Iranian Plant Protection Research
https://jpp.um.ac.ir

Research Article
Vol. 40, No. 3, 2026, p. 723-736

Comparison of Wild Mustard (*Sinapis arvensis* L.) Seedling Establishment Success in Two Populations with Different Management Backgrounds: Soil Texture and Seed Burial Depth

Rafat Hassani Nasab Farzaneh[1], Ahmad Tobeh[1], Rasoul Fakhari[2*], Mohammad Ahmadi[1]

1- Department of Genetic and Plant Production, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
2- Plant Protection Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Centre, AREEO, Moghan, Iran
(*- Corresponding author's Email: r.fakhari68@gmail.com)

Received: 07-09-2025
Revised: 17-08-2026
Accepted: 19-08-2026
Available Online: 22-06-2026

How to cite this article:
Hassani Nasab Farzaneh, R., Tobeh, A., Fakhari, R., & Ahmadi, M. (2026). Comparison of wild mustard (*Sinapis arvensis* L.) seedling establishment success in two populations with different management backgrounds: soil texture and seed burial depth. *Iranian Plant Protection Research*, *40*(3), 723-736. (In Persian). https://doi.org/10.22067/JPP.2026.95300.1250

Introduction

Wild mustard (*Sinapis arvensis* L.) is a highly competitive and widespread weed in global agricultural systems. Its high ecophysiological adaptability and ability to form a persistent seed bank consistently pose a serious threat to crop production. The ecological success of this plant is largely attributed to its complex adaptive mechanisms in response to environmental factors such as sowing depth and soil texture. Understanding these mechanisms is fundamental for developing effective and sustainable management strategies. Previous studies have well-established that sowing depth is a critical factor determining seedling emergence. Generally, smaller seeds, like those of wild mustard, are dependent on being placed at shallow depths for germination due to their limited seed reserves. This study specifically addresses the question of whether a critical depth can be identified for managing any population in any soil type, beyond which the potential for seedling establishment approaches zero.

Materials and Methods

In the autumn of 2023, a factorial experiment arranged in a completely randomized design (CRD) with three replications was conducted to investigate the emergence and establishment indices of wild mustard seedlings. The factors included wild mustard population at 2 levels (A and B to tribenuron-methyl herbicide), soil type at 2 levels (clay and silt textures), and sowing depth at 8 levels (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, and 7 cm). Seeds of both A and B populations were collected in the spring of 2023 from fields around the University of Mohaghegh Ardabili greenhouse, where they had been cultivated. To break physiological dormancy, seeds were pre-treated with Gibberellic acid (GA_3) at a concentration of 1500 parts per million (ppm).

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.22067/JPP.2026.95300.1250

Results and Discussion

Findings revealed that although the population of B demonstrated superiority under optimal conditions (shallow depths and clay soil) with a high emergence index (24.5), this genetic advantage is entirely fragile in the face of the determining factor of seed placement depth. Identifying a critical physiological threshold at 4-5 cm depth is considered key to controlling this weed; this is the depth at which even the most population of B, in an unequal battle against darkness and soil mechanical pressure, exhausts its energy reserves before reaching the light and fails to emerge. The population of B achieved the highest survival percentage (98.61%) and the highest emergence rate (emergence index 16.50) at 1 cm depth in clay soil. At 1 cm depth, the mean emergence percentage in clay soil was 98.66% for both populations, while in silt soil it reached 84% for The population of B. At a 6 cm depth in silt soil, the survival percentage of the population of A was 0%, highlighting the detrimental interaction of depth and unfavorable soil texture.

Conclusion

In response to increasing depth, the plant allocates its resources primarily to the rapid elongation of the hypocotyl to escape darkness, rather than to radicle development and biomass production. Furthermore, a strong positive correlation between germination speed and final emergence percentage/seedling survival clearly demonstrated the decisive role of speed in the ultimate success of establishment. Considering the advantage of The population of A at shallow depths, particularly in clay soils, it is recommended to use competitive crops with high shading ability to neutralize this population's germination speed advantage. Additionally, careful monitoring of fields for the presence of resistant populations and selecting seedbeds with appropriate texture can be effective in designing integrated weed management programs. Ultimately, integrating these ecology-based strategies, founded on the findings of this research, can significantly contribute to reducing reliance on herbicides and achieving a more sustainable agricultural system.

Keywords: Acetolactate synthase inhibitor, emergence index, soil characteristics, weeds, herbicide resistance

پژوهش‌های حفاظت گیاهان ایران
https://jpp.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۴۰ شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵، ص. ۷۳۶-۷۲۳

مقایسه موفقیت استقرار گیاهچه خردل وحشی (*Sinapis arvensis* L.) در دو جمعیت با پیشینه مدیریتی متفاوت: اثرات بافت خاک و عمق دفن بذر

رفعت حسنی نسب فرزانه[۱]- احمد توبه[۱]- رسول فخاری[۲*]- محمد احمدی[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۸

چکیده

خردل وحشی (*Sinapis arvensis* L.) از علف‌های هرز رقابتی و شایع در کشاورزی جهان است که به‌دلیل سازگاری بالای اکوفیزیولوژیک و ایجاد بانک بذر پایدار، تهدیدی جدی برای محصولات زراعی محسوب می‌شود. برای بررسی شاخص‌های ظهور و استقرار گیاهچه خردل وحشی، در پاییز سال ۱۴۰۲ آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل‌ها شامل جمعیت خردل وحشی در دو سطح (A و B)، نوع خاک در دو سطح (بافت رسی و سیلتی) و عمق کاشت در هشت سطح (صفر، یک، دو، سه، چهار، پنج، شش و هفت سانتی‌متر) بودند. طبق یافته‌ها، اگرچه جمعیت B در شرایط بهینه (عمق‌های کم و خاک رسی) با شاخص ظهور بالا (۲۴/۵ درصد در روز) برتری خود را نشان داد، امّا این شاخص ظهور بالا در برابر یک عامل تعیین‌کننده به‌نام عمق قرارگیری بذر کاملاً شکننده است. شناسایی یک آستانه بحرانی فیزیولوژیک در عمق ۴-۵ سانتی‌متر، روش کلیدی مهار این علف هرز محسوب می‌شود؛ جایی‌که حتی مقاوم‌ترین جمعیت نیز در تاریکی و فشار مکانیکی خاک، ذخایر غذایی خود را پیش از رسیدن به نور از دست داده و سبز نشد. جمعیت مقاوم در عمق یک سانتی‌متری و بافت خاک رسی به بیش‌ترین درصد بقاء (۹۸/۶۱ درصد) و بالاترین سرعت ظهور (شاخص ظهور ۱۶/۵۰ درصد در روز) دست یافت. در عمق یک سانتی‌متر، میانگین درصد سبز شدن از خاک رسی برای هر دو جمعیت ۹۸/۶۶ درصد بود، درحالی‌که در خاک سیلتی در عمق یک سانتی‌متری برای جمعیت B به ۸۴ درصد رسید. در عمق شش سانتی‌متری و خاک سیلتی، درصد بقای جمعیت A صفر درصد بود که نشان‌دهنده تعامل مخرب عمق و بافت نامناسب خاک است. کاهش درصد سبز شدن از مقدار بیش از ۹۰ درصد در عمق سطحی به مقدار کمتر از ۲۰ درصد در عمق‌های بیش از چهار سانتی‌متر، به‌وضوح نشان‌دهنده اتلاف ذخایر غذایی بذر قبل از رسیدن به سطح خاک است. می‌توان با اجرای عملیات خاک‌ورزی هدفمند (مانند شخم) برای دفن بذرهای علف هرز در اعماق بحرانی، جمعیت آن را بدون وابستگی به علف‌کش‌ها و بدون نگرانی از مسئله مقاومت، به‌طور اساسی مهار کرد.

