



Ecophysiological responses of seed germination in *Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass. to drought and salinity stress

Soraya Ghasemi¹ | Gholamabbas Akbari^{2✉} | Elias Soltani³ | Maryam Mansouri⁴

1. Department of Agronomy Sciences and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Pakdasht, Tehran, Iran. E-mail: Soraya.ghasemi@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Agronomy and Plant Breeding Sciences, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Pakdasht, Tehran, Iran. E-mail: Ghakbari@ut.ac.ir
3. Department of Agronomy and Plant Breeding Sciences, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Pakdasht, Tehran, Iran. E-mail: elias.soltani@ut.ac.ir
4. Department of Agronomy Sciences and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Pakdasht, Tehran, Iran. E-mail: maryammansori@ut.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Objective: Drought and soil salinity are major constraints limiting crop performance and global productivity. Niger seed (<i>Guizotia abyssinica</i>), an oilseed-forage species in the Asteraceae, exhibits rapid life cycle and notable drought and salinity tolerance, making it a candidate for marginal environments. This study evaluated the ecophysiological responses of Niger seed germination under controlled drought and salinity stress to inform potential cultivation in stress-prone regions.
Article history: Received 9 July 2025 Received in revised form 26 August 2025 Accepted 23 November 2025 Published online 5 January 2026	Methods: Two controlled-laboratory experiments were conducted in a completely randomized design with four replications. Drought stress was simulated with polyethylene glycol 6000 (PEG-6000) at six osmotic potentials: 0 (control), -0.2, -0.4, -0.6, -0.8, and -1.0 MPa. Salinity stress was imposed using NaCl at five concentrations: 0 (control), 50, 100, 150, and 200 mM. Germination dynamics were quantified using maximum germination percentage (Gmax), time to 10% germination (R10), and time to 50% germination (R50) as key metrics of seed vigor and germination pace under stress.
Keywords: Abiotic Stress Germination Indices Medicinal Plant Osmotic Potential	Results: Under drought, Gmax peaked at 95% at -0.2 MPa and declined to 6% at -1.0 MPa. R10 was highest in the control (mean ≈ 6.5 seeds·day ⁻¹) and dropped to 0.04 seeds·day ⁻¹ at -1.0 MPa. R50 reached a maximum of 1.3 seeds·day ⁻¹ in control, with no germination at -1.0 MPa. Under salinity, Gmax decreased from 98% (control) to 58% at 200 mM NaCl. R10 ranged from 1.8 seeds·day ⁻¹ (control) to 0.44 at 200 mM NaCl, and R50 declined from 1.62 seeds·day ⁻¹ (control) to 0.09 seeds·day ⁻¹ at 200 mM NaCl.
	Conclusions: Niger seed germination is sensitive to both drought and salinity, particularly under severe stress, but shows resilience under low to moderate stress levels where germination percentage and speed are less affected. These findings suggest Niger seed has potential as an alternative crop in semi-arid regions with limited water and moderately saline soils. Further research could optimize management strategies for stress-prone environments.

Cite this article: Ghasemi, S., Akbari, Gh., Soltani, E., & Mansouri, M. (2026). Ecophysiological responses of seed germination in *Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass. to drought and salinity stress. *Journal of Crops Improvement*, 27 (4), 737-756. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.397782.2940>





بررسی پاسخ های اکوفیزیولوژیک جوانه زنی گیاه دان سیاه (*Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass) به تنش های خشکی و شوری

ثریا قاسمی^۱ | غلامعباس اکبری^۲ | الیاس سلطانی^۳ | مریم منصوری^۴

۱. گروه علوم زراعی و اصلاح نباتات، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، تهران، ایران. رایانامه: Soraya.ghasemi@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم زراعی و اصلاح نباتات، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، تهران، ایران. رایانامه: Ghakbari@ut.ac.ir
۳. گروه علوم زراعی و اصلاح نباتات، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، تهران، ایران. رایانامه: elias.soltani@ut.ac.ir
۴. گروه علوم زراعی و اصلاح نباتات، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، تهران، ایران. رایانامه: maryammansori@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

هدف: خشکی و شوری از مهم ترین عوامل محیطی هستند که عملکرد گیاهان زراعی را تحت تأثیر قرار داده و موجب کاهش تولیدات کشاورزی در جهان می شوند. دان سیاه (*Guizotia abyssinica*) گیاهی روغنی-علوفه ای از خانواده کاسنی است که به دلیل دوره رشد کوتاه، ترکیب منحصربه فرد اسیدهای چرب و مقاومت نسبی به تنش های محیطی مورد توجه قرار گرفته است. این پژوهش با هدف بررسی پاسخ های اکوفیزیولوژیک جوانه زنی دان سیاه تحت تنش خشکی و شوری انجام شد.

روش پژوهش: آزمایش ها در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی اجرا گردید. در آزمایش اول، تنش خشکی توسط پلی اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ (PEG-6000) در شش سطح پتانسیل اسمزی (صفر (شاهد)، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱- مگاپاسکال) اعمال شد. در آزمایش دوم، تنش شوری با کلرید سدیم (NaCl) در پنج سطح (صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی مولار) بررسی گردید. صفات اندازه گیری شده شامل حداکثر درصد جوانه زنی (G_{max})، سرعت شروع جوانه زنی (R_{10}) و سرعت رسیدن به ۵۰ درصد جوانه زنی (R_{50}) بود.

یافته ها: در تنش خشکی، بیش ترین درصد جوانه زنی با میانگین ۹۵ درصد در سطح ۰/۲- مگاپاسکال و کم ترین با میانگین ۶ درصد در ۱- مگاپاسکال به دست آمد. سرعت شروع جوانه زنی (R_{10}) در شاهد ۶/۵ بذر در روز بود که در ۱- مگاپاسکال به ۰/۴ بذر کاهش یافت. بیش ترین R_{50} در شاهد با میانگین ۱/۳ بذر در روز و کم ترین در ۱- مگاپاسکال با صفر بذر مشاهده شد. در تنش شوری نیز درصد جوانه زنی به طور معنی دار کاهش یافت؛ بیش ترین مقدار در شاهد با ۹۸ درصد و کم ترین در ۲۰۰ میلی مولار با ۵۸ درصد ثبت گردید. مقدار R_{10} از ۸/۱ بذر در روز در شاهد به ۰/۴۴ در ۲۰۰ میلی مولار کاهش یافت. هم چنین R_{50} در شاهد ۱/۶۲ بذر در روز بود که در ۲۰۰ میلی مولار به ۰/۰۹ رسید.

نتیجه گیری: نتایج نشان داد دان سیاه در مراحل اولیه رشد نسبت به تنش های خشکی و شوری، به ویژه در سطوح شدید، حساس است. با این حال، در سطوح پایین تا متوسط، درصد و سرعت جوانه زنی کاهش چشم گیری نداشت. بنابراین می توان این گیاه را گزینه ای مناسب برای کشت در مناطق با تنش ملایم خشکی یا خاک های نسبتاً شور دانست.

کلیدواژه ها:

پتانسیل اسمزی

تنش غیرزیستی

گیاه دارویی

شاخص های جوانه زنی

استناد: قاسمی، ثریا؛ اکبری، غلامعباس؛ سلطانی، الیاس و منصوری، مریم (۱۴۰۴). بررسی پاسخ های اکوفیزیولوژیک جوانه زنی گیاه دان سیاه (*Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass) به تنش های خشکی و شوری. به زراعی کشاورزی، ۲۷ (۴)، ۷۵۶-۷۳۷.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.397782.2940>



۱. مقدمه

تأمین امنیت غذایی به عنوان یکی از ارکان اصلی توسعه پایدار، نقشی بنیادین در ارتقای سلامت عمومی، کاهش فقر، و افزایش تاب آوری جوامع در برابر بحران های اقتصادی و اقلیمی ایفا می کند. در این میان، دانه های روغنی به دلیل دارا بودن ارزش غذایی بالا و سهم قابل توجه در تأمین انرژی مورد نیاز بدن، پس از غلات در رتبه دوم اهمیت غذایی قرار دارند و نقش کلیدی در سبد تغذیه ای انسان دارند (پاندا^۱ و همکاران، ۲۰۲۵). این گیاهان با دارا بودن اسیدهای چرب ضروری مانند اسیدلینولئیک و اسیداولئیک، علاوه بر تأمین کالری، در حفظ سلامت قلبی عروقی، عملکرد ایمنی و توسعه بافت های بدن نیز مؤثر می باشند (سیفو^۲ و همکاران، ۲۰۲۴). با این حال، در بسیاری از کشورها از جمله ایران، تولید داخلی دانه های روغنی پاسخگوی نیاز مصرفی جامعه نیست و بخش عمده ای از این نیاز از طریق واردات تأمین می گردد. این وابستگی بالا، کشور را در معرض نوسانات بازار جهانی، بحران های ژئوپلیتیکی و تهدیدات امنیت غذایی قرار داده است. از این رو، افزایش سطح زیرکشت، بهبود عملکرد در واحد سطح، شناسایی و توسعه گیاهان روغنی سازگار با شرایط اقلیمی کشور، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک ضرورتی اجتناب ناپذیر است (دوازده امامی و همکاران، ۱۴۰۱). از طرفی دیگر در دهه های اخیر، گسترش پدیده های زیست محیطی نظیر خشکی و شوری خاک، به واسطه تغییرات اقلیمی، بهره برداری بی رویه از منابع آبی، و افزایش تبخیر-تعرق، به تهدیدی جدی برای تولید پایدار محصولات کشاورزی تبدیل شده است (چمبر^۳ و همکاران، ۲۰۲۲). تنش خشکی از طریق کاهش دسترسی گیاه به آب، اختلال در تعادل آبی سلول ها، کاهش فتوسنتز و تسریع پیری برگ ها، سبب کاهش عملکرد می گردد (پاندا و همکاران، ۲۰۲۵). از سوی دیگر، شوری نیز با افزایش غلظت یون های سمی نظیر سدیم و کلر، کاهش جذب عناصر ضروری مانند پتاسیم، کلسیم و نیتروژن و ایجاد تنش اسمزی، ساختارهای فیزیولوژیکی گیاه را تحت تأثیر قرار می دهد (پاندا و همکاران، ۲۰۲۵). اثرات هم افزای خشکی و شوری می تواند منجر به تشدید اختلالات متابولیک، افزایش گونه های فعال اکسیژن، آسیب به غشاهای سلولی و در نهایت مرگ سلولی برنامه ریزی شده شود (بدلزاده^۴ و همکاران، ۲۰۲۱). این تنش ها به ویژه در مراحل حساس رشدی نظیر جوانه زنی که پایه گذار رشد مطلوب و استقرار گیاه در مزرعه است، تأثیرات عمیق تری دارند. در شرایط تنش، کاهش پتانسیل اسمزی خاک مانع از جذب آب توسط بذر می شود، فرایندهای آنزیمی فعال در جوانه زنی را مختل کرده و درصد، سرعت و یکنواختی سبز شدن را کاهش می دهد که این موضوع در نهایت منجر به کاهش تراکم بوته، ضعف در رشد اولیه و کاهش عملکرد نهایی می شود (گویال^۵ و همکاران، ۲۰۲۲).

