University of Birjand

Journal homepage:
https://escs.birjand.ac.ir

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

Vol. 18, No. 2, pp. 263-281 (Summer 2025)

https://doi.org/10.22077/ESCS.2024.7074.2258

Original article

Evaluation of morphological traits and yield and yield components of oilseed flax (*Linum usitatissimum* L.) genotypes in response to deficit irrigation regimes

M. Valipour[1], A. Rahnama[2*], P. Hassibi[2], A. Monsefi[3]

1. *M.Sc. Graduate of Agrotechnology, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran*
2. *Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran*
3. *Assistant Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran*

Received 21 December 2023; Accepted 15 January 2024

Extended abstract

Introduction

Arid and semi-arid regions of the world are primarily characterized by water scarcity, which limits agriculture mainly to irrigated land. Presently and in the future, irrigated farming systems will have to operate under conditions of water scarcity, which significantly impacts food production and threatens global food security. Deficit irrigation is an important strategy involving the application of limited irrigation during drought-sensitive phenological stages of a crop. Water restriction is targeted at drought-tolerant growth stages, particularly the vegetative stages and late stages of ripening. The response of plants to deficit irrigation-induced water stress varies with growth stages and stress intensity. Deficit irrigation can maximize crop water productivity without significant yield loss, and various deficit irrigation strategies have been developed to improve crop performance under water deficit conditions. However, it is crucial to develop crop management strategies aimed at enhancing crop sustainability in stressful environmental conditions. Therefore, our study aimed to investigate the influence of different irrigation regimes at various growth stages on the morphological characteristics, and oil and grain yield of oilseed flax genotypes.

Materials and methods

This experiment was carried out during the 2022-2023 growing season, using a split-plot arrangement in a randomized complete block design with three replications. The study site was located at the research farm of Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. The main plots consisted of four irrigation regimes: control (irrigation at 80%, 80%, 80%, and 80% of field capacity), mild water deficit (irrigation at 60%, 70%, 70%, and 60% of field capacity), moderate water deficit (irrigation at 60%, 60%, 60%, and 60% of field capacity) and severe water deficit (irrigation at 40%, 50%, 50%, and 40% of field capacity). The sub-plots consisted of four oilseed flax genotypes: Isfahan, Kerman, Indian and Hungarian. Deficit irrigation treatments were applied at stem elongation, branching, flowering, and seed-filling stages. The control treatment was watered with sufficient water (80% field capacity) until the end of the experiment.

* Corresponding author: Afrasyab Rahnama; E-Mail: a.rahnama@scu.ac.ir

© 2025, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Results and discussion

There were significant differences among genotypes and irrigation regimes in most traits. Deficit irrigation depend on plant growth stage and stress severity led to a significant reduction in the number of capsule per plant, the number of grain per capsule, grain number per plant, grain weight per plant, 1000-grain weight, plant height, branch number, biomass yield, harvest index, and grain and oil yield. The grain yield of all genotypes significantly decreased under mild, moderate and severe water-deficit stresses by 34%, 39% and 49%, respectively, compared to the control. Similarly, the oil yield reduced by 35%, 40%, and 52%, respectively, compared to the control. There was genetic variation in grain yield between genotypes in response to water deficit. Grain yield was significantly reduced for all genotypes in response to severe water-deficit stress, with larger reductions in Indian and Hungarian genotypes (56 and 62%, respectively) than Isfahan and Kerman genotypes (with 46 and 32%, respectively). The Isfahan and Kerman genotypes with higher grain yield exhibited a higher oil yield.

Conclusion

Different irrigation regimes applied at various growth stages had different effects on the morphological traits and yield of oil seed flax genotypes. The developmental stage and severity of water deficiency played an important role in the genotype responses to deficit irrigation management. The moderate deficit regime led to a 37% and 29% decrease in grain yield of Isfahan and Kerman genotypes, respectively, while saving about 35% of available water. Therefore, this deficit irrigation regime is recommended as a suitable strategy to improve water productivity. Moreover, Isfahan and Kerman genotypes are recommended for cultivation in semi-arid regions due to their greater stability in grain yield under deficit irrigation conditions.