واژه‌های کلیدی: بازدارنده استولاکتات سینتاز، شاخص ظهور، علف هرز، مقاومت به علف‌کش، ویژگی‌های خاک

مقدمه

خردل وحشی (*Sinapis arvensis* L.) به‌عنوان یکی از علف‌های هرز رقابتی و شایع در نظام‌های کشاورزی جهان، به‌دلیل توانایی بالای سازگاری اکوفیزیولوژیک و ایجاد بانک بذر پایدار، همواره تهدیدی جدی برای تولید محصولات زراعی محسوب می‌شود (Heap, 2024). موفقیت اکولوژیک این گیاه تا حد زیادی مرهون سازوکارهای سازگاری پیچیده آن در پاسخ به عوامل محیطی مانند عمق کاشت و بافت خاک است (Benech-Arnold & Sánchez, 2023). درک این سازوکارها، پایه و اساس توسعه راهکارهای مدیریتی مؤثر و پایدار می‌باشد. مطالعات پیشین به‌خوبی نشان داده‌اند که عمق کاشت به‌عنوان یک عامل تعیین‌کننده در خروج گیاهچه از

۱- گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۲- بخش تحقیقات گیاهپزشکی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مغان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: r.fakhari68@gmail.com)
https://doi.org/10.22067/JPP.2026.95300.1250

خاک عمل می‌کند. به‌طورکلی، بذرهای کوچک‌تر، مانند خردل وحشی، به‌دلیل محدودیت ذخایر غذایی، برای سبز شدن به قرارگیری در عمق‌های کم وابسته هستند (Benvenuti, 2022). همچنین بافت خاک بر رطوبت قابل دسترس، مقاومت مکانیکی در برابر جوانه‌زنی و میزان نور رسیده به بذر تأثیر می‌گذارد که همه این عوامل می‌توانند الگوی سبز شدن را تغییر دهند (Guillemin et al., 2023). بااین‌حال، آنچه که در تحقیقات گذشته کم‌تر به آن پرداخته شده، بررسی واکنش جمعیت‌های مختلف یک گونه علف هرز به تعامل هم‌زمان عمق کاشت و نوع خاک است. گزارش‌ها حاکی از آن است که جمعیت‌های مختلف یک گونه می‌توانند سازگاری‌های اکوفیزیولوژیکی متمایزی را در پاسخ به فشارهای انتخابی محیطی توسعه دهند (Vidotto et al., 2024). برای مثال، ممکن است یک جمعیت «مقاوم» در یک محیط خاص، سازوکارهای جبرانی داشته باشد که به آن اجازه دهد از عمق‌های بیش‌تر یا در بافت‌های سنگین‌تر نیز با موفقیت سبز شود (Nguyen & Smith, 2023). مطالعات متعددی به‌طور جداگانه نقش عمق کاشت و بافت خاک را بر جوانه‌زنی و استقرار علف‌های هرز بررسی کرده‌اند. برای نمونه، تحقیقات روی گونه‌های مختلف از جمله خردل وحشی نشان داده است که افزایش عمق کاشت می‌تواند درصد و سرعت ظهور گیاهچه را کاهش دهد، امّا آستانه این کاهش در گونه‌ها و حتی جمعیت‌های مختلف، متفاوت است (Chauhan et al., 2022). از سوی دیگر، تأثیر بافت خاک بر رطوبت و مقاومت مکانیکی بستر بذر به‌عنوان عاملی کلیدی در تعیین موفقیت استقرار شناخته شده است (Colbach et al., 2023). بااین‌حال، کمبود مطالعات سیستماتیکی که به‌طور هم‌زمان اثر متقابل این دو عامل را روی جمعیت‌های مختلف یک گونه علف هرز بررسی کنند، مشهود است. این کمبود، مانع درک جامع پویایی جمعیت علف‌های هرز و توسعه راهکارهای مدیریتی دقیق شده است.

این خلأ دانش، سؤال پژوهش اصلی حاضر را شکل می‌دهد که آیا پاسخ‌های جوانه‌زنی و استقرار دو جمعیت حساس و مقاوم خردل وحشی در برابر عوامل مختلفی مانند عمق کاشت و بافت خاک، یکسان است یا خیر؟ فرضیه این تحقیق آن است که بین این جمعیت‌ها از نظر راهبردهای اکوفیزیولوژیکی سازگاری با محیط‌های زیرسطحی مختلف، تفاوت معناداری وجود دارد. هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی کمّی اثرات متقابل سه‌گانه جمعیت، عمق کاشت (عامل مدیریتی) و نوع خاک (عامل محیطی) بر شاخص‌های کلیدی ظهور و استقرار خردل وحشی است. در این پژوهش به‌طور خاص به این پرسش پرداخته می‌شود که آیا می‌توان یک عمق بحرانی را برای مدیریت هر جمعیت در هر نوع خاک شناسایی کرد که در پایین‌تر از آن، امکان استقرار گیاهچه به صفر نزدیک شود. یافته‌های این تحقیق نه‌تنها بینش‌های بنیادینی در مورد انعطاف فیزیولوژیکی و سازگاری اکولوژیک یک علف هرز مهم ارائه می‌دهد، بلکه از نظر کاربردی، پایه‌ای علمی برای طراحی برنامه‌های مدیریت تلفیقی علف‌های هرز (IWM) مبتنی بر بوم‌شناسی و منطبق با شرایط خاص هر مزرعه فراهم خواهد کرد (Zhang et al., 2024).

مواد و روش‌ها

این پژوهش طی پاییز سال ۱۴۰۲ برای بررسی اثرات متقابل سه جانبه جمعیت خردل وحشی، نوع خاک و عمق دفن بذر بر شاخص‌های ظهور و استقرار گیاهچه خردل وحشی در دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی انجام شد.

آزمایش زیست‌سنجی

به‌منظور اطمینان از مقاوم یا حساس بودن بذرهای خردل وحشی، یک آزمایش زیست‌سنجی در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. بذور جمعیت‌های مشکوک به مقاومت از مزارع با سابقه شکست کنترل و بذرهای یک جمعیت استاندارد حساس در گلدان‌های حاوی خاک استریل کشت گردیدند. تیمارهای علف‌کش تری‌بنورون‌متیل (DF%75) ساخت شرکت مهان در دُز توصیه‌شده در مرحله رشدی ۲-۴ برگی با استفاده از سم‌پاش مجهز به نازل فلت فَن XR8004 اعمال گردید. یک تیمار شاهد (بدون علف‌کش) نیز برای هر جمعیت در نظر گرفته شد. ارزیابی درصد مهار علف‌هرز و اندازه‌گیری وزن خشک بوته‌ها ۲۸ روز پس از سم‌پاشی انجام گرفت. داده‌ها با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد آماری مقایسه شدند. جمعیتی که درصد مهار آن در دُز توصیه‌شده به‌طور معنی‌داری کمتر از جمعیت حساس بود، به‌عنوان جمعیت مقاوم شناسایی گردید.

تهیه و پیش‌تیمار بذر

بذرها از مزارع پیرامون گلخانه دانشگاه محقق اردبیلی طی بهار سال ۱۴۰۲ جمع‌آوری گردید. برای شکستن خواب فیزیولوژیکی بذرها از پیش‌تیمار جیبرلیک اسید با غلظت ۱۵۰۰ قسمت در میلیون (ppm) برای استانداردسازی قبل از شروع تیمارهای اصلی استفاده شد. بدین منظور، بذرها به مدت ۲۴ ساعت در محلول مذکور قرار داده شدند (Baskin & Baskin, 2014). پس از تیمار با جیبرلیک اسید، درصد جوانه‌زنی هر دو جمعیت (A و مقاوم) بالای ۹۰ درصد بود و بین درصد جوانه‌زنی پایه دو جمعیت تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. همچنین بذرهای سالم و یکنواخت انتخاب شده و با اتانول ۷۰ درصد به مدت ۲-۱ دقیقه و سپس سدیم هیپوکلریت ۲-۱ درصد به مدت ۵-۳ دقیقه ضدعفونی گردید. پس از شست‌وشوی کامل با آب مقطر

استریل، بذرها روی کاغذ صافی استریل در دمای محیط (25 درجه سانتی‌گراد) خشک شده و بلافاصله کشت گردید.

طرح آزمایشی و تیمارها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. عوامل مورد بررسی شامل جمعیت خردل وحشی در دو سطح (A (با سابقه حساسیت به علفکش تری‌بنورون‌متیل) و B (با سابقه مقاومت به علفکش تری‌بنورون‌متیل))، نوع خاک در دو سطح (بافت رسی و سیلتی) و عمق کاشت در هشت سطح (صفر، یک، دو، سه، چهار، پنج، شش و هفت سانتی‌متر) بودند.

اجرای آزمایش

گلدان‌های پلاستیکی (۹۶ عدد) با قطر ۲۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر با خاک‌های از پیش آماده‌شده رسی و سیلتی پُر شدند. در هر گلدان، ۲۰ بذر در عمق‌های تعیین‌شده کشت گردید. گلدان‌ها در شرایط کنترل‌شده گلخانه با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در روز و ۱۸ درجه سانتی‌گراد در شب و رطوبت نسبی ۶۰-۷۰ درصد قرار داده شدند (Guillemin et al., 2023). آبیاری به‌صورت روزانه و به‌منظور حفظ رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی انجام گردید.