در چنین شرایطی، شناسایی گیاهان روغنی مقاوم به خشکی و شوری، به عنوان بخشی از راهبردهای مقابله با تنش های غیرزیستی، از اهمیت بالایی برخوردار است. دان سیاه^۶ گیاهی یک ساله از تیره کاسنیان (Asteraceae) و بومی نواحی مرتفع شرق آفریقا، به ویژه اتیوپی، اریتره و بخش هایی از هند است. این گیاه بیش تر به منظور تولید دانه های روغنی کشت می شود و دانه های آن حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد روغن خوراکی سبک با کیفیت بالا، به ویژه غنی از اسیدلینولئیک تولید می کنند. دان سیاه به دلیل توانایی رشد در خاک های فقیر و شرایط نامساعد محیطی، به ویژه خشکی، مورد توجه نظام های کشاورزی پایدار در برخی کشورهای آسیایی و آفریقایی قرار گرفته است (سیفو و همکاران، ۲۰۲۴). اگرچه این گونه به طور طبیعی در ایران نمی روید، اما در سال های اخیر به عنوان گیاهی روغنی مقاوم به تنش های غیرزیستی، نظیر

1. Panda
2. Seifu
3. Chambhare
4. Badalzadeh
5. Goyal
6. *Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass

شوری و خشکی، در پژوهش‌ها و آزمایش‌های کشاورزی موردبررسی قرار گرفته است. سرعت رشد مناسب، عملکرد نسبی قابل قبول و نیاز پایین به نهاده‌ها از جمله ویژگی‌هایی هستند که دان‌سیاه را به گزینه‌ای بالقوه برای توسعه کشت در اراضی کم‌بازده تبدیل کرده‌اند (دوازده‌امامی و واثقی، ۱۳۹۸). این گیاه همچنین به دلیل سازگاری بالا با شرایط اقلیمی گرم و خشک، قابلیت کشت در اراضی با حاصلخیزی پایین و مقاومت نسبی به تنش‌های محیطی، موردتوجه پژوهش‌گران و برنامه‌ریزان کشاورزی قرار گرفته است (تسما^۱ و همکاران، ۲۰۲۵).

دانه‌های این گیاه دارای درصد بالایی از روغن، به‌ویژه اسیدلینولئیک هستند که ارزش غذایی و صنعتی قابل‌توجهی دارد و به دلیل مصرف داخلی و صادرات در سال‌های اخیر موردتوجه کشاورزان به‌ویژه در استان اصفهان قرار گرفته و سطح زیر کشت آن افزایش یافته است (حسینی و همکاران، ۱۳۹۷). دان‌سیاه نسبت به دیگر گیاهان روغنی آفات و بیماری‌های کم‌تری دارد و از پایداری بالایی برخوردار است. این گیاه علاوه بر مصارف خوراکی، در صنایع رنگ‌سازی، صابون‌سازی، روغن‌کاری و عطرسازی نیز کاربرد دارد (سیفو و همکاران، ۲۰۲۴). پژوهش‌های صورت‌گرفته نشان داده‌اند که دان‌سیاه در مواجهه با تنش اسمزی، با بهره‌گیری از مکانیسم‌هایی همچون تنظیم اسمزی از طریق تجمع ترکیبات محلول سازگار مانند پرولین، تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی برای مهار رادیکال‌های آزاد و حفظ تعادل یونی در سلول‌ها، توانایی حفظ جوانه‌زنی و رشد گیاهچه را داراست. این ویژگی‌ها دان‌سیاه را به گزینه‌ای مناسب برای کشت در مناطقی با محدودیت منابع آبی تبدیل کرده است (چمبر و همکاران، ۲۰۲۲).

باتوجه به روند افزایشی خشکی و شوری در اراضی کشاورزی کشور و کاهش کیفیت منابع آبی، بررسی عملکرد فیزیولوژیکی و زراعی گیاهان روغنی مقاوم، به‌ویژه در مراحل ابتدایی رشد، از جمله راهبردهای مؤثر در توسعه نظام‌های کشاورزی پایدار به‌شمار می‌آید. پژوهش در زمینه بررسی پاسخ‌های جوانه‌زنی دان‌سیاه به تنش‌های خشکی و شوری، ضمن ارائه اطلاعات ارزشمند درباره سازوکارهای تطبیقی این گیاه، می‌تواند زمینه‌ساز شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم، بهینه‌سازی مدیریت زراعی و بهره‌برداری از پتانسیل این گیاه در مناطق کم‌بازده کشور باشد. در مجموع، آینده تولید دانه‌های روغنی در کشور در گرو شناسایی و معرفی گونه‌ها و ژنوتیپ‌های سازگار، بهره‌گیری از دانش فیزیولوژی گیاهی، و تلفیق آن با اصول مدیریت پایدار منابع است.

۲. پیشینه پژوهش

۲.۱. پیشینه نظری

مرحله جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاه از مهم‌ترین و حساس‌ترین مراحل زیستی در چرخه زندگی گیاهان است که نقش تعیین‌کننده‌ای در تثبیت و موفقیت گیاه در مراحل بعدی رشد دارد. در این مرحله، عوامل محیطی نظیر دسترسی به آب، شرایط حرارتی، کیفیت بستر رشد و حضور عوامل تنش‌زا مانند خشکی و شوری تأثیر بسیار چشم‌گیری بر کیفیت و سرعت جوانه‌زنی و توسعه اولیه گیاه دارند (زهرا^۲ و همکاران، ۲۰۲۴). خشکی که ناشی از کاهش مقدار آب قابل‌استفاده در خاک است، یکی از اصلی‌ترین محدودکننده‌های رشد گیاه در مرحله جوانه‌زنی محسوب می‌شود. کاهش دسترسی به آب باعث می‌شود بذرها نتوانند به اندازه کافی آب جذب کنند که این امر فرایندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی لازم برای شکستن حالت خواب بذر را مختل می‌سازد (صدیقی^۳ و همکاران، ۲۰۲۵). به‌دنبال این شرایط، مدت زمان لازم

1. Tesema
2. Zahra
3. Siddiqi

برای شروع جوانه زنی افزایش می یابد، درصد جوانه زنی کاهش پیدا می کند و یکنواختی جوانه زنی نیز به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. این اختلالات بر تمام جوانه های بذر اثر گذاشته و منجر به رشد غیریک دست و ضعیف ریشه و ساقه می شود. کاهش طول ریشه و ساقه در این مرحله سبب می شود که گیاه نتواند به منابع آب عمیق تر در خاک دسترسی پیدا کند و در نتیجه مقاومت آن به تنش های خشکی افزایش نیابد (چمبر و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین خشکی منجر به افزایش تولید رادیکال های آزاد و گونه های اکسیژن فعال می شود که به ساختارهای سلولی آسیب وارد کرده و در صورت عدم مقابله مناسب، می تواند باعث مرگ سلولی شود (گویال و همکاران، ۲۰۲۲). تنش شوری یکی دیگر از چالش های مهم در مرحله جوانه زنی است که عملکرد گیاه را تحت تأثیر قرار می دهد. وجود نمک های محلول در خاک باعث افزایش فشار اسمزی محیط اطراف بذر می شود و فرایند جذب آب توسط بذر را به شدت محدود می کند (زهر و همکاران، ۲۰۲۴). علاوه بر فشار اسمزی، یون های سدیم و کلر می توانند اثرات سمی مستقیم روی بافت های سلولی داشته باشند، موجب اختلال در تعادل یونی و متابولیسم سلولی شده و به طور خاص رشد ریشه و ساقه را مختل کنند. این تأثیرات منجر به کاهش درصد جوانه زنی، کاهش سرعت جوانه زنی و کاهش یکنواختی جوانه زنی می شوند (بدل زاده و همکاران، ۲۰۲۱). معمولاً کاهش وزن خشک و طول اندام های اولیه مانند ریشه و ساقه نیز به عنوان شاخص های مهم کاهش عملکرد در شرایط شوری گزارش شده است (صدیقی و همکاران، ۲۰۲۵).

برخی پژوهش ها نشان داده اند که شدت تنش نقش تعیین کننده ای در میزان تأثیرگذاری آن بر جوانه زنی و رشد اولیه دارد، به طوری که با افزایش شدت خشکی و شوری، درصد جوانه زنی کاهش یافته و مدت زمان لازم برای جوانه زنی افزایش می یابد. علاوه بر این، صفات رشدی مانند طول ریشه و ساقه، وزن خشک اندام های اولیه و درصد سبزشدگی نیز به طور قابل توجهی کاهش می یابند. در بسیاری از موارد، حتی پس از شروع جوانه زنی، رشد اولیه گیاه تحت تأثیر تنش ها کنده شده و توسعه اندام های اصلی به تأخیر می افتد. این وضعیت، زادآوری و بقای گیاه را در مراحل بعدی به شدت تحت تأثیر قرار می دهد (چمبر و همکاران، ۲۰۲۲).

مطالعاتی که روی گیاهچه های دهروزهی دان سیاه انجام شد، نشان داد که خشکی به سرعت منجر به افزایش مارکرهای استرس اکسیداتیو نظیر پراکسید هیدروژن، مالون دی آلدئید و پرولین گردید. به موازات آن، کاهش غلظت گلوتاتیون و آسکوربات- دو آنتی اکسیدان کلیدی غیرآنزیمی- مشاهده شد. در همین حال، سطح فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی نظیر پراکسیدازها و گلوتاتیون ردوکتاز و همچنین برخی آنزیم های متابولیکی نظیر آمیلاز و اسید فسفاتاز به طور متوسط افزایش یافت که نشان دهنده تلاش گیاه برای کاهش آسیب های ناشی از تنش اکسیداتیو است (کاویا^۱ و همکاران، ۲۰۱۷).

از آنجاکه جوانه زنی موفق و رشد اولیه قوی از ارکان حیاتی برای تثبیت و افزایش عملکرد گیاه دان سیاه به شمار می آید (تسما و همکاران، ۲۰۲۵). بررسی دقیق و شناسایی صفات مرتبط با مقاومت به تنش های خشکی و شوری در این مرحله می تواند در انتخاب ارقام مقاوم و توسعه راه کارهای کشاورزی مؤثر باشد. این امر می تواند کمک شایانی به کاهش وابستگی به واردات روغن های نباتی و افزایش خودکفایی در تولید دانه های روغنی کشور نماید، به ویژه در مناطقی که محدودیت های آبی و خاک های شور، موانع اصلی توسعه کشاورزی به شمار می آیند. در نهایت، توجه به مطالعات جامع و ارزیابی های چندجانبه از جوانه زنی و رشد اولیه دان سیاه تحت شرایط تنش، می تواند چارچوب علمی محکمی برای توسعه کشت این گیاه در شرایط دشوار اقلیمی فراهم آورد. چنین پژوهش هایی نه تنها به درک بهتر پاسخ های اکوفیزیولوژیک این گیاه کمک می کنند، بلکه راهنمایی برای اجرای برنامه های اصلاح نژاد و مدیریت کشاورزی هدفمند در مناطق خشک و شور خواهند بود.