Keywords: Drought stress, Growth stages, Oil yield, Seed yield

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد هجدهم، شماره دوم، تابستان ۱٤۰٤

https://doi.org/10.22077/ESCS.2024.7074.2258

مقاله پژوهشی

ارزیابی خصوصیات مورفولوژیکی و عملکرد و اجزای عملکرد ژنوتیپ‌های کتان روغنی (*Linum usitatissimum* L.) در واکنش به رژیم‌های کم‌آبیاری

محمد ولی‌پور[۱]، افراسیاب راهنما[۲*]، پیمان حسیبی[۲]، علی منصفی[۳]

۱. دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد اگروتکنولوژی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۲. دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۳. استادیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
تنش خشکی
عملکرد دانه
عملکرد روغن
مراحل رشدی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۱۰/۲۵

تاریخ انتشار:
تابستان ۱۴۰۴
۱۸(۲): ۲۶۳-۲۸۱

چکیده

کم‌آبیاری یک راهبرد مهم صرفه‌جویی مصرف آب آبیاری است که راندمان مصرف آب را افزایش می‌دهد. به‌منظور ارزیابی واکنش صفات مورفولوژیکی و عملکرد ژنوتیپ‌های کتان روغنی به رژیم‌های کم‌آبیاری، آزمایشی مزرعه‌ای به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ در دانشگاه شهید چمران اهواز اجرا شد. چهار رژیم آبیاری شامل آبیاری مطلوب (آبیاری در ۸۰-۸۰-۸۰-۸۰ درصد ظرفیت زراعی)، کم‌آبیاری ملایم (آبیاری در ۶۰-۷۰-۷۰-۶۰ درصد ظرفیت زراعی)، کم‌آبیاری متوسط (آبیاری در ۶۰-۶۰-۶۰-۶۰ درصد ظرفیت زراعی) و کم‌آبیاری شدید (آبیاری در ۴۰-۵۰-۵۰-۴۰ درصد ظرفیت زراعی) به‌عنوان عامل اصلی و چهار ژنوتیپ کتان روغنی (هندی، مجاری، اصفهان و کرمان) به‌عنوان عامل فرعی موردبررسی قرار گرفتند. رژیم‌های آبیاری مذکور به ترتیب در مراحل رشد رویشی، ساقه‌دهی، آغاز گلدهی و آغاز پر شدن دانه اعمال شدند. رژیم‌های کم‌آبیاری بسته به مرحله رشدی گیاه و شدت تنش به‌طور متفاوتی باعث کاهش ویژگی‌های مورفولوژیکی و عملکرد دانه و روغن ژنوتیپ‌ها شد. به‌طوری‌که رژیم‌های کم‌آبیاری ملایم، متوسط و شدید به‌طور متوسط منجر به کاهش معنی‌دار عملکرد دانه به میزان ۳۴، ۳۹ و ۴۹ درصد و عملکرد روغن به میزان ۳۵، ۴۰ و ۵۲ درصد شدند. بین ژنوتیپ‌ها ازنظر عملکرد دانه در واکنش به کم‌آبیاری تنوع ژنتیکی وجود داشت. عملکرد دانه در کم‌آبیاری شدید در مقایسه با آبیاری مطلوب در ژنوتیپ‌های هندی، مجاری، اصفهان و کرمان به میزان ۵۶، ۶۲، ۴۶ و ۳۲ درصد کاهش یافت. ژنوتیپ‌های اصفهان و کرمان در شرایط کم‌آبیاری با کمترین کاهش عملکرد دانه و روغن، پایداری عملکرد بالاتری داشتند. به‌طورکلی، اعمال کم‌آبیاری متوسط علی‌رغم کاهش ۳۷ و ۲۹ درصدی عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های اصفهان و کرمان، باعث کاهش ۳۵ درصدی آب مصرفی و افزایش کارایی مصرف آب شد. لذا رژیم آبیاری ۶۰ درصد ظرفیت زراعی و ژنوتیپ‌های اصفهان و کرمان برای تولید پایدار کتان روغنی در مناطق نیمه‌خشک قابل توصیه هستند.