برداشت و اندازه‌گیری صفات

گلدان‌ها به‌صورت روزانه بازدید شدند و تعداد بذرهای سبزشده ثبت گردید. بذر زمانی به‌عنوان سبزشده در نظر گرفته می‌شد که برگ‌های لپه‌ای در سطح خاک ظاهر می‌شدند (Benech-Arnold & Sánchez, 2022). پس از دو هفته، همه گیاهچه‌ها به‌دقت از گلدان خارج شده و صفات درصد و سرعت سبز شدن، زمان رسیدن به ۵۰ درصد سبز شدن، درصد بقای گیاهچه، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه (برحسب سانتی‌متر) و وزن خشک کل گیاهچه (برحسب میلی‌گرم) اندازه‌گیری شد. تعداد بذرهای سبزشده به‌صورت روزانه ثبت گردید. داده‌های حاصل از شمارش تجمعی سبز شدن، وارد نرم‌افزار Germination Time شد و زمان رسیدن به ۵۰ درصد سبز شدن (T_{50}) برای هر تکرار با استفاده از ابزار درون‌یابی خطی (Linear Interpolation) موجود در این نرم‌افزار محاسبه شد. برای محاسبه درصد بقای گیاهچه، گیاهانی که خشک شده بودند، جدا شده و محاسبات درصدی انجام گردید. برای اندازه‌گیری وزن خشک، نمونه‌ها پس از جداسازی اجزای گیاه، به مدت ۴۸ ساعت درون پاکت کاغذی و در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و سپس به‌وسیله ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ میلی‌گرم توزین شدند. برای اندازه‌گیری طول ریشه‌چه و ساقه‌چه، گیاهچه‌ها به‌آرامی از خاک خارج شده و با آب به‌آرامی شسته شدند تا خاک چسبیده به ریشه‌چه پاک شود. سپس روی یک سطح صاف قرار گرفتند و با استفاده از خط‌کش با دقت میلی‌متری، طول نوک ریشه‌چه تا محل اتصال ریشه‌چه و ساقه‌چه (یقه) و طول یقه تا نوک ساقه (یا تا انتهای برگ‌های لپه‌ای) اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل آماری

داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ تجزیه واریانس (Anova) شدند. مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد آماری انجام گردید.

جدول ۱- میانگین مربعات اثر جمعیت، نوع خاک و عمق قرارگیری بذر بر زمان ۵۰ درصد سبز شدن، درصد سبز شدن، درصد بقاء، سرعت ظهور تجمعی گیاهچه، طول ریشه‌چه، وزن خشک کل گیاهچه و طول ساقه‌چه خردل وحشی

Table 1- Mean square effect of population, soil type and seed depth on 50% germination time, germination percentage, survival percentage, cumulative seedling emergence rate, radicle length, total seedling dry weight and shoot length of wild mustard

S.O.V	df	50% Emergence time	Emergence percentage	Survival percentage	Cumulative seedling emergence rate
Soil depth (A)	7	19.61**	73.66.07**	9175.09**	254.56**
Soil type (B)	1	7.59*	541.50**	7451.67**	7.13*
population (C)	1	23.01**	12240.17**	2.49	838.69**
A × B	7	6.52**	664.93**	808.35	118.71**
A × C	7	33.84**	1350.26**	1004.42**	51.50**
B × C	1	41.34**	8.17ns	1932.23**	71.50**
A × B × C	7	6.70**	699.21**	2138.28**	27.63**
Error	64	2.13	29.33	28.74	1.06
C.V (%)	-	16.76	7.51	8.06	8.44

* و **: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

* and **: are significant at the five and one percent probability levels, respectively.

ادامه جدول ۱- میانگین مربعات اثر جمعیت، نوع خاک و عمق قرارگیری بذر روی زمان ۵۰ درصد سبز شدن، درصد سبز شدن، درصد بقاء، سرعت ظهور تجمعی گیاهچه، طول ریشه‌چه، وزن خشک کل گیاهچه و طول ساقه‌چه خردل وحشی

Table 1 continued- Mean square effect of population, soil type and seed depth on 50% germination time, germination percentage, survival percentage, cumulative seedling emergence rate, radicle length, total seedling dry weight and shoot length of wild mustard

S.O.V	df	Radicle length (cm)	Total seedling dry weight (mg)	Epicotyle length (cm)
Soil depth (A)	7	57.26**	12.90**	69.60*
Soil type (B)	1	306.38**	2.73*	17.85^{ns}
Population (C)	1	28.71**	0.0004^{ns}	96.80^{ns}
A × B	7	7.78**	1.34*	35.68^{ns}
A × C	7	4.65*	1.17^{ns}	24.51^{ns}
B × C	1	46.07**	12.33**	83.25^{ns}
A × B × C	7	18.35**	1.71*	37.45^{ns}
Error	64	2.15	0.59	26.94
C.V (%)	-	11.20	12.74	13.14

* و **: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

* and **: are significant at the five and one percent probability levels, respectively

نتایج و بحث

اثرات سه‌جانبه جمعیت، نوع خاک و عمق دفن بذر بر زمان ۵۰ درصد سبز شدن، درصد سبز شدن، درصد بقاء، سرعت ظهور تجمعی گیاهچه، طول ریشه‌چه، خردل وحشی در سطح احتمال یک درصد آماری و بر وزن خشک کل گیاهچه در سطح احتمال پنج درصد آماری معنی‌دار شد. همچنین اثر اصلی عمق دفن بذر بر طول ساقه‌چه در سطح احتمال پنج درصد آماری معنی‌دار بود (جدول ۱).

زمان ۵۰ درصد سبز شدن

نتایج این مطالعه به‌وضوح نشان داد که زمان لازم برای رسیدن به ۵۰ درصد سبز شدن (T50) یک شاخص بسیار حساس و کلیدی در ارزیابی پاسخ بذرهای خردل وحشی به شرایط محیطی است. میانگین این شاخص در کل آزمایش حدود ۹/۲ روز بود، امّا دامنه تغییرات آن از ۱۳/۳ روز (عمق هفت سانتی‌متر، خاک رسی، جمعیت مقاوم) تا هشت روز (عمق‌های سطحی) متغیر بود (جدول ۲). این تغییرات گسترده، گویای تأثیر معنی‌دار تیمارهای اعمال‌شده بر جوانه‌زنی است و تأثیر عوامل مورد مطالعه بر این شاخص کاملاً مشهود بود. با افزایش عمق کاشت از سطح خاک به سمت عمق هفت سانتی‌متر، مقدار T50 به‌طورکلی روندی افزایشی نشان داد که حاکی از تأخیر در آغاز و پیشرفت فرآیند جوانه‌زنی تحت تنش است. علاوه‌بر این، جمعیت B در مقایسه با جمعیت A، در اکثر شرایط به‌ویژه عمق‌های کم و متوسط، برتری خود را با نمایش مقادیر پایین‌تر T50 (یعنی سرعت جوانه‌زنی بالاتر) به اثبات رساند. مقایسه نوع خاک نیز نشان داد که بافت رسی در مقایسه با بافت سیلتی، بستر مطلوب‌تری برای تسریع جوانه‌زنی فراهم می‌کند. این مشاهده را می‌توان عمدتاً با میزان بالاتر و پایداری بیشتر رطوبت در خاک‌های رسی توضیح داد. اگرچه خاک‌های رسی معمولاً با مشکل زهکشی و تهویه ضعیف برای رشد ریشه در مراحل بعدی مرتبط هستند، امّا برای فرآیند اولیه جوانه‌زنی که به جذب آب و تورم بذر وابسته است، می‌توانند مزیت قابل توجهی داشته باشند. مطالعات روی علف‌های هرز دیگر نیز نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند. برای مثال، تحقیقات روی جوانه‌زنی پیچک (*Convolvulus arvensis*) نشان داد که ظهور گیاهچه در خاک‌های رسی–لومی با سرعت و درصد بیشتری نسبت به خاک‌های لومی–شنی رخ می‌دهد، که این امر به ظرفیت بالای نگهداری آب این خاک‌ها نسبت داده شده است (Kaya & Çıkıkçı, 2020). تحلیل روابط بین T50 و سایر صفات، نتایج بسیار جالب توجهی را آشکار کرد. مهم‌ترین رابطه، همبستگی منفی بسیار قوی (۰/۹۲-) بین T50و شاخص ظهور (EI) بود. این نتیجه کاملاً منطقی است، چرا که هر دو شاخص در حال سنجش مفهوم سرعت جوانه‌زنی هستند، امّا با روشی متفاوت. رابطه دیگر، همبستگی منفی قوی (۰/۶۵-) بین T50و درصد سبز شدن نهایی بود. این یافته به‌وضوح نشان می‌دهد که تأخیر در شروع جوانه‌زنی، نه‌تنها بر سرعت، بلکه بر نتیجه نهایی و تعداد کل گیاهچه‌های سبزشده نیز تأثیر منفی می‌گذارد. به‌طور مشابه، یک همبستگی منفی متوسط (۰/۵۵-) بین T50 و درصد بقای گیاهچه مشاهده شد که مؤید این اصل حیاتی است که گیاهچه‌های دیرتر سبزشده، شانس کم‌تری برای بقاء و استقرار موفق دارند. یک رابطه قابل تأمل، همبستگی مثبت متوسط (≈ ۰/۴۵+) بین T50 و طول ساقه‌چه بود (جدول ۲). این پدیده نشان‌دهنده یک پاسخ تطبیقی به تنش عمق است؛ به این صورت که در عمق‌های بیش‌تر، بذر انرژی ذخیره‌شده خود را عمدتاً صرف طویل شدن سریع ساقه‌چه برای رسیدن به سطح خاک می‌کند، فرآیندی که زمان‌بر بوده و منجر به افزایش T50 و هم‌زمان افزایش طول ساقه‌چه می‌شود (Finch-Savage & Leubner-Metzger, 2022). می‌توان عنوان کرد که سرعت جوانه‌زنی که توسط شاخص‌های T50 و EI سنجیده