۲.۲. پیشینه تجربی

حساسیت گیاهان زراعی و زینتی به تنش‌های محیطی، به‌ویژه شوری و خشکی، به‌طور قابل‌توجهی به مرحله فنولوژیک رشد آن‌ها وابسته است و مراحل جوانه‌زنی و گل‌دهی، حساس‌ترین مراحل چرخه زیستی گیاه نسبت به تنش شوری محسوب می‌شوند (لوو^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). از میان شاخص‌های مرتبط با جوانه‌زنی، درصد و سرعت جوانه‌زنی بیش‌ترین حساسیت را در شرایط تنش از خود نشان می‌دهند و از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در ارزیابی تحمل گیاهان به تنش‌های محیطی به‌شمار می‌آیند، به‌طوری‌که تنش اسمزی ناشی از خشکی و شوری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تنش‌زای محیطی، تأثیرات قابل‌توجهی بر رشد و فیزیولوژی گیاه‌دان‌سیاه دارد (تسما و همکاران، ۲۰۲۵).

از طرفی گزارش شده است که گیاه‌دان‌سیاه دارای سیستم ریشه‌ای عمیق و توسعه‌یافته‌ای است که آن را به گیاهی نسبتاً مقاوم در برابر خشکی، به‌ویژه در خاک‌های عمیق مناطق دیم خشک، تبدیل می‌نماید (سیفو و همکاران، ۲۰۲۴). این ویژگی ریشه‌ای موجب بهبود دسترسی به منابع آب زیرسطحی و افزایش کارایی جذب آب در شرایط بحرانی می‌شود. نتایج حاصل از مقایسه دو رقم‌دان‌سیاه با درجات مختلف تحمل به خشکی نشان داد که تنش خشکی منجر به کاهش نرخ رشد نسبی و محتوای نسبی آب برگ در هر دو رقم می‌شود. در مقابل، تجمع اسمولیت‌های سازگار مانند گلیسین بتائین، قندهای محلول، مالون‌دی‌آلدهید^۲، و افزایش فعالیت آنزیم‌های دفاعی نظیر سوپراکسید دیسموتاز^۳، آسکوربات پراکسیداز^۴ و کاتالاز^۵ در هر دو رقم مشاهده شد، با این تفاوت که رقم متحمل سطح بالاتری از α -توکوفرول را حفظ کرد و آسیب اکسیداتیو کم‌تری را متحمل گردید. این رقم هم‌چنین با کاهش پراکسیداسیون لیپیدها، تجمع بیش‌تر ترکیبات سازگار با تنش و افزایش فعالیت آنزیم‌های دفاعی، کارایی بهتری در مواجهه با خشکی از خود نشان داد (پاندا و همکاران، ۲۰۲۵).

هم‌چنین به‌منظور ارزیابی تأثیر هیدروپرایمینگ و تنش شوری بر شاخص‌های جوانه‌زنی گیاه‌دان‌سیاه، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در آزمایشگاه تحقیقات بذر دانشگاه شهرکرد اجرا شد. تیمارهای شوری در پنج سطح شامل صفر، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم (NaCl) و تیمارهای هیدروپرایمینگ در دو سطح شامل شاهد (عدم پرایمینگ) و هیدروپرایمینگ شش ساعته با آب مقطر اعمال گردید. نتایج نشان داد که اثرات اصلی هیدروپرایمینگ با آب مقطر و تنش شوری بر تمامی صفات مورد بررسی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. با این‌حال، اثر متقابل هیدروپرایمینگ و شوری تنها بر میانگین زمان جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه و ضریب آلومتریک معنی‌دار بود. در شرایط پرایمینگ، درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و میانگین زمان جوانه‌زنی نسبت به شرایط شاهد (بدون پرایمینگ) به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. هم‌چنین با افزایش سطح شوری، درصد جوانه‌زنی، زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی، میانگین زمان جوانه‌زنی و انرژی جوانه‌زنی کاهش معنی‌داری را نشان دادند. در مقابل، هیدروپرایمینگ تأثیر مثبتی بر ضریب آلومتریک (نسبت طول ساقه‌چه به طول ریشه‌چه به‌عنوان شاخصی از الگوی رشد اولیه گیاهچه) داشت و مقدار آن را نسبت به شرایط بدون پرایمینگ بهبود بخشید. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه هیدروپرایمینگ در برخی شاخص‌های جوانه‌زنی باعث کاهش عملکرد شد، اما در بهبود برخی شاخص‌های مورفولوژیک مانند ضریب آلومتریک نقش مثبتی ایفا کرد و می‌تواند در مدیریت شرایط تنش شوری موردتوجه قرار گیرد (بدلزاده و همکاران، ۲۰۲۱). در یک پژوهش با هدف بررسی تأثیر تیمار اسموزپرایمینگ با

1. Luo
2. Malondialdehyde
3. Superoxide dismutase
4. Ascorbate peroxidase
5. Catalase

کلریدپتاسیم بر جوانه زنی بذرهای اسطوخودوس پروانه‌ای^۱ تحت تنش شوری و کم‌آبی، بذرهای این گونه گیاهی با غلظت‌های مختلف KCl (شامل ۱، ۲ و ۴ درصد) تیمار شدند و سپس در معرض سطوح مختلفی از شوری (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار NaCl) و پتانسیل‌های آبی مختلف (صفر، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱/۰- مگاپاسکال با استفاده از پلی‌اتیلن گلیکول) قرار گرفتند. بذرهای شاهد بدون تیمار اولیه دارای درصد جوانه زنی نسبتاً بالایی (حدود ۹۰ درصد) بودند و خواب بذری اندکی نشان دادند. نتایج نشان داد که افزایش شوری و کاهش پتانسیل آب به‌طور معنی‌داری منجر به کاهش درصد و سرعت جوانه زنی می‌شود و در شرایط تنش شدید (اعم از شوری بالا یا تنش شدید رطوبتی)، تیمار بذر با KCl به‌ویژه در غلظت ۴ درصد، باعث بهبود جوانه زنی شد. در این شرایط، تیمار پرایمینگ با KCl موجب کاهش θH در مدل هیدروتایم^۲ شد که نشان‌دهنده افزایش سرعت جوانه زنی است (بنادجود^۳ و همکاران، ۲۰۲۲).

در مطالعه‌ای دیگر، شریفی (۱۳۹۵) با هدف تعیین دماهای کاردینال و تأثیر دما بر شاخص‌های جوانه زنی بذر گیاه دان سیاه، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با هشت سطح دمایی (پنج تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد) انجام داد. نتایج حاصل از مدل رگرسیون خطی دو تکه‌ای نشان داد که دماهای پایه، مطلوب و حداکثر برای جوانه زنی به‌ترتیب برابر با ۲۵، ۳۹ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد است. بیشینه سرعت جوانه زنی در بازه دمایی ۲۲ تا ۲۶ درجه سانتی‌گراد و بیشینه طول و وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه به‌ترتیب در دماهای ۲۲ و ۱۳ تا ۲۲ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد. همچنین، بالاترین یکنواختی جوانه زنی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد.

۳. روش‌شناسی پژوهش

۳.۱. زمان اجرا و طرح آزمایش

پژوهش حاضر در سال ۱۴۰۲ به‌منظور بررسی پاسخ‌های اکوفیزیولوژیک جوانه زنی گیاه دان سیاه به تنش‌های خشکی و شوری، در دو بخش گلخانه‌ای و آزمایشگاهی در دانشکده فناوری کشاورزی (پردیس ابوریحان) دانشگاه تهران، واقع در شهرستان پاکدشت، به‌اجرا درآمد. بخش گلخانه‌ای با هدف ایجاد شرایط محیطی کنترل‌شده برای القای دقیق تنش‌های غیرزیستی و بخش آزمایشگاهی با تمرکز بر ثبت ویژگی‌های جوانه زنی و تحلیل فیزیولوژیک بذرها مورد بهره‌برداری قرار گرفت.

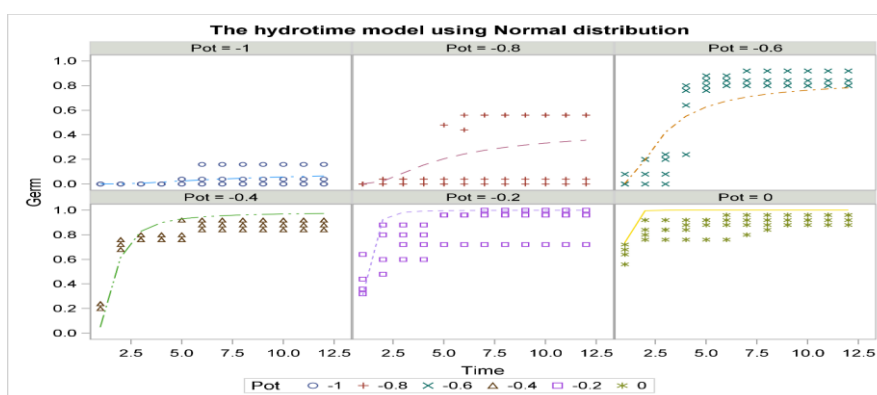
۳.۱.۱. بررسی اثر تنش خشکی بر جوانه زنی دان سیاه

برای بررسی تأثیر تنش خشکی، آزمایشی به‌صورت مستقل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار طراحی شد. جهت شبیه‌سازی سطوح مختلف تنش آبی، از ماده اسموتیکی پلی‌اتیلن گلیکول با وزن مولکولی ۶۰۰۰ (PEG 6000) استفاده شد. این ترکیب به‌دلیل وزن مولکولی بالا و عدم جذب توسط بافت‌های گیاهی، موجب کاهش پتانسیل آب محیط بدون ایجاد سمیت شیمیایی مستقیم می‌گردد. سطوح پتانسیل اسمزی شامل صفر (شاهد)، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸- و ۱- مگاپاسکال بود. به‌منظور تهیه محلول‌های موردنظر، از ارتباط بین غلظت PEG، دما و پتانسیل آب به‌صورت کمی استفاده شد. تمامی محلول‌ها براساس دمای ثابت ۲۰ درجه سانتی‌گراد آماده‌سازی شدند.

در هر تکرار، تعداد ۲۵ عدد بذر سالم و هم‌اندازه پس از ضدعفونی سطحی با محلول هیپوکلریت سدیم ۱ درصد

به مدت ۵ دقیقه و شست‌وشوی کامل با آب مقطر، بر روی کاغذ صافی واتمن (شماره ۱) درون پتری‌دیش‌های استریل به قطر ۸ سانتی‌متر قرار داده شدند. سپس، به هر پتری‌دیش مقدار مشخصی از محلول پلی‌اتیلن‌گلیکول با وزن مولکولی ۶۰۰۰ مطابق با تیمار مربوطه اضافه گردید. پتری‌ها در ژرمیناتور با دمای ثابت ۲۰ درجه سانتی‌گراد و در شرایط تاریکی کامل قرار گرفتند تا اثر نور در فرایند جوانه‌زنی حذف گردد و تأثیر خالص پتانسیل آب بررسی شود. جهت جلوگیری از خشکی محیط کشت، در صورت نیاز، محلول تیماری به‌صورت روزانه به‌روزرسانی می‌شد. فرایند شمارش بذرهای جوانه‌زده به‌صورت روزانه و در ساعت مشخصی انجام گرفت. بذرهای زمانی جوانه‌زده تلقی می‌شدند که طول ریشه‌چه آن‌ها حداقل به ۲ میلی‌متر رسیده باشد. این شمارش تا زمانی ادامه یافت که طی سه روز متوالی هیچ جوانه‌زنی جدیدی مشاهده نشود و منحنی جوانه‌زنی به حالت اشباع برسد.

