



The Effect of Endophytic Fungi *Alternaria chlamydospora*, *Fusarium equiseti*, and *Curvularia spicifera* on the Germination of Bread Wheat Seeds under Artificial Drought Stress

Mohammad Sabzehzari¹ | Mohammad Reza Naghavi^{2✉} | Seyed Kazem Sabbagh Sharafabadi^{3✉} | Mohammad Javan Nikkhah⁴ | Houshang Alizadeh⁵

1. Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: msabzehzari68@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Agronomy and Plant Breeding, Agricultural and Natural Resources College, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: mnaghavi@ut.ac.ir
3. Corresponding Author, Department of Biology, Faculty of Science, University of Yazd, Yazd, Iran. E-mail: sksabbagh@ut.ac.ir
4. Department of Plant Protection, Agricultural and Natural Resources College, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: jnikkhah@ut.ac.ir
5. Department of Agronomy and Plant Breeding, Agricultural and Natural Resources College, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: halizade@ut.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: June 26, 2024

Received in revised form:

September 25, 2024

Accepted: October 26, 2024

Published online: June 22, 2025

Keywords:

Cereal,
drought induction,
fungi,
priming,
seed.

ABSTRACT

Improvement of seed germination and seedling growth under stresses has made the seed treatment with endophytic fungi a promising method for mitigating climate change conditions. Therefore, this research was conducted with the aim of determining the effect of *Aegilops* endophyte fungi on the germination of bread wheat seeds under drought conditions. *Alternaria chlamydospora*, *Fusarium equiseti*, and *Curvularia spicifera* fungi were isolated from *Aegilops tauschii*, *Ae. triuncialis*, and *Ae. cylindrical* species, respectively. The identity of these endophytes was confirmed by using the ITS4 and ITS1F primers towards amplifying ITS nrDNA genomic region, followed by morphological survey. Germination characteristics of the French RENAN variety of wheat were investigated under PEG 6K drought (-4.5 bar) and the fungal treatments in M medium. PEG-induced drought decreased germination traits such as germination percentage, germination rate, germination energy, germination index, and seedling growth traits (length and weight), and also seed vigor index. *C. spicifera* fungus often had no effect on germination traits. *F. equiseti* fungus due to its pathogenic nature, caused a decrease in the germination characteristics, especially under stress conditions. On the contrary, *A. chlamydospora* fungus often led to an improvement of seedling length, seedling weight, and germination indices under both humidity normal and drought conditions. In general, endophyte *A. chlamydospora* could improve wheat germination indicators and seedling growth under drought conditions, and therefore, there is a potential to use it in the seed priming.

Cite this article: Sabzehzari, M., Naghavi, M.R., Sabbagh Sharafabadi, S.K., Javan Nikkhah, M., & Alizadeh, H. (2025). The effect of endophytic fungi *Alternaria chlamydospora*, *Fusarium equiseti*, and *Curvularia spicifera* on the germination of bread wheat seeds under artificial drought stress. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 56(2), 1-12. Doi: 10.22059/ijfcs.2024.377043.655084.





انتشارات دانشگاه تهران

علوم گیاهان زراعی ایران

شماره الکترونیکی: ۸۰۸۲-۲۴۲۳

Homepage: <https://ijfcs.ut.ac.ir/>

تأثیر قارچ‌های اندوفیت *Fusarium equiseti*، *Alternaria chlamydospora* و *Curvularia spicifera* بر جوانه‌زنی بذور گندم نان تحت تنش خشکی مصنوعی

محمد سبزه‌زاری^۱ | محمدرضا نقوی^۲ | سید کاظم صباغ شرف‌آبادی^۳ | محمد جوان نیکخواه^۴ | هوشنگ علیزاده^۵

۱. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: msabzehzari68@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mnaghavi@ut.ac.ir

۳. گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه یزد، یزد، ایران. رایانامه: sksabbagh@yazd.ac.ir

۴. گروه گیاه‌پزشکی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: jnikkhah@ut.ac.ir

۵. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: halizade@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱ کلیدواژه‌ها: القای خشکی، بذر، پرایمینگ، غلات، قارچ.	تقویت جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه در مقابله با تنش‌ها، تیمار بذر با قارچ‌های آندوفیت را به روشی امیدبخش برای مواجهه با شرایط تغییر اقلیم تبدیل کرده است. لذا، این پژوهش با هدف تعیین تأثیر قارچ‌های آندوفیت <i>Aegilops tauschii</i>، <i>Curvularia spicifera</i> و <i>Fusarium equiseti</i> به‌ترتیب از گونه‌های آغازگرهای ITS4 و ITS1F برای تکثیر ناحیه ژنومی ITS nrDNA در کنار مطالعه ریخت‌شناسی تایید شد. خصوصیات جوانه‌زنی و رشد گیاهچه رقم فرانسوی RENAN گندم تحت خشکی PEG 6K (۴/۵- بار) و تیمار قارچی در محیط M بررسی شد. خشکی القاشده با PEG سبب کاهش صفات جوانه‌زنی نظیر درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، انرژی جوانه‌زنی، شاخص جوانه‌زنی، خصوصیات رشد گیاهچه (طول و وزن گیاهچه) و شاخص بنیه/ویگور بذر شد. قارچ <i>C. spicifera</i> اغلب تأثیری بر صفات جوانه‌زنی نداشت. قارچ <i>F. equiseti</i> به‌واسطه ماهیت بیماری‌زایی خود سبب کاهش خصوصیات جوانه‌زنی به‌ویژه تحت شرایط تنش شد. در مقابل، قارچ <i>A. chlamydospora</i> اغلب منجر به بهبود طول و وزن گیاهچه همراه با شاخص‌های جوانه‌زنی تحت هر دو شرایط عادی رطوبتی و تنش خشکی شد. به‌طور کلی، آندوفیت <i>A. chlamydospora</i> قادر بود تا شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه گندم را تحت شرایط خشکی بهبود بخشد؛ لذا، پتانسیل استفاده از آن در پرایمینگ بذر وجود دارد.

استناد: سبزه‌زاری، م.، نقوی، م.ر.، صباغ شرف‌آبادی، س.ک.، جوان نیکخواه، م.، و علیزاده، ه. (۱۴۰۴). تأثیر قارچ‌های اندوفیت *Fusarium equiseti*، *Alternaria chlamydospora* و *Curvularia spicifera* بر جوانه‌زنی بذور گندم نان تحت تنش خشکی مصنوعی.

