هفتمین کنفرانس بین‌المللی
مطالعات مهندسی کشاورزی
زراعت و اصلاح نباتات
7th International Conference on
Studies of Agricultural Engineering
Farming and Plant Breeding

تجزیه ژنتیکی ویژگی‌های جوانه زنی لاین‌های F_7 حاصل از تلاقی ارقام گندم آرتا و بم تحت شرایط تنش اسمزی

پونه پارسا[۱]، سیامک علوی کیا[۲]، روح اله امینی[۳]، حسین عباسی هولاسو[۴]،

۱) فارغ التحصیل مقطع ارشد گروه ژنتیک و به نژادی گیاهی دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز،تبریز،ایران
Pooneh.parsa9@gmail.com
۲) هیئت علمی و استاد دانشگاه گروه به نژادی و بیوتکنولوژی دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز،تبریز،ایران
Ss.alavikia@tabrizu.ac.ir
۳) هیئت علمی و استاد دانشگاه گروه اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی در دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز،تبریز،ایران
۴) دانشجوی پسا دکتری گروه به نژادی و بیوتکنولوژی گیاهی دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز،تبریز،ایران

چکیده

در این پژوهش، ۲۲ لاین F7 گندم حاصل از تلاقی ارقام آرتا و بم به همراه والدین آن‌ها، به منظور بررسی اثر تنش اسمزی (ایجادشده با PEG 6000) و محتوای روی و آهن بذر بر ویژگی‌های جوانه‌زنی مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که تنش اسمزی بر بیشتر صفات جوانه‌زنی تأثیر معنی‌دار دارد و تفاوت ژنتیکی قابل‌توجهی بین ژنوتیپ‌ها وجود دارد. برخی لاین‌ها در برخی صفات عملکرد بهتری نسبت به والدین داشتند که نشان‌دهنده پدیده تفکیک متجاوز است. همچنین صفات مرتبط با جوانه‌زنی دارای وراثت‌پذیری بالایی بودند. بر اساس شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (SIIG)، لاین‌های ۱۴، ۵، ۱۰ و ۲۲ به عنوان برترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شدند.

کلمات کلیدی: تحمل تنش، تنش اسمزی، تنوع ژنتیکی، ژنوتیپ متحمل، صفات جوانه‌زنی، گندم، لاین اینبرد نوترکیب، محتوای آهن بذر، محتوای روی بذر.

مقدمه:

گندم یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی در جهان است که نقش اساسی در تأمین غذای بشر دارد (Morsy et al., 2021)[1]. شوری، خشکی و تنش‌های اسمزی از مهم‌ترین چالش‌ها در تولید محصولات کشاورزی هستند و عملکرد گیاهان را محدود می‌کنند. بنابراین، بهبود عملکرد گیاهان در مناطق خشک و نیمه‌خشک و تحت شرایط تنش اسمزی اهمیت زیادی دارد (Correia et al., 2021)[2]. مقاومت گیاهان به تنش‌های محیطی در مراحل مختلف رشد متفاوت است و در مرحله جوانه‌زنی حساسیت بیشتری به تنش‌ها دارند (Ahmed et al., 2017)[3]. تحقیقات نشان می‌دهند که افزایش تنش اسمزی باعث کاهش درصد جوانه‌زنی گیاهان می‌شود (امیری و همکاران، ۱۳۸۹)[4].

عنصر روی در دانه گندم می‌تواند تأثیر زیادی بر رشد و عملکرد گیاه در خاک‌های کم‌بهره و تحت تنش‌های محیطی داشته باشد. همچنین، آهن به‌عنوان ریزمغذی مهم، در واکنش گیاهان به تنش‌ها و افزایش مقاومت گیاه به شرایط نامساعد نقش دارد (Marschner, 2011[6]; Nair et al., 2010)[5].

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر محتوای روی و آهن دانه بر قدرت جوانه‌زنی گندم در شرایط عادی و تنش اسمزی انجام شده است. اهداف اصلی آن عبارتند از:

- ارزیابی تنوع ژنتیکی صفات جوانه‌زنی و خصوصیات گیاهچه در لاین‌های گندم تحت شرایط عادی و تنش اسمزی
- بررسی تأثیر محتوای روی و آهن دانه بر قدرت جوانه‌زنی در شرایط عادی و تنش اسمزی
- انتخاب لاین‌های برتر از نظر صفات جوانه‌زنی در شرایط فوق.

منشا گندم

بشر برای اولین بار ۱۰۰۰۰ سال قبل در عصر نوسنگی اقدام به کشت گندم نمود که این امر باعث انتقال زندگی بشری به مرحله‌ای نوین تحت عنوان کشاورزی به منظور تامین منابع غذایی گردید. اولین شکل‌های گندم زراعی به صورت دیپلوییید و تتراپلوییید بود که از جنوب شرق ترکیه به وجود آمدند (Dubcovsky and Dvorak, 2007)[7]. در خاور نزدیک حدود ۹۰۰۰ سال قبل کشاورزی گسترش یافت که در این مدت گندم هگزاپلوییید به وجود آمد (Feldman, 2001)[8]. مطالعات سیتوژنتیکی نشان داده است که اکثر گراس‌ها، خویشاوندان وحشی گندم و گندم‌های بومی دارای سطوح پلوئیدی از دیپلوئید تا هگزاپلوئید هستند (Badaeva, 2002; Mirzaie-Nadoushan et al.,2000; Badaeva et al.,1991)[9,10,11].

گیاه شناسی گندم

گندم گیاهی یکساله از زیر شاخه نهان دانگان ، رده گیاهان تک لپه و تیره گندمیان است. گندم زراعی با نام علمی (Triticum aestivum L.) شناخته می شود. سیستم ریشه ای در گندم همانند سایر غلات سطحی و افشان است. ساقه گندم بدون انشعاب و بر روی آن برجستگی هایی به نام گره وجود دارد که فاصله بین دو گره را "میان گره" می نامند. روی هر

یک از گره ها یک برگ به صورت متناوب دیده می شود. هر برگ گندم از دو قسمت غلاف و پهنک برگ تشکیل شده است (خدابنده، ۱۳۷۱[12]و نورمحمدی و همکاران، ۱۳۸۰)[13].

اهمیت گندم

غلات بیش از نیمی از غذای مردم جهان را تأمین می‌کنند و گندم یکی از مهم‌ترین منابع غذایی به شمار می‌آید. از نظر تولید و سطح زیرکشت، گندم به عنوان اصلی‌ترین محصول زراعی شناخته می‌شود و افزایش کمّی و کیفی عملکرد آن در واحد سطح از اولویت‌های اصلی تحقیقاتی و اجرایی کشورها به شمار می‌رود. گندم بیش از یک‌چهارم تولید جهانی غلات را به خود اختصاص داده و به عنوان مهم‌ترین غله در جهان مطرح است (فتحی و زاهدی، ۱۳۹۳[14]؛ Morsy et al., 2021; Sramkova et al., 2009)[15]. سازمان جهانی خواروبار و کشاورزی (فائو) پیش‌بینی کرده است که در سال ۲۰۲۴-۲۰۲۳ تولید غلات در جهان به ۲.۸۱۹ میلیارد تن خواهد رسید که نسبت به سال گذشته ۱.۱ درصد افزایش خواهد داشت (FAO, 2024)[16].

۱-۴- ساختمان دانه گندم

در خانواده گرامینه‌ها، دیواره میوه و لایه بیرونی بذر به هم متصل هستند، به همین دلیل دانه و میوه از یکدیگر قابل تفکیک نیستند. این نوع میوه که در غلات به‌ویژه گندم مشاهده می‌شود، گندمه نام دارد. دانه گندم به‌صورت بیضی شکل است (Belderok et al., 2000)[17]. دانه گندم به‌عنوان منبع مواد غذایی شامل سه بخش پوسته، آندوسپرم و جنین است. پوسته دانه وظیفه حفاظت از آندوسپرم و جنین را بر عهده دارد. در پوسته دانه گندم، مواد مغذی نظیر پروتئین، فیبر و چربی وجود دارد که نقش مهمی در تغذیه دارند.

جوانه‌زنی و تنش اسمزی

خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی است که بر مورفولوژی، فیزیولوژی و بیوشیمی گیاه اثر می‌گذارد و تأثیر زیادی بر تولیدات کشاورزی دارد (اسدی و حاتمی، ۱۴۰۰)[18]. شوری، خشکی و تنش‌های اسمزی ناشی از آن‌ها از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی هستند که تولید محصولات غذایی اصلی را محدود می‌کنند. بنابراین، روش‌های بهبود عملکرد گیاهان در مناطق خشک و نیمه‌خشک و تحت شرایط اسمزی اهمیت زیادی دارند و لزوم شناخت ویژگی‌های فیزیولوژیکی و ژن‌های دخیل در بهبود عملکرد محصول در این شرایط احساس می‌شود (Correia et al., 2021).

تنش شوری از جمله عواملی است که تأثیر زیادی بر جوانه‌زنی، رشد، تولید و ویژگی‌های کیفی گندم دارد. محققان شوری را به عنوان تجمع یون‌هایی چون سدیم، سولفات و کلر در محیط ریزوسفر معرفی کرده‌اند که می‌تواند رشد طبیعی گیاه را مختل کند. تنش شوری با کاهش فشار آماس سلولی، اختلال در فعالیت غشاها، تأثیر بر آنزیم‌ها، ممانعت از فتوسنتز و ایجاد کمبود یون‌ها، موجب کاهش رشد، سطح برگ، زیست توده و عملکرد دانه در گندم می‌شود. ارقام گندم واکنش‌های متفاوتی به شوری نشان می‌دهند و میزان تحمل آن‌ها به شوری به ویژگی‌های فیزیولوژیکی خاصی بستگی دارد. افزایش تحمل به شوری

در گندم با کاهش غلظت سدیم در گیاه و نسبت سدیم به پتاسیم در برگ‌ها مرتبط است. این ویژگی به وجود ژنوم D در گندم‌های هگزاپلوئید مربوط می‌شود. در نهایت، آگاهی از واکنش‌های فیزیولوژیکی، به ویژه در ژنوتیپ‌های مقاوم به شوری، می‌تواند به اصلاح و تولید ژنوتیپ‌های مقاوم به شوری کمک کند (مدحج، ۱۴۰۰)[19].

در یک مطالعه به‌منظور بررسی اثر پرایمینگ بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه ذرت هیبرید SC704 تحت شرایط شوری و خشکی، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل با طرح پایه کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد. نتایج نشان دادند که پرایمینگ بذر باعث بهبود درصد جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها در شرایط تنش‌های شوری و خشکی شد. بیشترین تأثیر مثبت در شرایط تنش، در تیمار نیترات پتاسیم ۱٪ مشاهده گردید (مسرت و همکاران، ۱۳۹۲)[20].

تحقیقات نشان داده‌اند که گیاهان در مراحل مختلف رشد نسبت به تنش‌ها واکنش‌های متفاوتی دارند، به‌طوری‌که حساسیت گیاهان در مرحله جوانه‌زنی بیشتر از مراحل دیگر است (Ahmed et al., 2017). مطالعات مختلف نشان می‌دهند که با افزایش میزان تنش اسمزی، درصد جوانه‌زنی گیاهان کاهش می‌یابد (معروف زاده و منصوری فر، [21]۱۳۹۴؛ انصاری و شریف زاده، [22]۱۳۹۰؛ امیری و همکاران، ۱۳۸۹).