پس از جمع‌آوری داده‌ها، برای تحلیل پاسخ جوانه‌زنی به سطوح مختلف تنش خشکی، از مدل هیدروتایم استفاده گردید (شکل ۱). این مدل یکی از ابزارهای کمی و فیزیولوژیک برای تحلیل رفتار جوانه‌زنی بذرهای تحت شرایط محدودکننده رطوبت است (بردفورد^۱، ۲۰۰۲) براساس این مدل، جوانه‌زنی تابعی از پتانسیل آب محیط و زمان است و سه پارامتر اصلی از آن استخراج می‌گردد؛ θH (ثابت هیدروتایم بر حسب MPa.day)، Ψ_b (پتانسیل آب پایه برای ۵۰ درصد جوانه‌زنی)، و $\sigma \Psi_b$ (انحراف معیار پتانسیل آب پایه بین بذرهای). این پارامترها از طریق برازش غیرخطی معادلات مدل به داده‌های تجربی و با استفاده از روش حداکثر درست‌نمایی (MLE) و نرم‌افزارهای آماری تخصصی مانند R و SigmaPlot محاسبه شدند. این تحلیل‌ها امکان ارزیابی دقیق حساسیت فیزیولوژیک بذرهای دان‌سیاه نسبت به کاهش پتانسیل آب و توان بالقوه جوانه‌زنی آن‌ها در شرایط تنش خشکی را فراهم ساخت.



شکل ۱. مدل هیدروتایم استفاده‌شده (بنادجودو همکاران، ۲۰۲۲)

۳.۱.۲. بررسی اثر تنش شوری بر جوانه‌زنی

در ادامه این پژوهش و به‌منظور بررسی دقیق پاسخ‌های اکوفیزیولوژیک جوانه‌زنی گیاه به تنش شوری، آزمایشی مستقل در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی طراحی و اجرا گردید. این آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با پنج سطح تیماری و چهار تکرار انجام گرفت. سطوح مختلف شوری شامل صفر (شاهد)، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم (NaCl) بود که به‌منظور اعمال تنش اسمزی در محیط جوانه‌زنی مورد استفاده قرار گرفت. برای تیمار شاهد از آب مقطر استفاده شد تا از عدم وجود تنش یونی در این تیمار اطمینان حاصل گردد.

پس از انتخاب و یکنواخت سازی بذرها از نظر اندازه، رنگ، سلامت فیزیکی و عدم وجود علائم آلودگی یا آسیب، بذرها ابتدا با محلول هیپوکلریت سدیم ۱ درصد به مدت ۵ دقیقه ضد عفونی شدند و سپس چندین مرتبه با آب مقطر شسته شدند تا آثار باقی مانده از ماده ضد عفونی کننده کاملاً حذف گردد. در هر تکرار، تعداد ۲۵ عدد بذر به صورت یکنواخت بر روی کاغذ واتمن قرار داده شد. این کاغذها در داخل پتری دیش های استریل به قطر ۸ سانتی متر چیده شده و به هر کدام از آنها حجم مشخصی از محلول NaCl مطابق با سطح تنش مربوطه اضافه گردید (مونس^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). با هدف حفظ شرایط اسمزی ثابت در طول آزمایش، محلول ها به صورت روزانه تعویض و تازه سازی شدند.

پتری دیش ها درون ژرminatور در دمای ثابت ۲۰ درجه سانتی گراد و شرایط تاریکی مطلق قرار گرفتند تا از هرگونه تأثیر نور بر فرایند جوانه زنی جلوگیری شود. بررسی و شمارش بذرها ی جوانه زده به صورت روزانه و در ساعت مشخصی انجام شد. معیار جوانه زنی، ظهور ریشه چه به طول حداقل دو میلی متر در نظر گرفته شد. این روند تا زمانی ادامه یافت که طی سه روز متوالی هیچ گونه جوانه زنی جدیدی مشاهده نگردید و روند جوانه زنی به طور کامل متوقف شد. برای تحلیل پاسخ سرعت جوانه زنی به تنش شوری، از مدل خطی ساده شده رابطه (۱) استفاده شد:

$$R_{50} = ax + b \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه، متغیر R_{50} بیانگر عکس زمان لازم برای جوانه زنی ۵۰ درصد از بذرها (نرخ نسبی جوانه زنی) است. متغیر x نشان دهنده مقدار شوری بر حسب دسی زیمنس بر متر (dS/m) است. ضرایب a و b به ترتیب بیانگر شیب خط و عرض از مبدأ هستند، به گونه ای که b معرف سرعت اولیه جوانه زنی در شرایط بدون تنش (شوری صفر) بوده و $-a$ نرخ کاهش سرعت جوانه زنی به ازای هر واحد افزایش در شدت شوری را مشخص می کند. این مدل، رابطه خطی بین شدت تنش شوری و کاهش نسبی در نرخ جوانه زنی را تبیین می کند و امکان پیش بینی رفتار فیزیولوژیک بذر تحت سطوح مختلف شوری را فراهم می سازد (ال منصور^۲ و همکاران، ۲۰۲۱).

در انتها داده های حاصل از آزمایش نیز با استفاده از نرم افزار آماری SAS (نسخه ۹/۱) مورد تجزیه واریانس قرار گرفته و میانگین ها به وسیله آزمون حداقل تفاوت معنی دار^۳ (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند. برای رسم شکل ها از برنامه اکسل (نسخه ۲۰۱۳) استفاده گردید.

۴. یافته های پژوهش

۴.۱. نتایج حاصل از آزمایش اثر تنش خشکی بر مؤلفه های جوانه زنی

۴.۱.۱. حداکثر جوانه زنی

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده های مربوط به درصد جوانه زنی بذرها ی گیاه دان سیاه تحت شرایط مختلف تنش خشکی (مطابق جدول ۱) نشان داد که اثر اعمال پتانسیل های متفاوت اسمزی ناشی از پلی اتیلن گلیکول بر حداکثر درصد جوانه زنی^۴ در سطح آماری ۱ درصد معنی دار بوده است. این یافته بیانگر آن است که کاهش تدریجی پتانسیل آب محیط جوانه زنی تأثیری چشم گیر بر توان بذرها در آغاز فرایند جوانه زنی داشته و جوانه زنی به شدت تحت تأثیر سطوح مختلف خشکی قرار گرفته است. بررسی نتایج مقایسه میانگین سطوح مختلف تنش خشکی نشان داد که بیش ترین درصد جوانه زنی در سطح خشکی ۰/۲- مگاپاسکال با میانگین ۹۵ درصد مشاهده شد که از نظر آماری در بالاترین سطح

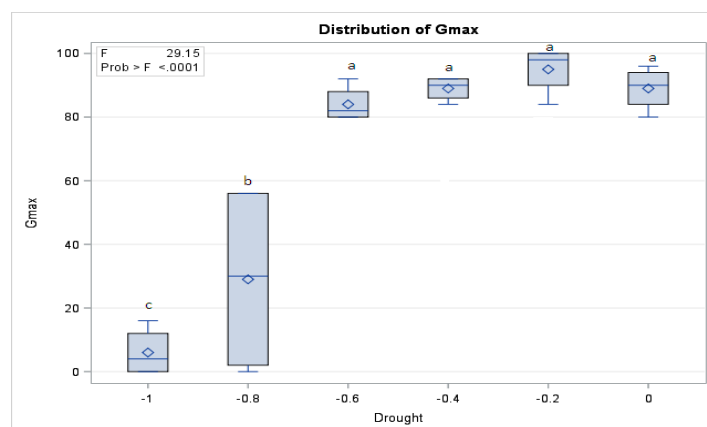
1. Munns
2. Almansouri
3. Least Significant Difference
4. Gmax

عملکرد قرار داشت (شکل ۲). این امر حاکی از آن است که در این سطح تنش ملایم، بذره‌های دان‌سیاه همچنان توانایی کامل برای جذب آب کافی جهت آغاز جوانه‌زنی را حفظ نموده‌اند. در مقابل، کم‌ترین درصد جوانه‌زنی در بالاترین شدت تنش، یعنی ۱- مگاپاسکال، مشاهده شد که تنها میانگین ۶ درصد جوانه‌زنی را نشان داد. این کاهش شدید در پاسخ به افزایش تنش اسمزی، نشانگر محدودیت شدید در جذب آب توسط بذرها و متعاقب آن، اختلال در فرایندهای متابولیکی حیاتی برای جوانه‌زنی است. علاوه بر این، نتایج حاکی از آن بود که بین سطوح صفر تا ۰/۶- مگاپاسکال تفاوت آماری معنی‌داری در مقدار بر حداکثر درصد جوانه‌زنی مشاهده نشد (شکل ۲). این موضوع نشان می‌دهد که تا سطح ۰/۶- مگاپاسکال، سیستم‌های فیزیولوژیک و تنظیمی بذرها قادرند تنش‌های ملایم تا متوسط خشکی را تحمل کرده و بدون افت معنی‌دار در درصد جوانه‌زنی، به‌طور مؤثر به مرحله رشد اولیه ورود پیدا کنند. اما عبور از این آستانه و ورود به تنش‌های شدیدتر نظیر ۰/۸- و به‌ویژه ۱- مگاپاسکال، منجر به افت شدید در نرخ جوانه‌زنی و بروز علائم آسیب فیزیولوژیک می‌شود. به‌طور کلی، این نتایج بیانگر آن است که دان‌سیاه از سطحی از تحمل نسبت به تنش خشکی برخوردار است و در محدوده‌ای از پتانسیل‌های اسمزی، توانایی حفظ درصد جوانه‌زنی بالا را دارد، اما تحت شرایط خشکی شدید، ظرفیت فیزیولوژیک بذرها برای جذب آب و شروع فرایند جوانه‌زنی به‌شدت محدود می‌شود. این یافته‌ها می‌توانند مبنای مهمی برای انتخاب شرایط کشت و برنامه‌ریزی آبیاری اولیه در مناطق خشک یا با منابع آب محدود قرار گیرند.

جدول ۱. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) مؤلفه‌های جوانه‌زنی دان‌سیاه تحت تیمارهای خشکی

منابع تغییرات	درجه آزادی	Gmax	R10	R50
سطوح خشکی (A)	۵	۲/۱۵**	۲/۵۳**	۰/۲۴**
خطای آزمایشی (E)	۱۸	۰/۳۲	۰/۰۲	۰/۰۰۳
ضریب تغییرات (درصد)	-	۱۳/۹۹	۱۰/۲۷	۶/۰۴

*, ** و *** به ترتیب معنی‌داری در سطح ۵ و ۱ درصد و عدم معنی‌داری می‌باشد.