علوم گیاهان زراعی ایران، ۵۶(۲)، ۱-۱۲. DOI: 10.22059/ijfcs.2024.377043.655084



© نویسندگان

ناشر: موسسه انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

گندم یکی از محصولات استراتژیک دنیا می‌باشد که نزدیک به ۲۰ درصد نیاز جوامع انسانی به مواد مغذی و انرژی را تامین می‌کند (Benlioglu et al., 2024). با این حال، از یک طرف، تولید این محصول متأثر از حوادثی مثل تغییر اقلیم و تنش‌های محیطی قرار دارد و از طرف دیگر، نیاز جوامع انسانی به خاطر گسترش جمعیت به این محصول مهم در حال افزایش است (Pour-Aboughadareh et al., 2021). جوانه‌زنی یکی از مراحل کلیدی در چرخه زندگی گندم به شمار می‌آید که فرآیندهای رشد و نمو، عملکرد و کیفیت را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Cardarelli et al., 2022). خشکی بر خصوصیات مختلف جوانه‌زنی نظیر درصد جوانه‌زنی اثر چشمگیری می‌گذارد (Benlioglu et al., 2024). کمبود آب کافی سبب اختلال در فرایند آبنوشتی بذر و فعال‌سازی آنزیم‌های درگیر در جوانه‌زنی و فرآیندهای متابولیکی می‌شود. چنین اختلالاتی منجر به عدم جوانه‌زنی یا عدم یکنواختی در جوانه‌زنی بذور می‌شوند (Vuković et al., 2022).

میان‌کنش‌های قارچ‌های اندوفیت، نقش کلیدی در تحول و تنوع زیستی گیاهان دارند (Trentin et al., 2024). این قارچ‌ها باعث تقویت جوانه‌زنی و رشد گیاهچه می‌شوند (Leroy et al., 2019). این ویژگی در کنار افزایش توان سازگاری گیاهان در مقابله با تنش‌های زیستی و غیر زیستی (Hubbard et al., 2012)، تیمار با قارچ‌های اندوفیت را به روش امیدبخشی برای کشاورزی در نواحی نیمه‌خشک تبدیل ساخته است (Marthandan et al., 2020). از میان اندوفیت‌های قارچی، سه گونه *Fusarium equiseti* (Shikur Gebremariam et al., 2018)، *Alternaria chlamydospora* (Perelló et al., 2013) و *Curvularia spicifera* (Qostal et al., 2019) مورد توجه قرار گرفته‌اند. حضور اندوفیت *C. spicifera* در آمریکا، اروپا، آسیا و آفریقا با تأثیر ناچیز بر عملکرد گیاهان گزارش شده است. به گفته Qostal et al. (2019)، این قارچ دارای بیماری‌زایی کمی است، اما به هنگام اپیدمی و تحت شرایط خاص، شاید بتواند باعث کاهش عملکرد گندم و جو شود. بر مبنای مشاهدات Shikur Gebremariam et al. (2018)، قارچ آسکومیست رشته‌ای *F. equiseti* برای گندم بیمارگر مهمی نیست و لذا خسارت زیادی به بار نمی‌آورد. اندوفیت *A. chlamydospora* دارای دامنه تأثیر متنوعی بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه است (Perelló et al., 2013).

اجداد گندم (*Aegilops*) دارای تنوع قارچ‌های اندوفیت چشمگیری هستند که از آن می‌توان برای به‌نژادی مبتنی بر مایکوبیوم بهره جست. گونه‌های آزیلوپس *Aegilops tauschii* (دارای ژنوم D)، *Ae. triuncialis* (دارای ژنوم UC) و *Ae. cylindrical* (دارای ژنوم DC) به‌خاطر صفات بارزش خود مورد توجه به‌نژادگران قرار گرفته‌اند (Li et al., 2024). تاکنون، مطالعات متعددی در حوزه تأثیر تنش خشکی بر جوانه‌زنی بذور و استفاده از تیمارهای پرایمینگ زیستی برای کاهش اثر خشکی انجام شده است. در پژوهشی، Hubbard et al. (2012) نشان دادند که خشکی باعث کاهش خصوصیات جوانه‌زنی نظیر درصد جوانه‌زنی و وزن تر گیاهچه می‌شود و در مقابل قارچ‌های اندوفیت منجر به بهبود جوانه‌زنی گندم شدند. علاوه بر این، Colla et al. (2015) نشان دادند که اندوفیت‌های قارچی حتی اگر با بذر در تماس قرار گیرند، بر رشد، جذب مواد مغذی، عملکرد و کیفیت دانه‌های گندم تأثیر مثبت خواهند گذاشت. با توجه به اهمیت قارچ‌های اندوفیت در پاسخ گیاه به خشکی، این پژوهش با هدف کاوش تأثیر قارچ‌های اندوفیت *A. chlamydospora*، *F. equiseti* و *C. spicifera* بر جوانه‌زنی بذور گندم نان تحت تنش خشکی انجام شد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. مواد گیاهی

نمونه‌های گیاهی *Aegilops* از سه گونه *Aegilops tauschii* (گلستان-کردکوی)، *Ae. triuncialis* (قزوین)، *Ae. cylindrical* (قزوین) تهیه و بر مبنای کلید شناسایی (Van Slageren, 1994) هویت آنها تأیید شد. نمونه‌برداری گیاهی بدین شکل بود که بوته‌های آزیلوپس از خاک بیرون آورده شدند و سپس در پاکت‌های کاغذی قرار گرفتند تا توسط گیاه‌شناس تأیید هویت شوند و در ادامه ریشه آنها جداسازی و برای ادامه آزمایش نگهداری شدند.

۲-۲. قارچ‌های اندوفیت

قارچ‌های اندوفیت *A. chlamydospora*، *F. equiseti* و *C. spicifera* به ترتیب از گونه‌های *Ae. tauschii*، *Ae. triuncialis* و *Ae. cylindrical* جداسازی شدند (شکل ۱). برای جداسازی جدایه‌های قارچی، قطعات ریشه بر اساس دستورالعمل *Salamon et al.* (2023) نخست استریل و سپس روی محیط‌های PDA، MEA و CMA کشت شدند. در اغلب محیط‌ها، دو تا پنج قارچ رشد کرد که در ادامه هر کدام از آنها به‌طور جداگانه به یک محیط جدید انتقال یافت. این واکشت میسلیوم‌های قارچی تا جایی ادامه داشت که جدایه خالص (از نظر ریخت) در محیط PDA به‌دست آید.



شکل ۱. قارچ‌های اندوفیت *A. chlamydospora* (الف)، *F. equiseti* (ب) و *C. spicifera* (پ).

جهت شناسایی و تایید هویت قارچ‌های اندوفیت، لوله‌های حاوی یک گرم میسلیوم قارچی خالص در ازت مایع به مدت دو دقیقه قرار گرفتند. استخراج محتوی DNA و واکنش PCR به‌طور همزمان با استفاده از کیت REDExtract-N-Amp™ انجام شد. محتوی DNA با استفاده از محلول‌های استخراج و رقیق‌ساز تهیه شد. در ادامه از محلول رقیق حاصل برای اجرای واکنش PCR استفاده شد. اجزای واکنش PCR عبارت بودند از: هشت میکرولیتر مسترمیکس، ۰/۸ میکرولیتر آغازگر ITS4 (5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3') (با غلظت ۰/۵ میکرومولار)، ۰/۸ میکرولیتر آغازگر ITS1F (5'-CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA-3') (با غلظت ۰/۵ میکرومولار)، ۶/۴ میکرولیتر آب دیونیزه و چهار میکرولیتر ماتریکس (از محلول رقیق حاصل از استخراج DNA). چرخه حرارتی PCR به‌صورت واسرشت‌سازی در ۹۴ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ ثانیه، اتصال در ۵۶ درجه سلسیوس به مدت ۴۵ ثانیه و گسترش در ۷۲ درجه سلسیوس به مدت ۶۰ ثانیه تنظیم شد. محصول PCR با استفاده از ژل آگارز ۱/۵ درصد به مدت ۲۰ دقیقه در دستگاه الکتروفورز تفکیک شد. جهت شناسایی قارچ‌ها، هشت میکرولیتر آب دیونیزه، یک میکرولیتر آغازگر ITS4 و یک میکرولیتر محصول PCR باهم ترکیب شدند و در چاهک‌های پلیت توالی‌یابی ریخته شدند. سپس، نمونه‌ها برای توالی‌یابی سانگر به شرکت آلمانی Eurofins Genomics فرستاده شدند. توالی‌ها با استفاده از ابزار BLAST-NCBI علیه پایگاه‌های اطلاعاتی ITS قارچی همانندجویی شدند. نتایج حاصل از همانندجویی با مورفولوژی قارچی توسط کارشناس قارچ‌شناسی منطبق شد تا از صحت شناسایی قارچ اطمینان حاصل شود.