به‌منظور بررسی تأثیر سطوح مختلف تنش اسمزی ناشی از پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ بر مؤلفه‌های جوانه‌زنی و شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی گندم و همبستگی میان صفات مرتبط با جوانه‌زنی در آزمایشگاه و مزرعه، دو آزمایش جداگانه انجام شد. در آزمایشگاه، ۴۰ ژنوتیپ گندم نان تحت چهار سطح پلی‌اتیلن گلیکول (۰، ۳-، ۶- و ۹- بار) به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار بررسی شدند. در این آزمایش، صفاتی نظیر طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه، نسبت طول ریشه‌چه به ساقه‌چه، طول کلئوپتیل، وزن خشک و تر ریشه‌چه، سرعت و درصد جوانه‌زنی اندازه‌گیری گردید. آزمایش مزرعه‌ای نیز در شرایط مطلوب و تنش خشکی با طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که اعمال تیمارهای تنش اسمزی بر تمامی صفات مورد بررسی تأثیر معنی‌داری داشت. همچنین تفاوت معنی‌داری در صفات بین ژنوتیپ‌های مختلف مشاهده شد. در تنش ۳- بار، هیچ تأثیر معنی‌داری بر طول ساقه‌چه، طول کلئوپتیل، طول ریشه‌چه و وزن خشک ریشه‌چه مشاهده نشد، اما درصد جوانه‌زنی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. در تنش شدید ۶- بار، به‌جز طول ریشه‌چه و نسبت طول ریشه‌چه به ساقه‌چه، سایر صفات به‌شدت کاهش یافتند. در شرایط بدون تنش (صفر بار)، همبستگی مثبت و معنی‌دار میان تمامی صفات آزمایشگاه با عملکرد دانه و شاخص‌های مقاومت مشاهده شد. در شرایط تنش‌های خفیف و شدید، همبستگی مثبت و معنی‌دار میان وزن تر و خشک ریشه‌چه و طول ریشه‌چه با عملکرد دانه مشاهده شد. نتایج آزمایش مزرعه‌ای نشان داد که بین ژنوتیپ‌ها از نظر عملکرد دانه در هر دو شرایط مطلوب و تنش خشکی تفاوت معنی‌داری وجود دارد. تحلیل همبستگی بین شاخص‌های مقاومت به خشکی و عملکرد دانه نشان داد که شاخص‌های تحمل به تنش، میانگین بهره‌وری و میانگین هندسی بهره‌وری برای شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا در هر دو شرایط مناسب هستند (عبدی و همکاران، ۱۳۹۳)[23].

برای بررسی واکنش اینبرد لاین‌های گندم حاصل از ارقام M82 و Babax به تنش اسمزی ناشی از پلی‌اتیلن گلیکول در مراحل رشد رویشی، آزمایشی به‌صورت طرح آلفالاتیس ۱۳×۱۳ در دو تکرار در دو محیط نرمال و تنش اسمزی بر روی ۱۶۹ اینبرد لاین انجام شد. در این تحقیق از پلی‌اتیلن گلیکول با پتانسیل اسمزی ۸- مگاپاسکال استفاده شد و صفات

مورفولوژیک مانند طول ساقه‌چه، طول ریشه‌چه، وزن تر و خشک ساقه‌چه و ریشه‌چه، نسبت‌های مختلف طول و وزن ریشه‌چه به ساقه‌چه، طول گیاهچه و مجموع وزن‌های تر و خشک گیاهچه مورد مطالعه قرار گرفت. تجزیه آماری نشان داد که تنش خشکی تأثیر معنی‌داری بر صفات مورد آزمایش داشت. نتایج تجزیه کلاستر نشان داد که لاین‌های شماره ۱، ۹، ۸، ۱۱، ۱۹، ۱۰۹ و ۱۱۳ در زمینه صفات طول ساقه‌چه، وزن خشک ساقه‌چه، طول گیاهچه، مجموع وزن خشک گیاهچه و طول ریشه‌چه در گروه لاین‌های برتر قرار گرفتند. در این مطالعه، صفت طول ساقه‌چه به‌عنوان بهترین معیار برای گزینش لاین‌های مقاوم به خشکی معرفی شد (طباطبایی و همکاران، ۱۳۹۹)[24].

تنش‌های محیطی، به‌ویژه خشکی، از عوامل اصلی کاهش رشد در مراحل مختلف زندگی گیاه، به‌ویژه در مرحله جوانه‌زنی، به شمار می‌روند. در این تحقیق، واکنش هفت رقم گندم شامل آذر، امید، دروم-D/786-(۱۹)، طبسی، کراس اروند، اروند و G73-20 به تنش خشکی در مراحل جوانه‌زنی، در سطوح مختلف خشکی صفر، ۳-، ۶-، ۹-، ۱۲- و ۱۵- بار که با استفاده از محلول پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ اعمال شد، بررسی گردید. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با چهار تکرار در شرایط آزمایشگاهی دانشگاه آزاد اسلامی بجنورد انجام شد. صفات مورد بررسی شامل درصد جوانه‌زنی، میانگین زمان جوانه‌زنی، میانگین سرعت جوانه‌زنی، ضریب سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و طول ساقه‌چه بودند. نتایج نشان داد که در تمامی صفات، تفاوت‌های معنی‌داری بین ارقام و سطوح مختلف تنش وجود داشت و اثر متقابل تنها در سرعت جوانه‌زنی و طول ساقه‌چه معنی‌دار بود. بذور در سطح تنش ۱۵- بار قادر به جوانه‌زنی نبودند. رقم G73-20 بیشترین درصد جوانه‌زنی را داشت و رقم اروند با ۳۶ درصد، کمترین درصد جوانه‌زنی را نشان داد. بیشترین میانگین زمان جوانه‌زنی از رقم اروند حاصل شد. رقم طبسی بیشترین میانگین سرعت جوانه‌زنی را داشت و رقم کراس اروند بیشترین ضریب سرعت جوانه‌زنی را به دست آورد. بیشترین طول ریشه‌چه متعلق به رقم کراس اروند با ۵۸/۶۳ میلی‌متر بود و بیشترین طول ساقه‌چه در رقم آذر با ۱۵/۶۱ میلی‌متر مشاهده گردید. با افزایش سطوح تنش خشکی، میزان تمامی صفات کاهش یافت، اما طول ساقه‌چه بیشترین کاهش را نشان داد. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که اروند و امید حساس‌ترین و G73-20 مقاوم‌ترین ارقام در برابر خشکی بودند (جاجرمی، ۱۳۹۴)[25].

پژوهش و تحقیقات انجام گذشته

در سال‌های اخیر، بهره‌وری گندم به طور مستمر کاهش یافته و فشارهای غیرزیستی تقریباً نیمی از کل کاهش عملکرد را شامل می‌شوند. تنش خشکی به‌عنوان یکی از عوامل مهم محدودکننده برای رشد و تولید گیاهان در سطح جهانی شناخته می‌شود. طبق تحقیقات انجام‌شده، مرحله جوانه‌زنی یکی از مراحل کلیدی رشد گندم در مواجهه با تنش‌های محیطی است (Saryar et al., 2010)[26].

در تحقیقی که اثر پلی‌اتیلن گلیکول (PEG) با غلظت‌های مختلف (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) ناشی از تنش خشکی بر ویژگی‌های مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی پانزده ژنوتیپ گندم بررسی شد، نتایج نشان داد که شاخص‌های

مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی، از جمله درصد جوانه‌زنی و طول ساقه‌چه در مرحله گیاهچه، به طور قابل توجهی کاهش یافتند. از سوی دیگر، محتوای پرولین با غلظت‌های مختلف PEG همبستگی مثبتی داشت. همچنین، تفاوت‌های معنی‌داری در تحمل به تنش غیرزیستی خشکسالی میان ژنوتیپ‌های HD2733، HD2888 و RAJ3765 مشاهده شد. این پارامترها می‌توانند برای غربالگری تحمل به خشکی در ژنوتیپ‌های گندم و انتخاب فرم‌های مقاوم به تنش مورد استفاده قرار گیرند (Mahpara et al., 2022[29]; Bilgili et al., 2019[28]; Sharma et al., 2022[27]).

برای ارزیابی تحمل گندم دوروم (Triticum durum Desf.) به تنش اسمزی، در پتانسیل‌های آبی مختلف با استفاده از PEG-8000 و محلول‌های NaCl، صفات جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و وزن‌تر و خشک گیاهچه در شرایط کنترل‌شده اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که سرعت جوانه‌زنی و سبز شدن در هر دو محلول برای هر دو رقم به تأخیر افتاد. همچنین، رقم Omrabia در برابر NaCl عملکرد بهتری نسبت به BD290273 داشت، اما BD290273 کمتر تحت تأثیر محلول‌های NaCl و PEG قرار گرفت. رشد گیاهچه در هر دو تنش کاهش یافت، اما NaCl آسیب کمتری به جوانه‌ها وارد کرد که نشان‌دهنده تفاوت مکانیسم‌های عمل NaCl و PEG است. به‌طور کلی، مهار جوانه‌زنی ناشی از NaCl و PEG-8000 بیشتر به دلیل تنش اسمزی بود تا سمیت نمک (Sayar et al., 2010).

در شرایط تنش اسمزی، جوانه‌زنی بذرها تحت تأثیر قرار می‌گیرد زیرا پتانسیل اسمزی خارجی از جذب آب جلوگیری کرده و اثرات سمی یون‌های Na^+ و Cl^- مانع از جذب و استقرار گیاهچه می‌شود (Murillo-Amador et al., 2002)[30].

در تحقیقی دیگر، سه ژنوتیپ گندم زمستانه برای پاسخ به خشکی در مرحله جوانه‌زنی و گیاهچه مورد بررسی قرار گرفتند. تنش خشکی با استفاده از PEG 6000 در غلظت ۲۰ درصد ایجاد شد. در سطح شاهد، درصد جوانه‌زنی در هر سه ژنوتیپ بیشتر از تیمار خشکی بود. وزن تر اندام هوایی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تنش اسمزی کاهش یافت. وزن تر ریشه در دو ژنوتیپ زیتارکا و آنتونیا کاهش یافت و در ولکان افزایش نشان داد. کاهش وزن خشک ریشه تنها در ژنوتیپ زیتارکا مشاهده شد (Spanic et al., 2017)[31].

در مطالعه دیگری، اثرات تنش خشکی بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه در ژنوتیپ‌های مختلف گندم نان بررسی شد. آزمایش‌ها با استفاده از دوزهای مختلف PEG در مراحل جوانه‌زنی و رشد گیاهچه انجام گرفت. نتایج نشان داد که افزایش دوز PEG منجر به کاهش چشمگیر در تمامی صفات، به‌ویژه در زمان جوانه‌زنی و سبز شدن، شد. همچنین، ژنوتیپ‌ها نسبت به دوزهای مختلف PEG واکنش‌های متفاوتی نشان دادند (Bilgili et al., 2019).