می‌شود، یک عامل پیش‌بینی‌کننده قوی و تعیین‌کننده در موفقیت استقرار گیاهچه خردل وحشی است. شانس بقاء و موفقیت در مراحل اولیه رشد به‌میزان قابل توجهی در جمعیت B در عمق سطحی در خاک رسی زیاد بود. خاک رسی در عمق سطحی، یک میکروکلیمای با نوسان دمایی کمتر و رطوبت نسبتاً پایدار ایجاد می‌کند. این پایداری برای جمعیت‌های مقاوم که احتمالاً دارای آستانه‌های باریک‌تری برای پاسخ به عوامل محیطی هستند، حیاتی است. این شرایط همچنین از تنش‌های ناگهانی رطوبتی و دمایی که در خاک‌های درشت‌بافت با نفوذپذیری بالا رخ می‌دهد، جلوگیری می‌کند (Forcella et al., 2000). مطالعه تأثیر عامل‌های محیطی و ژنتیکی بر جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه‌ها از دیرباز مورد توجه پژوهشگران علوم زراعی و بوم‌شناسی بوده است. در این زمینه، عمق کاشت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عامل‌های مؤثر بر جوانه‌زنی شناخته می‌شود. به‌طورکلی، افزایش عمق کاشت می‌تواند از طریق محدودیت دسترسی به نور، ایجاد موانع فیزیکی برای خروج کوتیلدون‌ها به سطح خاک و اتلاف ذخایر آندوسپرم قبل از دستیابی به استقلال فتوسنتزی منجر به کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی شود (Grundy et al., 2003).

درصد سبز شدن

سبز شدن در عمق دفن یک سانتی‌متر + خاک رسی + جمعیت A به‌مقدار ۹۸/۶۶ درصد، در عمق یک سانتی‌متر + خاک رسی + جمعیت B به‌میزان ۹۸/۶۶ درصد، در عمق دو سانتی‌متر + خاک رسی + جمعیت A به‌مقدار ۹۸/۶۶ درصد و در عمق صفر سانتی‌متر (سطح خاک) + خاک رسی + جمعیت A به‌میزان ۹۲ درصد ثبت شد. در عمق هفت سانتی‌متر تقریباً در تمام تیمارها با درصد سبز شدن بسیار پایین (زیر ۲۰ درصد) یا حتی صفر همراه بود که نشان‌دهنده اثر مخرب عمق زیاد بر جوانه‌زنی است. کم‌ترین مقدار مربوط به تیمار عمق هفت سانتی‌متر + خاک رسی + جمعیت B با میانگین ۲/۶۷ درصد بود. نتایج این مطالعه به‌وضوح نشان می‌دهد که عمق کاشت تأثیر چشم‌گیری بر درصد سبز شدن بذر دارد. به‌طورکلی با افزایش عمق از صفر به هفت سانتی‌متر، روند نزولی واضحی از درصد جوانه‌زنی مشاهده شد. بیش‌ترین میانگین درصد سبز شدن (بالای ۹۰ درصد) در عمق‌های سطحی (صفر، یک و دو سانتی‌متر) ثبت گردید. این پدیده را می‌توان به دسترسی آسان‌تر به نور، اکسیژن و کاهش موانع فیزیکی خروج از خاک نسبت داد. در عمق‌های بیش از چهار سانتی‌متر، به‌دلیل محدودیت‌های فیزیکی و انرژی زیاد مورد نیاز برای جوانه‌زنی و خروج از خاک، درصد سبز شدن به‌شدت کاهش یافت. اگرچه خاک سیلتی در عمق سطحی بهترین نتیجه را داد، امّا در عمق‌های یک و دو سانتی‌متر، خاک رسی با حفظ رطوبت بهتر، شرایط مطلوب‌تری برای جوانه‌زنی فراهم کرد و میانگین‌های بسیار بالایی (۹۸/۶۶ درصد) را به ثبت رساند. این نشان می‌دهد که برهم‌کنش عمق و نوع خاک بسیار قابل توجه است. جمعیت A در عمق‌های سطحی جوانه‌زنی بهتری داشت. بااین‌حال، داده‌ها نشان می دهند که جمعیت B در برخی از عمق‌های میانی (مانند سه سانتی‌متر) بهتر با شرایط سازگار شده است. پدیده مشاهده‌شده تصادفی نیست؛ بلکه نتیجه مستقیم فشار انتخاب است. در جمعیت‌های علف هرز، دفن مکرر بذرها توسط عملیات خاک‌ورزی، به‌عنوان یک فیلتر انتخابی قدرتمند عمل می‌کند. تنها بذرهایی که بتوانند از طریق سازوکارهای ذخیره انرژی بیشتر، قدرت رشد بهتر و متابولیسم کارآمد در شرایط تنش از عمق بیشتر سبز شوند، شانس بقاء و تولیدمثل خواهند داشت. بنابراین، طی نسل‌های متمادی، این آلل‌های مقاوم به دفن عمیق در جمعیت غالب شده و یک بیوتیپ مقاوم را شکل می دهند. این یک نمونه کلاسیک از تکامل تطبیقی (Adaptive Evolution) در پاسخ به یک عامل مدیریتی (خاک‌ورزی) است (Benech & Sánchez, 2017). همچنین این برتری به اندازه‌ای نبود که از برتری کلی جمعیت A در شرایط ایده‌آل بکاهد. این موضوع ظرفیت سازگاری اکوفیزیولوژیک بالاتر جمعیت B را تحت تنش نشان می‌دهد. همبستگی مثبت قوی با نرخ بقاء (+۰/۸۵) گویای این واقعیت است که گیاهانی که موفقیت بالایی در مرحله جوانه‌زنی دارند، با احتمال بسیار بیش‌تری به حیات خود ادامه می‌دهند. همچنین همبستگی منفی با T50 تأیید می‌کند که سرعت در جوانه‌زنی یکی از کلیدی‌ترین عوامل تعیین‌کننده درصد نهایی است.

درصد بقای گیاهچه

طبق نتایج جدول ۲، میانگین درصد بقای بذرهای خردل وحشی حدود ۷۴/۵ درصد بود. این شاخص در دامنه وسیعی از صفر (در موارد عدم جوانه‌زنی) تا ۱۰۰ درصد متغیر بود. به‌طورکلی با افزایش عمق کاشت از سطح خاک تا هفت سانتی‌متر، درصد بقاء به‌شکل محسوسی کاهش یافت، به‌طوری که در عمق‌های پنج تا هفت سانتی‌متر، مقادیر بقاء نزدیک به صفر بود که نشان‌دهنده ایجاد تنش بسیار شدید برای جوانه‌زنی و بقای گیاهچه در این اعماق است. علاوه‌بر عمق کاشت، اثر متقابل نوع خاک و جمعیت نیز مورد بررسی قرار گرفت. به نظر می‌رسد که خاک رسی در مقایسه با خاک سیلتی در عمق‌های کم (صفر تا دو سانتی‌متر) شرایط بهتری برای بقاء فراهم می‌کند، چرا که بیشترین درصد بقاء (۱۰۰ درصد) در تیمارهای مربوط به اثرات متقابل عمق صفر و یک سانتی‌متر خاک با خاک بافت رسی و جمعیت B و همچنین عمق دو سانتی‌متر با خاک رسی و جمعیت A مشاهده شد. این امر احتمالاً به‌دلیل تأثیر بافت خاک بر مقاومت مکانیکی در برابر خروج جوانه است. از سوی دیگر، جمعیت B در عمق‌های کم (صفر تا دو سانتی‌متر) با میانگین بقای حدود ۹۰ درصد، عملکرد بهتری نسبت به جمعیت A (حدود ۸۵ درصد) نشان داد.