۲-۳. تیمار بذور گندم با قارچ‌های اندوفیت و ارزیابی جوانه‌زنی تحت تنش خشکی

روش ضد عفونی بذور گندم عبارت بود از: تیمار بذور با اتانول ۹۵ درصد به مدت ۱۰ ثانیه و شستشو با آب مقطر به مدت ۱۰ ثانیه. ضد عفونی از دو جهت حائز اهمیت است: اول، باعث حذف میکروارگانیسم‌های رقابت‌کننده با قارچ‌های اندوفیت می‌شود و دوم، اجازه تغییر خصوصیات جوانه‌زنی توسط میکروارگانیسم‌های غیر اندوفیت را نمی‌دهد. عدم وجود میکروارگانیسم‌های غیر از اندوفیت مورد نظر بر مبنای مشاهدات چشمی قابل تایید است. قبل از جوانه‌زنی، بذور گندم با قارچ‌های اندوفیت و بر اساس روش *Abdellatif et al.* (2009) تیمار شدند. به‌طور خلاصه، یک تکه از میسلیوم قارچی (با ابعاد تقریبی ۰/۵*۰/۵ سانتی‌متر) روی بذور رقم فرانسوی RENAN گندم تحت شرایط عادی رطوبتی و تنش خشکی قرار گرفت. بذرها تحت شرایط عادی و تنش برای یک

1. Potato Dextrose Agar

2. Malt Extract Agar

3. Corn Meal Agar

هفته جوانه زدند. شرایط استاندارد جوانه‌زنی عبارت بودند از: سه تکرار، پنج بذر به ازای هر تکرار، دمای جوانه‌زنی ۲۰ درجه سانتی‌گراد و بستر جوانه‌زنی کاغذ صافی واتمن. تنش خشکی به راحتی و با استفاده از PEG 6K (۴/۵ - بار) در محیط M (Bécard & Fortin, 1988) اعمال شد. غلظت ترکیب PEG 6K بر اساس گزارش Abdi *et al.* (2015) و با فرمول $QS = (1018 \times 10^{-2})C - (1018 \times 10^{-4})C^2 + (2067 \times 10^{-4})CT + (8039 \times 10^{-7})C^2T$ (که در آن QS معادل پتانسیل اسمزی، C معادل غلظت PEG، و T معادل دما به سانتی‌گراد است) به گونه‌ای تنظیم شد که با پتانسیل ۴/۵- بار، تنش خشکی متوسط بر بذر گندم وارد آورد.

۲-۴. سنجش خصوصیات جوانه‌زنی بذور گندم

معیار بذور جوانه‌زده، خروج ریشه‌چه گندم به طول دو میلی‌متر در نظر گرفته شد. شمارش روزانه بذور جوانه‌زده گندم تا زمانی ادامه یافت که افزایشی در تعداد بذور جوانه‌زده طی دو شمارش متوالی مشاهده نشد. در روز پایانی آزمایش (روز هشتم)، صفات گیاهچه‌ای همانند طول گیاهچه (SL)، ساقه‌چه (HL) و ریشه‌چه (RL) در بذور جوانه‌زده تعیین شدند. جهت برآورد وزن تر (SFW) و خشک (SDW) گیاهچه، نخست ریشه‌چه‌ها و ساقه‌چه‌های هر تیمار و تکرار از بذور جدا و وزن شدند. ریشه‌چه‌ها و ساقه‌چه‌ها به‌طور جداگانه به‌مدت دو شبانه‌روز در دمای ۷۰ درجه سلسیوس در آون قرار گرفتند تا وزن خشک آنها توسط ترازو دیجیتال تعیین شود. از مجموع وزن خشک ساقه‌چه و ریشه‌چه، وزن خشک گیاهچه به‌دست آمد. بر مبنای اطلاعات حاصل از شمارش بذور جوانه‌زده در هر روز تا پایان روز هشتم، خصوصیات دیگر مرتبط با جوانه‌زنی نظیر شاخص جوانه‌زنی (GI)، سرعت جوانه‌زنی (GR)، انرژی جوانه‌زنی (GE)، درصد جوانه‌زنی (GP)، و بنیه بذر (SI) برآورد شدند (جدول ۱).

جدول ۱. روابط محاسبه شاخص‌های جوانه‌زنی.

Index	Calculation formula	Ref.
Germination Energy	$GE = \frac{nt_4}{N} \times 100$	Agrawal, 2003
Germination Index	$GI = \frac{7n_1 + 6n_2 + 5n_3 + 4n_4 + 3n_5 + 2n_6 + 1n_7}{7 \times N}$	
Seedling Vigor Index	$SI = \frac{GP \times LSh}{100}$	
Germination Rate	$GR = \sum \left(\frac{n_1}{t_1} + \frac{n_2}{t_2} + \frac{n_i}{t_i} \right)$	
Germination Percentage	$GP = \frac{n}{N} \times 100$	

حروف n، N و t به‌ترتیب عبارتند از: تعداد بذور جوانه‌زده، تعداد کل بذور و زمان (روز).

۲-۵. تجزیه و تحلیل آماری

مقایسه خصوصیات جوانه‌زنی تحت شرایط عادی، تیمار قارچ و تنش خشکی با استفاده از تجزیه واریانس فاکتوریل مبتنی بر طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و مقایسه میانگین LSD در نرم‌افزار R انجام شد. قبل از انجام آنالیزها، داده‌های مربوط به جوانه‌زنی تحت تبدیل سینوس معکوس قرار گرفتند تا توزیع عادی از آنها به‌دست آید. سطح معنی‌داری مقایسه میانگین‌ها با LSD نیز یک و پنج درصد در نظر گرفته شد (جدول ۲).

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

نتایج حاصل از تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که شرایط رطوبتی، قارچ‌های اندوفیت و اثر متقابل آنها تأثیر معنی‌داری در سطوح یک و پنج درصد بر خصوصیات مختلف جوانه‌زنی و رشد گیاهچه داشته است.