پاکباز و همکاران (۱۴۰۱)[32] در یک آزمایش تأثیر محلول‌پاشی ریزمغذی‌ها شامل آهن، روی، آهن + روی، نانوآهن، نانوروی و نانوآهن + نانوروی بر جوانه‌زنی کینوا در شرایط تنش کم‌آبی را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها در دو مرحله گلدهی (۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد) و در دو سطح تنش (شاهد با پتانسیل آبی ۰/۰۴۵±۰/۰۳- بار و تنش کم‌آبی با پتانسیل آبی ۰/۰۴۵±۹- بار) انجام شد. نتایج نشان داد که صفات جوانه‌زنی شامل درصد، سرعت، میانگین زمان جوانه‌زنی، یکنواختی جوانه‌زنی و شاخص‌های گیاهچه‌ای تحت تأثیر محلول‌پاشی ریزمغذی‌ها، زمان محلول‌پاشی و سطوح مختلف تنش کم‌آبی قرار

گرفتند. تنش کم‌آبی موجب کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی و سایر شاخص‌های رشدی شد، اما استفاده از محلول‌پاشی ریزمغذی‌ها اثرات منفی تنش را کاهش داد. همچنین، محلول‌پاشی با نانو آهن + نانو روی منجر به افزایش قابل توجهی در شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌های کینوا تحت شرایط کم‌آبی شد.

در یک مطالعه دیگر، اثرات شوری و تیمارهای نانوکود و کلات آهن بر جوانه‌زنی و رشد گیاهان سالیکورنیا در آزمایشی فاکتوریل با سه تکرار بررسی شد. فاکتور اول شامل چهار سطح شوری (۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ میلی‌مولار NaCl) و فاکتور دوم تیمارهای نانوکود و کلات آهن بود. نتایج نشان داد که افزایش شوری موجب کاهش سرعت و درصد جوانه‌زنی، طول ساقه‌چه، طول ریشه‌چه، ارتفاع گیاهچه و سایر شاخص‌های رشدی شد. شوری در مراحل بعدی رشد نیز موجب کاهش رشد گردید، به طوری که در شوری ۶۰۰ میلی‌مولار بیش‌ترین کاهش در تعداد گره‌ها، وزن تر ریشه و وزن خشک اندام هوایی مشاهده شد. استفاده از نانوکود آهن و کلات آهن باعث بهبود جوانه‌زنی و افزایش شاخص‌های رشدی نسبت به شرایط شاهد گردید. به‌ویژه، نانوکود آهن در شرایط تنش شوری موجب افزایش رشد ریشه شد و بالاترین نسبت ریشه به اندام هوایی (۷۳/۰) در تیمار نانوکود آهن در شوری ۶۰۰ میلی‌مولار مشاهده گردید. همچنین، مقایسه میانگین حجم ریشه و ارتفاع اندام هوایی نشان داد که نانوکود آهن و کلات آهن تفاوت معنی‌داری نداشتند و هر دو نوع کود می‌توانند در تعدیل اثرات شوری مؤثر واقع شوند (ریاحی‌نیا و دانایی، ۱۴۰۱)[33].

مواد و روش ها

این تحقیق در سال ۱۴۰۱ و به‌مدت چهار ماه (از خرداد تا شهریور) در آزمایشگاه سیتوژنتیک دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز انجام شد. هدف اصلی مطالعه بررسی اثر تنش اسمزی ناشی از پلی‌اتیلن گلایکول (PEG 6000) بر ویژگی‌های جوانه‌زنی ۲۲ لاین گندم نسل F7 حاصل از تلاقی دو رقم آرتا و بم، به‌همراه والدین آن‌ها بود.

برای انجام آزمایش، یک طرح فاکتوریل دو عاملی در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار به‌کار گرفته شد. فاکتور اول شامل دو سطح تنش (صفر و ۱۵ درصد PEG 6000 معادل پتانسیل اسمزی ۶۱/۱- بار) و فاکتور دوم ژنوتیپ‌های مورد بررسی بود.

در هر تکرار، ۱۰ عدد بذر سالم از هر ژنوتیپ انتخاب شد و ابتدا به‌مدت ۱۰ دقیقه در محلول هیپوکلریت سدیم ۵ درصد ضدعفونی و سپس با آب مقطر استریل شسته شدند. بذور در ظروف پتری استریل شده و بر روی کاغذ صافی کشت شدند. سپس این ظروف در ژرمیناتور با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و چرخه نوری ۱۴ ساعت روشنایی و ۱۰ ساعت تاریکی به‌مدت ۱۰ روز قرار گرفتند.

طی این دوره، روزانه تعداد بذرهای جوانه‌زده، طول ریشه‌چه و طول ساقه‌چه به‌دقت اندازه‌گیری شد. پس از ۱۰ روز، گیاهچه‌ها در آون با دمای ۷۵ درجه به‌مدت ۴۸ ساعت خشک شدند و وزن خشک کل گیاهچه، وزن خشک باقیمانده بذر و سایر اجزای گیاهچه به‌طور مجزا اندازه‌گیری شد. همچنین، مقادیر آهن و روی در بذرها با روش جذب اتمی اندازه‌گیری گردید.

در طول آزمایش، صفاتی مانند تعداد نهایی گیاهچه، درصد جوانه‌زنی کل، حداکثر مدت جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، ضریب جوانه‌زنی، میانگین مدت جوانه‌زنی، ویگور جوانه‌زنی، شاخص ویگور رشد گیاهچه، وزن خشک و تر ریشه‌چه، ساقه‌چه و بذر، و درصد تخلیه ذخایر بذر ثبت و محاسبه شدند.

تجزیه آماری داده‌ها شامل آزمون نرمال بودن داده‌ها با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، تجزیه واریانس چندمتغیره (MANOVA)، تجزیه واریانس تک‌متغیره (ANOVA)، و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح ۵ درصد بود. در تجزیه واریانس، مجموع مربعات ژنوتیپ به والدین، لاین‌های RIL و والدین علیه RILها تفکیک شد.

برای درک بهتر روابط میان صفات، از رگرسیون خطی چندگانه در چهار حالت مختلف استفاده شد تا تأثیر معیارهای جوانه‌زنی و ویژگی‌های گیاهچه بر وزن تر و خشک ساقه‌چه تحلیل شود. این رگرسیون‌ها در محیط نرمال و تنش به‌طور جداگانه تحلیل شدند.

تجزیه همبستگی کانونیک نیز به‌منظور شناسایی مهم‌ترین صفات مرتبط بین معیارهای جوانه‌زنی و ویژگی‌های گیاهچه انجام گرفت. این تجزیه کمک کرد تا متغیرهای مؤثر در رشد و تحمل تنش به‌خوبی شناسایی شوند.

تجزیه‌های آماری داده‌ها

تجزیه واریانس

در ابتدا توزیع نرمال خطاهای آزمایشی توسط آزمون کولموگروف-اسمیرنوف بررسی شد. بعد از جمع آوری اطلاعات، برای تثبیت خطای نوع اول تجزیه واریانس چند متغیره (MANOVA) انجام شد و سپس تجزیه واریانس تک متغیره (ANOVA) بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار صورت گرفت. در این تجزیه مجموع مربعات ژنوتیپ به سه بخش والدین، RILs و والدین علیه RILs تفکیک شد.

مقایسه میانگین ژنوتیپ‌ها از طریق آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ انجام شد و به منظور بررسی و نمایش دقیق میانگین‌ها نمودارهای ستونی رسم و مورد تحلیل قرار گرفتند.

پارامترهای ژنتیکی

واریانس ژنتیکی، واریانس فنوتیپی، وراثت پذیری عمومی و ضریب تغییرات ژنتیکی به ترتیب طبق رابطه‌های ۲-۱ تا ۲-۴ مورد محاسبه قرارگرفتند.

$$\sigma_g^{\,2} = \frac{MS_g - MS_E}{bs} \qquad (۲-۱)$$

$$\sigma_{Ph}^{\,2} = \sigma_g^{\,2} + MS_E \qquad (۲-۲)$$

$$h^2 = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_{ph}^2} \qquad (۲-۳)$$

$$CV_g = \frac{\sqrt{\sigma_g^2}}{\bar{X}_{00}} \times 100 \qquad (۲-۴)$$

$\sigma_g^{\,2}$: واریانس ژنتیکی

h^2 : وراثت پذیری عمومی

σ_{ph}^2: واریانس فنوتیپی

CV_g : ضریب تغییرات ژنتیکی

b: تعداد تکرارها

$\bar{X}_{00}$: میانگین صفت

s: تعداد شرایط تنش

MSg: میانگین مربعات ژنوتیپ

MS_E : میانگین مربعات خطا

در پایان، شاخص SIIG (شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل) برای رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها به‌کار رفت(جدول ۱). برای این منظور، صفاتی مانند وزن تر ساقه‌چه، طول ساقه‌چه، طول ریشه‌چه، سرعت جوانه‌زنی، درصد تخلیه ذخایر بذر و شاخص ویگور رشد به‌عنوان ویژگی‌های کلیدی انتخاب و نرمال‌سازی شده و بر اساس وراثت‌پذیری وزن‌دهی شدند.

ژنوتیپ‌های فرضی برتر و ضعیف‌تر بر اساس حداکثر و حداقل صفات تعیین شدند و سپس فاصله اقلیدسی ژنوتیپ‌ها از این دو ژنوتیپ محاسبه شد. با این روش، شاخص SIIG برای هر ژنوتیپ محاسبه و ژنوتیپ‌های برتر با بیشترین شباهت به ژنوتیپ ایده‌آل شناسایی شدند.

این شاخص دارای مقادیر بین صفر تا یک می‌باشد که به ترتیب دامنه ضعیفترین تا برترین ژنوتیپ‌ها را بیان می‌کند.

جدول۱_ مشخصات برترین و ضعیف‌ترین ژنوتیپ‌های فرضی

ژنوتیپ	وزن تر	وزن تر ساقه-	طول ساقه-	طول ریشه-	SRDP	AGT	GR	Zn

	ریشه‌چه (mg)	چه(mg)	چه(mm)	چه(mm)	(درصد)	(روز)	(دانه/روز)	(بذرmg/kg)
برترین ژنوتیپ	۰/۰۸	۰/۰۸	۹۰/۱۶	۶۲/۰۵	۶۷/۳۶	۷/۶۷	۱/۳۶	۸۹/۵۱
ضعیف‌ترین ژنوتیپ	۰/۰۳	۰/۰۴	۴۳/۶۳	۲۵/۳۰	۴۲/۴۶	۲/۸۳	۴/۲۲	۵۶/۵۵

SRDP: درصد تخلیه ذخایر بذر، AGT: میانگین مدت جوانه‌زنی، GR: سرعت جوانه‌زنی، Zn: عنصر روی.

شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل از رابطه (۲-۵) مورد محاسبه قرار گرفت:

$$SIIG = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \qquad i=1,2\ldots,m, \qquad 0 \le SIIG \le 1 \qquad (۲-۵)$$

در رابطه فوق d_i^+ فاصله از ژنوتیپ برتر و d_i^- فاصله از ژنوتیپ ضعیف می باشد که از روابط زیر محاسبه شد:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^{m}(r_{ij} - r_j^+)^2}$$

i=1,…,n

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{i=1}^{m}(r_{ij} - r_j^-)^2}$$

- r_{ij} : مقدار نرمال شده شاخص(صفت) iام (i=1,2,…,n)در رابطه با ژنوتیپjام (j=1,2,…,m).

r_j^+ و r_j^- : به ترتیب مقدار نرمال شده ژنوتیپ ایده‌آل و ژنوتیپ ضعیف برای هر شاخص(صفت) iام (i=1,2,…,n).

در مجموع، این آزمایش با طراحی دقیق، بررسی صفات فیزیولوژیکی و شیمیایی در شرایط تنش و تجزیه‌های آماری پیشرفته، زمینه‌ساز انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به تنش و مناسب برای کشت در شرایط کم‌آبی می‌باشد.