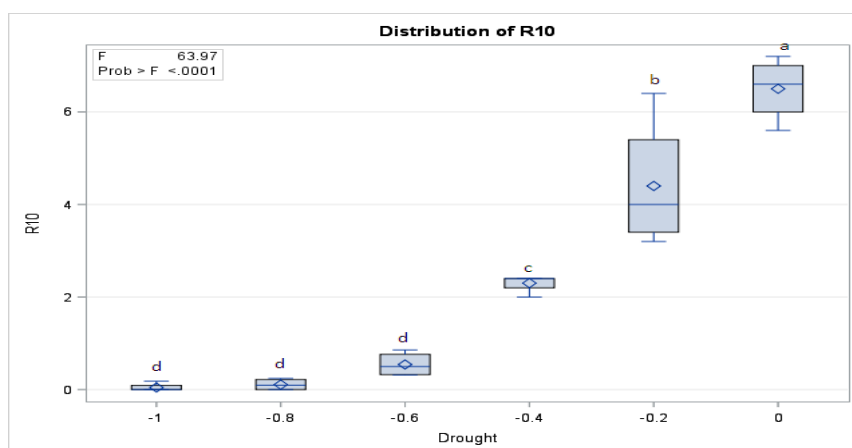
شکل ۲. مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف خشکی بر حداکثر جوانه‌زنی (Gmax) دان‌سیاه.

(میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.)

۴.۱.۲. سرعت شروع جوانه‌زنی

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌های مربوط به مؤلفه سرعت شروع جوانه‌زنی (R₁₀) در آزمایش تنش خشکی نشان داد که تیمارهای مختلف تنش به‌طور معنی‌داری بر این شاخص تأثیرگذار بودند، به‌گونه‌ای که اثر سطوح متفاوت پتانسیل

آب بر مقدار R_{10} در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار شد (جدول ۱). مقایسه میانگین داده های مربوط به تیمارهای تنش خشکی نشان داد که بیشترین سرعت آغاز جوانه زنی در تیمار شاهد (پتانسیل صفر مگاپاسکال) با میانگین ۶/۵ بذر در روز ثبت گردید. این مقدار نمایانگر بیشینه توان بذرها در آغاز فرایند جوانه زنی در شرایط کاملاً مطلوب از نظر رطوبتی بود. در مقابل، پایینترین مقدار سرعت آغاز جوانه زنی در تیمار با پتانسیل -۱ مگاپاسکال مشاهده شد که در این شرایط، مقدار R_{10} به طور چشمگیری کاهش یافته و به میانگین ۰/۴ بذر در روز رسید (شکل ۳). این امر نشانگر افت شدید نرخ آغاز جوانه زنی در تنش شدید خشکی بود. همچنین بررسی روند تغییرات این شاخص در سطوح میانی تنش نشان داد که در تیمارهای خشکی با پتانسیل های ۰/۶، -۰/۸ و -۱ مگاپاسکال، تفاوت آماری معنی داری از نظر سرعت شروع جوانه زنی مشاهده نشد. به عبارت دیگر، کاهش سرعت آغاز جوانه زنی از سطح ۰/۶- به بعد به صورت یکنواخت و بدون تغییرات آماری قابل توجه تداوم یافت (شکل ۳). این نتیجه بیانگر رسیدن به آستانه بحرانی تنش در حدود ۰/۶- مگاپاسکال است که پس از آن، کاهش سرعت آغاز جوانه زنی به یک سطح پایین پایدار می رسد و تفاوت های بیش تر در شدت تنش، اثرات افزایشی محسوسی بر این مؤلفه اعمال نمی کند. این روند در شکل (۳) به صورت نمودار تغییرات سرعت شروع جوانه زنی در پاسخ به تنش های مختلف خشکی ترسیم شده است.

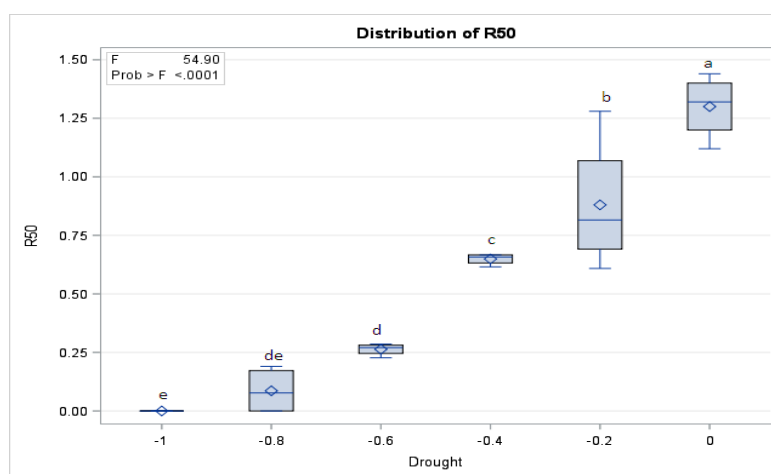


شکل ۳. مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف خشکی بر سرعت شروع جوانه زنی (R_{10}) دان سیاه.

(میانگین هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می باشند براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی داری ندارند.)

۳.۱.۴. سرعت رسیدن به ۵۰ درصد جوانه زنی

بررسی نتایج حاصل از تجزیه واریانس مؤلفه سرعت رسیدن به ۵۰ درصد جوانه زنی (R_{50}) در شرایط مختلف تنش خشکی نشان داد که این شاخص به طور معنی داری تحت تأثیر سطوح متفاوت خشکی قرار گرفته و تفاوت بین تیمارها در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۱). مطابق داده های حاصل، بیشترین میزان R_{50} در شرایط بدون تنش (صفر مگاپاسکال) با میانگین ۱/۳ بذر در روز به ثبت رسید که نشان دهنده سرعت بالای رسیدن بذرها به نقطه میانی جوانه زنی در شرایط مطلوب رطوبتی است. در مقابل، کمترین مقدار این شاخص در تیمار دارای پتانسیل آبی -۱ مگاپاسکال مشاهده شد، به طوری که میانگین R_{50} در این سطح از تنش برابر با صفر بذر در روز بود (شکل ۴). این موضوع بیانگر آن است که در شرایط تنش خشکی شدید، فرایند جوانه زنی نه تنها کند شده بلکه در بسیاری از بذور آغاز نشده یا متوقف شده است و بذرها عملاً قادر به رسیدن به مرحله ۵۰ درصد جوانه زنی نبوده اند.



شکل ۴. مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف خشکی بر سرعت تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی (R50) دان‌سیاه. میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

۲.۴. نتایج حاصل از آزمایش اثر تنش شوری بر مؤلفه‌های جوانه‌زنی

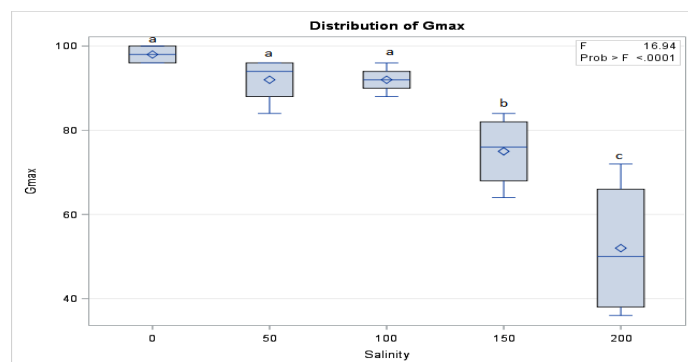
۲.۴.۱. حداکثر درصد جوانه‌زنی

نتایج حاصل از تجزیه واریانس مؤلفه‌های جوانه‌زنی (جدول ۲) نشان داد که سطوح مختلف شوری تأثیر معنی‌داری بر درصد حداکثر جوانه‌زنی دان‌سیاه داشته‌اند، به‌گونه‌ای که این اثر در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار تشخیص داده شد. براساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین تیمارها، مشخص شد که بیش‌ترین درصد جوانه‌زنی در شرایط عدم وجود تنش شوری (شوری صفر میلی‌مولار) با میانگین ۹۸ درصد حاصل گردید. این در حالی است که در شرایط تنش شدید شوری (۲۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم)، درصد جوانه‌زنی به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته و به کم‌ترین مقدار خود یعنی ۵۸ درصد رسید (شکل ۵). علاوه‌بر این، نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بین سطوح پایین‌تر شوری شامل تیمارهای صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری در مقدار درصد جوانه‌زنی مشاهده نشد (شکل ۵)، که این موضوع حاکی از آن است که گیاه دان‌سیاه تا حدی از تحمل به تنش شوری برخوردار بوده و قادر است در غلظت‌های پایین تا متوسط نمک، فرایند جوانه‌زنی را بدون اختلال محسوس ادامه دهد. با این حال، با افزایش بیش‌تر سطح شوری به مقادیر ۱۵۰ و به‌ویژه ۲۰۰ میلی‌مولار، توانایی بذرها در تکمیل موفقیت‌آمیز جوانه‌زنی به‌طور ملموسی کاهش یافته و این کاهش در سطح بالاتر شوری دارای اختلاف آماری معنی‌داری با سطوح پایین‌تر بود (شکل ۵). این یافته‌ها نشان‌دهنده اثر بازدارنده شوری بالا بر توان زیستی و فعالیت فیزیولوژیک بذرهای دانه‌سیاه در مرحله جوانه‌زنی می‌باشند.

جدول ۲. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) مؤلفه‌های جوانه‌زنی دان‌سیاه تحت تیمارهای شوری

منابع تغییرات	درجه آزادی	Gmax	R10	R50
سطوح شوری (A)	۴	۰/۳۱**	۲/۳**	۰/۳۴**
خطای آزمایشی (E)	۱۵	۰/۰۲	۲/۰۷	۰/۰۰۹
ضریب تغییرات (درصد)	—	۳/۶۶	۱۳/۱	۸/۸۳

*, ** و *** به‌ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و بدون اختلاف معنی‌داری می‌باشد.

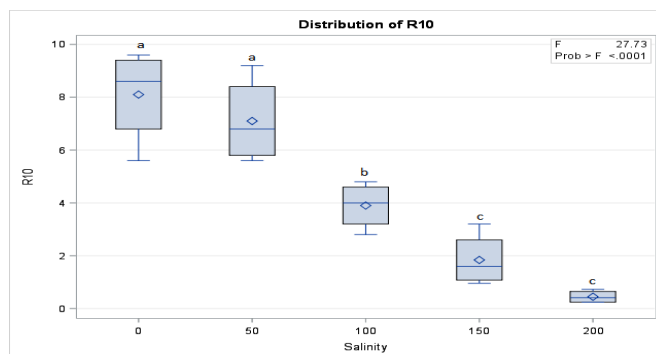


شکل ۵. مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف شوری بر حداکثر جوانه زنی (Gmax) دان سیاه. (میانگین هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می باشند براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی داری ندارند).