جدول ۲. تجزیه واریانس خصوصیات جوانه‌زنی بذر گندم نان تحت تاثیر قارچ اندوفیت و شرایط رطوبتی مختلف.

	df	MS									
		RL	HL	SL	SFW	SDW	GI	GR	GE	GP	SVI
En	1	70.42**	26.4**	180.18**	0.32**	0.003**	0.29**	40.82*	0.16*	1566.9**	116.03**
Fungi	3	56.71**	37.78**	176.36**	0.51**	0.005**	0.22**	72.88**	0.22**	1144.9**	92.70**
En. Fungi	3	3.34 *	20.92**	24.64**	0.42 *	0.0003*	0.06*	10.09*	0.02*	272.6*	11.4*
Error	16	2.93	2.99	3.2	0.01	0.0002	0.01	8.61	0.001	121.8	2.25

* و ** به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد. اختصارات در قسمت "ستجش خصوصیات جوانه‌زنی" می‌باشد.

۳-۱. طول ریشه‌چه، ساقه‌چه و گیاهچه

تنش خشکی القاشده با PEG سبب کاهش معنی‌دار طول ریشه‌چه، ساقه‌چه و گیاهچه گندم شد. تحت شرایط عادی، قارچ *A. chlamydospora* سبب افزایش ۴۹، ۶۸ و ۵۷ درصدی طول ریشه‌چه، ساقه‌چه و گیاهچه گندم نسبت به شاهد شد. در مقابل، قارچ *F. equiseti* باعث کاهش حدود ۴۰ درصدی صفات مذکور نسبت به شاهد شد. برخلاف تاثیرگذاری معنی‌دار دو قارچ فوق، قارچ *C. spicifera* تاثیر معنی‌داری بر طول ریشه‌چه و ساقه‌چه نداشت (شکل ۲-الف). تحت شرایط خشکی، رفتار قارچ *C. spicifera* همانند شرایط عادی رطوبتی بود که نشان‌دهنده عدم توانایی این اندوفیت در کمک به میزبان خود تحت شرایط کمبود آب است. قارچ *F. equiseti* تنها توانست خاصیت مهارکنندگی خود را روی ریشه اعمال کند و طول آن را حدود ۶۰ درصد نسبت به شاهد تنش کاهش دهد. جالب اینکه قارچ *A. chlamydospora* همچنان توانست به رشد گیاهچه کمک کند و طول ریشه‌چه، ساقه‌چه و گیاهچه را به ترتیب ۶۵، ۱۲۰ و ۹۵ درصد نسبت به شاهد تنش افزایش دهد (شکل ۲-الف).

۳-۲. وزن گیاهچه

پاسخ گندم از نظر وزن تر و خشک گیاهچه از رفتار صفت طول تبعیت کرد که از لحاظ ارتباط مابین طول و وزن منطقی است. به عبارتی، با افزایش طول گیاهچه طبیعتاً وزن آن نیز افزایش می‌یابد. تحت شرایط عادی رطوبتی، قارچ *A. chlamydospora* به ترتیب باعث افزایش حدود ۳۰ و ۲۵ درصدی وزن تر و خشک گیاهچه گندم نسبت به شاهد شد. در مقابل، قارچ *F. equiseti* باعث کاهش حدود ۵۰ درصدی صفات مورد نظر شد. با این حال، قارچ *C. spicifera* تاثیری بر وزن گیاهچه نداشت (شکل ۲-ب). تحت شرایط تنش خشکی، تیمار بذرها با قارچ *C. spicifera* اثر معنی‌داری بر وزن گیاهچه نداشت. تاثیر منفی قارچ *F. equiseti* بر وزن خشک بیشتر از وزن تر بود که شاید به خاطر ایجاد اختلال در تولید ماده خشک گیاهچه است. با این حال، قارچ *A. chlamydospora* توانست هر دو صفت وزن خشک و تر گیاهچه را افزایش دهد که این امر گویای توانایی این قارچ در افزایش جذب آب و کمک به تولید زیست‌توده است (شکل ۲-ب).

۳-۳. شاخص جوانه‌زنی

شاخص جوانه‌زنی، بر مبنای شمارش بذره‌ای جوانه‌زده از روز اول تا هفتم است. این شاخص، به‌طور همزمان، درصد و سرعت جوانه‌زنی را در برمی‌گیرد. خشکی منجر به یک افت معنی‌دار در شاخص جوانه‌زنی گندم نسبت به تیمار شاهد شد. تحت شرایط عادی، هر دو قارچ *A. chlamydospora* و *C. spicifera* سبب افزایش شاخص جوانه‌زنی شدند؛ هر چند تاثیر قارچ *A. chlamydospora* بیشتر و معنی‌دار بود. قارچ *F. equiseti* همچنان بخاطر ماهیت پاتوژنی خود بر شاخص جوانه‌زنی اثر منفی بر جای گذاشت. تحت خشکی، قارچ *A. chlamydospora* موجبات افزایش شاخص جوانه‌زنی را تا ۵۵ درصد نسبت به شاهد تنش فراهم کرد. در مقابل، شاخص جوانه‌زنی تحت تاثیر منفی قارچ‌های *F. equiseti* و *C. spicifera* قرار گرفت (شکل ۲-پ).

۳-۴. سرعت جوانه‌زنی

سرعت جوانه‌زنی در واقع گویای تعداد بذور جوانه‌زده در یک مدت زمان معین است. خشکی سبب کاهش سرعت جوانه‌زنی شد که امری بدیهی است. در مقابل، دو قارچ *A. chlamydospora* و *C. spicifera* توانستند سرعت جوانه‌زنی را تحت شرایط خشکی التیام بخشند و آن را به سطح شاهد برگردانند. در این میان، قارچ *A. chlamydospora* توانست سرعت جوانه‌زنی را تا ۴۰ درصد نسبت

به شرایط تنش خشکی افزایش دهد. قارچ *F. equiseti* همچنان با اختلال در فرآیند جوانه‌زنی سبب کاهش سرعت جوانه‌زنی شد (شکل ۲-ت).

۳-۵. انرژی جوانه‌زنی

انرژی جوانه‌زنی پارامتری است که در دل خود سرعت و بنیه بذر را دارد. خشکی سبب کاهش انرژی جوانه‌زنی شد؛ این در حالی است که قارچ‌های *C. spicifera* و *A. chlamydospora* به ترتیب باعث افزایش ۴۷ و ۵۶ درصدی این شاخص نسبت به شاهد در شرایط کمبود آب شدند. در مقابل، قارچ *F. equiseti* تأثیری بر صفت انرژی جوانه‌زنی در بذور متاثر از خشکی نداشت. تحت شرایط عادی رطوبتی، تنها قارچ *C. spicifera* توانست سبب افزایش انرژی جوانه‌زنی شود (شکل ۲-ث).

