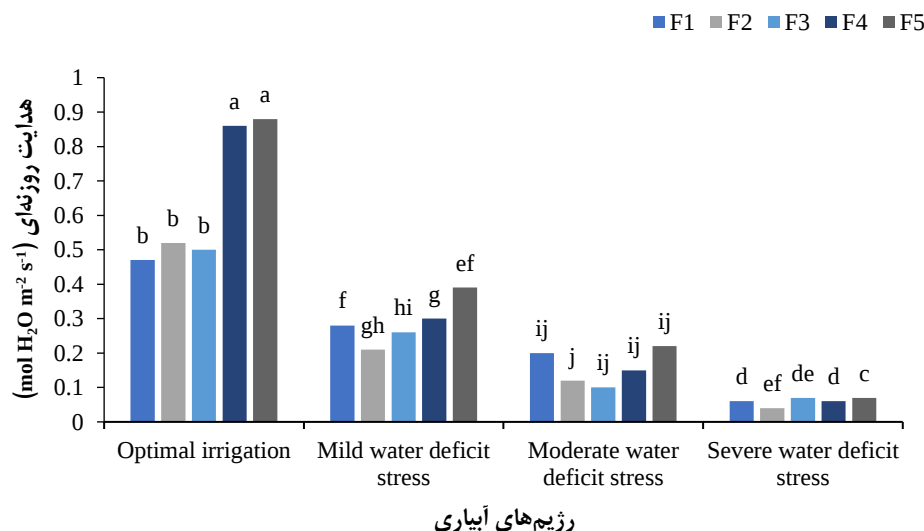
شکل ۱۰. برهمکنش رژیم‌های آبیاری در سطوح مختلف محلول‌پاشی کلات آهن روی سرعت فتوسنتز گل‌گاوزبان اروپایی (حروف مشترک نشان از عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد. F1: آب مقطر، F2: ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F3: ۱۵۰ پی‌پی‌ام کلات آهن، F4: ۲۲۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F5: ۳۰۰ پی‌پی‌ام کلات آهن).

#### هدایت روزنه‌ای

نتایج نشان داد که تیمار محلول‌پاشی با ۳۰۰ پی‌پی‌ام کلات آهن (۰/۸۸ مول  $\text{CO}_2$  بر مترمربع بر ثانیه) در شرایط آبیاری مطلوب بیشترین هدایت روزنه‌ای را داشت (شکل ۱۱) و از لحاظ آماری با تیمار محلول‌پاشی ۲۲۵ پی‌پی‌ام (۰/۸۶ مول  $\text{CO}_2$  بر مترمربع بر ثانیه) کلات آهن در شرایط آبیاری مطلوب تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۱۱) در حالی که کمترین مقدار آن در تیمارهای محلول‌پاشی با ۷۵ پی‌پی‌ام در شرایط تنش کم‌آبی شدید مشاهده شد (شکل ۱۱) و از لحاظ آماری با تیمارهای محلول‌پاشی ۱۵۰ پی‌پی‌ام (۰/۰۷ مول  $\text{CO}_2$  بر مترمربع بر ثانیه)، ۲۲۵ پی‌پی‌ام (۰/۰۶ مول  $\text{CO}_2$  بر مترمربع بر ثانیه)، ۳۰۰ پی‌پی‌ام (۰/۰۷ مول  $\text{CO}_2$  بر مترمربع بر ثانیه) و بدون محلول‌پاشی (۰/۰۶ مول  $\text{CO}_2$  بر مترمربع بر ثانیه) کلات آهن در شرایط تنش کم‌آبی شدید تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۱۱). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که تنش خشکی سبب کاهش هدایت روزنه‌ای گردید. تنش خشکی در گیاه با کاهش آب برگ و در نتیجه بسته شدن روزنه‌ها و کاهش فتوسنتز از یک سو و متاثر کردن فعالیت‌های آنزیمی و فرایندهای مربوطه از سوی دیگر، موجب افت عملکرد دانه می‌شود. کاهش میزان هدایت روزنه‌ای و کاهش جذب آب در اثر کاهش رشد ریشه از عوامل دخیل در کاهش عملکرد در شرایط خشکی شناخته شده است. در شرایطی که گیاه با کمبود آب مواجه است، گیاه برای کاهش تعرق، اقدام به بسته شدن روزنه‌ها می‌کند که نتیجه آن ممانعت از ورود دی اکسید کربن به برگ و کاهش فتوسنتز است. بنابراین با کاهش فتوسنتز برخی از شاخص‌های رشدی مانند تعداد برگ کاهش می‌یابد. همچنین کم‌آبی باعث کاهش فشار آماس و اختلال در تقسیم سلولی شده، در نتیجه باعث کاهش رشد گیاه می‌شود (علیخانی و همکاران، ۱۴۰۰). بسته شدن روزنه‌ها در طی تنش گرچه به منظور کاهش هدر رفت آب صورت می‌گیرد، اما بواسطه ممانعت از ورود  $\text{CO}_2$  می‌تواند فتوسنتز را به کمتر از نقطه جبرانی کاهش دهد.