جدول ۲- مقایسه میانگین اثر سه‌جانبه جمعیت، نوع خاک و عمق کاشت یا دفن بذر روی زمان تا ۵۰ درصد سبز شدن، درصد سبز شدن، درصد بقاء، سرعت ظهور تجمعی گیاهچه، طول ریشه‌چه و وزن خشک کل گیاهچه خردل وحشی

Table 2- Comparison of the three-way effect of population, soil texture, and seed burial depth on time to 50% emergence, emergence percentage, survival percentage, cumulative seedling emergence rate, radicle length, and total dry weight of wild mustard seedlings

Wild mustard population	Soil texture	Burial depth (cm)	50% Time to emergence (Day)	Emergence percentage (%)	Survival percentage (%)
A	Clay soil	0	9.00^{bc*}	92.00^{ab}	77.86^{ef}
		1	9.00^{bc}	98.66^{a}	91.83^{abc}
		2	9.00^{bc}	98.66^{a}	93.05^{ab}
		3	9.00^{bc}	98.66^{a}	100.00^{a}
		4	9.00^{bc}	82.66^{cd}	73.52^{f}
		5	9.66^{bc}	88.00^{bc}	95.37^{ab}
		6	11.00^{ab}	60.00^{gh}	50.81^{ij}
		7	11.00^{ab}	32.00^{k}	57.31^{hi}
	Silty soil	0	8.00^{c}	97.33^{a}	98.66^{a}
		1	9.00^{bc}	100.00^{a}	47.20^{j}
		2	8.66^{bc}	100.00^{a}	89.33^{bcd}
		3	9.00^{bc}	72.00^{ef}	70.20^{fg}
		4	9.00^{bc}	80.00^{cde}	58.17^{hi}
		5	9.00^{bc}	98.66^{a}	63.44^{gh}
		6	9.00^{bc}	68.00^{fg}	0.00^{k}
		7	9.00^{bc}	68.00^{fg}	0.00^{k}
B	Clay soil	0	8.66^{bc}	62.66^{gh}	95.23^{ab}
		1	8.00^{c}	98.66^{a}	98.61^{a}
		2	8.00^{c}	98.66^{a}	91.83^{abc}
		3	9.00^{bc}	84.00^{bcd}	92.13^{abc}
		4	9.00^{bc}	76.00^{def}	87.60^{bcd}
		5	9.00^{bc}	40.00^{jk}	100.00^{a}
		6	13.30^{d}	2.66^{l}	0.00^{k}
		7	13.30^{d}	2.66^{l}	0.00^{k}
	Silty soil	0	11.00^{ab}	60.00^{gh}	77.14^{ef}
		1	10.66^{ab}	84^{bcd}	83.80^{cde}
		2	10.00^{bc}	98.66^{a}	49.94^{ij}
		3	10.00^{bc}	98.66^{a}	58.05^{hi}
		4	9.00^{ab}	56^{hi}	82.78^{de}
		5	13.00^{a}	48^{ij}	71.84^{fg}
		6	9.66^{bc}	62.66^{gh}	72.66^{f}
		7	0.00^{e}	0.00^{l}	0.00^{k}
LSD			2.38	8.83	8.74

* میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون اختلاف معنی‌داری با هم در سطح پنج درصد ندارند.

* The averages with common letters in each column do not have a significant difference at the 5% level.

بااین‌حال، یک یافته کلیدی این مطالعه آن بود که تحت شرایط تنش شدید (عمق کاشت بیش از چهار سانتی‌متر)، اثرات مثبت خاک رسی و برتری جمعیت B تقریباً کم‌رنگ شده و هر دو جمعیت در این اعماق عملکرد مشابه و بسیار پایینی داشتند. این مشاهده تأیید می‌کند که تنش ناشی از عمق زیاد کاشت آنقدر شدید است که حتی ژنوتیپ‌های مقاوم نیز قادر به غلبه بر آن نیستند. به نظر می‌رسد که این محدودیت عمدتاً فیزیولوژیک است و عمق بیش از حد باعث اتلاف ذخایر انرژی بذر قبل از رسیدن به سطح خاک می‌شود. همچنین رابطه مثبت و قوی بین سرعت سبز شدن و درصد بقاء مشاهده شد؛ به این معنی که جوانه‌هایی که سریع‌تر سبز شدند، شانس بقای بالاتری داشتند. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که بهینه‌ترین شرایط برای حداکثر بقای گیاهچه خردل وحشی، عمق کم (صفر تا دو سانتی‌متر) و در بستر خاک رسی است.

تأثیر عمق قرارگیری به‌عنوان یک عامل محیطی کلیدی بر جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه در گونه‌های مختلف به‌طور گسترده‌ای مطالعه شده است. به‌طورکلی افزایش عمق کاشت می‌تواند از طریق محدودیت دسترسی به نور، ایجاد موانع فیزیکی برای خروج کوتیلدون‌ها به سطح خاک و اتلاف ذخایر آندوسپرم قبل از استقلال فتوسنتزی منجر به کاهش بقای گیاهچه شود (Grundy et al., 2003). مطالعات نشان داده‌اند که پاسخ به عمق کاشت می‌تواند تا

حد زیادی به بافت خاک وابسته باشد. خاک‌های با بافت سنگین‌تر (مانند رس) در مقایسه با خاک‌های سبک‌تر (مانند لومی سیلتی) می‌توانند در عمق‌های کم، رطوبت را بهتر حفظ کرده و یک محیط مرطوب و یکنواخت برای جوانه‌زنی فراهم کنند (Baskin & Baskin, 2014). در عمق‌های بیش‌تر، همین خاک‌ها می‌توانند با تشکیل سله یا ایجاد مقاومت مکانیکی شدید، به مانعی غیرقابل عبور برای جوانه‌زنی تبدیل شوند (Guerresi et al., 2021). همچنین وجود تفاوت بین جمعیت‌ها یا اکوتیپ‌های یک گونه در تحمل به عمق کاشت عمیق‌تر به‌خوبی ثبت شده است. این تغییرات داخل‌گونه‌ای اغلب به ویژگی‌های ریخت‌شناختی مانند اندازه بذر و قدرت بنیه آن نسبت داده می‌شود، به‌طوری که جمعیت‌های دارای بذر بزرگ‌تر و نیروی ریشه‌زایی بیش‌تر معمولاً توانایی بهتری برای خروج از اعماق بیش‌تر دارند (Colbach et al., 2020).

ادامه جدول ۲ـ مقایسه میانگین اثر سه‌جانبه جمعیت، نوع خاک و عمق کاشت یا دفن بذر روی زمان تا ۵۰ درصد سبز شدن، درصد سبز شدن، درصد بقاء، سرعت ظهور تجمعی گیاهچه، طول ریشه‌چه و وزن خشک کل گیاهچه خردل وحشی

Table 2 continued- Comparison of the three-way effect of population, soil texture, and seed burial depth on time to 50% emergence, emergence percentage, survival percentage, cumulative seedling emergence rate, radicle length, and total dry weight of wild mustard seedling