۳-۶. درصد جوانه‌زنی

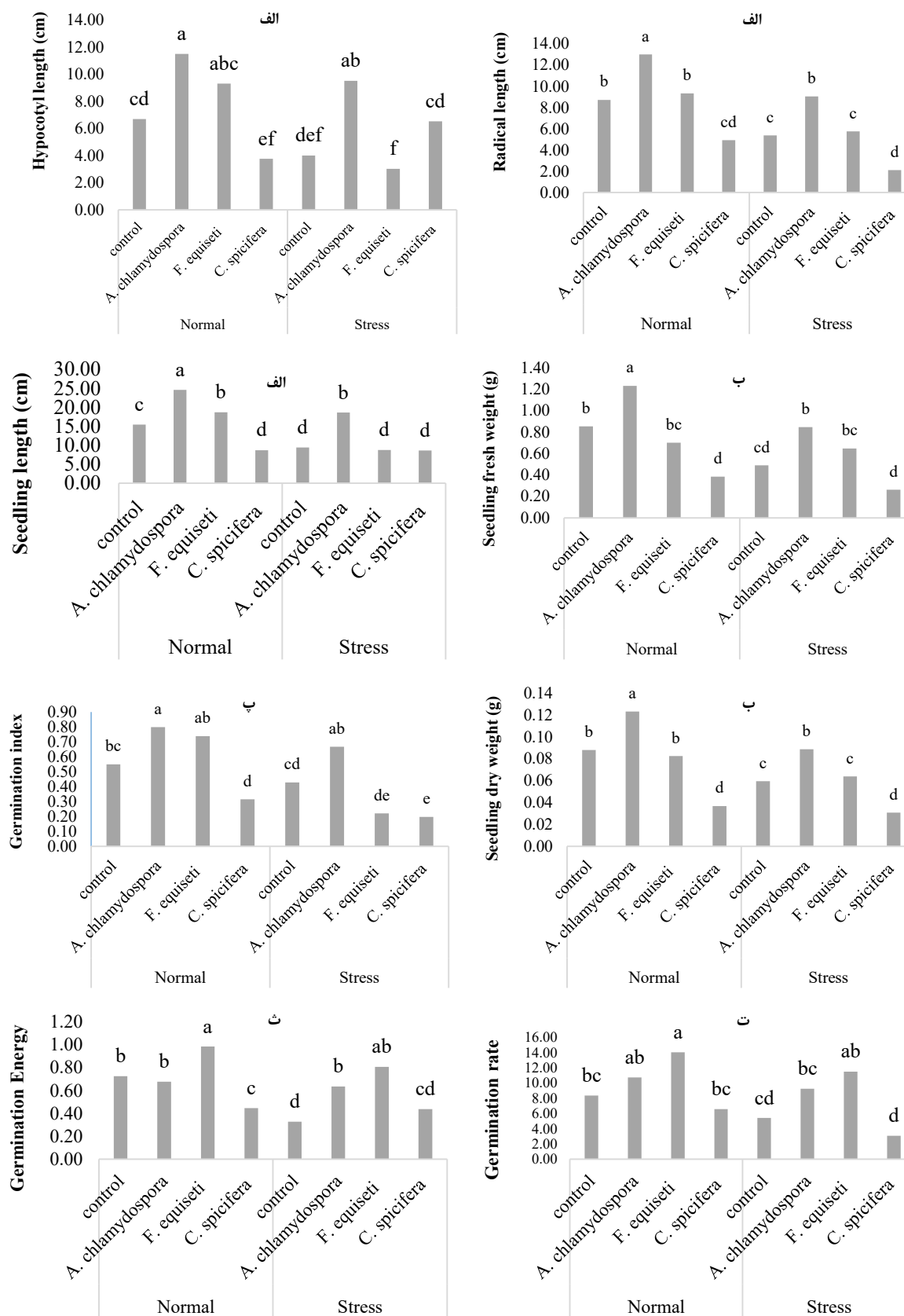
درصد جوانه‌زنی یکی از شاخص‌های مهم مطالعه رفتار بذور در مواجهه با تیمارهای مختلف آزمایشی است. کاهش درصد جوانه‌زنی بر اثر تنش خشکی القاشده با PEG مشهود و قابل انتظار بود. هر دو قارچ *C. spicifera* و *A. chlamydospora* تأثیر مثبت و معنی‌داری بر درصد جوانه‌زنی تحت شرایط کمبود آب داشتند و به ترتیب درصد جوانه‌زنی را تا ۱۱۵ و ۶۰ درصد نسبت به شاهد افزایش دادند. تحت شرایط عادی رطوبتی، قارچ *A. chlamydospora* تنها قارچی بود که اثر مثبت و معنی‌داری بر درصد جوانه‌زنی گذاشت (شکل ۲-ج).

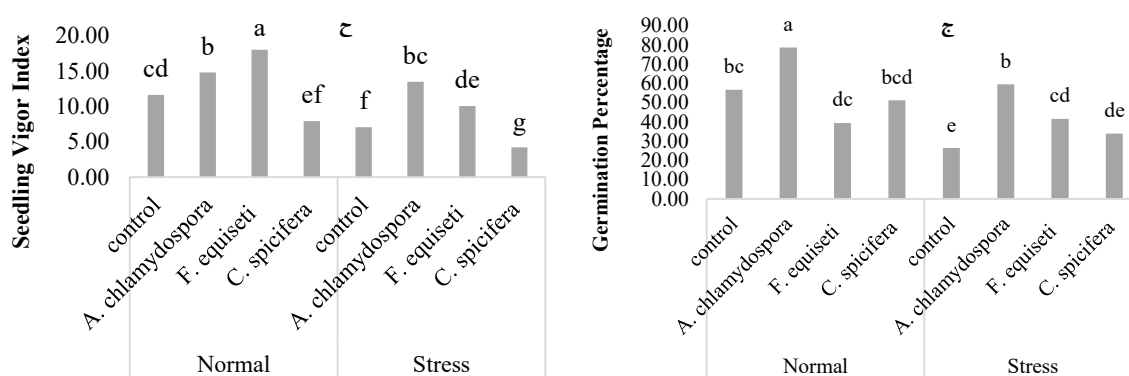
۳-۷. شاخص بنیه بذر

شاخص بنیه بذر آخرین شاخص جوانه‌زنی است که پاسخ آن به تیمار قارچی تحت خشکی القاشده با PEG مطالعه شد. قارچ‌های *C. spicifera* و *A. chlamydospora* دارای تأثیر مثبت اما قارچ *F. equiseti* دارای تأثیر منفی بر بنیه بذر در شرایط عادی رطوبتی بودند. تنش خشکی منجر به کاهش ۲۷ درصدی در بنیه بذر نسبت به شاهد شد. قارچ *F. equiseti* با یک اثر منفی سبب کاهش بیشتر در شاخص مورد مطالعه شد. در مقابل دو قارچ *C. spicifera* و *A. chlamydospora* و به‌ویژه قارچ *A. chlamydospora* تأثیر بهبوددهنده بیشتری بر بنیه بذر داشتند (شکل ۲-ح).

۳-۸. بحث

توانایی جوانه‌زنی بذور تحت شرایط خشکی برای تکثیر، رشد، بقا و سازگاری گندم حائز اهمیت است. تحمل خشکی در مرحله جوانه‌زنی متاثر از اثر متقابل تنش/گیاه/تیمار قارچ اندوفیت است (Vujanovic & Vujanovic, 2007). چنین پدیده‌ای به متخصصان فناوری زیستی این اجازه را می‌دهد تا با کاربرد القاگرهای قارچی به تقویت جوانه‌زنی بذور گندم تحت شرایط خشکی نائل شوند. بر مبنای مشاهدات ما، تنش خشکی سبب کاهش خصوصیات مرتبط با جوانه‌زنی شد. این کاهش می‌تواند بدین دلیل باشد که خشکی سبب اختلال در فرایند آبنوشی بذر، عدم فعال‌سازی آنزیم‌های درگیر در جوانه‌زنی و برهم‌خوردن فرایندهای متابولیکی می‌شود. چنین اختلالاتی به‌نوبه خود سبب عدم جوانه‌زنی، جوانه‌زنی پایین و یا عدم یکنواختی در فرایند جوانه‌زدن بذور می‌شود (Vuković et al., 2022).