مقدمه

کتان روغنی (*Linum usitatissimum* L.)، یکی از گیاهان لیفی خانواده کتان موسوم به کتان معمولی یا بزرگ است که دارای ارزش تجاری و دارویی بالا بوده و کشت آن در کشاورزی سراسر دنیا سابقه طولانی دارد و به دلیل توسعه محصولات باارزش حاصل از این گیاه، قیمت آن در بازار جهانی رو به افزایش است (Zhao et al., 2020). بنابراین سطح زیر کشت آن در جهان به دلیل تقاضا و ارزش اقتصادی بالا به‌طور فزاینده‌ای در حال گسترش است (Gao, 2020). در سال ۲۰۲۲، سطح زیر کشت کتان روغنی در جهان حدود ۴/۵ میلیون هکتار و میزان تولید آن ۳/۶۵ میلیون تن بوده است (FAO, 2022). در ایران نیز به‌تازگی کشت این گیاه مجدداً موردتوجه قرار گرفته و بر اساس آمارنامه کشاورزی در

* نگارنده پاسخگو: افراسیاب راهنما. پست الکترونیک: a.rahnama@scu.ac.ir

سال ۱۴۰۰، سطح زیر کشت کتان در کشور ۱۰۱ هکتار و میزان تولید آن ۱۳۱ تن بوده است (Ministry of Agriculture Jihad, 2022).

در حال حاضر، راهبردهای بهبود عملکرد شامل روش‌های بهنژادی و بهزراعی است. بااین‌وجود کمبود آب و پراکنش نامناسب بارندگی در مراحل مختلف رشدی گیاهان از عوامل اصلی محدودکننده تولید محصولات کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است و رقابت بر سر منابع آبی، سبب تبدیل اراضی فاریاب به سیستم‌های دیم شده است. بدیهی است که گیاهان زراعی و حتی گیاهان نسبتاً متحمل به خشکی از وقوع دوره‌ای تنش خشکی آسیب خواهند دید. کم‌آبیاری یک سیستم مدیریتی آبیاری و راهبرد مهم صرفه‌جویی در مصرف آب آبیاری در بسیاری از نقاط جهان است (Fernández et al., 2013) که در آن آبیاری در مقادیر کمتر از نیاز آبی گیاه زراعی اعمال می‌شود و درنتیجه راندمان مصرف آب افزایش می‌یابد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به دلیل محدودیت دسترسی به آب، استفاده از سیستم‌های منتهی به افزایش راندمان مصرف آب و بهبود عملکرد دانه بسیار مهم است (Ma et al., 2020). در نتیجه در دهه‌های اخیر به‌منظور صرفه‌جویی در مصرف آب، شیوه‌های مختلف کم‌آبیاری به‌عنوان یک روش جایگزین برای آبیاری سنتی فاریاب موردبررسی قرار گرفته است.

تاکنون پژوهش‌های متعددی در زمینه رشد کتان روغنی در شرایط آبیاری کامل انجام شده است. برای مثال، آبیاری مناسب پس از گرده‌افشانی کتان روغنی باعث افزایش تجمع ماده خشک و افزایش سهم ماده خشک به دانه شده است (Cui et al., 2015). همچنین گزارش شده مقادیر عملکرد دانه کتان روغنی در کشت فاریاب به‌مراتب بیشتر از کشت دیم آن است (Bauer et al., 2015). در پژوهشی دیگر گزارش شد آبیاری مناسب سبب افزایش عملکرد دانه کتان روغنی شد، اما برخی مطالعات نیز نشان دادند که آبیاری تأثیری قابل‌توجهی بر عملکرد دانه نداشت (Bauer et al., 2015). از سوی دیگر، آبیاری بیش‌ازحد نیز به‌طور قابل‌توجهی فتوسنتز و عملکرد دانه کتان را کاهش می‌دهد (Cui et al., 2015). بنابراین حجم مناسب آب آبیاری و مراحل رشدی گیاه دو جزء ضروری برای افزایش عملکرد دانه و استفاده کارآمد از آب است.

به‌هرحال با کاهش منابع آبی و افزایش هزینه آب مصرفی، واضح است که کشاورزی به سمت مدیریت کم‌آبیاری سوق داده می‌شود و طی آن گیاه با مقادیر جزئی تنش خشکی روبرو می‌شود. مهم‌ترین چالش این راهبرد تعیین یک سیستم مدیریت کم‌آبیاری با کمترین تأثیر منفی تنش بر گیاه است. به عبارتی، در زمان محدودیت دسترسی به آب، مدیریت کم‌آبیاری مستلزم انتخاب زمان مناسب آبیاری و مقدار آب مصرفی و نیز درجه حساسیت گیاه به تنش است (Fereres and Soriano, 2007).