۲.۲.۴. سرعت شروع جوانه زنی

براساس نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۲)، اختلاف بین تیمارها از لحاظ آماری در سطح ۱ درصد معنی دار بود. یافته های حاصل از بررسی اثر سطوح مختلف تنش شوری بر سرعت شروع جوانه زنی دانه سیاه (R10) نشان داد که این صفت به طور معنی داری تحت تأثیر شوری قرار گرفت، به گونه ای که با افزایش غلظت کلرید سدیم در محیط، روند آغاز جوانه زنی به طور مشهودی کند شد. به طوری که بیشترین سرعت شروع جوانه زنی در تیمار شاهد (بدون شوری) با میانگین ۸/۱ بذر در روز به ثبت رسید، در حالی که کمترین سرعت مربوط به بالاترین سطح شوری (۲۰۰ میلی مولار) با میانگین ۰/۴۴ بذر در روز بود (شکل ۶).

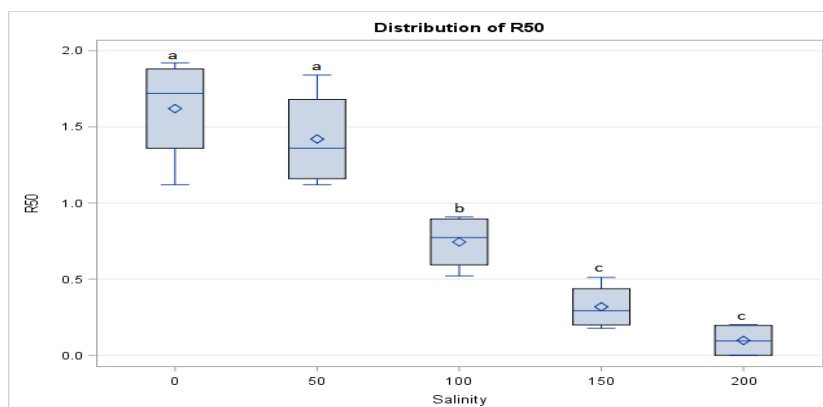
شایان ذکر است که در تیمارهای دارای شوری پایین (۵۰ میلی مولار)، کاهش محسوسی در سرعت شروع جوانه زنی نسبت به تیمار شاهد مشاهده نشد و تفاوت بین این دو تیمار از نظر آماری معنی دار نبود (شکل ۶). این امر نشان دهنده آن است که در غلظت های پایین کلرید سدیم، بذرها ی دان سیاه همچنان قادرند با موفقیت فرایندهای آغازین جوانه زنی را طی کرده و عملکرد طبیعی خود را حفظ کنند. اما در غلظت های بالاتر از ۱۰۰ میلی مولار، کاهش شدیدی در مقدار R10 مشاهده شد، به گونه ای که سرعت آغاز جوانه زنی به تدریج و به شکل چشم گیری کاهش یافت. این کاهش در شرایط شوری ۲۰۰ میلی مولار به کمترین حد خود رسید (شکل ۶). چنین روندی گویای آن است که با افزایش تنش شوری، فرایندهای فیزیولوژیکی وابسته به شروع جوانه زنی دچار اختلال شده و بذرها برای آغاز رشد، مدت زمان طولانی تری نیاز دارند، که در نهایت به کاهش سرعت کلی این مرحله منجر می گردد.



شکل ۶. مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف شوری بر سرعت شروع جوانه زنی (R10) دان سیاه. (میانگین هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می باشند براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی داری ندارند).

۳.۲.۴. سرعت رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی (R50)

بررسی نتایج به‌دست‌آمده از تأثیر سطوح مختلف تنش شوری بر سرعت رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی (R50) در بذرهاى دان‌سیاه نشان داد که این شاخص به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر میزان شوری محیط قرار گرفت (سطح احتمال ۱ درصد) (جدول ۲). به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار R50 در شرایط بدون تنش شوری (شاهد) و با میانگین ۱/۶۲ بذر در روز ثبت شد، درحالی‌که با افزایش شدت تنش شوری تا سطح ۲۰۰ میلی‌مولار کلریدسدیم، این شاخص به‌طور چشم‌گیری کاهش یافته و به حداقل مقدار خود یعنی ۰/۰۹ بذر در روز رسید (شکل ۷). نتایج مقایسه میانگین‌ها حاکی از آن است که بین تیمار شاهد و تیمار ۵۰ میلی‌مولار، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری در مقدار R50 مشاهده نشد (شکل ۷). این موضوع نشان‌دهنده آن است که سطوح پایین شوری هنوز تأثیر مخربی بر عملکرد بذر در رسیدن به نقطه ۵۰ درصد جوانه‌زنی نداشته‌اند و بذرها توانسته‌اند با موفقیت فرایند جوانه‌زنی را در زمان قابل‌قبول و مشابه با شرایط شاهد طی کنند. اما در سطوح بالاتر شوری، به‌ویژه در تیمارهای ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار، سرعت دستیابی به این نقطه به‌طور پیوسته کاهش یافته است که بیانگر اختلال تدریجی در روند طبیعی جوانه‌زنی تحت فشار اسمزی و اثرات سمی ناشی از تجمع یون‌های نمکی در محیط پیرامونی بذر می‌باشد. این الگو از تغییرات نشان می‌دهد که شاخص R50 می‌تواند به‌عنوان یک معیار حساس برای تشخیص میزان تحمل بذر به تنش شوری در مراحل اولیه رشد استفاده شود و دان‌سیاه در سطوح پایین‌تر شوری توانایی حفظ سرعت جوانه‌زنی مطلوب خود را دارد، اما با افزایش غلظت نمک در محیط، کارایی آن در انجام جوانه‌زنی به‌موقع کاهش می‌یابد.



شکل ۷. مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف شوری بر سرعت تا ۵۰ درصد جوانه زنی (R50) دان‌سیاه.

(میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.)

۵. بحث

تنش شدید خشکی منجر به ایجاد استرس اکسیداتیو، نشت یونی و آسیب به پروتئین‌ها و لیپیدهای غشایی می‌شود که درنهایت فرایند جوانه‌زنی را متوقف می‌کند. کاهش شدید درصد جوانه‌زنی در این شرایط، نتیجه‌ای طبیعی از آسیب سلولی، ناپایداری غشاها و ممانعت از فعالیت‌های بیوشیمیایی موردنیاز برای رشد ریشه‌چه است (شین^۱ و همکاران، ۲۰۲۱). بر این اساس در پژوهش حاضر نیز در سطوح تنش ملایم تا متوسط (تا حدود ۰/۶ مگاپاسکال)، به‌نظر می‌رسد بذرهاى دان‌سیاه با بهره‌گیری از مکانیسم‌های سازگاری همچون تجمع اسمولیت‌های آلی، توانسته‌اند تعادل اسمزی خود را تا

حدی حفظ کنند و با حفظ جذب آب، فرایند جوانه زنی را آغاز نمایند. این مکانیسم ها به بذرها کمک می کند تا فشار اسمزی داخلی خود را کاهش داده و همچنان قادر به جذب آب از محیط با پتانسیل پایین باشند (اوگاز^۱ و همکاران، ۲۰۲۲). در این حالت، فعالیت آنزیم هایی نظیر آلفا آمیلاز و آنزیم های مرتبط با متابولیسم انرژی همچنان در حد قابل قبولی حفظ می شود. اما در سطوح تنش شدیدتر (به ویژه ۱- مگاپاسکال)، کاهش شدید پتانسیل آب باعث اختلال جدی در مکانیسم جذب آب شده و حتی در صورت جذب محدود آب، ساختارهای غشایی، عملکرد آنزیم ها و تنظیم تعادل یونی دچار اختلال می گردد (سلیمان^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). مشاهده کاهش معنی دار درصد جوانه زنی بذرها گیاه دان سیاه در مواجهه با سطوح شدید تنش خشکی، به ویژه در پتانسیل های ۰/۸- و ۱- مگاپاسکال، را می توان بر مبنای اصول اکوفیزیولوژیکی مرتبط با جذب آب، فعالیت آنزیمی و تعادل اسمزی تبیین نمود. جوانه زنی بذرها فرایندی وابسته به جذب فعال آب و آغاز فعالیت های متابولیکی است. در شرایطی که پتانسیل آب محیط کاهش می یابد (نظیر حضور غلظت های بالای PEG 6000)، شیب پتانسیل آب بین بذر و محیط پیرامون کاهش یافته و حتی در موارد شدید معکوس می شود (زهر و همکاران، ۲۰۲۴)؛ در نتیجه توان بذر برای جذب آب مورد نیاز جهت آغاز جوانه زنی به شدت محدود می گردد. نکته حائز اهمیت دیگر آن است که بالاترین درصد جوانه زنی در تنش ۰/۲- مگاپاسکال مشاهده شد، نه در تیمار شاهد (صفر). این پدیده می تواند ناشی از پاسخ تحریکی بذر به تنش خفیف باشد. در برخی موارد، اعمال سطوح پایین تنش می تواند با فعال سازی مسیرهای دفاعی و تنظیم ژن های مرتبط با جوانه زنی، منجر به بهبود عملکرد نسبی گیاه گردد. این تحریک اولیه ممکن است بذر را برای مواجهه با شرایط محیطی واقعی (که معمولاً دارای نوسانات تنش هستند) آماده تر کند و جوانه زنی مؤثرتری رقم بزند (لوو و همکاران، ۲۰۲۰).

تأثیر معنی دار سطوح مختلف شوری بر درصد جوانه زنی دان سیاه را نیز می توان با استناد به ویژگی های فیزیولوژیک و محیطی مرتبط با تنش شوری در مرحله جوانه زنی تبیین نمود. یکی از مهم ترین مکانیسم هایی که در مواجهه با شوری، درصد جوانه زنی را تحت تأثیر قرار می دهد، کاهش پتانسیل اسمزی محیط بذر و در نتیجه اختلال در جذب آب توسط بذر است (بدلزاده و همکاران، ۲۰۲۱). در سطوح پایین شوری (تا ۱۰۰ میلی مولار) به نظر می رسد پتانسیل اسمزی بستر جوانه زنی هنوز آن قدر پایین نیامده است که مانعی جدی برای آب گیری بذرها و فعال شدن آنزیم های مرتبط با جوانه زنی ایجاد کند. به همین دلیل در این سطوح تفاوت معنی داری با تیمار شاهد مشاهده نشد. با این حال، با افزایش میزان شوری به سطوح بالاتر، به ویژه ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی مولار، کاهش پتانسیل آب محیط به حدی می رسد که ورود آب به داخل بذر را محدود کرده و از تورم سلولی اولیه جلوگیری می کند. این موضوع باعث می شود فرایندهای متابولیکی وابسته به آب نظیر فعال سازی آنزیم های هیدرولیتیک، تجزیه ذخایر مواد غذایی و توسعه محور جنینی مختل گردد. در چنین شرایطی یا بذرها قادر به جوانه زنی کامل نمی شوند، یا جوانه زنی آن ها به تأخیر می افتد و در نهایت درصد کمتری از آن ها توانایی عبور موفق از این مرحله را خواهند داشت (فنگ^۳ و همکاران، ۲۰۲۲). افزون بر این، تجمع یون های سدیم و کلر در محیط اطراف بذر در سطوح بالای شوری می تواند سمیت یونی ایجاد کرده و از طریق اختلال در تعادل یونی و آسیب به غشاهای سلولی، بر سلامت سلول های جنینی اثر منفی بگذارد. این سمیت می تواند منجر به تخریب ساختارهای حیاتی درون بذر و از کار افتادن مسیرهای سیگنال دهی مربوط به آغاز رشد شود (بنادجود و همکاران، ۲۰۲۲). در نتیجه، کاهش معنی دار درصد جوانه زنی در غلظت های بالای شوری حاصل اثرات هم زمان محدودیت اسمزی و سمیت یونی است که به ویژه در مراحل اولیه جوانه زنی، که بذر به تعادل دقیق آب و یون نیاز دارد، مانع از پیشرفت طبیعی این فرایند می شود.