در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود با محلول‌پاشی نانو کلات آهن در تنش کم‌آبی ملایم تا غلظت ۳۰۰ پی‌پی‌ام سبب افزایش هدایت روزنه‌ای شد. با توجه به اینکه آهن در فتوسنتز گیاه اثر مثبت دارد و با بسته شدن روزنه‌ها بر میزان فتوسنتز کاهش

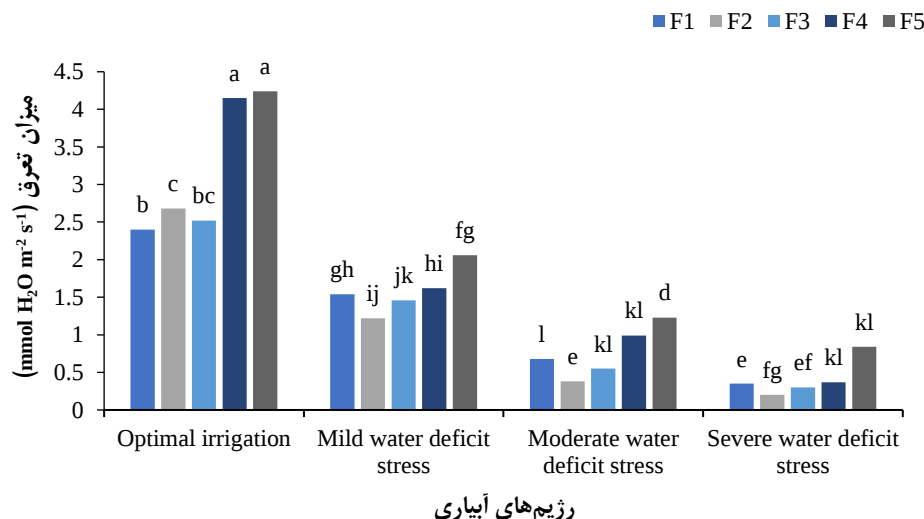
می‌یابد می‌توان چنین استنباط کرد که احتمالاً هدایت روزنه‌ای با آهن موجود در گیاه ارتباط مستقیم دارد و با افزایش آهن به ویژه نانو آهن به دلیل جذب شدید در گیاه سبب افزایش هدایت روزنه‌ای در گیاه می‌شود.



شکل ۱۱. برهمکنش رژیم‌های آبیاری در سطوح مختلف محلول‌پاشی کلات آهن روی هدایت روزنه‌ای گل‌گاوزبان اروپایی (حروف مشترک نشان از عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد. F1: آب مقطر، F2: ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F3: ۱۵۰ پی‌پی‌ام کلات آهن، F4: ۲۲۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F5: ۳۰۰ پی‌پی‌ام کلات آهن).

### میزان تعرق

نتایج نشان داد که تیمار محلول‌پاشی با ۳۰۰ پی‌پی‌ام کلات آهن (۴/۲۴ میلی مول  $H_2O$  بر مترمربع بر ثانیه) در شرایط آبیاری مطلوب بیشترین میزان تعرق را داشت (شکل ۱۲) و از لحاظ آماری با تیمار محلول‌پاشی ۲۲۵ پی‌پی‌ام (۴/۱۵ میلی مول  $H_2O$  بر مترمربع بر ثانیه) کلات آهن در شرایط آبیاری مطلوب تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۱۲) در حالی که کمترین مقدار آن در تیمارهای محلول‌پاشی با ۷۵ پی‌پی‌ام در شرایط تنش کم‌آبی شدید (۰/۲ میلی مول  $H_2O$  بر مترمربع بر ثانیه) مشاهده شد (شکل ۱۲) و از لحاظ آماری با تیمارهای محلول‌پاشی ۲۲۵ پی‌پی‌ام (۰/۳۷ میلی مول  $H_2O$  بر مترمربع بر ثانیه)، ۱۵۰ پی‌پی‌ام (۰/۳ میلی مول  $H_2O$  بر مترمربع بر ثانیه) و بدون محلول‌پاشی (۰/۳۵ میلی مول  $H_2O$  بر مترمربع بر ثانیه) کلات آهن در شرایط تنش کم‌آبی شدید و تیمارهای محلول‌پاشی ۷۵ پی‌پی‌ام (۰/۳۸ میلی مول  $H_2O$  بر مترمربع بر ثانیه) در شرایط تنش کم‌آبی متوسط تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۱۲). کلات آهن موجب افزایش وزن تر و خشک اندام هوایی گیاه گردید، زیرا آهن در ساختمان کلروفیل نقش اساسی دارد، در نتیجه کاربرد کلات آهن از طریق افزایش محتوای کلروفیل گیاه منجر به افزایش فتوسنتز و رشد رویشی بیشتر در گیاه میگردد که در نهایت موجب تولید پوشش گیاهی توسعه یافته تر و شاخ و برگ بیشتری می‌گردد. به تبع آن شدت تعرق نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲. برهمکنش رژیم‌های آبیاری در سطوح مختلف محلول‌پاشی کلات آهن روی میزان تعرق گل‌گاوزبان اروپایی (حروف مشترک نشان از عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد. F1: آب مقطر، F2: ۷۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F3: ۱۵۰ پی‌پی‌ام کلات آهن، F4: ۲۲۵ پی‌پی‌ام کلات آهن، F5: ۳۰۰ پی‌پی‌ام کلات آهن).

## نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت هم‌زمان آب و تغذیه برگی آهن، با انتخاب غلظت بهینه و اجتناب از مصرف بیش از حد، می‌تواند به عنوان راهبردی مؤثر برای بهبود عملکرد و کیفیت گل‌گاوزبان اروپایی به کار گرفته شود. استفاده از غلظت‌های پایین تا متوسط نانوکلات آهن در شرایط آبیاری مطلوب یا تنش ملایم، ضمن صرفه‌جویی در منابع، به پایداری تولید این گیاه دارویی کمک می‌کند و از کاهش شاخص‌های رشد و کیفیت در اثر تنش شدید جلوگیری می‌نماید. این رویکرد می‌تواند برای کشاورزان و تولیدکنندگان گیاهان دارویی به‌ویژه در مناطق با محدودیت منابع آبی، یک راهکار عملی و پایدار باشد.

## منابع

- اردشیری، ط. و جهان‌بین، س. (۱۳۹۷). اثر محلول‌پاشی نانوآهن و روی کلاته بر عملکرد، اجزای عملکرد و شاخص برداشت کلزا در شرایط تنش خشکی. *نشریه اصلاح گیاهان زراعی*، ۲۰(۱)، ۳۱-۴۳. <https://doi.org/10.22059/jci.2018.220873.1582>
- جوانمرد، ا. و اسدی دانالو، ا. (۱۳۹۶). اثر کود مرغی و محلول‌پاشی ریزمغذی‌ها بر برخی صفات کمی و کیفی گندم در شرایط دیم. *تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک*، ۱۱(۱)، ۱۳-۲۶. <https://doi.org/10.22034/csrar.01.01.02>
- دهمرد، م.، تاجی، ر.، خماری، ا. و هادادی، ت. (۱۳۹۷). ارزیابی سنتز سبز نانوذرات آهن و نقره با عصاره چای سبز (*Camellia sinensis* L. بر صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گاوزبان (*Borago officinalis* L.). *مجله ایرانی تحقیقات گیاهان دارویی و معطر*، ۳۴(۲)، ۳۳۰-۳۴۵. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2018.114543.2072>
- زاهدی، ح. و علی‌پور، ا. (۱۳۹۷). اثر محلول‌پاشی نانو کلاته آهن و منگنز بر عملکرد و اجزای عملکرد جو (*Hordeum vulgare* L.) تحت تنش کم‌آبی در مراحل رشد مختلف. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۱(۴)، ۸۴۷-۸۶۱. <https://doi.org/10.22077/escs.2018.890.1176>
- سودائی زاده، ح.، شمسایی، م.، تجمیلیان، م.، میرمحمدی میبدی، ع.م. و حکیم زاده، م.ع. (۱۳۹۵). بررسی تأثیر تنش خشکی بر برخی صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی مرزه (*Satureja hortensis*). *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۵(۱۵)، ۱-۱۲. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222727.1395.5.15.9.2>

عبداللهی مایوان، م.، خرم‌دل، س.، کوچکی، ع.، و قربانی، ر. (۱۳۹۷). ارزیابی عملکرد و اجزای عملکرد گاوزبان (*Borago officinalis* L.) تحت تأثیر سطح آبیاری و تراکم کاشت. *بوم‌شناسی کشاورزی*، ۱۰(۲)، ۳۳۷-۳۳۹.