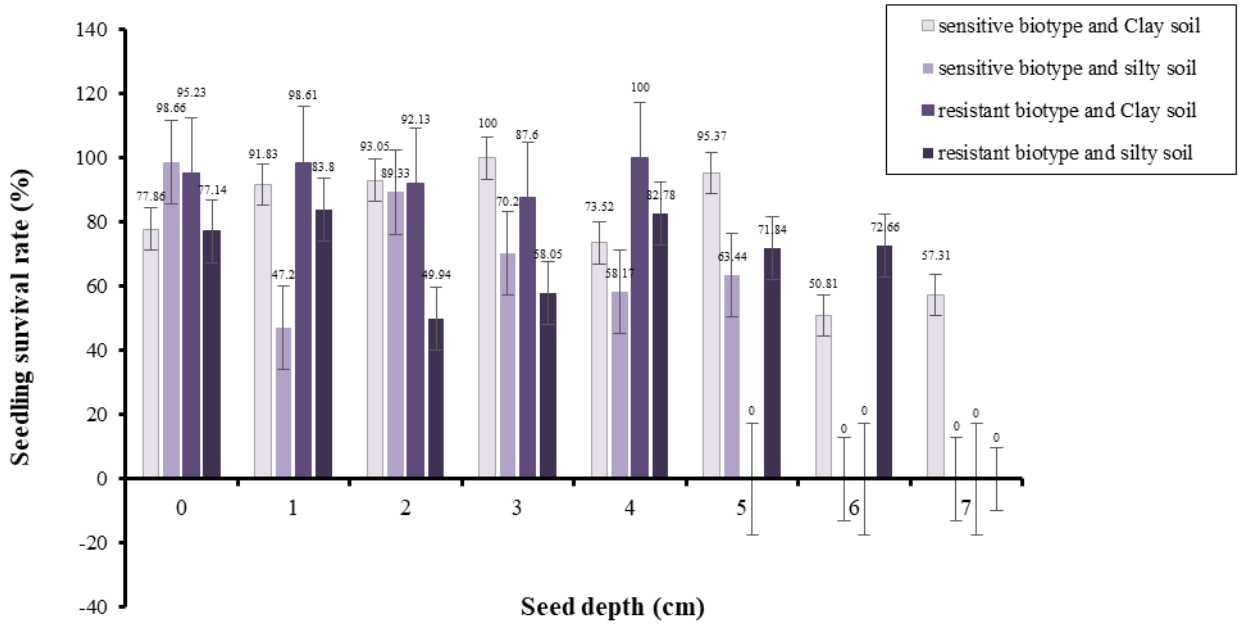
Wild mustard population	Soil texture	Seed burial depth (cm)	Cumulative seedling emergence rate (days)	Radicle length (cm)	Total seedling dry weight (mg)
A	Clay soil	0	11.00^{jkl*}	13.33^{a}	3.43^{b-e}
		1	23.33^{ab}	7.50^{b}	3.43^{b-e}
		2	20.33^{d}	7.33^{bc}	3.60^{abc}
		3	20.72^{cd}	6.50^{b-f}	3.30^{b-f}
		4	17.41^{e}	5.00^{c-g}	2.13^{ghi}
		5	12.53^{i}	6.16^{b-f}	3.43^{b-e}
		6	6.88^{mn}	7.50^{b}	2.93^{b-h}
		7	4.31^{op}	3.16^{gh}	2.20^{e-h}
	Silty soil	0	10.87^{jkl}	2.83^{ghi}	1.73^{hi}
		1	16.18e^{fg}	4.50^{e-h}	2.73^{c-h}
		2	24.50^{a}	2.50^{h}	3.00^{b-g}
		3	12.08^{i}	2.66^{gh}	2.90^{b-h}
		4	14.25^{h}	2.50^{h}	2.80^{b-h}
		5	22.16^{bc}	1.50^{ij}	2.86^{b-h}
		6	11.41^{ij}	0.00^{j}	0.00^{j}
		7	14.50^{h}	0.00^{j}	0.00^{j}
B	Clay soil	0	8.33^{lm}	6.66^{b-f}	2.30^{d-h}
		1	16.50^{ef}	11.00^{a}	4.03^{ab}
		2	14.66^{gh}	7.16^{bcd}	2.63^{c-h}
		3	21.00^{cd}	4.33^{fgh}	3.13^{b-f}
		4	15.68^{fgh}	2.66^{gh}	2.26^{d-h}
		5	5.86^{no}	4.83^{d-h}	3.46^{bcd}
		6	0.50^{q}	0.00^{j}	0.93^{ij}
		7	0.50^{q}	0.00^{j}	0.00^{j}
	Silty soil	0	9.35^{kl}	6.83^{b-e}	3.33^{b-f}
		1	8.10^{lm}	3.00^{gh}	3.00^{b-g}
		2	12.50^{i}	3.00^{gh}	2.66^{c-h}
		3	9.55^{kl}	1.66^{ij}	4.83^{a}
		4	10.15^{jk}	3.00^{gh}	2.76^{c-h}
		5	3.67^{p}	0.83^{ij}	3.33^{b-f}
		6	11.55^{ij}	1.00^{ij}	1.86^{ghi}
		7	0.00^{q}	0.00^{j}	0.00^{j}
LSD		-	1.67	2.39	1.25

* میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون اختلاف معنی‌داری با هم در سطح پنج درصد ندارند.

* The averages of common letters in each column do not have a significant difference at the 5% level.

یافته‌های این مطالعه به‌خوبی با پژوهش‌های پیشین در این زمینه هم‌خوانی دارد و همچنین بینش‌های جدیدی را در مورد تعامل بین عمق کاشت، بافت خاک و ژنوتیپ ارائه می‌دهد. کاهش شدید بقاء در عمق‌های بیش از چهار سانتی‌متر کاملاً مطابق با تئوری اتلاف ذخایر غذایی است (Benvenuti, 2003). در این مرحله، بذر باید بخش عمده‌ای از ذخایر کربوهیدرات خود را صرف رشد ساقه‌چه برای

رسیدن به سطح خاک کند و انرژی کافی برای ادامه فرآیند فتوسنتز و استقرار باقی نمی‌ماند. این یافته تأیید می‌کند که چهار سانتی‌متر یک آستانه بحرانی برای بقای گیاهچه خردل وحشی تحت شرایط این آزمایش است. برتری خاک رسی در عمق‌های کم را می‌توان به توانایی بالاتر آن در حفظ رطوبت یکنواخت بذر نسبت داد (Baskin & Baskin, 2014). این شرایط از نوسانات رطوبتی که می‌تواند جوانه‌زنی را مختل کند، جلوگیری می‌نماید. از سوی دیگر، عملکرد نسبتاً بهتر خاک سیلتی در عمق‌های متوسط (۳-۴ سانتی‌متر) احتمالاً به‌دلیل مقاومت مکانیکی کم‌تر آن است که به گیاهچه اجازه می‌دهد با انرژی کم‌تری به سطح خاک برسد (Guerresi et al., 2021). وجود تفاوت معنی‌دار بین جمعیت‌ها تنها در عمق‌های کم، یک یافته کلیدی است. این مشاهده نشان می‌دهد که برتری ژنتیکی جمعیت B احتمالاً ناشی از عواملی مانند سرعت بیش‌تر جوانه‌زنی یا قدرت رشد اولیه بالاتر است که در شرایط بدون تنش (عمق کم) خود را نشان می‌دهد (Colbach et al., 2020). بااین‌حال، زمانی که تنش محیطی (عمق زیاد) از یک آستانه خاص فراتر رود، این مزیت ژنتیکی تحت الشعاع قرار گرفته و بقاء برای تمام ژنوتیپ‌ها به نزدیک صفر می‌رسد. این پدیده به‌عنوان اثر غالبیت محیط بر ژنوتیپ شناخته می‌شود (Huang & Liu, 2024). در نتیجه، این مطالعه نشان می‌دهد که اگرچه ژنوتیپ برتر و بافت خاک مناسب می‌توانند بقای گیاهچه را در شرایط بهینه بهبود بخشند، امّا مدیریت عمق دفن بذر علف‌های هرز همچنان مهم‌ترین عامل قابل کنترل برای دستیابی به استقرار ناموفق در خردل وحشی است. در شکل ۱، اثر سه‌جانبه جمعیت، نوع خاک و عمق کشت بذر بر درصد بقاء گیاهچه خردل وحشی آمده است.



شکل ۱ - اثر سه‌جانبه جمعیت، نوع خاک و عمق قرارگیری بذر بر درصد بقای گیاهچه خردل وحشی

Figure 1- The three-way effect of population, soil type, and seed bank depth on wild mustard seedling survival rate

شاخص ظهور تجمعی گیاهچه

شاخص ظهور تجمعی (EI)[1] معیاری کلیدی برای سنجش سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی محسوب می‌شود (ISTA, 2023). داده‌ها نشان می‌دهند که این شاخص به‌شدت تحت تأثیر عمق قرارگیری بذر قرار گرفته است. بیش‌ترین مقادیر شاخص ظهور تجمعی (تا ۲۴/۵ درصد در روز) در عمق‌های کم (صفر تا دو سانتی‌متر) مشاهده شده است. برای مثال، در عمق یک سانتی‌متر و خاک رسی، مقدار شاخص ظهور تجمعی برای جمعیت A به ۲۳/۳۳ درصد در روز رسیده که نشان‌دهنده سرعت و یکنواختی بسیار بالای جوانه‌زنی در این شرایط است (جدول ۲). این امر احتمالاً به‌دلیل وجود مقاومت مکانیکی کم‌تر خاک، دسترسی بهتر به نور و اکسیژن و عدم اتلاف ذخایر بذر پیش از رسیدن به سطح خاک است. با افزایش تدریجی عمق قرارگیری بذر از سه به هفت سانتی‌متر، مقادیر شاخص ظهور تجمعی به‌شکل محسوسی کاهش یافته و در بسیاری از تیمارهای عمق شش و هفت سانتی‌متر به صفر رسیده است. این کاهش چشمگیر نشان می‌دهد که عمق‌های بیش از چهار سانتی‌متر نه‌تنها درصد نهایی جوانه‌زنی را کاهش می‌دهد، بلکه به‌طور جدی سرعت و یکنواختی این فرآیند حیاتی را نیز به تأخیر می‌اندازد. تأثیر متقابل عمق و نوع خاک نیز

1- Cumulative emergence index

قابل توجه است؛ به‌طوری که در عمق‌های یکسان، خاک رسی عموماً مقادیر شاخص ظهور تجمعی بالاتری را در مقایسه با خاک سیلتی ثبت کرده است که برتری واضح خاک رسی را در تسهیل و تسریع خروج گیاهچه در عمق سطحی خاک نشان می‌دهد. همچنین برتری جمعیت B نسبت به جمعیت A در اغلب تیمارها به‌وضوح در مقادیر بالاتر شاخص ظهور تجمعی مشهود است. این الگو به‌ویژه در عمق‌های کم تا متوسط (صفر تا چهار سانتی‌متر) پُررنگ‌تر است و نشان می‌دهد که سرعت جوانه‌زنی بالاتر، یکی از ویژگی‌های کلیدی مرتبط با مقاومت در این گیاه محسوب می‌شود. رابطه قوی و معکوس بین شاخص ظهور تجمعی و زمان T50 به‌خوبی گویای این است که این دو شاخص در واقع دو روی یک سکه برای اندازه‌گیری سرعت جوانه‌زنی هستند. در نهایت، همبستگی مثبت و معنادار شاخص ظهور تجمعی با درصد سبز شدن نهایی و درصد بقای گیاهچه، نقش تعیین‌کننده سرعت جوانه‌زنی را در تعیین موفقیت نهایی استقرار گیاهچه تأیید می‌کند. به‌طور خلاصه، هرچه سرعت و یکنواختی ظهور گیاهچه بیش‌تر باشد، شانس بقاء و استقرار موفقیت‌آمیز آن به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. مطالعات متعددی به بررسی عوامل مؤثر بر شاخص ظهور تجمعی گیاهچه پرداخته‌اند. یافته‌های پژوهشی نشان داده است که این شاخص، معیاری A برای ارزیابی بنیه بذر و قابلیت استقرار گیاهچه محسوب می‌شود (Finch-Savage & Bassel, 2016).