بدون شک تنش خشکی، مهم‌ترین عامل محدودکننده عملکرد گیاهان زراعی محسوب می‌گردد (Wei et al., 2020). گزارش‌های متعددی نشان می‌دهند که تنش خشکی عملکرد دانه، عملکرد و کیفیت روغن کتان روغنی را کاهش می‌دهد (Naserie et al., 2021; Sadeghian Dehkordi and Tadayyon, 2016; Shojaeian Kish et al., 2021; Istanbulluoglu et al., 2015). از سوی دیگر، گیاهان زراعی در مراحل مختلف فنولوژیکی حساسیت متفاوتی به تنش خشکی نشان می‌دهد. نوع واکنش‌ها و میزان خسارت تنش به عوامل متعددی ازجمله شدت، مدت و زمان وقوع تنش و ژنوتیپ گیاهی بستگی دارد (Moatshe et al., 2020). عملکرد دانه بسیاری از گیاهان زراعی در مراحل رویشی و اواخر زایشی واکنش ناچیزی به تنش رطوبتی نشان می‌دهند، درحالی‌که در مرحله زایشی تحت تأثیر تنش رطوبتی قرار می‌گیرند. گزارش شده که کم‌آبیاری طی مرحله حساس گلدهی سبب کاهش رشد و عملکرد کتان روغنی شد، درحالی‌که در مرحله رسیدگی تأثیر آن کمتر بود (Istanbulluoglu et al., 2015).

به‌طورکلی، تنش خشکی در مراحل مختلف رشدی گیاه تأثیر متفاوتی بر ویژگی‌های مورفولوژیکی و عملکرد گیاه برجای می‌گذارد و دسترسی مناسب به آب در مراحل مختلف رشدی گیاه جهت دستیابی به عملکرد قابل‌قبول حائز اهمیت است. هدف از اجرای این پژوهش بررسی تأثیر رژیم‌های مختلف کم‌آبیاری بر خصوصیات مورفولوژیکی و عملکرد ژنوتیپ‌های کتان روغنی در راستای کاهش مصرف آب آبیاری و حفظ پایداری عملکرد در شرایط کم‌آبی بود.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ در مزرعهٔ تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز اجرا شد. رژیم‌های آبیاری شامل آبیاری مطلوب

(آبیاری در ۸۰-۸۰-۸۰-۸۰ درصد ظرفیت زراعی)، کم‌آبیاری ملایم (آبیاری در ۶۰-۷۰-۷۰-۶۰ درصد ظرفیت زراعی)، کم‌آبیاری متوسط (آبیاری در ۶۰-۶۰-۶۰-۶۰ درصد ظرفیت زراعی) و کم‌آبیاری شدید (آبیاری در ۴۰-۵۰-۵۰-۴۰ درصد ظرفیت زراعی) در کرت‌های اصلی و چهار ژنوتیپ کتان روغنی (هندی، مجاری، اصفهان و کرمان) در کرت‌های فرعی موردبررسی قرار گرفتند. در مدیریت‌های مختلف آبیاری به‌گونه‌ای عمل شد که آبیاری با توجه به رسیدن میزان رطوبت خاک به مقادیر ظرفیت زراعی موردنظر به ترتیب در مراحل رشد رویشی، ساقه‌دهی، آغاز گلدهی و آغاز پر شدن دانه اعمال شد. اعمال سطوح کم‌آبیاری از اواخر یک مرحله تا شروع مرحله بعد به همان صورت ادامه داشت و با ورود به مرحله رشدی بعد، درصد ظرفیت زراعی موردنظر بعدی اعمال شد. کاشت هر چهار ژنوتیپ در پنجم آذرماه انجام شد. بذرهای کتان روغنی در دو طرف پنج پشته سه متری با فاصله پشته ۶۰ سانتی‌متر و فاصله خط کاشت ۳۰ سانتی‌متر و فاصله روی خطوط ۵ سانتی‌متر در عمق ۲ تا ۳ سانتی‌متری کشت شدند. به‌منظور جلوگیری از نشت آب بین تیمارها، فاصله بین سطوح کم‌آبیاری و همچنین فاصله بین تکرارها ۲ متر در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج آزمون خاک (جدول ۱)، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار فسفر از منبع سوپرفسفات معمولی، ۸۰ کیلوگرم پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم به‌صورت پایه قبل از کاشت و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص از منبع کود اوره به‌صورت تقسیط در دو مرحله به‌صورت کود پایه هم‌زمان با کاشت و کود سرک در اوایل دوره ساقه‌دهی به خاک مزرعه اضافه شد.