تجزیه واریانس:

آزمون کولموگروف-اسمیرنوف به منظور بررسی نرمال بودن توزیع خطاهای آزمایشی صفات مختلف (ولی‌زاده و مقدم، ۱۳۹۵)[34] نشان داد که توزیع خطاها در تمامی صفات مورد بررسی نرمال بوده است.

تجزیه واریانس چند متغیره:

از جمله کاربردهای آزمون‌های چندمتغیره، کاهش احتمال بروز خطای نوع اول است (مقدم و همکاران، ۱۳۸۸)[35]. نتایج تجزیه واریانس چندمتغیره برای ۲۲ لاین F7 به همراه دو والد در دو شرایط تنش (PEG) و عادی، در جدول ۲ آمده است. بر اساس چهار آزمون ارائه‌شده در جدول، اثرات تکرار، ژنوتیپ، شرایط تنش، و اثر متقابل ژنوتیپ × تنش همگی از نظر آماری معنادار بودند.

جدول ۲_ تجزیه واریانس چند متغیره برای ۲۴ ژنوتیپ مورد بحث

اثرات	آزمون	مقدار	آماره F	p-value
تکرار	Pillai's Trace	۰/۸۸۲	۲/۶۵۳	۰/۰۰۰
	Wilks' Lambda	۰/۲۷۴	۳/۰۱۷	۰/۰۰۰
	Hotelling's Trace	۲/۰۷۶	۳/۳۹۶	۰/۰۰۰
	Roy's Largest Root	۱/۷۵۰	۵/۸۸۷	۰/۰۰۰
تنش	Pillai's Trace	۱/۰۰۰	۲۷۶۹۳/۲۸۳	۰/۰۰۰
	Wilks' Lambda	۰/۰۰۰	۲۷۶۹۳/۲۸۳	۰/۰۰۰
	Hotelling's Trace	۸۳۴۵/۹۲۱	۲۷۶۹۳/۲۸۳	۰/۰۰۰
	Roy's Largest Root	۸۳۴۵/۹۲۱	۲۷۶۹۳/۲۸۳	۰/۰۰۰
ژنوتیپ	Pillai's Trace	۵/۸۸۰	۱/۴۹۱	۰/۰۰۰
	Wilks' Lambda	۰/۰۰۰	۱/۷۵۱	۰/۰۰۰
	Hotelling's Trace	۱۴/۱۱۴	۱/۹۸۳	۰/۰۰۰
	Roy's Largest Root	۳/۴۷۲	۱۴/۱۹۱	۰/۰۰۰
ژنوتیپ×تنش	Pillai's Trace	۵/۱۸۵	۱/۲۶۱	۰/۰۰۰
	Wilks' Lambda	۰/۰۰۱	۱/۴۶۴	۰/۰۰۰
	Hotelling's Trace	۱۲/۰۴۴	۱/۶۹۲	۰/۰۰۰
	Roy's Largest Root	۱۱/۹۰۶	۲/۹۱۳	۰/۰۰۰

با توجه به معنی‌دار بودن اثر ژنوتیپ‌ها در تجزیه واریانس چندمتغیره و تثبیت خطای نوع اول، انجام تجزیه واریانس تک‌متغیره امکان‌پذیر شد. شرایط تنش (ایجادشده توسط PEG) در اکثر صفات تأثیر معنی‌داری داشت، به جز در چهار صفت شامل:

تعداد نهایی گیاهچه، ضریب جوانه‌زنی، شاخص ویگور رشد گیاهچه، و طول ریشه‌چه. این نتایج با یافته‌های پژوهش‌های پیشین در گندم نیز هم‌راستا هستند (عبدی و همکاران، ۱۳۹۳؛ جاجرمی، ۱۳۹۴؛ طباطبایی و همکاران، ۱۳۹۹).

اثر ژنوتیپ برای اغلب صفات معنی‌دار بود، به جز طول و وزن خشک ریشه‌چه، که بیانگر وجود تنوع ژنتیکی در بین لاین‌های مورد بررسی است. برای بررسی دقیق‌تر، مجموع مربعات ژنوتیپ به سه بخش شامل RILها، والدین، و مقایسه RILها با والدین تفکیک شد. نتایج نشان داد که دو رقم آرتا و بم تنها در چند صفت تفاوت معنی‌داری داشتند، در حالی که لاین‌های F7 در بیشتر صفات (به جز سه صفت) تفاوت‌های معنی‌داری با یکدیگر نشان دادند. همچنین، میانگین والدین با میانگین لاین‌های F7 در برخی صفات از جمله درصد و سرعت جوانه‌زنی، ضریب جوانه‌زنی، ویگور، طول ساقه‌چه و وزن تر ریشه‌چه تفاوت معنی‌داری داشت. به‌طور کلی، تنوع بالای فنوتیپی در بین لاین‌های F7 از نظر اکثر صفات قابل مشاهده بود(جدول ۳).

جدول ۳_ تجزیه واریانس تک متغیره مربوط به صفات مورد مطالعه در ژنوتیپ‌های مورد بررسی

منابع تغییرات	درجه آزادی	MGT	GP	تعداد نهایی گیاهچه	MDG	AGT
تکرار	۲	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۱**	۰/۹۹۹^{ns}	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**
تنش	۱	۰/۰۱۸*	۰/۰۳۴*	۰/۷۵۸^{ns}	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۵**
ژنوتیپ	۲۳	۰/۰۰۱**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۷**	۰/۰۰۰**
والدین	۱	۰/۰۳۱*	۰/۰۷۴^{ns}	۰/۱۶۱^{ns}	۰/۰۱۹*	۰/۳۱۱$^{n.s}$
RILs	۲۱	۰/۰۰۴**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۵۴^{ns}	۰/۰۰۰**
والدین در مقابل RILs	۱	۰/۰۷۲^{ns}	۰/۴۶^{ns}	۰/۲۲۱^{ns}	۰/۰۷۸**	۰/۰۰۱**
ژنوتیپ× تنش	۲۳	۰/۶۹۳^{ns}	۰/۹۸۲^{ns}	۰/۴۲۵^{ns}	۰/۹۹۹^{ns}	۰/۹۴۳^{ns}
خطا	۹۴	۱/۹۲۶	۳۱۸/۶۰۲	۴/۶۴۵	۹۱/۰۳۱	۱/۶۸۲

^{ns}، * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪.

MGT: حداکثر مدت جوانه‌زنی(روز)، GP: درصد جوانه‌زنی(درصد)، MDG: درصد جوانه‌زنی روزانه(درصد)، AGT: میانگین مدت جوانه-زنی(روز)، GR: سرعت جوانه‌زنی(دانه/روز)، GC: ضریب جوانه‌زنی(درصد)، GV: ویگور جوانهزنی، GVI: شاخص ویگور رشد گیاهچه(mg)، SLDW: وزن خشک گیاهچه(mg)، RSDW: وزن خشک باقیمانده بذر(mg)، WMSR: وزن ذخایر پویای بذر(mg)، SRDP: درصد تخلیه ذخایر بذر(درصد)،Jfw: وزن تر گیاهچه(mg)، Afw: وزن تر باقیمانده بذر(mg).

ادامه جدول۳

منابع تغییرات	درجه آزادی	GR	GC	GV	GVI	SLDW
تکرار	۲	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۹۹۳^{ns}	۰/۲۳۶$^{n.s}$
تنش	۱	۰/۰۰۰**	۰/۰۶۸^{ns}	۰/۰۰۱**	۰/۶۷۹^{ns}	۰/۰۰۰**
ژنوتیپ	۲۳	۰/۰۰۱**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۲**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**
والدین	۱	۰/۰۳۱*	۰/۱۸۰^{ns}	۰/۰۵۸^{ns}	۰/۱۴۱^{ns}	۰/۰۰۶**
RILs	۲۱	۰/۰۰۴**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۹**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**
والدین در مقابل RILs	۱	۰/۰۷۲^{ns}	۰/۰۰۲**	/۰۳۳*	۰/۲۲۵^{ns}	۰/۸۹۳^{ns}
ژنوتیپ× تنش	۲۳	۰/۶۹۳^{ns}	۰/۹۰۳^{ns}	۰/۹۹۷^{ns}	۰/۵۵۲^{ns}	۰/۰۴۰**
خطا	۹۴	۱/۹۲۶	۰/۵۸۲	۹۲۰۲/۶۷۱	۰/۰۰۰۲۱۶	۲/۷۷۴$^{\times-۵}$

^{ns}، * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪.

ادامه جدول۳

منابع تغییرات	درجه آزادی	RSDW	WMSR	SRDP	طول ریشه‌چه
تکرار	۲	۰/۳۸۸^{ns}	۰/۱۰۵^{ns}	۰/۳۸۹^{ns}	۰/۳۶۷^{ns}
تنش	۱	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۱۲۸^{ns}
ژنوتیپ	۲۳	۰/۰۰۰**	۰/۰۴۰*	۰/۰۰۲**	۰/۱۲^{ns}
والدین	۱	۰/۱۶۵^{ns}	۰/۰۰۵**	۰/۱۴۴^{ns}	۰/۸۸۱^{ns}
RILs	۲۱	۰/۰۰۰**	۰/۳۷۶^{ns}	۰/۳۴۰^{ns}	۰/۰۰۴**
والدین در مقابل RILs	۱	۰/۷۳۰^{ns}	۰/۰۶۷^{ns}	۰/۸۹۳^{ns}	۰/۳۴۶^{ns}
ژنوتیپ× تنش	۲۳	۰/۰۰۷**	۰/۰۴۹*	۰/۰۳۲*	۰/۲۲۵^{ns}
خطا	۹۴	۲/۱۵۵$^{\times-۵}$	۱/۹۸۹$^{\times-۶}$	۷۳/۳۷۵	۲۱۵/۱۹۴

^{ns}، * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪.

ادامه جدول۳

منابع تغییرات	درجه آزادی	طول ساقه‌چه	Jfw	وزن تر ریشه‌چه	وزن خشک ریشه‌چه
تکرار	۲	۰/۱۵۵^{ns}	۰/۱۲۷^{ns}	۰/۲۲۷**	۰/۰۳۲*

تنش	۱	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**
ژنوتیپ	۲۳	۰/۰۰۴**	۰/۰۰۱**	۰/۰۰۰**	۰/۰۵۳ns
والدین	۱	۰/۷۶۷ns	۰/۳۴۰ns	۰/۲۱۱ns	۰/۳۸۹ns
RILs	۲۱	۰/۱۱۰*	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۴۱*
والدین در مقابل RILs	۱	۰/۰۴۱*	۰/۰۵۵ns	۰/۰۰۳**	۰/۳۱۹ns
ژنوتیپ× تنش	۲۳	۰/۵۴۷ns	۰/۰۰۴**	۰/۰۰۰**	۰/۲۸۷ns
خطا	۹۴	۳۲۵/۷۴۶	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۲۹۲	۵/۹۹۸×۱۰-۷

ns، * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪.

ادامه جدول۳

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن خشک ساقه‌چه	وزن تر ساقه‌چه	Afw
تکرار	۲	۰/۳۴۲ns	۰/۱۰۶ns	۰/۱۰۹ns
تنش	۱	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**
ژنوتیپ	۲۳	۰/۰۱۳*	۰/۰۰۵**	۰/۰۰۱**
والدین	۱	۰/۰۴۱*	۰/۷۸۹ns	۰/۳۷۸ns
RILs	۲۱	۰/۰۲۷*	۰/۰۰۲**	۰/۰۰۱**
والدین در مقابل RILs	۱	۰/۲۳۰ns	۰/۵۹۷ns	۰/۰۹۰ns
ژنوتیپ× تنش	۲۳	۰/۰۰۰**	۰/۰۱۸*	۰/۰۱۱*
خطا	۹۴	۳/۱۱۹×۱۰-۸	۰/۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۳۹۸

ns، * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪.