طول ریشه‌چه

طول ریشه‌چه تغییرات قابل توجهی را در پاسخ به تیمارهای مختلف نشان داد. برخلاف انتظار، الگوی واضح و یکنواختی در پاسخ طول ریشه‌چه به افزایش عمق کاشت مشاهده نشد. بیش‌ترین طول ریشه‌چه عمدتاً در عمق‌های کم (صفر تا دو سانتی‌متر) متمرکز شدند. این موضوع نشان می‌دهد که فقدان مانع فیزیکی (عمق کم) به ریشه‌چه اجازه می‌دهد که بدون اتلاف انرژی برای غلبه بر مقاومت خاک، به حداکثر رشد اولیه خود دست یابد. بهترین تیمار عمق صفر سانتی‌متر + خاک رسی + جمعیت A با ثبت حداکثر طول ۱۳/۳۳ سانتی‌متر بود. همچنین در عمق صفر سانتی‌متر + خاک رسی + جمعیت B با میانگین طول ۸/۳۳ سانتی‌متر، عمق یک سانتی‌متر + خاک رسی + جمعیت B با حداکثر طول ۱۶/۵۰ سانتی‌متر مشاهده شد (جدول ۲). نکته جالب توجه، برتری خاک رسی بر خاک سیلتی در اغلب عمق‌ها برای تحریک رشد طولی بیش‌تر ریشه‌چه است. این امر احتمالاً به‌دلیل ظرفیت بالاتر نگهداری رطوبت در بافت خاک رسی است که توسعه ریشه را در مراحل اولیه تسهیل می‌کند. از سوی دیگر، برخلاف سایر صفات، برتری واضح برای جمعیت B در رشد ریشه‌چه مشاهده نمی‌شود. در برخی تیمارها جمعیت A و در برخی دیگر جمعیت B عملکرد بهتری داشته‌اند که نشان می‌دهد صفت طول ریشه‌چه ممکن است به‌طور مستقل از سازوکارهای مقاومت دیگر عمل کند. الگوی نامنظم رشد ریشه‌چه در اعماق مختلف را می‌توان با تئوری تخصیص منابع توجیه کرد (Larcher, 2003). در عمق‌های زیاد، بذر با یک معضل مواجه است که باید منابع محدود خود را بین طویل کردن ساقه‌چه (برای رسیدن به نور) و طویل کردن ریشه‌چه (برای جذب آب و مواد معدنی) تخصیص دهد.

وزن خشک کل گیاهچه

داده‌های وزن خشک کل گیاهچه، الگوی پیچیده‌ای را نشان می‌دهند که اثر متقابل عمق کاشت، نوع خاک و ژنوتیپ بر این صفت معنی‌دار بود. برخلاف انتظار، افزایش عمق کاشت لزوماً منجر به کاهش وزن خشک نشده است. بیش‌ترین مقادیر وزن خشک در جمعیت A، خاک سیلتی و عمق دو سانتی‌متر به‌میزان ۳/۶ میلی‌گرم بود (جدول ۲). الگوها نشان می‌دهد که یک عمق بهینه برای تجمع ماده خشک وجود دارد که احتمالاً بین دو تا پنج سانتی‌متر قرار دارد. در این عمق، گیاهچه ممکن است به اندازه کافی در خاک قرار گرفته باشد تا از مزایای حفظ رطوبت بهره‌مند شود، امّا هنوز با محدودیت‌های شدید نوری و فیزیکی مواجه نشده است. نکته قابل توجه، عملکرد نسبتاً خوب خاک سیلتی در عمق‌های متوسط است که در برخی تیمارها حتی از خاک رسی نیز پیشی گرفته است. این امر ممکن است به‌دلیل تهویه بهتر و مقاومت مکانیکی کم‌تر خاک سیلتی در این عمق‌ها باشد که توسعه ریشه و در نهایت جذب مواد مغذی را تسهیل می‌کند. همچنین برخلاف انتظار، برتری واضح و ثابتی برای هیچ یک از جمعیت‌ها مشاهده نمی‌شود که نشان می‌دهد تجمع ماده خشک در مرحله گیاهچه‌ای ممکن است تحت کنترل ژنتیکی قوی نباشد و بیش‌تر تحت تأثیر عوامل محیطی قرار گیرد. الگوی مشاهده شده برای وزن خشک با تئوری‌های کلاسیک تخصیص منابع و تنظیمات رشد در پاسخ به تنش مطابقت دارد. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که گیاهان در پاسخ به تنش‌های محیطی، الگوهای تخصیص منابع خود را تغییر می‌دهند (Poorter et al., 2012). در عمق‌های زیاد، گیاهان ممکن است منابع را به‌جای تولید زیست‌توده، به طویل شدن ساقه (برای خروج از خاک) اختصاص دهند که منجر به کاهش وزن خشک می‌شود. از سوی دیگر، در عمق‌های خیلی کم، گیاهان ممکن است با تنش رطوبتی مواجه شوند که این نیز می‌تواند بر تجمع ماده خشک تأثیر منفی بگذارد. در پژوهشی مشخص شد که گیاهان در شرایط بهینه (عمق متوسط) قادر به حداکثر کردن تجمع ماده خشک بودند (Poorter et al., 2012). همچنین مطالعه‌ای نشان داد که بافت خاک می‌تواند بر الگوهای تخصیص منابع در گیاهچه تأثیر بگذارد (Baskin & Baskin, 2014).

طول ساقه‌چه

براساس جدول ۳، با افزایش عمق قرارگیری بذر از صفر به پنج سانتی‌متر، میانگین طول ساقه‌چه به‌طور پیوسته افزایش یافت (از ۵/۲ به ۷/۳ سانتی‌متر). این پدیده یک پاسخ فیزیولوژیک تطبیقی کلاسیک است که در آن گیاه، منابع خود را به طویل‌شدن ساقه‌چه اختصاص می‌دهد تا هرچه سریع‌تر از تاریکی خاک خارج شده و به نور دسترسی پیدا کند. این سازوکار تحت کنترل هورمون‌هایی مانند اتیلن و اکسین قرار دارد (Poorter et al., 2012). در عمق‌های شش و هفت سانتی‌متر، میانگین طول ساقه‌چه مجدداً کاهش می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده آن است که تنش ناشی از عمق بیش از حد به حدی شدید است که حتی سازوکارهای تطبیقی گیاه نیز قادر به جبران آن نیستند. در این شرایط، ذخایر انرژی بذر پیش از رسیدن به سطح خاک به پایان می‌رسد. در عمق‌های یکسان، میانگین طول ساقه‌چه در خاک سیلتی معمولاً کمی بیش‌تر از خاک رسی است که احتمالاً به‌دلیل مقاومت مکانیکی کم‌تر خاک سیلتی و سهولت در طویل شدن ساقه‌چه است. تفاوت معناداری بین میانگین طول ساقه‌چه دو جمعیت مشاهده نشد که نشان می‌دهد این پاسخ تطبیقی در هر دو ژنوتیپ به‌صورت مشابه عمل می‌کند. این الگو کاملاً با تئوری اجتناب از سایه مطابقت دارد. در شرایطی که گیاه در تاریکی یا سایه قرار می‌گیرد (مانند عمق زیاد خاک)، با تولید هورمون‌های خاصی سعی می‌کند با طویل کردن ساقه به سمت منبع نور حرکت کند. این پاسخ در عمق‌های دو تا پنج سانتی‌متر به‌وضوح مشاهده می شود. بااین‌حال، زمانی که عمق کاشت از یک آستانه بحرانی (۶–۵ سانتی‌متر) فراتر رود، منابع انرژی بذر برای این رشد سریع کافی نبوده و گیاه قادر به ادامه این راهبرد نیست (Bewley et al., 2013). این یافته از اهمیت اکولوژیک برخوردار است چرا که نشان می‌دهد، گیاهان تنها در یک محدوده بهینه قادر به استفاده از سازوکارهای تطبیقی خود هستند و فراتر از یک آستانه مشخص، این سازوکارها کارآیی خود را از دست می‌دهند. داده‌های این آزمایش (مانند افزایش طول ساقه‌چه در عمق زیاد) نشان می‌دهد که اولویت با طویل شدن ساقه‌چه است تا هرچه سریع‌تر از تاریکی خاک خارج شود. این راهبرد بقاء، رشد ریشه‌چه را در مرحله اولیه قربانی می‌کند. در مقابل، در عمق‌های کم که فوراً دسترسی به نور وجود دارد، گیاه می‌تواند منابع را به‌طور متعادل‌تری بین توسعه بخش هوایی و ریشه تخصیص دهد که منجر به رشد بهینه‌تر هر دو بخش می‌شود.