جدول ۱. نتایج آنالیز فیزیکوشیمیایی خاک مزرعه در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر

Table 1. The results of physico-chemical analysis of soil at 0-30 cm

بافت خاک Soil texture	اسیدیته pH	هدایت‌الکتریکی EC	نیتروژن N	پتاسیم K	فسفر P	مواد آلی O.M	رطوبت ظرفیت زراعی FC	رطوبت نقطهٔ پژمردگی PWP
	-	$dS.m^{-1}$	%	$mg.kg^{-1}$		---------- %	----------	%
Sandy loam	7.4	4.8	0. 098	230	11.3	0.39	32	13

به‌منظور اعمال مدیریت کم‌آبیاری و برنامه‌ریزی آبیاری تیمارها در هر مرحلهٔ رشدی بر اساس درصد ظرفیت زراعی موردنظر، از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک مزرعه به‌طور تصادفی نمونه‌برداری و به آزمایشگاه منتقل شد. برای تعیین ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم ابتدا با استفاده از صفحات فشاری نمونه‌های اشباع خاک در مکش‌های ۰/۳- و ۱۵- بار قرار داده شد و درصد رطوبت وزنی خاک در هر دو مکش تعیین شد. درصد رطوبت حجمی خاک در هر مکش با توجه به وزن مخصوص ظاهری خاک تعیین و آب قابل‌استفاده خاک بین این دو نقطه محاسبه شد. درصد رطوبت حجمی خاک به‌طور روزانه با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج (TDR) (ProCheck, Decagon Devices, USA) اندازه‌گیری شد. تیمار آبیاری مطلوب با رسیدن رطوبت خاک در ناحیه ریشه به ۸۰ درصد آب قابل‌استفاده اعمال شد و آبیاری سایر تیمارهای کم‌آبیاری با توجه به کاهش درصد آب قابل‌استفاده خاک در تیمار موردنظر انجام شدند (Zandi et al., 2023). مقادیر تقریبی آب آبیاری مصرف‌شده در کل دورهٔ رشد با احتساب مقادیر بارندگی در ابتدای دورهٔ رشد برای تیمارهای آبیاری مطلوب، کم‌آبیاری ملایم، کم‌آبیاری متوسط و کم-آبیاری شدید به ترتیب ۶، ۴/۸، ۳/۹ و ۳/۶ هزار مترمکعب در هکتار و تعداد نوبت‌های آبیاری به ترتیب ۱۰، ۸، ۶ و ۵ مرتبه بود. مقادیر بارش (مؤثر و غیر مؤثر) از ابتدای آذرماه تا پایان فروردین‌ماه ۲۲۵ میلی‌متر بود که در حدود ۱۵۰ میلی‌متر آن تا اواسط بهمن‌ماه حادث شد.

در پایان فصل رشد و پس از رسیدگی کامل دانه‌ها و به‌منظور حذف اثرات حاشیه‌ای، سه خط وسط هر کرت به‌عنوان خطوط نمونه‌برداری در نظر گرفته شدند. اندازه‌گیری عملکرد دانه، عملکرد زیست‌توده و شاخص برداشت از مساحت یک مترمربع از هر واحد آزمایشی انجام شد. همچنین به‌منظور اندازه‌گیری ارتفاع بوته و اجزای عملکرد شامل تعداد شاخه‌های فرعی، تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، تعداد دانه در بوته، وزن دانه در بوته و وزن هزار دانه، تعداد ۱۵ بوته به‌طور تصادفی از هر واحد آزمایشی مورد ارزیابی قرار گرفت. محتوای روغن دانه با کمک حلال اتر و با روش سوکسله (FOSS, Model SOCCET 2050) اندازه‌گیری شد. کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد

روغن از نسبت عملکرد روغن به آب آبیاری مصرف‌شده محاسبه شد (Fereres and Soriano, 2007).

تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخهٔ ۹/۱ و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد بین رژیم‌های کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشد ازنظر کلیه صفات و بین ژنوتیپ‌ها ازنظر کلیه صفات به‌جز تعداد و وزن دانه در بوته و عملکرد زیست‌توده تفاوت معنی‌داری وجود داشت. برهم‌کنش رژیم‌های کم‌آبیاری و ژنوتیپ نیز برای کلیه صفات به‌جز تعداد کپسول در بوته، تعداد شاخه فرعی، ارتفاع بوته، محتوا و عملکرد روغن تفاوت معنی‌داری نشان داد (جدول ۲).

عملکرد دانه

برهم‌کنش سطوح کم‌آبیاری و ژنوتیپ‌ها نشان داد که رژیم‌های کم‌آبیاری به‌طور متفاوتی منجر به کاهش معنی‌دار عملکرد دانه در هر چهار ژنوتیپ شدند. در تیمار آبیاری مطلوب ژنوتیپ‌های اصفهان و مجاری دارای بیشترین عملکرد دانه بودند، درحالی‌که در تیمارهای کم‌آبیاری ژنوتیپ‌های اصفهان و کرمان دارای بیشترین عملکرد دانه بودند و بین آن‌ها تفاوت معنی‌داری وجود نداشت؛ البته در شرایط کم‌آبیاری ملایم، ژنوتیپ اصفهان تفاوت معنی‌داری با سایر ژنوتیپ‌ها داشت. بین ژنوتیپ‌ها در تیمار کم‌آبیاری شدید تفاوت معنی‌داری وجود داشت، به‌گونه‌ای که میزان کاهش عملکرد دانه در مقایسه با آبیاری مطلوب در ژنوتیپ‌های هندی، مجاری، اصفهان و کرمان به ترتیب ۴۱، ۵۹، ۳۷ و ۳۰ درصد بود (شکل ۱). عملکرد نهایی گیاه نیازمند عرضهٔ مداوم مواد پرورده در طی نمو و باروری گل‌ها، تکامل جنین و تجمع نشاسته و پروتئین در دانه است. نتایج پژوهش حاضر نیز نشان داد تنش خشکی از طریق ریزش کپسول و کاهش تعداد دانه در کپسول و همچنین وزن دانه به‌ویژه در شدت‌های بالای تنش باعث کاهش عملکرد دانه کتان شد. در سطوح کم‌آبیاری ملایم و متوسط، پایداری عملکرد ژنوتیپ اصفهان و در سطوح کم‌آبیاری شدید پایداری عملکرد ژنوتیپ‌های اصفهان و کرمان به‌مراتب بیشتر از سایر ژنوتیپ‌ها بود که این امر ممکن است با سازگاری بهتر این ژنوتیپ‌ها با شرایط کم‌آبیاری در مراحل رشد سریع ساقه و پر شدن دانه نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها مرتبط باشد. کاهش عملکرد دانه کتان روغنی در شرایط تنش خشکی در مطالعات متعددی گزارش شده است (Naserie et al., 2021; Sadeghian Dehkordi and Tadayyon, 2016; Shojaeian Kish et al., 2021; Istanbulluoglu et al., 2015).

جدول ۲. میانگین مربعات صفات مورفولوژیکی و عملکرد کتان روغنی تحت تأثیر ژنوتیپ و رژیم آبیاری

Table 2. Mean squares of morphoological traits and yield of oilseed flax as affected by genotype and irrigation regime