با توجه به این‌که اثر متقابل ژنوتیپ و تنش اسمزی در بیشتر صفات (از جمله حداکثر مدت جوانه‌زنی، درصد جوانه‌زنی، تعداد نهایی گیاهچه، درصد جوانه‌زنی روزانه، میانگین مدت جوانه‌زنی، سرعت و ضریب جوانه‌زنی، ویگور و شاخص ویگور جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه، ساقه‌چه و وزن خشک ریشه‌چه) معنی‌دار نبود، مقایسه میانگین ژنوتیپ‌ها برای این صفات بر پایه میانگین دو شرایط تنش و عادی انجام شد.

بر اساس نتایج، لاین‌های ۹ و ۴ در صفات تعداد نهایی گیاهچه و شاخص ویگور گیاهچه عملکرد بهتری نسبت به سایر لاین‌ها و حتی هر دو والد نشان دادند. در مقابل، لاین‌های ۲ و ۱۹ ضعیف‌ترین عملکرد را در این صفات داشتند. از نظر سرعت و

ضریب جوانه‌زنی، لاین‌های ۴ و ۱۸ بیشترین مقدار را داشته و به شکل معنی‌داری از والدین برتر بودند، در حالی که لاین ۲ و والد آرتا در این صفات کمترین مقدار را نشان دادند.

لاین‌های ۹ و ۱۸ در درصد جوانه‌زنی نیز عملکرد برتری داشتند، در حالی که لاین‌های ۲ و ۱۲ کمترین درصد را ثبت کردند. برای طول ساقه‌چه، لاین‌های ۱ و ۱۹ بیشترین و لاین‌های ۱۰ و ۲۲ کمترین طول را داشتند. لاین‌های ۴ و ۱۳ بیشترین درصد جوانه‌زنی روزانه را ثبت کرده‌اند، در حالی که والد آرتا و لاین ۲ در این زمینه ضعیف بودند. در میانگین مدت جوانه‌زنی، والد آرتا و لاین ۲ بیشترین مقدار و لاین‌های ۴ و ۱۸ کمترین مقدار را داشتند. لاین‌های ۴ و ۱۳ از نظر ویگور جوانه‌زنی برتر بودند، اما والد آرتا و لاین ۲ ضعیف‌ترین مقدار را ثبت کردند.

در بررسی طول ریشه‌چه، لاین ۱۳ نسبت به هر دو والد برتری معنی‌داری داشت و لاین ۱۶ تنها نسبت به یکی از والدین برتر بود. لاین‌های ۱۰ و ۲۲ در این صفت پایین‌ترین عملکرد را داشتند. در مورد حداکثر مدت جوانه‌زنی، والد آرتا و لاین ۷ بیشترین مقدار را نشان دادند، در حالی که لاین‌های ۸ و ۱۷ پایین‌ترین بودند. در نهایت، لاین‌های ۱۳، ۱۶ و ۲۱ بیشترین وزن خشک ریشه‌چه را داشتند و لاین‌های ۳، ۷، ۱۰، ۲۰ و والد بم کمترین مقدار را ثبت کردند.

نکته قابل توجه اینکه در صفاتی مانند تعداد نهایی گیاهچه، سرعت و ضریب جوانه‌زنی، درصد جوانه‌زنی، طول ساقه‌چه و ریشه‌چه، برخی از لاین‌ها عملکردی فراتر از والدین برتر داشتند که نشان‌دهنده بروز پدیده تفکیک متجاوز (Transgressive Segregation) است؛ موضوعی که بر ارزش اصلاحی تلاقی‌های انجام‌شده تأکید دارد (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸)[36].

با توجه به معنی‌دار بودن اثر متقابل ژنوتیپ و تنش اسمزی در صفات وزن خشک گیاهچه، وزن خشک باقیمانده بذر، وزن ذخایر پویای بذر، درصد تخلیه ذخایر بذر، وزن تر گیاهچه، وزن تر ریشه‌چه، وزن تر ساقه‌چه، وزن خشک ساقه‌چه و وزن تر باقیمانده بذر، میانگین این صفات به تفکیک دو شرایط عادی و تنش محاسبه گردید. مقایسه میانگین‌ها نیز بر اساس خطای معیار اثرات متقابل ژنوتیپ × تنش انجام شد.

بررسی میانگین لاین‌ها در صفات وزن خشک گیاهچه، وزن خشک باقیمانده بذر و وزن ذخایر پویای بذر نشان داد که لاین ۱۳ در شرایط تنش دارای بیشترین مقدار بود. همچنین، این لاین در شرایط عادی نیز به عنوان دومین ژنوتیپ برتر شناخته شد و اختلاف معنی‌داری با برترین لاین نداشت. لاین ۱۳ از نظر صفات وزن خشک گیاهچه و وزن خشک باقیمانده بذر در هر دو شرایط تنش و عادی به‌طور معنی‌داری عملکرد بهتری نسبت به هر دو والد نشان داد.

در رابطه با صفت درصد تخلیه ذخایر بذر، در شرایط عادی لاین ۳ و در شرایط تنش لاین ۷ بالاترین مقادیر را به خود اختصاص دادند. لاین ۳ در شرایط عادی اختلاف معنی‌داری با هر دو والد داشت. در صفات وزن تر گیاهچه و وزن تر ریشه‌چه ، در شرایط عادی لاین ۱۳ برترین لاین بود و نسبت به والدین نیز برتری معنی‌داری داشت، در حالی که در شرایط تنش، والد بم بیشترین مقدار را نشان داد.

در صفت وزن تر ساقه‌چه ، لاین ۱۳ در شرایط عادی دارای بیشترین مقدار بود و به‌طور معنی‌داری از هر دو والد برتر بود؛ در حالی که در شرایط تنش، لاین ۱۷ بیشترین مقدار را به خود اختصاص داد. در صفت وزن خشک ساقه‌چه نیز لاین ۱۳ در شرایط عادی بیشترین مقدار را داشت و به‌طور معنی‌داری از والدین پیشی گرفت. در شرایط تنش نیز همین لاین بالاترین مقدار را نشان داد. در نهایت، در صفت وزن تر باقی‌مانده بذر، لاین ۱۳ در شرایط عادی دارای بیشترین مقدار و اختلاف معنی‌دار با والدین بود، اما در شرایط تنش، والد بم بیشترین مقدار را نشان داد.

برتری لاین‌هایی مانند لاین ۱۳ نسبت به هر دو والد در صفاتی نظیر وزن خشک گیاهچه و وزن خشک باقیمانده بذر در هر دو شرایط عادی و تنش، بیانگر بروز پدیده‌ی تفکیک متجاوز بوده و نشان‌دهنده‌ی موفقیت‌آمیز بودن تلاقی‌ها از دیدگاه اصلاح نباتات می‌باشد.

سه صفت وزن ذخایر پویای بذر، درصد تخلیه ذخایر بذر و وزن تر ریشه‌چه در برخی از لاین‌ها در شرایط تنش مقادیر بالاتری نسبت به شرایط عادی نشان دادند. این موضوع با یافته‌های مطالعات پیشین نیز همخوانی دارد؛ به‌گونه‌ای که گزارش شده است شرایط تنش می‌تواند کارایی انتقال ذخایر بذر به اندام‌های رویشی را افزایش دهد و در نتیجه، منجر به ارتقای مقادیر این صفات در مقایسه با شرایط عادی گردد (خزاعی و کافی، ۱۳۸۲)[37].

به‌منظور بررسی روابط میان صفات مورد مطالعه، از تحلیل رگرسیون خطی چندگانه و همبستگی کانونیک استفاده شد. در تحلیل رگرسیون خطی چندگانه، به دلیل محدود بودن تعداد نمونه‌ها نسبت به تعداد متغیرهای مستقل، این متغیرها به دو گروه مجزا تقسیم شدند:

۱. ویژگی‌های گیاهچه شامل: شاخص ویگور رشد گیاهچه، درصد تخلیه ذخایر بذر، طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه، وزن تر ریشه‌چه، وزن خشک ریشه‌چه، وزن تر ساقه‌چه، وزن خشک ساقه‌چه، و میزان عناصر آهن و روی؛

۲. معیارهای جوانه‌زنی شامل: تعداد نهایی گیاهچه، روز اوج جوانه‌زنی، درصد جوانه‌زنی، حداکثر مدت جوانه‌زنی، درصد جوانه‌زنی روزانه، ضریب جوانه‌زنی، میانگین مدت جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، و ویگور جوانه‌زنی.

تحلیل رگرسیون به‌صورت جداگانه بر روی هر گروه از متغیرهای مستقل در ارتباط با متغیرهای وابسته مورد نظر صورت گرفت. همچنین در تحلیل همبستگی کانونیک، از همین تقسیم‌بندی برای محاسبه ضرایب همبستگی کانونیک و انجام تحلیل‌های تکمیلی استفاده شد.

رگرسیون چندگانه خطی صفات مورد مطالعه روی وزن تر ساقه چه بعلت وجود چندهم خطی بین خصوصیات گیاهچه این رگرسیون با روش ریج با لاندای برابر با ۰/۰۵۵ و به شکل نزولی انجام شد. بر این اساس متغیرهای وزن تر ریشه چه، طول ساقه چه و طول ریشه چه با ضریب تبیین اصلاح شده ۰/۹۴در مدل باقی ماندند(جدول ۴).

جدول۴_ نتایج رگرسیون نزولی خصوصیات گیاهچه بر روی وزن تر ساقه‌چه در شرایط عادی

متغیر	ضریب رگرسیون استاندارد شده	p-Value
وزن تر ریشه چه	۰/۷۶۱	۰/۰۰۰
طول ساقه چه	۰/۱۲۱	۰/۰۸
طول ریشه چه	۰/۱۳۱	۰/۰۹۷
۰/۹۴*adjusted R^2 =		

نتایج جدول بالا نشان داد که وزن تر ساقه‌چه به‌طور خطی وابسته به ابعاد گیاهچه است. در این رابطه، طول ساقه‌چه و طول ریشه‌چه در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بودند. از سوی دیگر، وزن تر ریشه‌چه، یا به عبارتی قدرت ریشه‌چه در جذب آب، مهم‌ترین عامل در افزایش وزن تر ساقه‌چه به شمار می‌آید.

رگرسیون خطی نزولی خصوصیات گیاهچه بر وزن خشک ساقه‌چه با استفاده از روش ریج و مقدار لاندای برابر با ۰.۰۶، منجر به مدل خطی با ضریب تبیین اصلاح‌شده برابر با ۰.۹۴ شد. در این مدل، دو متغیر درصد تخلیه ذخایر بذر (SRDP) و وزن خشک ریشه‌چه باقی ماندند(جدول ۵).