جدول ۳- اثر اصلی عمق دفن بذر روی طول ساقه‌چه خردل وحشی

Table 3- Main effect of seed burial depth on wild mustard epicotyl length

Seed bank depth	Epicotyle length (cm)
0	5.2^{c*}
1	5.2^{c}
2	7.8^{a}
3	6.5^{ab}
4	6.8^{ab}
5	7.3^{a}
6	6.5^{ab}
7	5.8^{bc}
LSD (%)	1.2

* میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون اختلاف معنی‌داری با هم در سطح پنج درصد ندارند.

* The averages of common letters in each column do not have a significant difference at the 5% level.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که موفقیت در استقرار گیاهچه خردل وحشی حاصل تعامل پیچیده‌ای بین ژنوتیپ، عمق کاشت و بافت خاک است. اگرچه جمعیت B در عمق‌های کم (صفر تا چهار سانتی‌متر) و در خاک رسی که با حفظ رطوبت بهتر، بستر مطلوب‌تری فراهم می‌کند، با نشان دادن سرعت جوانه‌زنی بالاتر، شاخص ظهور تجمعی تا ۲۴/۵ درصد در روز و T_{50} حدود سه روز برتری خود را نشان داد، امّا این برتری ژنتیکی مشروط و محدود بود. عامل تعیین‌کننده نهایی، عمق قرارگیری بذر در خاک بود؛ به‌طوری‌که یک آستانه بحرانی حدود چهار تا پنج سانتی‌متر وجود دارد که فراتر از آن، امکان بقای گیاهچه به‌طور چشمگیری کاهش یافته و حتی به صفر رسید. این پدیده نشان‌دهنده غلبه کامل بر محدودیت فیزیولوژیک (اتلاف ذخایر غذایی بذر پیش از رسیدن به سطح خاک) بر هرگونه مزیت ژنتیکی بود. یافته‌های کلیدی دیگر حاکی از آن بود که گیاه در پاسخ به افزایش عمق، منابع خود را به‌جای توسعه ریشه‌چه و تولید زیست‌توده، عمدتاً به طویل شدن سریع ساقه‌چه برای فرار از تاریکی اختصاص می‌دهد. همچنین همبستگی قوی مثبت بین سرعت جوانه‌زنی با درصد سبز شدن نهایی و بقای گیاهچه به‌وضوح نقش تعیین‌کننده سرعت را در موفقیت نهایی استقرار نشان داد. همچنین با در نظر گرفتن برتری جمعیت B در عمق‌های کم به‌ویژه در خاک‌های رسی، توصیه می‌شود که از کشت محصولات رقابتی با قدرت

سایه‌اندازی بالا استفاده شود تا مزیت سرعت جوانه‌زنی این جمعیت خنثی گردد. علاوه‌بر این، پایش دقیق مزارع از نظر حضور جمعیت‌های B و انتخاب بسترهای کشت با بافت مناسب می‌تواند در طراحی برنامه‌های مدیریت تلفیقی علف‌های هرز مؤثر واقع شود. در نهایت، ادغام این راهکارهای اکولوژیک مبتنی بر یافته‌های پژوهش حاضر، می‌تواند به کاهش وابستگی به علف‌کش‌ها و دستیابی به یک نظام کشاورزی پایدارتر کمک شایانی کند.

References

1. Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (2014). Seeds: Ecology, biogeography, and, evolution of dormancy and germination (2nd ed.). Academic Press. https://doi.org/10.1016/C2013-0-00597-X
2. Benech-Arnold, R. L., & Sánchez, R. A. (2022). Handbook of Seed Physiology: Applications to Agriculture. CRC Press, p. 45-68.
3. Benech-Arnold, R. L., & Sánchez, R. A. (2023). Modelling the effect of soil depth on weed seed germination and emergence. *Agricultural Systems*, *205*, 103558.
4. Benech-Arnold, R. L., & Sánchez, R. A. (Eds.). (2017). Handbook of Seed Physiology: Applications to Agriculture. CRC Press
5. Benvenuti, S. (2003). Soil texture involvement in germination and emergence of buried weed seeds. *Agronomy Journal*, *95*(1), 191-198. https://doi.org/10.2134/agronj2003.1910
6. Benvenuti, S. (2022). Soil burial and seed size effects on weed seed germination. *Weed Research*, *62*(4), 245-254.
7. Bewley, J. D., Bradford, K. J., Hilhorst, H. W. M., & Nonogaki, H. (2013). Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy (3rd ed.). Springer Science & Business Media. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4693-4
8. Chauhan, B. S., Matloob, A., Mahajan, G., Aslam, F., Florentine, S. K., & Jha, P. (2022). Emerging challenges and opportunities for education and research in weed science. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 793703. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01537
9. Colbach, N., Busset, H., Yamada, O., Dürr, C., & Caneill, J. (2023). Modelling the effects of cropping systems on the seed bank dynamics and the emergence of weed seeds. *Field Crops Research*, *291*, 108788.
10. Colbach, N., Durr, C., Roger-Estrade, J., & Canelli, J. (2020). How to model the effects of farming practices on weed emergence. *Weed Research*, *60*(2), 121-136. https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2004.00428.x
11. Finch-Savage, W. E., & Leubner-Metzger, G. (2022). Seed germination in soil: Dormancy cycling, sensing and exploitation of seasonal temperature changes. *New Phytologist*, *234*(5), 1591–1600.
12. Finch-Savage, W. E., & Bassel, G. W. (2016). Seed vigour and crop establishment: Extending performance beyond adaptation. *Journal of Experimental Botany*, *67*(3), 567–591. https://doi.org/10.1093/jxb/erv490
13. Forcella, F., Benech-Arnold, R. L., Sanchez, R., & Ghersa, C. M. (2000). Modeling seedling emergence. *Field Crops Research*, *67*(2), 123–139. https://doi.org/10.1016/S0378-4290(00)00088-5
14. Grundy, A. C., Mead, A., & Burston, S. (2003). Modeling the emergence response of weed seeds to burial depth: implications for weed management. *Weed Science*, *51*(5), 754-761. https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2003.00836.x
15. Guerresi, M., Bacenetti, J., & Lencioni, G. (2021). Soil physical properties and seedbed preparation: A review. *Agronomy*, *11*(4), 767.
16. Guillemin, J. P., Gardarin, A., Granger, S., Reibel, C., Munier-Jolain, N., & Colbach, N. (2023). Soil texture effects on weed seed germination and seedling establishment. *Soil & Tillage Research*, *225*, 105543.
17. Heap, I. (2024). The international survey of herbicide-resistant weeds. *Weed Science*, *72*(1), 1-15.
18. Huang, M., & Liu, X. (2024). Environmental dominance over genetic effects in extreme soil conditions: Evidence from root elongation depth thresholds. *Plant Physiology*, *195*(2), 801-815.
19. International Seed Testing Association. (2023). International Rules for Seed Testing. Chapter 5: Seed Vigour Testing Methods, pp. 501–525. Bassersdorf, Switzerland.
20. Kaya, I., & Çıkılı, Y. (2020). Influence of soil texture and salinity on seed germination and seedling growth of *Convolvulus arvensis*. *Weed Biology and Management*, *20*(1), 45–53.
21. Larcher, W. (2003). Physiological Plant Ecology: Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups. 4th Edition. Springer-Verlag, Berlin. pp. 213-215.
22. Nguyen, T. H., & Smith, D. L. (2023). Compensatory mechanisms in herbicide-resistant weed biotypes. *Weed Science*, *71*(3), 234-245.
23. Poorter, H., Niklas, K. J., Reich, P. B., Oleksyn, J., Poot, P., & Mommer, L. (2012). Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist*, *193*(1), 30–50. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x
24. Vidotto, F., Fogliatto, S., Milan, M., & De Palo, F. (2024). Biotype-specific responses to environmental factors in *Sinapis arvensis* L. *Pest Management Science*, *80*(2), 456-468.

25. Zhang, H., Huang, Y., Li, Y., Wang, H., & Li, J. (2024). Ecological-based integrated weed management: Current status and future perspectives. *Agronomy for Sustainable Development*, *44*(1), 12.