بدین ترتیب، نتایج این مطالعه به روشنی نشان می‌دهد که دان‌سیاه نسبت به تنش شوری دارای آستانه تحمل مشخصی است و فراتر رفتن از این آستانه به‌صورت چشم‌گیری توان جوانه‌زنی را کاهش می‌دهد.

در مجموع، یافته‌ها حاکی از آن است که بذره‌های دان‌سیاه تا سطحی از تنش خشکی و شوری قادر به تحمل و سازگاری فیزیولوژیکی هستند، اما در پتانسیل‌های پایین‌تر از آستانه تحمل (آستانه بحرانی)، مکانیسم‌های دفاعی بذر کارآمدی خود را از دست داده و جوانه‌زنی دچار افت شدید می‌شود. شناخت دقیق این آستانه‌ها برای بهینه‌سازی شرایط کشت در مناطق مستعد خشکی اهمیت به‌سزایی دارد.

آب نقش کلیدی در نرم کردن پوشش بذر و فعال‌سازی فرایندهای فیزیولوژیکی مرتبط با شروع جوانه‌زنی دارد؛ وقتی فشار اسمزی محیط پایین می‌آید، جذب آب توسط بذر کاهش یافته و در نتیجه تورژسانس سلول‌های جنین به تأخیر می‌افتد. این کاهش تورژسانس منجر به کندی در رشد و تقسیم سلولی اولیه می‌شود و در نتیجه سرعت آغاز جوانه‌زنی کاهش می‌یابد (اوگاز و همکاران، ۲۰۲۲). بنابراین کاهش سرعت شروع جوانه‌زنی در اثر افزایش شدت تنش خشکی را می‌توان به کاهش دسترسی به آب قابل جذب توسط بذر نسبت داد. از سوی دیگر، با افزایش تنش خشکی، فشار اسمزی منفی محیط بالاتر می‌رود و بذر باید انرژی بیشتری برای جذب مقادیر کافی آب صرف کند. این امر باعث افزایش مدت زمان موردنیاز برای شروع فرایندهای متابولیکی مرتبط با جوانه‌زنی می‌شود و در نهایت سرعت جوانه‌زنی را کاهش می‌دهد (سلیمان و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین، تنش خشکی ممکن است باعث تجمع یون‌های غیرطبیعی در سلول‌ها و اختلال در تعادل آبی شود که مانع از بازشدن سریع غشاهای سلولی و رشد اولیه می‌شود (ظفر^۱ و همکاران، ۲۰۲۳). براساس نتایج، با وجود کاهش چشم‌گیر سرعت جوانه‌زنی در تنش‌های شدید، بین سطوح ۰/۰۶- تا ۱- مگاپاسکال تفاوت معنی‌دار آماری مشاهده نشده است که می‌تواند نشان‌دهنده رسیدن بذرها به حداقل ظرفیت خود برای آغاز رشد در شرایط محدود آبی باشد، به‌عبارتی بذرها در این سطوح تنش شدید به‌شدت تحت فشار هستند و کاهش سرعت در سطح پایینی تثبیت شده است.

در شرایط شوری بالا، حضور غلظت‌های زیاد یون‌های سدیم (Na^+) و کلر (Cl^-) موجب کاهش پتانسیل اسمزی محیط پیرامونی بذر می‌شود. این پدیده مانع جذب مؤثر آب توسط بذر شده و مرحله آغازین فرایندهای فیزیولوژیکی جوانه‌زنی، از جمله فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده ذخایر غذایی (نظیر آمیلاز و پروتئاز)، سنتز پروتئین‌ها و توسعه جنین را به تعویق می‌اندازد (فنگ و همکاران، ۲۰۲۲). علاوه بر این، در غلظت‌های بالای نمک، سمیت یونی ناشی از تجمع بیش از حد یون‌های Na^+ و Cl^- در بافت‌های بذر، منجر به اختلال در تعادل یونی سلول‌ها، کاهش فعالیت آنزیمی، آسیب به غشای سلولی و اختلال در متابولیسم انرژی می‌شود که همگی موجب کندشدن و در موارد شدید، توقف فرایند جوانه‌زنی می‌گردد (بنادجود و همکاران، ۲۰۲۲). بر این اساس کاهش معنی‌دار سرعت شروع جوانه‌زنی در سطوح بالای تنش شوری را می‌توان با در نظر گرفتن تأثیرات فیزیولوژیکی، اسمزی و یونی نمک‌ها بر فرایند جوانه‌زنی بذر توجیه کرد. از سوی دیگر، در تیمارهای پایین‌تر شوری (نظیر صفر و ۵۰ میلی‌مولار)، با توجه به پتانسیل اسمزی نسبتاً مناسب محیط و نبود یا کم‌بودن اثرات سمی یون‌ها، بذر قادر به جذب آب و آغاز فعالیت‌های حیاتی خود بدون مانع جدی بوده است، احتمالاً به همین دلیل بین این دو تیمار از نظر سرعت شروع جوانه‌زنی تفاوت آماری معنی‌داری مشاهده نشده است. در مقابل، با افزایش غلظت کلرید سدیم به ۱۰۰، ۱۵۰ و به‌ویژه ۲۰۰ میلی‌مولار، اثرات منفی تنش شوری به‌شدت افزایش یافته و توان بذر برای انجام فعالیت‌های حیاتی مختل شده که در نهایت به کاهش شدید سرعت آغاز جوانه‌زنی منجر گردیده است. این نتایج نشان می‌دهد که دان‌سیاه در برابر سطوح پایین تنش شوری دارای تحمل نسبی است، اما در

برابر سطوح بالاتر شوری، حساسیت قابل توجهی از خود نشان داده و سرعت شروع جوانه زنی آن به طور معنی داری کاهش می یابد. در مجموع، کاهش سرعت شروع جوانه زنی تحت تنش خشکی و شوری بیانگر کندشدن واکنش های فیزیولوژیکی مرتبط با جذب آب و تورژسانس اولیه در بذرهاست که به طور مستقیم بر توانایی بذر در شروع سریع جوانه زنی تأثیر می گذارد. این کاهش سرعت می تواند پیامد مستقیم کاهش نفوذپذیری آب و اختلال در تعادل اسمزی باشد که اندازه گیری شده و با شاخص های فیزیولوژیک جوانه زنی قابل توضیح است.

کاهش سرعت جوانه زنی برای رسیدن به ۵۰ درصد جوانه زنی (R50) در سطوح مختلف تنش خشکی، به ویژه در شدت های بالاتر (نظیر ۱- مگاپاسکال)، از دیدگاه فیزیولوژیک و بوم فیزیولوژیک، توجیه پذیر و قابل انتظار است و ناشی از چندین عامل کلیدی در فرایند جذب آب و فعال سازی متابولیسم بذرها در مراحل آغازین جوانه زنی می باشد (شین و همکاران، ۲۰۲۱). در شرایط کم آبی، فرایندهای فیزیولوژیک مانند هیدرولیز مواد ذخیره ای (نظیر نشاسته و پروتئین ها) و انتقال آن ها به محور رویشی کند شده یا مختل می شود. این موضوع به طور مستقیم بر رشد و توسعه ریشه چه و ساقه چه تأثیر گذاشته و موجب می شود بخشی از بذور حتی در صورت آغاز جوانه زنی، به سرعت کافی برای رسیدن به مرحله ۵۰ درصد جوانه زنی نرسند (اوگاز و همکاران، ۲۰۲۲). از طرفی تنش خشکی معمولاً با افزایش اسمولاریته محیط همراه است که خود می تواند منجر به ایجاد فشار اسمزی منفی در بذر شود. این وضعیت منجر به تغییر در تعادل اسمزی سلول ها شده و از بازشدن سلول ها و کشش دیواره ها جلوگیری می کند. در نتیجه، نه تنها جوانه زنی به تعویق می افتد بلکه یکنواختی آن نیز کاهش می یابد، به طوری که مجموعه ای از بذور ممکن است در زمان های مختلفی شروع به جوانه زنی کنند یا اصلاً موفق به آن نشوند (سلیمان و همکاران، ۲۰۲۲). این ناهمبستگی زمانی میان بذور مختلف نیز به افت چشم گیر مقدار R50 منجر می شود.

در نهایت، باید توجه داشت که شاخص R50 نسبت به دیگر مؤلفه های جوانه زنی حساسیت بالاتری به اختلالات در سرعت و یکنواختی جوانه زنی دارد. به همین دلیل، کاهش شدید آن در سطوح بالای تنش خشکی (نظیر ۱- مگاپاسکال) نه تنها بازتابی از افت ظرفیت جوانه زنی کل جمعیت است، بلکه بیانگر ضعف هم زمانی و هماهنگی در پاسخ جمعی بذور به شرایط محیطی می باشد. در مجموع، کاهش شدید R50 در شرایط خشکی شدید نتیجه مستقیم محدودیت های ایجاد شده در جذب آب، اختلال در فرایندهای اولیه متابولیسمی و کاهش یکنواختی جوانه زنی است که همگی از تبعات فیزیولوژیک کمبود آب در محیط محسوب می شوند.