جدول۵_ نتایج رگرسیون نزولی خصوصیات گیاهچه بر روی وزن خشک ساقه‌چه در شرایط عادی

متغیر	ضریب رگرسیون استاندارد شده	p-Value
وزن خشک ریشه‌چه	-۰/۷۵۸	۰/۰۰۰
SRDP	۰/۲۰۸	۰/۰۴۸
۰/۹۴*adjusted R^2 =		

درصد تخلیه ذخایر بذرSRDP:

نتایج این جدول نشان داد که در شرایط فاقد تنش اسمزی، افزایش وزن خشک ریشه‌چه در سطح احتمال ۰.۰۱ باعث کاهش وزن خشک ساقه‌چه می‌شود. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که وزن خشک ساقه‌چه بیشتر تحت تأثیر افزایش درصد تخلیه ذخایر بذر قرار دارد و ریشه‌چه در این مورد تنها نقش جذب آب را ایفا می‌کند. به علاوه، رشد جرمی ریشه‌چه ارتباط منفی با وزن خشک ساقه‌چه دارد.

رگرسیون خطی معیارهای جوانه‌زنی بر وزن خشک ساقه‌چه با توجه به عدم معنی‌دار شدن ضرایب رگرسیون نشان داد که هیچ ارتباطی بین آنها وجود ندارد.

رگرسیون نزولی خصوصیات گیاهچه بر وزن تر ساقه‌چه در شرایط تنش اسمزی منجر به ایجاد مدل سه‌متغیری با ضریب تبیین اصلاح‌شده برابر با ۰.۹۹ شد. در مقایسه با شرایط عادی، مشخص شد که در شرایط تنش اسمزی، وزن تر ریشه‌چه همچنان مهم‌ترین عامل در افزایش وزن تر ساقه‌چه است. با این حال، طول ساقه‌چه در شرایط تنش رابطه منفی معنی‌داری در سطح احتمال ۰.۰۱ نشان داد. این امر بیانگر این است که قابلیت جذب آب در ساقه‌چه‌ها در شرایط تنش ارتباط منفی با طول

ساقه‌چه دارد و ساقه‌چه‌های کوتاه‌تر توانایی جذب آب بیشتری دارند. همچنین، افزایش درصد تخلیه ذخایر بذر (SRDP) در سطح احتمال ۰.۰۵ منجر به افزایش وزن تر ساقه‌چه شد(جدول ۶).

جدول۶_ نتایج رگرسیون نزولی خصوصیات گیاهچه بر روی وزن تر ساقه‌چه در شرایط تنش اسمزی

متغیر	ضریب رگرسیون استاندارد شده	p-Value
وزن تر ریشه‌چه	۱/۰۱	۰/۰۰۰
طول ساقه‌چه	-۰/۰۵	۰/۰۰۴
SRDP	۰/۰۳۶	۰/۰۲۲
۰/۹۹*adjusted R^2 =		

درصد تخلیه ذخایر بذرSRDP:

رگرسیون چندگانه خطی صفات مورد مطالعه روی وزن خشک ساقه‌چه رگرسیون خطی نزولی خصوصیات گیاهچه روی وزن خشک ساقه‌چه در شرایط تنش منجر به ایجاد مدل خطی با ضریب تبیین تصحیح شده برابر ۰/۹۲ شد که متغیر وزن خشک ریشه‌چه در آن باقی ماند.

نتایج جدول ۸ نشان داد که در شرایط تنش تنها عامل وزن خشک ریشه‌چه است که منجر به افزایش وزن خشک ساقه‌چه می‌شود. به عبارتی می‌توان اینگونه عنوان کرد که هرچقدر وزن خشک ریشه‌چه بیشتر باشد وزن خشک ساقه‌چه نیز بیشتر خواهد بود.

جدول۸_ نتایج رگرسیون نزولی خصوصیات گیاهچه بر روی وزن خشک ساقه‌چه در شرایط تنش اسمزی

متغیر	ضریب رگرسیون استاندارد شده	p-Value
وزن خشک ریشه‌چه	۰/۹۶۳	۰/۰۰۰
۰/۹۲*adjusted R^2 =		

رگرسیون خطی معیارهای جوانه زنی روی وزن خشک ساقه‌چه با توجه به عدم معنی‌دار شدن ضریب رگرسیون نشان داد که ارتباطی بین آنها وجود ندارد.

در این تحقیق، محتوای روی و آهن بذر در هیچ یک از شرایط عادی و تنش رابطه‌ای با متغیرهای وابسته نشان نداد. به نظر می‌رسد دلیل این امر تعداد کم ژنوتیپ‌های مورد استفاده و کم بودن درجه آزادی باقیمانده باشد.

آزمایشی به منظور بررسی واکنش پارامترهای مؤثر در جوانه‌زنی گیاه مرزه در شرایط تنش اسمزی انجام شد. این آزمایش در شرایط کنترل شده اتاقک رشد در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو تکرار اجرا و پتانسیل‌های اسمزی مورد نیاز با استفاده از مانیتول در ۱۴ سطح (از سطح صفر تا سطح ۱۴ بار) با فاصله سطوح یک بار ایجاد شد و به عنوان سطوح اعمال تنش مورد نظر قرار گرفت. صفات مهم در مرحله جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهچه‌ای شامل طول ریشه‌چه و طول ساقه‌چه اندازه‌گیری شد. همچنین صفات زمان شروع تا حداکثر جوانه‌زنی، حداکثر جوانه‌زنی، یکنواختی جوانه‌زنی و سرعت جوانه‌زنی محاسبه شدند. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اختلاف بین پتانسیل‌های اسمزی مورد بررسی برای طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه، زمان شروع تا حداکثر جوانه‌زنی، حداکثر جوانه‌زنی، یکنواختی جوانه‌زنی و سرعت جوانه‌زنی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. همچنین مشخص شد که با افزایش میزان تنش اسمزی، طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه، حداکثر جوانه‌زنی و سرعت جوانه‌زنی کاهش یافتند و در مقابل زمان شروع تا حداکثر جوانه‌زنی و یکنواختی جوانه‌زنی افزایش یافتند (صبوری و همکاران، ۱۳۸۹)[38].

تجزیه همبستگی کانونیک در شرایط فاقد تنش اسمزی (عادی)

در شرایط فاقد تنش اسمزی، همبستگی کانونیک با مقدار ۰.۹۷ (p-value = 0.049) بین گروه صفات معیارهای جوانه‌زنی و گروه خصوصیات گیاهچه برآورد شد. در تجزیه همبستگی کانونیک، ماتریس ساختار همبستگی صفات مورد مطالعه با تابع کانونیک مربوطه نشان داده می‌شود. تحلیل ماتریس‌ها مشخص کرد که متغیر GVI (شاخص ویگور رشد گیاهچه) با ضریب ۰.۸۷ از گروه خصوصیات گیاهچه، با متغیرهای GP (درصد جوانه‌زنی)، AGT (میانگین مدت جوانه‌زنی)، GR (سرعت جوانه‌زنی) و GC (ضریب جوانه‌زنی) به ترتیب با ضرایب ۰.۹۴، -۰.۸۸، ۰.۸ و ۰.۸۷ مهم‌ترین عوامل در رابطه با تحقق ضریب همبستگی کانونیک فوق بوده‌اند. به عبارت دیگر، GVI با GP، GR و GC رابطه مثبت و با AGT رابطه منفی نشان داد(جدول۹).

جدول۹_ ماتریس ساختار گروه صفات خصوصیات گیاهچه در شرایط عادی

ماتریس ساختار معیارهای خصوصیات گیاهچه(عادی)	
متغیر	**تابع کانونیک ۱**
GVI (شاخص ویگور رشد گیاهچه)	٭۰/۸۷
SRDP(درصد تخلیه ذخایر بذر)	-۰/۱۳
طول ریشه‌چه	۰/۲۹
طول ساقه‌چه	۰/۰۰۴
وزن تر ریشه‌چه	۰/۰۱۷
وزن خشک ریشه‌چه	۰/۱۷۸
وزن تر ساقه‌چه	۰/۰۴
وزن خشک ساقه‌چه	-۰/۱۵
Fe(آهن)	۰/۱۵
Zn(روی)	۰/۱۱

ادامه جدول۹_ ماتریس ساختار گروه صفات معیارهای جوانه‌زنی در شرایط عادی

ماتریس ساختار معیارهای جوانه زنی(عادی)	
متغیر	**تابع کانونیک ۱**
روز دارای بیشترین جوانه‌زنی	۰/۱۴
GP (درصد جوانه‌زنی)	٭۰/۹۴
MGT(حداکثر مدت جوانه‌زنی)	۰/۷۱
MDG(درصد جوانه‌زنی روزانه)	۰/۱۸
AGT (میانگین مدت جوانه‌زنی)	٭-۰/۸۸
GR(سرعت جوانه‌زنی)	٭۰/۸۰
GC(ضریب جوانه‌زنی)	٭۰/۸۲
GV(ویگور جوانه‌زنی)	۰/۴

تجزیه همبستگی کانونیک در شرایط تنش اسمزی

در شرایط تنش اسمزی، همبستگی کانونیک بین دو گروه مذکور از متغیرها برابر با ۰.۹۹۱ (p-value = 0.000) به دست آمد. تحلیل ماتریس ساختار، بیانگر این مطلب بود که متغیر GVI (شاخص ویگور رشد گیاهچه) با ضریب ۰.۹۹۹ از سمت خصوصیات گیاهچه و معیارهای جوانه‌زنی، شامل تعداد نهایی گیاهچه، GP (درصد جوانه‌زنی)، GC (ضریب جوانه‌زنی) و

GR (سرعت جوانه‌زنی) رابطه مستقیم و با متغیر AGT (میانگین مدت جوانه‌زنی) رابطه منفی داشت. این متغیرها مهمترین نقش را در ایجاد همبستگی کانونیک فوق داشتند(جدول ۱۰).

جدول۱۰_ نتایج تجزیه همبستگی کانونیک در شرایط تنش گروه خصوصیات گیاهچه در شرایط تنش اسمزی

ماتریس ساختار معیارهای خصوصیات گیاهچه(تنش اسمزی)	
متغیر	**تابع کانونیک ۱**
GVI (شاخص ویگور رشد گیاهچه)	٭۰/۹۹۹
SRDP(درصد تخلیه ذخایر بذر)	-۰/۵۳
طول ریشه‌چه	۰/۴۲
طول ساقه‌چه	۰/۳۴
وزن تر ریشه‌چه	-۰/۱۸
وزن خشک ریشه‌چه	۰/۱۳
وزن تر ساقه‌چه	-۰/۱۸۹
وزن خشک ساقه‌چه	۰/۱۸۵
Fe(آهن)	۰/۲۲
Zn (روی)	۰/۴۹

ادامه جدول۱۰_ نتایج تجزیه همبستگی کانونیک در شرایط تنش گروه معیارهای جوانه‌زنی در شرایط تنش اسمزی

ماتریس ساختار معیارهای جوانه‌زنی(تنش اسمزی)	
متغیر	**تابع کانونیک ۱**
تعداد نهایی گیاهچه	٭۰/۹۹۹
روز دارای بیشترین جوانه‌زنی	-۰/۱
GP(درصد جوانه‌زنی)	٭۰/۹۵
MGT(حداکثر مدت جوانه‌زنی)	۰/۳۹
MDG(درصد جوانه‌زنی روزانه)	۰/۵۱
AGT(میانگین مدت جوانه‌زنی)	٭-۰/۹۳
GR(سرعت جوانه‌زنی)	٭۰/۹۱
GC(ضریب جوانه‌زنی)	٭۰/۸۹

GV(ویگور جوانه‌زنی)	۰/۵۶

بدین ترتیب، نتایج تجزیه همبستگی کانونیک در هر دو شرایط عادی و دارای تنش اسمزی تقریباً یکسان بود و تنها تفاوت مربوط به افزوده شدن متغیر تعداد نهایی گیاهچه در شرایط تنش بود که نشان می‌دهد تعداد نهایی گیاهچه در شرایط تنش با شاخص دیگر رشد گیاهچه رابطه مثبت دارد. همچنین، با توجه به مقادیر همبستگی کانونیک و p-value می‌توان اظهار داشت که در شرایط تنش اسمزی شدت روابط بین خصوصیات گیاهچه و معیارهای جوانه‌زنی بیشتر بود.