شکل ۲. تأثیر قارچ‌های *A. chlamydospora* (F1)، *C. spicifera* (F2) و *F. equiseti* (F3) بر خصوصیات رشد گیاهچه مثل طول (الف) و وزن گیاهچه (ب)، صفات جوانه‌زنی نظیر شاخص جوانه‌زنی (پ)، سرعت جوانه‌زنی (ت)، انرژی جوانه‌زنی (ث)، درصد جوانه‌زنی (ج)، و شاخص بنیه/ویگور (ح) بذر گندم تحت شرایط عادی و تنش خشکی القاشده با PEG.

تنش خشکی می‌تواند از طریق مکانیسم‌های مختلف روی جوانه‌زنی بذر تأثیر منفی بگذارد که عبارتند از: ۱) تنش اسمزی؛ خشکی منجر به کاهش پتانسیل آب خاک و دسترسی محدود بذرها به آب می‌شود، ۲) عدم تعادل هورمونی؛ تجمع آبسازیک‌اسید طی خشکی باعث ممانعت از جوانه‌زنی بذرها از طریق مهار فعالیت‌های آنزیمی درگیر در تجزیه ذخایر غذایی می‌شود. همچنین، کاهش جیبرلین مانع از تجزیه ذخایر بذر مانند نشاسته می‌شود که مسئول تامین انرژی جوانه‌زنی مورد نیاز هستند (Saha et al., 2022)، ۳) مهار متابولیک؛ تنش خشکی سبب کاهش فعالیت آنزیمی آمیلازها (تجزیه‌گر نشاسته) و پروتئازها (تجزیه‌گر پروتئین‌ها) و متعاقباً دسترسی محدود به مواد مغذی مورد نیاز گیاهچه می‌شود. همچنین، تنش منجر به اختلال در تنفس سلولی، کاهش تولید ATP و مهار تقسیم سلولی می‌شود (Anjum et al., 2017)، ۴) تنش اکسیداتیو؛ خشکی اغلب منجر به افزایش گونه‌های فعال اکسیژن، آسیب به ساختارهای سلولی و مهار روند جوانه‌زنی می‌شود، ۵) بیان تغییر یافته ژن‌ها؛ طی تنش خشکی، بیان ژن‌هایی که جوانه‌زنی را تقویت می‌کنند ممکن است کاهش یابند، درحالی‌که ژن‌هایی که خواب بذر را القا می‌کنند ممکن است تنظیم مجدد شوند و جوانه‌زنی را به تأخیر بیندازند (Saha et al., 2022). به‌طور خلاصه، تنش خشکی با محدود کردن جذب آب، تغییر تعادل هورمونی، مهار فعالیت‌های متابولیک، آسیب اکسیداتیو و تغییر بیان ژن، بر جوانه‌زنی بذر تأثیر می‌گذارد.

در این پژوهش، قارچ *C. spicifera* اغلب تأثیری بر صفات جوانه‌زنی به همراه نداشت. تاکنون، گزارشی در خصوص تأثیر این قارچ بر جوانه‌زنی بذور گیاهان منتشر نشده است. تنها یک گزارش از خسارات *C. spicifera* بر گیاه بالغ گندم و جو وجود دارد که در آن به ایجاد پوسیدگی ریشه ناشی از *C. spicifera* پرداخته شده است (Qostal et al., 2019). عدم وجود گزارش‌های علمی درباره تأثیر این قارچ بر گیاهان گویای دانش اندک ما از درک میان‌کنش *C. spicifera* با گیاهان میزبان خود است. اگر در نظر بگیریم که شاید روزی *C. spicifera* تبدیل به پاتوژن مهمی در پوسیدگی ریشه گندم شود، لزوم مطالعه این قارچ بیشتر احساس می‌شود.

در این مطالعه، قارچ *F. equiseti* به‌واسطه ماهیت بیمارگری خود سبب کاهش خصوصیات جوانه‌زنی به‌ویژه تحت شرایط تنش القائی شد. این گونه قارچی نیز از چشمان محققان به دور مانده است؛ به‌طوری‌که تنها یک گزارش از تأثیر آن بر جوانه‌زنی بذر وجود دارد. در این گزارش، Suthar et al. (2014) مشاهده کردند که *F. equiseti* با تولید فیتوتوکسین‌ها سبب کاهش درصد جوانه‌زنی در زیره سبز می‌شود. محققان اعتقاد دارند که *F. equiseti* چندین فیتوتوکسین مانند equisetin، اسیدفوزاریک و اسیدآلترناریک تولید می‌کند که تولید آنها با خسارات سویه‌های بیماری‌زا مرتبط است (Suthar et al., 2014). فیتوتوکسین‌های قارچی می‌توانند از طریق مکانیزم‌های مختلف تأثیر قابل توجهی بر جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه داشته باشند که عبارتند از: ۱) ممانعت از جوانه‌زنی؛ برخی از سموم قارچی در فرآیندهای سلولی مانند تنفس، سنتز پروتئین یا فعالیت‌های آنزیمی ضروری برای جوانه‌زنی تداخل ایجاد می‌کنند، ۲) تغییر رشد گیاهچه؛ سموم قارچی می‌توانند بر رشد اولیه گیاهچه تأثیر بگذارند

(Ismail & Papenbrock, 2015)، ۳) برهم خوردن تعادل هورمونی: برخی از سموم قارچی می‌توانند تعادل هورمونی جیبرلین و اسیدآسبیزیک را مختل کنند و از جوانه‌زنی جلوگیری کنند، ۴) آسیب غشای سلولی: برخی از فیتوتوکسین‌ها مستقیماً با افزایش نفوذپذیری به غشای سلولی آسیب می‌زنند و منجر به مرگ سلولی جنین در حال رشد می‌شوند (Macías-Rubalcava & Garrido-Santos, 2022)، ۵) تنش اکسیداتیو: بسیاری از سموم قارچی با تولید سطوح بالای ROS می‌توانند به اجزای سلولی آسیب برسانند و این‌گونه جوانه‌زنی بذر را دشوار کنند، ۶) اختلالات متابولیک: فیتوتوکسین‌ها ممکن است در مسیرهای متابولیکی که برای شکستن ذخایر بذری مانند نشاسته ضروری است، تداخل ایجاد کنند. به‌طور کلی، درجه سمیت فیتوتوکسین‌های قارچی بر اساس گونه گیاهی، قارچی و غلظت متفاوت است (Ismail & Papenbrock, 2015).