کاهش سرعت رسیدن به ۵۰ درصد جوانه زنی در بذرهای دان سیاه با افزایش شدت تنش شوری را می توان به چند عامل فیزیولوژیکی و فیزیکی مرتبط دانست. ابتدا، افزایش غلظت نمک در محیط باعث افزایش فشار اسمزی محلول اطراف بذر می شود که مانع جذب آب توسط بذر می گردد. این کاهش در توانایی جذب آب، روند فعال سازی آنزیم ها و فرایندهای متابولیسمی لازم برای شروع و پیشرفت جوانه زنی را به تأخیر می اندازد و در نتیجه سرعت جوانه زنی کاهش می یابد (صدیقی و همکاران، ۲۰۲۵). علاوه بر این، یون های سدیم و کلر موجود در محلول شوری می توانند اثرات سمی مستقیم بر روی سلول های جنینی بذر داشته باشند و موجب اختلال در ساختار غشای سلولی و متابولیسم سلولی شوند. این اختلالات سلولی باعث کاهش کارایی روند تقسیم سلولی و رشد سلول های جوانه می شود و فرایند جوانه زنی را کند می کند (ظفر و همکاران، ۲۰۲۳). از طرف دیگر، عدم تفاوت معنی دار بین شرایط شاهد و تیمار ۵۰ میلی مولار نشان می دهد که در سطوح پایین شوری، بذرهای دان سیاه توانایی تحمل تنش را دارند و سیستم های تنظیم اسمزی و مکانیزم های دفاعی آن ها قادر به حفظ عملکرد طبیعی جوانه زنی هستند. این توانمندی ممکن است به دلیل فعال شدن پاسخ های تنظیمی سلولی مانند تولید ترکیبات آلی اسمولیت باشد که به حفظ تعادل آب کمک می کند (بنادجود و همکاران، ۲۰۲۲). بنابراین، با افزایش غلظت نمک در محیط، ترکیبی از

کاهش جذب آب به دلیل فشار اسمزی بالا و اثرات سمی یون‌ها باعث کاهش سرعت جوانه‌زنی می‌شود که در نهایت باعث تأخیر و کاهش نرخ رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی در بذره‌های دان‌سیاه می‌گردد. این نتایج نشان‌دهنده حساسیت بذر دان‌سیاه به تنش شوری بوده و اهمیت مدیریت شوری خاک و آب در کشت این گیاه را برجسته می‌کند.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش‌های خشکی و شوری به‌طور قابل‌توجهی بر فرایند جوانه‌زنی گیاه دان‌سیاه تأثیرگذار هستند. در مورد تنش خشکی، بیش‌ترین درصد جوانه‌زنی در شرایط فشار اسمزی ۰/۲- مگاپاسکال با میانگین ۹۵ درصد مشاهده شد، درحالی‌که بیش‌ترین کاهش جوانه‌زنی مربوط به فشار اسمزی ۱- مگاپاسکال با میانگین تنها ۶ درصد بود. هم‌چنین، در محدوده فشار اسمزی بین صفر تا ۰/۶- مگاپاسکال تفاوت معنی‌داری در حداکثر درصد جوانه‌زنی مشاهده نگردید که بیانگر توانایی نسبی بذر در تحمل خشکی ملایم است. سرعت شروع جوانه‌زنی نیز در شرایط بدون تنش (خشکی صفر) بیش‌ترین مقدار را داشت و در بازه ۰/۶- تا ۱- مگاپاسکال تفاوت آماری معنی‌داری دیده نشد، که نشان‌دهنده تأخیر نسبی در روند جوانه‌زنی تحت سطوح بالاتر خشکی است. در رابطه با تنش شوری، بالاترین درصد جوانه‌زنی در شرایط بدون شوری (صفر میلی‌مولار) با میانگین ۹۸ درصد به‌دست آمد و کم‌ترین آن در بالاترین سطح شوری (۲۰۰ میلی‌مولار) با میانگین ۵۸ درصد مشاهده شد. تفاوت معنی‌داری بین درصد جوانه‌زنی در سطوح صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار شوری مشاهده نشد که حاکی از تحمل نسبی بذر در مواجهه با شوری کم تا متوسط است. با افزایش شدت شوری، سرعت جوانه‌زنی نیز به‌طور محسوسی کاهش یافت، به‌طوری‌که در سطح ۲۰۰ میلی‌مولار به حداقل مقدار خود رسید که این موضوع نشان‌دهنده تأثیر منفی فشار اسمزی و اثرات سمی یون‌های نمکی بر فرایند جوانه‌زنی است.

با توجه به نتایج پژوهش، برای کاهش اثرات منفی تنش خشکی شدید که موجب کاهش چشم‌گیر درصد و سرعت جوانه‌زنی می‌شود، توصیه می‌شود پیش از کاشت از روش‌های بهینه مدیریت آب مانند آبیاری قطره‌ای استفاده شود تا شرایط رطوبتی بهبود یابد. در خاک‌های شور با غلظت نمک بالا، کاهش شوری از طریق شست‌وشو یا استفاده از اصلاح‌کننده‌های خاک ضروری است تا جوانه‌زنی بهتر صورت گیرد. هم‌چنین، انتخاب ارقام مقاوم به خشکی و شوری که در شرایط متوسط تنش درصد و سرعت جوانه‌زنی مناسبی دارند، می‌تواند کارایی کشت را افزایش دهد. زمان‌بندی مناسب کاشت در فصول کم‌تنش نیز در بهبود جوانه‌زنی مؤثر است. در مناطقی که آب آبیاری شور است، استفاده از روش‌هایی برای کاهش شوری آب به بهبود سرعت جوانه‌زنی کمک خواهد کرد. اجرای این راه‌کارها می‌تواند روند جوانه‌زنی و عملکرد کلی گیاه دان‌سیاه را در شرایط تنش بهبود بخشد.

۷. تشکر و قدردانی

از همکاری صمیمانه و حمایت ارزشمند مرکز گلخانه‌ای و آزمایشگاهی دانشکده فناوری کشاورزی (پردیس ابوریحان) دانشگاه تهران، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع برای نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

- حسینی، سمانه؛ رفیعی الحسینی، محمد و روشن دل، پرتو (۱۳۹۷). تأثیر میدان مغناطیسی بر جوانه زنی دان سیاه (*Guizotia abyssinica*) تحت تنش خشکی. پژوهش های بندر ایران، ۵ (۱)، ۳۳-۵۲.
- دوازده امامی، سعید (۱۴۰۱). تولید گیاهان دارویی جلد دوم (گیاهان بومی، جدید و خطرناک). نشر تحقیقات و آموزش کشاورزی. ۲۰۳ صفحه.
- دوازده امامی، سعید و و واثقی، آزاده (۱۳۹۸). دان سیاه. تهیه شده در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، دفتر شبکه دانش و رسانه های ترویجی وزارت جهاد کشاورزی. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مؤسسه آموزش و ترویج کشاورزی.
- دوازده امامی، سعید؛ اخوان روفیگر، آزاده و اهتمام، محمدحسین (۱۴۰۱). ارزیابی صفات ریخت شناسی و ریز ریخت شناسی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نگاره (SEM) در تعدادی از جمعیت های بومی گل محمدی در ایران. مجله پژوهش های گیاهی (مجله زیست شناسی ایران)، ۳۵ (۲)، ۳۴۲-۳۵۷.

References

- Almansouri, M., Kinet, J. M., & Lutts, S. (2001). Effect of salt and osmotic stresses on germination in durum wheat (*Triticum durum*). *Plant and Soil*, 231(2), 243-254.
- Badalzadeh, A., & Shahraki, A. D. (2021). Effect of hydro-priming and salinity stress on germination indices of Niger (*Guizotia abyssinica*). *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 69(4).
- Benadjaoud, A., Dadach, M., El-Keblawy, A., & Mehdadi, Z. (2022). Impacts of osmopriming on mitigation of the negative effects of salinity and water stress in seed germination of the aromatic plant *Lavandula stoechas* L. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 31, 100407.
- Bradford, K. J. (2002). Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Science*, 50(2), 248-260.
- Becker, V. I., Goessling, J. W., Duarte, B., Caoador, I., Liu, F., Rosenqvist, E., & Jacobsen S.-E. (2017). Combined effects of soil salinity and high temperature on photosynthesis and growth of quinoa plants (*Chenopodium quinoa*). *Functional Plant Biology*, 44(7), 665-679.
- Chambhare, M. R., & Nikam, T. D. (2022). Influence of plant growth regulators on somatic embryogenesis in Niger (*Guizotia abyssinica* Cass.): an edible oilseed crop. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 25(2), 225-232.
- Davazddeh-Emami, S., & Vaseghi, A. (2019). Niger seed. Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Isfahan Province, Knowledge Network and Extension Media Office, Ministry of Agriculture-Jahad. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Agricultural Extension and Education Institute. (In Persian).
- Davazddeh-Emami, S., Akhavan Rofigar, A., & Ehtemam, M. H. (2022). Evaluation of morphological and micromorphological traits using scanning electron microscopy (SEM) in some native populations of *Rosa damascena* in Iran. *Iranian Journal of Biology*, 35(2), 342-357. (In Persian).
- Davazddeh-Emami, S. (2022). Production of medicinal plants, Vol. 2: Indigenous, novel, and hazardous species. Agricultural Research, Education and Extension Publication. (203 pp.). (In Persian).
- Feng, H., Chen, L., Ding, Y.C., Ma, X.J., How, S.W., & Wu, D. (2022). Mechanism on the microbial salt tolerance enhancement by electrical stimulation. *Bioelectrochemistry*, 147 (108206).
- Goyal, V. K., Agrawal, N., Jain, M., Bisen, R., & Tripathi, R. (2022). Niger (*Guizotia abyssinica* (L. f.) Cass.) an oilseed crop under biotic stress. In *Managing plant production under changing environment* (pp. 135-149). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Hosseini, S., Rafiei Al-Hosseini, M., & Roshandel, P. (2018). Effect of magnetic field on germination of Niger seed (*Guizotia abyssinica*) under drought stress. *Iranian Journal of Seed Research*, 5 (1), 33-52. (In Persian).
- Kavya, H., Naik, N., & Varadahalli R. (2017). Induction of antioxidant system in niger (*Guizotia abyssinica* Cass.) under drought stress. *African Journal of Agricultural Research*, 12(41), 3037-3044.

- Luo, Z., Szczepanek, A., & Abdel-Haleem, H. (2020). Genome-wide association study (GWAS) analysis of camelina seedling germination under salt stress condition. *Agronomy*, 10(9), 1444.
- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651-681.
- Oguz, M. C., Aycan, M., Oguz, E., Poyraz, I., & Yildiz, M. (2022). Drought stress tolerance in plants: Interplay of molecular, biochemical and physiological responses in important development stages. *Physiologia*, 2(4), 180-197.
- Panda, D., Padhi, S. K., & Biswal, L. (2025). Differential drought tolerance responses in Indigenous Niger (*Guizotia abyssinica* (Lf) Cass.) accessions from Eastern Ghats of India. *Vegetos*, 1-15.
- Seifu, A., Lulekal, E., Demissew, S., & Woldu, Z. (2024). Allelopathic potential of invasive alien plant species, *Xanthium strumarium* L., water and methanol extracts on germination and seedling growth of *Guizotia abyssinica* (Lf) Cass., and *Linum usitatissimum* L. *Journal of Biological Studies*, 7(3), 70-94.
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., & Battaglia, M. L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10(2), 259.
- Shin, Y. K., Bhandari, S. R., Jo, J. S., Song, J. W., & Lee, J. G. (2021). Effect of drought stress on chlorophyll fluorescence parameters, phytochemical contents, and antioxidant activities in lettuce seedlings. *Horticulturae*, 7(8), 238.
- Siddiqi, K. S., Husen, A., Zahra, N., & Moheman, A. (2025). Harnessing silicon nanoparticles and various forms of silicon for enhanced plant growth performance under salinity stress: application and mechanism. *Discover Nano*, 20(1), 1-24.
- Tesema, A. A., & Mekonen, D. A. (2024). Responses of Niger (*Guizotia abyssinica* (Lf) Cass.) to cadmium and nickel stress. *Vegetos*, 37(1), 239-249.
- Zafar, S., Afzal, H., Ijaz, A., Mahmood, A., Ayub, A., Nayab, A., & Moosa, A. (2023). Cotton and drought stress: An updated overview for improving stress tolerance. *South African Journal of Botany*, 161, 258-268.
- Zahra, N., Kausar, A., Sharma, P., Wabaidur, S. M., & Husen, A. (2024). Serotonin application to *Guizotia abyssinica* improves growth, physiological functions, antioxidant system and alleviates the deleterious effects induced by salt stress. *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 158(5), 1006-1014.