در مطالعه‌ای، ارتباط بین ۱۵ خصوصیت مرتبط با جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه در هفت گونه مهم زراعی (مانند گندم، جو، سویا، پنبه، کلزا، آفتابگردان و گلرنگ) با استفاده از روش همبستگی کانونیک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که بین ویژگی‌های فیزیکی بذر (وزن دانه، طول دانه، وزن مخصوص بذر و میزان رطوبت نسبی دانه) و ویژگی‌های جوانه‌زنی بذر در آزمایشگاه (درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، یکنواختی جوانه‌زنی، وزن تر و وزن خشک گیاهچه) دو تابع کانونیک اول قابل توجه بودند و باعث بروز همبستگی کانونیک معنی‌دار بین گروه‌های صفات مذکور شدند. همچنین، بین ویژگی‌های بذر و گیاهچه در شرایط آزمایشگاه و مزرعه نیز همبستگی کانونیک معنی‌داری مشاهده شد (پهلوانی و همکاران، ۱۳۸۸)[39].

پارامترهای ژنتیکی واریانس فنوتیپی و ژنوتیپی، وراثت‌پذیری و ضریب تغییرات ژنتیکی برای هر یک از صفات در شرایط عادی و تنش اسمزی مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجاییکه واریانس بین لاین‌های اینبرد نوترکیب برآوردی از دو برابر واریانس افزایشی است، بنابراین وراثت‌پذیری محاسبه شده در این پژوهش می‌تواند برآوردی از وراثت‌پذیری خصوصی باشد.

با توجه به جدول قبل، درصد جوانه‌زنی، میانگین مدت جوانه‌زنی، ضریب جوانه‌زنی و شاخص ویگور رشد گیاهچه به ترتیب با مقادیر ۰/۸۶، ۰/۸۶، ۰/۸۵ و ۰/۸۰ بالاترین وراثت‌پذیری را به خود اختصاص دادند. بنابراین می‌توان اظهار داشت که در بین لاین‌های مورد مطالعه، این ویژگی‌ها به شکل مستقیم و بدون نیاز به آزمون نتاج و با اعتبار بالا قابل گزینش هستند.

با توجه به محاسبات، بیشترین ضریب تغییرات ژنتیکی مربوط به صفات ویگور جوانه‌زنی، تعداد نهایی گیاهچه، شاخص ویگور رشد گیاهچه و میانگین مدت جوانه‌زنی به ترتیب با مقادیر ۸۷/۸۴، ۷۹، ۷۷/۱۲ و ۶۷/۱۲ بود که نشان‌دهنده تنوع ژنتیکی بالا در آن‌ها است (غفاری مقدم و همکاران، ۱۳۹۸)[40]. کمترین مقدار ضریب تغییرات ژنتیکی به صفت وزن خشک ساقه‌چه با مقدار ۲/۹۸ تعلق داشت.

ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۵)[41] در آزمایشی برای ارزیابی روابط بین صفات در شرایط تنش شوری، وراثت‌پذیری بالایی را برای درصد جوانه‌زنی بیان کردند. نتایج نشان داد که تنوع ژنتیکی قابل توجهی بین کلیه ژنوتیپ‌ها در تمام صفات مورد بررسی وجود داشت. در این تحقیق، بیشترین مقدار تنوع فنوتیپی و ژنتیکی، وراثت‌پذیری عمومی و خصوصی و پیشرفت ژنتیکی برای درصد جوانه‌زنی نهایی برآورد شد. پیشرفت ژنتیکی در جهت مثبت و منفی نشان داد که آلل‌های کاهنده و افزایش‌دهنده در بین والدین وجود دارند.

در آزمایشی دیگری، علیزاده و همکاران (۱۳۸۲)[42] با مطالعه قابلیت ترکیب ژنوتیپ‌های کلزا نشان دادند که هر دو اثرات افزایشی و غالبیت در کنترل ژنتیکی پارامترهای جوانه‌زنی در شرایط شاهد و شوری نقش دارند.

شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل یکی از ابزارهای مهم در اصلاح نباتات است که به محققان و اصلاح‌گران گیاهی این امکان را می‌دهد تا بهترین ژنوتیپ‌ها را بر اساس معیارهای مختلف انتخاب کنند. در این پژوهش، برای انتخاب برترین ژنوتیپ‌ها از روش شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل استفاده شد. به دلیل وقوع فرصت‌های نوترکیبی زیاد در ایجاد لاین‌های اینبرد نوترکیب، هر یک از لاین‌ها معمولاً یکسری خصوصیات منحصر به فرد دارند و نمی‌توان به راحتی یک ژنوتیپ را که از نظر تمامی صفات برتر باشد، یافت.

در این تحقیق، شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل با توجه به صفات مختلفی از جمله وزن تر ریشه‌چه، وزن تر ساقه‌چه، طول ساقه‌چه، طول ریشه‌چه، درصد تخلیه ذخایر بذر (SRDP)، میانگین مدت جوانه‌زنی (AGT)، سرعت جوانه‌زنی (GR) و محتوای روی بذر محاسبه شد. نتایج نشان داد که لاین‌های ۱۴، ۵، ۱۰ و ۲۲ به ترتیب با مقادیر ۰/۶۳۳، ۰/۶۲۹، ۰/۶۱۶ و ۰/۶۰۷ بالاترین مقادیر SIIG را داشتند و به عنوان برترین ژنوتیپ‌ها انتخاب شدند (زالی و براتی، ۱۳۹۹)[43].

نتایج بررسی صفات مختلف در ژنوتیپ‌های ایده‌آل نشان داد که در برخی صفات، ژنوتیپ‌ها تفاوت‌های معنی‌داری با والدین (آرتا و بم) دارند.

۱. در صفت میانگین مدت جوانه‌زنی: ژنوتیپ‌های ایده‌آل ۲۲ و ۱۰ با والد بم تفاوت معنی‌دار داشتند. همچنین، ژنوتیپ ۱۰ با والد آرتا نیز اختلاف معنی‌داری نشان داد.

۲. در صفت سرعت جوانه‌زنی: ژنوتیپ‌های ایده‌آل ۱۰، ۱۴ و ۲۲ با هر دو والد آرتا و بم تفاوت معنی‌دار داشتند. در این صفت، ژنوتیپ ۵ تنها با والد آرتا اختلاف معنی‌دار داشت.

۳. در صفات طول ساقه‌چه و طول ریشه‌چه: همه ژنوتیپ‌های ایده‌آل با هر دو والد آرتا و بم تفاوت معنی‌دار داشتند.

۴. در صفت درصد تخلیه ذخایر پویا: ژنوتیپ ۲۲ تنها در شرایط تنش با والد آرتا اختلاف معنی‌دار داشت. ژنوتیپ‌های ۵ و ۱۴ در محیط عادی با هر دو والد آرتا و بم و در محیط تنش تنها با والد بم اختلاف معنی‌دار داشتند. ژنوتیپ ۱۰ در هر دو محیط تنش و عادی با هر دو والد آرتا و بم تفاوت معنی‌دار نشان داد.

۵. در صفت وزن تر ریشه‌چه: ژنوتیپ‌های ۲۲، ۱۴ و ۵ در هر دو محیط عادی و تنش با والد آرتا تفاوت معنی‌دار داشتند و همین ژنوتیپ‌ها در محیط عادی با والد بم نیز تفاوت داشتند. ژنوتیپ ۱۰ تنها در محیط عادی با هر دو والد تفاوت معنی‌دار داشت.

۶. در صفت وزن تر ساقه‌چه: ژنوتیپ‌های ۲۲، ۱۴ و ۵ در هر دو محیط عادی و تنش با والد آرتا و در محیط عادی با والد بم اختلاف معنی‌دار داشتند. ژنوتیپ ۱۰ تنها در محیط عادی با والد بم تفاوت معنی‌دار داشت، اما در هر دو محیط تنش و عادی با والد آرتا اختلاف معنی‌دار داشت.

این نتایج نشان می‌دهد که ژنوتیپ‌های ایده‌آل در شرایط مختلف محیطی (عادی و تنش) و در مقایسه با والدین آرتا و بم، تفاوت‌های قابل توجهی از نظر صفات مختلف جوانه‌زنی و رشد گیاهچه دارند که می‌تواند در انتخاب ژنوتیپ‌های مناسب برای بهبود صفات کشاورزی مفید باشد.

نتیجه‌گیری کلی

تحلیل واریانس چندمتغیره نشان داد که تکرار، ژنوتیپ‌ها، شرایط تنش اسمزی و اثر متقابل آن‌ها تأثیر معناداری بر صفات مورد بررسی داشتند. در تجزیه تک‌متغیره نیز اثر شرایط تنش بر اغلب صفات، به جز چهار مورد، معنادار بود و تفاوت معناداری بین ژنوتیپ‌ها در بیشتر صفات مشاهده شد که حاکی از وجود تنوع ژنتیکی قابل توجه است.

از نظر میانگین صفات، پدیده تفکیک متجاوز در برخی ویژگی‌ها دیده شد که نشان‌دهنده موفقیت تلاقی‌ها از نظر اصلاحی است. صفاتی مانند ویگور جوانه‌زنی و تعداد نهایی گیاهچه دارای بیشترین تنوع ژنتیکی بودند، در حالی که بیشترین وراثت‌پذیری مربوط به درصد جوانه‌زنی، میانگین مدت جوانه‌زنی و شاخص ویگور رشد بود. تحلیل رگرسیون نیز مشخص کرد که برخی صفات گیاهچه به‌صورت خطی تحت تأثیر ویژگی‌های دیگر قرار دارند، با تفاوت‌هایی در شرایط عادی و تنش. همبستگی کانونیک بین صفات جوانه‌زنی و ویژگی‌های گیاهچه در هر دو شرایط معنادار بود و در شرایط تنش، این روابط قوی‌تر بودند.

در نهایت، با استفاده از شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل، لاین‌های ۵، ۱۰، ۱۴ و ۲۲ به عنوان برترین لاین‌ها معرفی شدند.

منابع

1. Morsy, S.M., Elbasyoni, I.S., Abdallah, A.M., and Baenziger, P.S. 2021. Imposing water deficit on modern and wild wheat collections to identify drought-resilient genotypes. Journal of Agronomy and Crop Science, 208: 427-440.

2. Correia, P. MP., da Silva, A.B., Roitsch,T., Carmo-Silva,E., and Marques da Silva, J., 2021. Photoprotection and optimization of sucrose usage contribute to faster recovery of photosynthesis after water deficit at high temperatures in wheat. Physiologia Plantarum, 172: 615-28.

3. Ahmed, R., Howlader, M.H.K., Shila, A., and Haque, M.A. 2017. Effect of salinity on germination and early seedling growth of maize. Progressive Agriculture, 28: 18-25.