در این تحقیق، قارچ *A. chlamydospora* اغلب منجر به بهبود معنی‌داری در طول و وزن گیاهچه به‌همراه شاخص‌های مختلف جوانه‌زنی تحت هر دو شرایط عادی رطوبتی و خشکی القاشده گردید. تاکنون، گزارشی در خصوص تاثیر *A. chlamydospora* بر جوانه‌زنی بذور گیاهان منتشر نشده است. دلایل مختلفی برای تاثیر مثبت قارچ‌های اندوفیت بر خصوصیات جوانه‌زنی ارائه شده است. افزایش پارامترهای جوانه‌زنی تحت شرایط عادی رطوبتی و استفاده از تیمارهای قارچی می‌تواند ناشی از نقش القاگرهای قارچی اندوفیتی در تغییر سطح هورمون‌های IAA، جیبرلین و سیتوکینین‌ها باشد؛ به‌طوری‌که افزایش جیبرلین و کاهش IAA توسط اندوفیت قارچی *Porostereum spadiceum* در سویا گزارش شده است (Hamayun et al., 2017). هورمون اکسین (IAA) با هم‌افزایی با ABA باعث تقویت خواب و مهار جوانه‌زنی می‌شود (Liu et al., 2013). جیبرلین‌ها هم در فاز اولیه و هم در فاز ثانویه جوانه‌زنی بخاطر مهار ABA حائز اهمیت هستند. به‌واسطه تجزیه سریع ABA، نسبت جیبرلین به ABA در فاز اولیه تا سه برابر و در فاز ثانویه تا ۱۰ برابر افزایش می‌یابد (Vishal & Kumar, 2018). نقش سیتوکینین‌ها در فرایند جوانه‌زنی همچنان جای بحث دارد (Miransari & Smith, 2014). به نظر می‌رسد که برآیند تغییرات هورمونی به گونه‌ای است که قارچ *A. chlamydospora* سبب افزایش طول و وزن گیاهچه و شاخص‌های جوانه‌زنی تحت هر دو شرایط عادی رطوبتی و خشکی می‌شود. با توجه به جمع‌بندی منابع، قارچ‌های اندوفیت از راهکارهای مختلفی برای اعطای تحمل تنش به گیاه استفاده می‌کنند که عبارتند از: القای بیان ژن‌های مرتبط با تنش، تحریک هورمون‌های دخیل در مقابله با تنش، فعال‌سازی سامانه آنتی‌اکسیدانت گیاه، تقویت بیوستز پرولین، کربوهیدرات‌های غیر ساختاری و ترکیبات فعال اسمزی (White & Torres, 2010). نکته جالب درباره این قارچ، توارث‌پذیری آن و انتقال از طریق بذر از والدین به نتاج است (Perello & Larran, 2013). این ویژگی به‌نژادگران را قادر می‌سازد تا از طریق رویکرد به‌نژادی مبتنی بر مابکویوم و پرایمینگ بذر اقدام به بهره‌برداری از این اندوفیت در اقلیم‌های نیمه-گرمسیری و نیمه‌خشک کنند تا جوانه‌زنی بذورهای گندم تحت تنش خشکی را بهبود دهند.

قارچ‌های اندوفیت می‌توانند از طریق مکانیسم‌های مختلف بر جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه تحت تنش خشکی تأثیر مثبت بگذارند که عبارتند از: ۱) افزایش جذب و حفظ آب: برخی از اندوفیت‌ها آگزوپلی‌ساکاریدها یا سایر ترکیبات آبدوست تولید می‌کنند که باعث افزایش جذب آب توسط ریشه‌چه می‌شود، ۲) تنظیم اسمزی: قارچ‌های اندوفیت باعث تجمع مواد محافظت‌کننده اسمزی مانند پرولین در گیاهچه میزبان می‌شوند که وظیفه حفظ تعادل آب سلولی و محافظت از ساختارهای سلولی را بر عهده دارند (Byregowda et al., 2022)، ۳) افزایش دسترسی به مواد مغذی: قارچ‌های اندوفیت جذب مواد مغذی از محیط کشت را بهبود می‌بخشند که در نهایت سبب جوانه‌زنی سریع‌تر و قوی‌تر می‌شود، ۴) تنظیم هورمون گیاهی: برقراری تعادل ABA (مهارکننده جوانه‌زنی) و جیبرلین (تقویت‌کننده جوانه‌زنی) نقش مهمی در جوانه‌زنی بذر و پاسخ به تنش خشکی دارد. همچنین، برخی از قارچ‌های اندوفیت اکسین تولید می‌کنند که باعث تقویت رشد ریشه‌چه و استقرار گیاهچه در شرایط خشکی می‌شود (Salvi et al., 2022)، ۵) القای بیان ژن‌های پاسخگو به خشکی: قارچ‌های اندوفیت می‌توانند بیان ژن‌های مرتبط با تحمل به خشکی، مانند ژن‌های درگیر در تنظیم اسمزی، پاسخ آنتی‌اکسیدانی و مسیرهای سیگنال‌دهی تنش، را القا کنند و از طریق رشد گیاهچه را تقویت کنند. تنظیم متابولیسم: قارچ‌های اندوفیت می‌توانند فرایندهای متابولیک را تعدیل کنند و به حفظ منابع و انرژی لازم برای جوانه‌زنی و رشد گیاهچه تحت تنش خشکی کمک کنند (Hanaka et al., 2021). با استفاده از این مکانیسم‌ها، قارچ‌های

اندوفیت نقش حیاتی در افزایش انعطاف‌پذیری گیاه در طول جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه در محیط‌های تحت تنش خشکی ایفا می‌کنند و باعث استقرار و بقا بهتر می‌شوند.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، بهبود خصوصیات جوانه‌زنی گندم تیمار شده با قارچ اندوفیت *A. chlamydospora* تحت شرایط عادی و تنش رطوبتی در واقع انعکاسی از پدیده مایکوبیتالیسم است که توسط Vujanovic & Vujanovic (2007) مطرح شد. در این پدیده، قارچ‌های اندوفیت با بهره‌گیری از سازوکارهای مختلف بر جوانه‌زنی بذر تأثیر مثبت و معنی‌داری به همراه دارند. بدین ترتیب به نظر می‌رسد قارچ اندوفیت *A. chlamydospora* گزینه جالبی برای مقابله با خسارت تنش خشکی بر جوانه‌زنی بذرهای گندم در جریان تغییر اقلیم باشد.