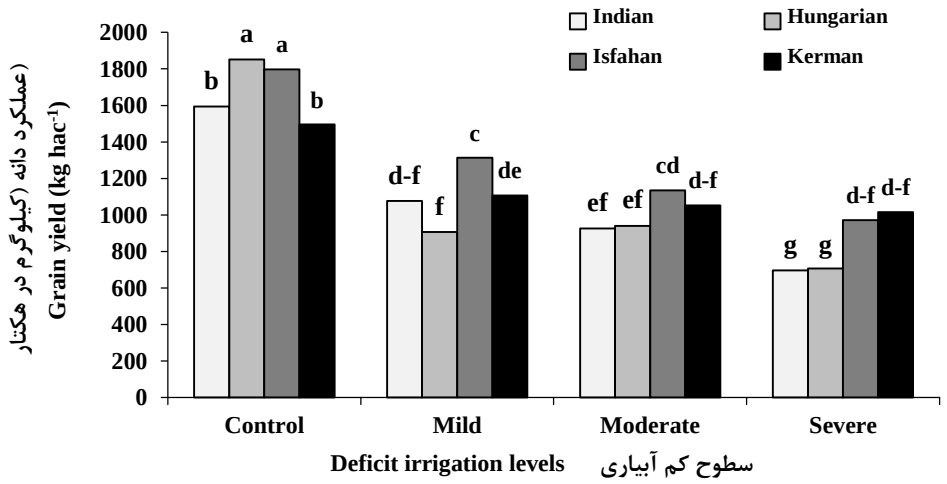
منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	عملکرد دانه Grain yield	تعداد کپسول در بوته Capsule number per plant	تعداد دانه در کپسول Grain number per capsule	تعداد دانه در بوته Grain number per plant	وزن دانه در بوته Grain weight per plant	وزن هزار دانه 1000 grain weight	تعداد شاخه فرعی Branch number
بلوک Block	2	116589**	1067**	0.688*	139086*	4.13**	0.081ns	0.380 ns
آبیاری Irrigation (I)	3	2591765**	19637**	8.34**	2218526**	67.26**	0.211**	1.021**
خطای اصلی Erorr (a)	6	13510	299.9	0.028	30775	0.708	0.018	0.203
ژنوتیپ Genotype (G)	3	129939**	547**	0.768**	45026ns	1.562ns	1.878**	1.941**
کم‌آبیاری × ژنوتیپ I× G	9	57949 **	172 ns	0517 **	66108*	1.674*	0.116*	0.410 ns
خطای فرعی Erorr (b)	24	13696	121	0.143	19008	0.654	0.044	0.187
ضریب تغییرات C.V (%)		*9.65*	*7.54*	*5.53*	*13.73*	*13.84*	*3.64*	*15.75*

Table 2. Continued **جدول ۲. ادامه**

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Plant height	عملکرد زیست‌توده Biological yield	شاخص برداشت Harvest index	محتوای روغن Oil content	عملکرد روغن Oil yield	راندمان مصرف آب Water use efficiency
بلوک Block	2	15.14^{ns}	268394^{ns}	7.11**	7.48^{ns}	19710**	0.00081**
آبیاری Irrigation (I)	3	110.1**	3709860**	159.9**	9.62*	263286**	0.00079**
خطای اصلی Erorr (a)	6	51.4	5348413	0.718	1.57	1530	0.00013
ژنوتیپ Genotype (G)	3	1363**	7502159^{ns}	15.50**	20.98**	24093**	0.00140**
کم‌آبیاری × ژنوتیپ I× G	9	12.15^{ns}	1042044**	2.90*	6.90^{ns}	7114^{ns}	0.00030**
خطای فرعی Erorr (b)	24	10.7	249257	0.992	2.54	2062	0.000094
ضریب تغییرات C.V (%)		*3.66*	*4.72*	*8.71*	*5.33*	*12.39*	*12.75*

**:معنی‌دار در سطح ۱ درصد، *: معنی‌دار در سطح ۵ درصد،ns: غیرمعنی‌دار.

ns: not significant; *and ** significant at 5% and 1% probability levels, respectively



شکل ۱. مقایسه میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌های کتان روغنی در شرایط کم‌آبیاری

Fig. 1. Mean comparison for grain yield of oilseed flax genotypes under deficit irrigation

در بررسی تأثیر تنش خشکی بر عملکرد دانه کتان روغنی گزارش شد که تنش خشکی ملایم و متوسط به‌طور معنی‌داری عملکرد دانه را از طریق کاهش وزن هزار دانه و تعداد کپسول در بوته کاهش داد (Sadeghian Dehkordi and Tadayyon, 2016). همچنین گزارش شد قطع آبیاری در دو مرحله شروع گلدهی تا شروع کپسول‌دهی و شروع کپسول‌دهی تا پایان رسیدگی کتان روغنی در مقایسه با آبیاری کامل سبب کاهش عملکرد دانه شد و بیشترین کاهش در تیمار قطع آبیاری در مرحله شروع کپسول دهی تا پایان رسیدگی به دست آمد (Shojaeian Kish et al., 2021). تنش خشکی با تأثیر بر اجزای عملکرد کتان مانند تعداد کپسول یا طبق و تعداد دانه در کپسول باعث کاهش عملکرد دانه می‌شود (Naserie et al., 2021; Sadeghian Dehkordi and Tadayyon, 2016). در بررسی تأثیر رژیم‌های آبیاری در مراحل مختلف رشدی گلرنگ مشخص شد اعمال تیمارهای کم‌آبیاری از طریق کاهش هدایت روزنه‌ای و