4. امیری، م.ب.، رضوانی مقدم، پ.، احیایی، ح.ر.، فلاحی، ج.و.، و اقحوانی شجری، م. ۱۳۸۹. اثر تنش های اسمزی و شوری بر شاخص های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه دو گیاه دارویی آرتیشو (*Cynara scoolymus*) و سرخارگل (*Echinacea purpurea*). نشریه تنش های محیطی در علوم زراعی، ۳: ۱۶۵-۱۷۶.

5. Nair, R., Varghese, S.H., Nair, B.G., Maekawa, T.,Yoshida, Y., and Kumar, S.K. 2010. Nanoparticulate material delivery to plants. Plant Science, 179: 154-63.

6. Marschner, H., 2011. Marschner's mineral nutrition of higher plants. Academic Press, 483-643 pages.

7. Dubcovsky, J. and Dvorak, J. 2007. Genome plasticity a kay factor in the success of polyploidy wheat under domestication. Science, 316: 1862-1866.

8. Feldman M. 2001. Origin of cultivated wheat. Lavoisier Publishing. In: Bonjean, A.P. and Angus, W.J. (eds.). The world wheat book: a history of wheat breeding, France, pp. 3-56.

9. Badaeva, E.D., Friebe, B., Zoshchuk, S.A., Zelenin, A.V. & Gill, B.S. 1991. Molecular cytogenetic analysis of tetraploid and hexaploid *Aegilops* grasses. Chromosome Research, 6: 629-637.

10. Mirzaie-Nadoushan, H., Zebarjadi, A.R. & Karimzadeh, G. 2000. Karyotypic investigation of some *Bromus tomentellus* populations and their karyotype correlations. The Iranian Journal of Botany, 8 :287-298

11 . Badaeva E.D. 2002. Evaluation of phylogenetic relationships between five polyploid Aegilops L.species of the U–genome cluster by means of chromosome analysis. Russian Journal of Genetics, 38: 664-675.

12. خدابنده، ن. ۱۳۷۱. زراعت غلات. انتشارت دانشگاه تهران. ۵۰۶ صفحه.

13. نورمحمدی، ق.، سیادت، س.ع. و کاشانی، ع. ۱۳۸۰. زراعت غلات. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ۴۶۸ صفحه.

14. فتحی، ع. و زاهدی، م. ۱۳۹۳. تأثیر محلول‌پاشی نانو ذرات اکسید آهن و روی بر رشد و محتوای یونی دو رقم گندم تحت تنش شوری. دانشگاه صنعتی اصفهان، مجله تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی، ۴: ۳۰۵-۲۹۵.

15. Sramkova, Z., Gregova, E., and Sturdik, E. 2009. Chemical composition and nutritional quality of wheat grain. Acta Chimica Slovaca, 2: 115-138.

16. FAO. 2024. Faostat. http://Fao.org

17. Belderok, B., Mesdag, H., and Donner, D.A. 2000. Bread-Making Quality of Wheat. Springer, New York, 432 pages.

18. اسدی، ع. ا. و حاتمی، ا. ۱۴۰۰. تاثیر تنش خشکی انتهای فصل بر برخی صفات فیزیوژیک گندم (*Triticum aestivum* L.). فرآیند کارکرد گیاهی، انجمن فیزیولوژی گیاهی ایران، ۱۰: ۱۲۸-۱۱۵.

19. مدحج، ع. ۱۴۰۰. فیزیولوژی تنش شوری در گندم. دو فصلنامه علوم به زراعی گیاهی، ۱۰۵:۱۱-۹۳.

20. مسرت، ن.، سیادت، ع. ا.، شرفی‌زاده، م. و حبیبی خانیانی، ب. ۱۳۹۲. تاثیر پرایمینگ بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه ذرت هیبرید SC704 در شرایط تنش شوری وخشکی. مجله علمی- پژوهشی اکوفیزیولوژی گیاهی، ۵: ۲۵-۱۳.

21. معروف زاده، ک. و منصوری فر، س. ۱۳۹۴. تغییرات جوانه‌زنی و رشد گیاهچه گندم با استفاده از اثرات خیساندن بذر در محلول پلی اتیلن گلیکول (PEG). چهارمین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار، تهران، ۳ اسفند ۱۳۹۴.

22. انصاری، ا. و شریف زاده، ف. ۱۳۹۰. اثر تنش اسمزی و دما بر جوانه‌زنی بذر چاودار کوهی (*Secale montanum*). نشریه تحقیقات بذر، ۱: ۴۰-۳۴.

23. عبدی، ح.، بی همتا، م. ر.، عزیز اف، ا. و چوگان، ر. ۱۳۹۳. بررسی سطوح تنش خشکی ناشی از پلی اتیلن گلیکول (PEG 6000)بر مؤلفه های جوانی‌زنی بذر و ارتباط آن با شاخص‌های تحمل به خشکی در ارقام و لاین‌های امید بخش گندم نان(*Triticum aestivum* L.). نشریه علمی پژوهشهای زراعی ایران، ۵۹۶:۱۲-۵۸۲.

24. طباطبایی، س. م. ت.، بخشی، ب. و نارویی راد، م. ر. ۱۳۹۹. بررسی اثرات تنش خشکی ناشی از پلی اتیلن گلیکول بر جوانه‌زنی و خصوصیات مورفولوژیک گندم نان. نخستین همایش ملی کم آبیاری و استفاده از آب های نامتعارف در کشاورزی مناطق خشک، ۳۶۸.

25. جاجرمی، و. ۱۳۹۴. بررسی اثر تنش خشکی بر مولفه‌های جوانه‌زنی هفت رقم گندم. پژوهش های زراعی در حاشیه کویر، ۱: ۱-۱۱.

26. Sayar, R., Bchini, H., Mosbahi, M. and Ezzine, M. 2010. Effects of salt and drought stresses on germination, emergence and seedling growth of durum wheat (Triticum durum Desf.). Journal of Agricultural Research, 5: 2008-2016.

27. Mahpara, S., Zainab, A., Ullah, R., Kausar, S., Bilal, M., Latif, M., I., Arif, M., Al-Hashimi, A.M., Elshikh, M.S., Zivcak, M. and Tan Kee Zuan, A. 2022. The impact of PEG-induced drought stress on seed germination and seedling growth of different bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. PloS One,17: e0262937.

28. Sharma, V., Kumar, A., Chaudhary, A., Mishra, A., Rawat, S., Y.B., B., Shami, V. and Kaushik, P. 2022. Response of wheat genotypes to drought stress stimulated by PEG. Journal of Stresses, 2: 26-51.

29. Bilgili, D., Mehmet, A. and Kazım, M. 2019. Effects of peg-induced drought stress on germination and seedling performance of bread wheat genotypes. Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences, 29: 765-771.

30. Murillo-Amador, B., López-Aguilar, R., Kaya, C., Larrinaga-Mayoral, J. and Flores-Hernández, A. 2002. Comparative effects of NaCl and polyethylene glycol on germination, emergence and seedling growth of cowpea. Journal of Agronomy and Crop Science, 188: 235-247.

31. Spanic, V., Izakovic, M. and Marcek, T. 2017. Wheat germination And seedlings under PEG-induced conditons. Agronomski glasnik: Glasilo Hrvatskog agronomskog Drustva, 79: 99-109.

32. پاکباز، ن.، امیدی، ح.، نقدی بادی، ح. ع. و بستانی، ا. ۱۴۰۱. تاثیر کاربرد محلول پاشی عناصر روی و آهن روی گیاه مادری کینوا تحت تنش کم‌آبی بر جوانه‌زنی و رنگیزه های فتوسنتزی بذور حاصل از آن. نشریه تحقیقات بذر، ۱۲:۵۵-۲۷.

33. ریاحی نیا، ش. و دانایی‌پور، ز. ۱۳۹۹. تاثیر تیمار نانو کود آهن و کلات آهن در دو مرحله زیستی گیاه سالیکورینا تحت تنش شوری. مجله پژوهشهای گیاهی(مجله زیست شناسی ایران)، ۱۴۰۱:۱:۳۵.

34. علیزاده، ب.، ولی‌زاده، م.، مقدم، م.، قاسمی گلعذانی، ک. و احمدی، م. ر.، ۱۳۸۲. اساس ژنتیکی تحمل به شوری کلزا (*BRASSICA NAPUS* L.) در مرحله جوانه‌زنی. نشریه جهاد دانشگاهی، ۳: ۶۶-۵۳.

35. مقدم، م.، محمدی، س.ا. و آقایی سربرزه، م. ۱۳۸۸. آشنایی با روش‌های آماری چند متغیره (ترجمه). انتشارات پریور، ۲۸۰صفحه.

36. حسین‌زاده، ز.، محمدی میریک، ع. ا.، رحیمی، ا. ۱۳۹۸. ارزیابی تنوع ژنتیکی و تفکیک متجاوز عملکرد و اجرای عملکرد لاین‌های F_6 حاصل از تلاقی KO37×CAN1066 بزرک (*Linum usitatissimum* L.). پژوهشنامه اصلاح گیاهان زراعی، ۳۲: ۱۸۳-۱۷۵.

37. خزاعی، ح. م. و کافی، م. ۱۳۸۲. تاثیر تنش خشکی بر رشد ریشه و توزیع ماده خشک بین ریشه و بخش هوایی در ارقام مقاوم و حساس گندم. نشریه پژوهش‌های زراعی ایران، ۱: ۴۱-۳۳.

38. صبوری، ح.، رحمانی، ز.، قلی‌زاده، ع. و جعفرزاده رزمی، م. ر. ۱۳۸۹. بررسی پارامترهای جوانه‌زنی مرزه (*Satureja hortensis* L.) تحت تنش اسمتیک با استفاده از رگرسیون خطی. همایش ملی گیاهان دارویی، ۱.

39. پهلوانی، م. ه.، احمدی، آ.، پالوج، ا. و جعفری، آ. ۱۳۸۸. بررسی ارتباط ویژگی‌های فیزیکی بذر، جوانه‌زنی و رشد گیاهچه بذر برخی از گونه‌های زراعی با استفاده از تجزیه همبستگی‌های متعارف. مجله پژوهش‌های تولید گیاهی، ۱۶: ۶۶-۴۷.

40. غفاری مقدم، س.، صبوری، ح.، قلیزاده، ع. و فلاحی، ح. ع. ۱۳۹۸. ساختار ژنتیکی مولفه‌های جوانه‌زنی جو تحت شرایط نرمال و تنش شوری. نشریه علمی دانشگاه اصفهان، ۳: ۹۴-۷۹.

41. ابراهیمی، م. ع.، محمدیان، ر.، خلیلی، م. ۱۳۹۵. برآورد همبستگی ژنتیکی، وراثت پذیری و گروهبندی لاین‌های جو هاپلوئید مضاعف بر اساس شاخص‌های مرتبط با جوانه‌زنی در شرایط تنش شوری. پژوهش‌های ژنتیک گیاهی، ۱: ۴۴-۲۹.

42. علیزاده، ب.، ولی‌زاده، م.، مقدم، م.، قاسمی گلعذانی، ک. و احمدی، م. ر.، ۱۳۸۲. اساس ژنتیکی تحمل به شوری کلزا (*BRASSICA NAPUS* L.) در مرحله جوانه‌زنی. نشریه جهاد دانشگاهی، ۳: ۶۶-۵۳.

43. زالی، ح. و براتی، ع. ۱۳۹۹. بررسی شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل(SIIG) به منظور گزینش لاین‌های امیدبخش جو با عملکرد بالا و خصوصیات زراعی مطلوب. پژوهشنامه اصلاح گیاهان زراعی، ۳۴: ۱۰۴-۹۳.