<https://doi.org/10.22067/jag.v10i2.34695>

علیخانی، ح.، رحیمی، ا.، شمس‌الدین سعید، م.، صاهفی، ر.، و پیرمرادی، م. (۱۴۰۰). تأثیر محلول‌پاشی کلات آهن و روی بر ویژگی‌های رشد، میزان روغن اسانس و صمغ آسافیتیدای گیاه تره‌تل (*Ferula assa-foetida* L.) در شرایط آبیاری مکمل. *مجله*

*تحقیقات گیاهان دارویی و معطر*، ۳۷(۴)، ۶۸۸-۷۰۳. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2021.353818.2957>

نقدی‌بادی، ح.، سروش‌زاده، ع.، رضازاده، ش.، شریفی، م.، قلاوند، ع.، و امید، ح. (۱۳۸۶). مروری بر گیاه گاوزبان (گیاهی دارویی

ارزشمند و غنی از گاما-لینولنیک اسید). *مجله گیاهان دارویی*، ۴(۲۴)، ۱-۱۳. DOR: 20.1001.1.2717204.2007.6.24.1.8

Akhter Ansari, W., Atri, N., Pandey, M., Kumar Singh, A., Singh, B., & Pandey, S. (2019). Influence of Drought Stress on Morphological, Physiological and Biochemical Attributes of Plants: A Review. *Biosciences, Biotechnology Research Asia*. 16(4): 697–709. <https://doi.org/10.13005/bbra/2785>

Al-Taher, Z. A. A. (2023). Effect of Iron Treatment and Fertilizer of High Phosphorous (N.P.K) on Vegetative and Flowering Growth of Lalla Abbas plant, *Mirabilis jalapa* L. *International Journal of Agricultural and Statistical Sciences*. 19(1): 979–986. <https://doi.org/10.59467/ijass.2023.19.979>

Ayoubizadeh, N., laei, G., Amini Dehaghi, M., Masoud Sinaki, J. & Rezvan, S., (2018). Seed yield and fatty acids composition of sesame genotypes as affected by foliar application of iron nano chelate and fulvic acid under drought stress. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16(6): 7585-7604.

Barkaoui, K., & Volaire, F. (2023). Drought survival and recovery in grasses: Stress intensity and plant–plant interactions impact plant dehydration tolerance. *Plant, Cell & Environment*. 46(5): 1489–1503. <https://doi.org/10.1111/pce.14543>

Bjerring Jensen, N., Vrobel, O., Akula Nageshbabu, N., De Diego, N., Tarkowski, P., Ottosen, C.-O., & Zhou, R. (2024). Stomatal effects and ABA metabolism mediate differential regulation of leaf and flower cooling in tomato cultivars exposed to heat and drought stress. *Journal of Experimental Botany*. 75(7): 2156–2175. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad498>

Chao, Z., & Chao, D. (2022). Similarities and differences in iron homeostasis strategies between graminaceous and nongraminaceous plants. *New Phytologist*. 236(5): 1655–1660. <https://doi.org/10.1111/nph.18482>

Considine, M. J., & Foyer, C. H. (2021). Stress effects on the reactive oxygen species-dependent regulation of plant growth and development. *Journal of Experimental Botany*. 72(6): 5795–5806. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab265>

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 185–212. <https://doi.org/10.1051/agro:2008021>

Ghorbanpour, M., Asgari Lajayer, H. & Hadian, J., (2016). Influence of copper and zinc on growth, metal accumulation and chemical composition of essential oils in Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.). *Journal of Medicinal Plants*, 15(59): 132-144.

Harish, V., Aslam, S., Chouhan, S., Pratap, Y., & Lalotra, S. (2023). Iron toxicity in plants: A Review. *International Journal of Environment and Climate Change*. 13(8): 1894–1900. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i82145>

Heidarzade, M., Zarei, G. & A. Morowati. (2020). The Effect of Different Levels of Urea and Iron Fertilizer Resources on Yield and Quality of Lemon Verbena (*Lippia citriodora* H. B. K.). *Journal of Horticultural Science*. 34(1): 45-59. <https://doi.org/10.22067/JHORTS4.V34I1.78875>

Hura, T., Hura, K., & Ostrowska, A. (2022). Drought-Stress Induced Physiological and Molecular Changes in Plants. *International Journal of Molecular Sciences*. 23(9): 4698. <https://doi.org/10.3390/ijms23094698>

Izadi, Z. & A. Rezaei nejad. (2020). Effect of Different Iron Concentrations and StaircaseIron Regime on Some Morphological, Biochemical and Flowering Characteristics of *Calendula officinalis*. *Journal of Horticultural Science*. 34(2): 349-360. <https://doi.org/10.22067/JHORTS4.V34I2.82363>