۵. منابع

- Abdellatif, L., Bouzid, S., Kaminskyj, S., & Vujanovic, V. (2009). Endophytic hyphal compartmentalization is required for successful symbiotic *Ascomycota* association with root cells. *Mycological Research*, 113(6-7), 782-791.
- Abdi, H., Bihamta, M.R., Aziz, O.E., & Chogan, R. (2015). Investigation effect of drought stress level of PEG 6000 on seed germination principle and its relation with drought tolerance index in promising Lines and cultivars of bread wheat (*Triticum. aestivum* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 12(4), 582-596.
- Agrawal, R. (2003). Seed Technology. Pub. Co. PVT. LTD. New Delhi. India.
- Anjum, S.A., Ashraf, U., Zohaib, A., Tanveer, M., Naeem, M., Ali, I., & Nazir, U. (2017). Growth and development responses of crop plants under drought stress: A review.
- Bécard, G., & Fortin, J.A. (1988). Early events of vesicular–arbuscular mycorrhiza formation on Ri T-DNA transformed roots. *New Phytologist*, 108(2), 211-218.
- Benlioğlu, B., Demirel, F., Türkoğlu, A., Haliloğlu, K., Özaktan, H., Kujawa, S., & Niedbała, G. (2024). Insights into drought tolerance of tetraploid wheat genotypes in the germination stage using machine learning algorithms. *Agriculture*, 14(2), 206.
- Byregowda, R., Prasad, S.R., Oelmüller, R., Nataraja, K.N., & Prasanna Kumar, M.K. (2022). Is endophytic colonization of host plants a method of alleviating drought stress? Conceptualizing the hidden world of endophytes. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(16), 9194.
- Cardarelli, M., Woo, S.L., Roupael, Y., & Colla, G. (2022). Seed treatments with microorganisms can have a biostimulant effect by influencing germination and seedling growth of crops. *Plants*, 11(3), 259.
- Colla, G., Roupael, Y., Bonini, P., & Cardarelli, M. (2015). Coating seeds with endophytic fungi enhances growth, nutrient uptake, yield and grain quality of winter wheat. *International Journal of Plant Production*, 9(2), 171-190.
- Hamayun, M., Hussain, A., Khan, S.A., Kim, H.Y., Khan, A.L., Waqas, M., Irshad, M., Iqbal, A., Rehman, G., Jan, S., & Lee, I.J. (2017). Gibberellins producing endophytic fungus *Porostereum spadiceum* AGH786 rescues growth of salt affected soybean. *Frontiers in Microbiology*, 8(e), 686.
- Hanaka, A., Ozimek, E., Reszczyńska, E., Jaroszuk-Ściseł, J., & Stolarz, M. (2021). Plant tolerance to drought stress in the presence of supporting bacteria and fungi: An efficient strategy in horticulture. *Horticulturae*, 7(10), 390.
- Hubbard, M., Germida, J., & Vujanovic, V. (2012). Fungal endophytes improve wheat seed germination under heat and drought stress. *Botany*, 90(2), 137-149.
- Ismail, A.A., & Papenbrock, J. (2015). Mycotoxins: Producing fungi and mechanisms of phytotoxicity. *Agriculture*, 5(3), 492-537.
- Leroy, C., Maes, A.Q., Louisanna, E., & Séjalon-Delmas, N. (2019). How significant are endophytic fungi in bromeliad seeds and seedlings? Effects on germination, survival and performance of two epiphytic plant species. *Fungal Ecology*, 39(e), 296-306.
- Li, H., Zhu, L., Fan, R., Li, Z., Liu, Y., Shaheen, A., & Song, C.P. (2024). A platform for whole-genome speed introgression from *Aegilops tauschii* to wheat for breeding future crops. *Nature Protocols*, 19(2), 281-312.

- Liu, X., Zhang, H., Zhao, Y., Feng, Z., Li, Q., Yang, H.Q., Luan, S., Li, J., & He, Z.H. (2013). Auxin controls seed dormancy through stimulation of abscisic acid signaling by inducing ARF-mediated ABI3 activation in *Arabidopsis*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(38), 15485-15490.
- Macías-Rubalcava, M.L., & Garrido-Santos, M.Y. (2022). Phytotoxic compounds from endophytic fungi. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106(3), 931-950.
- Marthandan, V., Geetha, R., Kumutha, K., Renganathan, V.G., Karthikeyan, A., & Ramalingam, J. (2020). Seed priming: A feasible strategy to enhance drought tolerance in crop plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(21), 8258.
- Miransari, M., & Smith, D.L. (2014). Plant hormones and seed germination. *Environmental and Experimental Botany*, 9(e), 110-121.
- Perello, A.E., & Larran, S. (2013). Nature and effect of *Alternaria* spp. complex from wheat grain on germination and disease transmission. *Pakistan Journal of Botany*, 45(5), 1817-1824.
- Pour-Aboughadareh, A., Kianersi, F., Pocza, P., & Moradkhani, H. (2021). Potential of wild relatives of wheat: Ideal genetic resources for future breeding programs. *Agronomy*, 11(8), 1656.
- Qostal, S., Kribel, S., Chliyah, M., Selmaoui, K., Touhami, A.O., Serghat, S., Zaarati, H., Benkirane, R., & Douira, A. (2019). *Curvularia spicifera*, a parasite of the fungal complex of root rot of wheat and barley in Morocco. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*, 20(9-10), 354-365.
- Salamon, S., Mikołajczak, K., & Błaszczak, L. (2023). Constellation of the endophytic mycobiome in spring and winter wheat cultivars grown under various conditions. *Scientific Reports*, 13(1), 6089.
- Salvi, P., Mahawar, H., Agarrwal, R., Kajal, Gautam, V., & Deshmukh, R. (2022). Advancement in the molecular perspective of plant-endophytic interaction to mitigate drought stress in plants. *Frontiers in Microbiology*, 13, 981355.
- Saha, D., Choyal, P., Mishra, U.N., Dey, P., Bose, B., Prathibha, M.D., & Singhal, R.K. (2022). Drought stress responses and inducing tolerance by seed priming approach in plants. *Plant Stress*, 4, 100066.
- Shikur Gebremariam, E., Sharma-Poudyal, D., Paulitz, T.C., Erginbas-Orakci, G., Karakaya, A., & Dababat, A.A. (2018). Identity and pathogenicity of *Fusarium* species associated with crown rot on wheat (*Triticum* spp.) in Turkey. *European Journal of Plant Pathology*, 150(e), 387-399.
- Suthar, R., Bhatt, D.P., & Bhatt, P.N., (2014). Effect of culture filtrate of *Fusarium equiseti* on seed germination and seedling growth of cumin (*Cuminum cyminum*). *Indian Phytopathology*, 67(2), 193-194.
- Trentin, A.B., Cardoso, J.M.K., de Castilhos Ghisi, N., da Costa Rachid, C.T.C., & de Assis Leite, D.C. (2024). Rooting for growth: Meta-analyzing the role of endophytic fungi in plant growth. *Scientia Horticulturae*, 333, 113276.
- Van Slageren, M.W. (1994). Wild wheats: A monograph of *Aegilops* L. and *Amblyopyrum* (Jaub. & Spach) Eig (Poaceae) (pp. 1-512). Wageningen: Agricultural University.
- Vishal, B., & Kumar, P.P. (2018). Regulation of seed germination and abiotic stresses by gibberellins and abscisic acid. *Frontiers in Plant Science*, 9, 368905.
- Vujanovic, V., & Vujanovic, J. (2007). Mycovitality and mycoheterotrophy: Where lies dormancy in terrestrial orchid and plants with minute seeds? *Symbiosis*, 44(1-3), 93-99.
- Vuković, R., Čamagajevac, I.Š., Vuković, A., Šunić, K., Begović, L., Mlinarić, S., Sekulić, R., Sabo, N., & Španić, V. (2022). Physiological, biochemical and molecular response of different winter wheat varieties under drought stress at germination and seedling growth stage. *Antioxidants*, 11(4), 693.
- White, J.F., Jr, & Torres, M.S. (2010). Is plant endophyte-mediated defensive mutualism the result of oxidative stress protection? *Physiologia Plantarum*, 138(4), 440-446.