Jazizadeh, A. & Mortezaei Nejad, F., (2018). Effects of water stress on morphological and physiological indices of *Cichorium intybus* L. for introduction in urban landscapes. *Journal of Plant Process and Function*, 6(21): 279-290. <https://doi.org/20.1001.1.23222727.1396.6.21.27.9>

Khalid, K. A., & Teixeira da Silva, J. A. (2010). Yield, essential oil and pigment content of *Calendula officinalis* L. flowers in response to drought stress. *Scientia Horticulturae*, 126(2), 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.07.023>

Kheiri, A., Veisi, M. & Sanikhani, M., (2017). Effect of micro-elements of Fe, Zn and Mn on some characteristics of Borage (*Borago officinalis* L.). *Journal of Plant Ecophysiology*, 29: 183-194.

- Liu, M., Kong, X.-Y., Yao, Y., Wang, X.-A., Yang, W., Wu, H., Li, S., Ding, J.-W., & Yang, J. (2022). The critical role and molecular mechanisms of ferroptosis in antioxidant systems: a narrative review. *Annals of Translational Medicine*. 10(6): 368–368. <https://doi.org/10.21037/atm-21-6942>
- Martín-Cardoso, H., & San Segundo, B. (2025). Impact of Nutrient Stress on Plant Disease Resistance. *International Journal of Molecular Sciences*. 26(4): 1780. <https://doi.org/10.3390/ijms26041780>
- Murgia, I., Marzorati, F., Vigani, G., & Morandini, P. (2021). Plant iron nutrition: the long road from soil to seeds. *Journal of Experimental Botany*. 73(6): 1809–1824. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab531>
- Ning, X., Lin, M., Huang, G., Mao, J., Gao, Z., & Wang, X. (2023). Research progress on iron absorption, transport, and molecular regulation strategy in plants. *Frontiers in Plant Science*. 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1190768>
- Rout, G. R., & Sahoo, S. (2015). Role of iron in plant growth and metabolism. *Reviews in Agricultural Science*, 3, 1–24. <https://doi.org/10.7831/ras.3.1>
- Slama, M., Slougui, N., Benaissa, A., Nekkaa, A., Sellam, F., & Canabady-Rochelle, L. (2024). *Borago Officinalis* L.: A Review On Extraction, Phytochemical, and Pharmacological Activities. *Chemistry & Biodiversity*. 21(5). <https://doi.org/10.1002/cbdv.202301822>
- Swain, R., Sahoo, S., Behera, M., & Rout, G. R. (2023). Instigating prevalent abiotic stress resilience in crop by exogenous application of phytohormones and nutrient. *Frontiers in Plant Science*. 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1104874>
- Tavallali, V. (2018). Effects of iron nano-complex and Fe-EDDHA on bioactive compounds and nutrient status of purslane plants. In *International Agrophysics*. 32(3): 411–419. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0028>
- Tripathi, D. K., Singh, S., Gaur, S., Singh, S., Yadav, V., Liu, S., Singh, V. P., Sharma, S., Srivastava, P., Prasad, S. M., Dubey, N. K., Chauhan, D. K., & Sahi, S. (2018). Acquisition and Homeostasis of Iron in Higher Plants and Their Probable Role in Abiotic Stress Tolerance. *Frontiers in Environmental Science*. 5. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00086>
- Wahab, A., Abdi, G., Saleem, M. H., Ali, B., Ullah, S., Shah, W., Mumtaz, S., Yasin, G., Muresan, C. C., & Marc, R. A. (2022). Plants' Physio-Biochemical and Phyto-Hormonal Responses to Alleviate the Adverse Effects of Drought Stress: A Comprehensive Review. *Plants*. 11(13): 1620. <https://doi.org/10.3390/plants11131620>
- Yang, H., Zhang, Y., Lyu, S., Mao, Y., Yu, F., Liu, S., Fang, Y., & Deng, S. (2025). Arabidopsis CIRP1 E3 ligase modulates drought and oxidative stress tolerance and reactive oxygen species homeostasis by directly degrading catalases. *Journal of Integrative Plant Biology*. 67(5): 1274–1289. <https://doi.org/10.1111/jipb.13845>
- Yoneyama, T. (2021). Iron delivery to the growing leaves associated with leaf chlorosis in mugineic acid family phytosiderophores-generating graminaceous crops. *Soil Science and Plant Nutrition*. 67(4): 415–426. <https://doi.org/10.1080/00380768.2021.1947735>