به دنبال آن کاهش فتوسنتز منجر به کاهش معنی‌دار عملکرد دانه و زیست‌توده می‌شود و مقادیر کاهش بسته به سطوح کم‌آبیاری و مراحل رشدی متفاوت است (Zandi et al., 2023). نتیجه آزمایش حاضر مبنی بر تأثیر منفی تنش کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشدی بر عملکرد دانه با نتایج ذکرشده مطابقت داشت. وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار عملکرد دانه با تعداد کپسول در بوته (r=۰/۹۶**) و تعداد دانه در کپسول (r=۰/۸۷**) نیز حاکی از تأثیرگذاری بالای این دو جزء در تعیین عملکرد دانه بود (جدول ۴). به عبارتی تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در کپسول کتان روغنی از مهم‌ترین ویژگی‌هایی هستند که به‌طور غیرمستقیم در تعیین عملکرد دانه نقش دارند.

تعداد کپسول در بوته

تعداد کپسول در بوته به‌عنوان یکی از اجزای مهم عملکرد کتان روغنی با اعمال رژیم‌های کم‌آبیاری در هر چهار ژنوتیپ به‌طور معنی‌داری کاهش یافت، به‌طوری‌که بیشترین تعداد کپسول در بوته در شرایط آبیاری مطلوب مشاهده شد و در رژیم‌های کم‌آبیاری ملایم، متوسط و شدید به ترتیب با کاهش ۳۵، ۳۶ و ۴۴ درصدی روبرو شد. بیشترین تعداد کپسول در ژنوتیپ اصفهان و هندی و کمترین آن مربوط به ژنوتیپ کرمان و مجاری بود (جدول ۳). قبلاً نیز گزارش شده تعداد کپسول در بوته ژنوتیپ هندی در مقایسه با ژنوتیپ مجاری از ثبات بیشتری در مواجه با تنش خشکی انتهای فصل رشد برخوردار بود (Naserie et al., 2021).

جدول ۳. تأثیر کم‌آبیاری و ژنوتیپ بر صفات مورفولوژیکی و عملکرد کتان روغنی

Table 3. Effect of deficit irrigation on morphoological and yield traits of oilseed flax

تیمارها Treatments	تعداد کپسول در بوته Capsule number per plant	تعداد شاخه فرعی Branch number	ارتفاع بوته Plant height	محتوای روغن Oil content	عملکرد روغن Oil yield
	-	-	cm	%	Kg.ha^{-1}
مدیریت کم‌آبیاری Deficit irrigation management					
شاهد Control	205 a	3.10 a	84.5 a	30.8 a	517 a
کم‌آبیاری ملایم Mild deficit irrigation	133 b	2.64 b	82.6 ab	29.9 a	332 b
کم‌آبیاری متوسط Moderate deficit irrigation	131 bc	2.85 ab	81.5 ab	30.2 a	308 b
کم‌آبیاری شدید Severe deficit irrigation	114 c	2.41 c	77.3 b	28.6 b	244 c
ژنوتیپ‌ها Genotypes					
هندی Indian	148 a	2.91 ab	65.9 c	29.0b c	315 b
مجاری Hungarian	137 b	3.19 a	90 a	28.7 c	320 b
اصفهان Isfahan	153 a	2.67 b	84.7 b	31.6 a	411 a
کرمان Kerman	146 ab	2.24 c	85.4 b	30.3 ab	355 b

* میانگین‌های دارای حروف مشترک برای هر صفت در هر ستون و هر فاکتور آزمایشی با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

Means followed by the same letters for each trait in each column and each experimental factor using Dunkan test at 5% probability level did not differ significantly.

در تیمار کم‌آبیاری ملایم و متوسط، اعمال تنش رطوبتی در مرحله رویشی و ساقه‌دهی از طریق کاهش تعداد شاخه فرعی سبب کاهش تعداد کپسول در بوته شد. همچنین به نظر می‌رسد در مرحله پر شدن دانه، مواد فتوسنتزی تولیدی نتوانستند پاسخ‌گوی گل‌های لقاح یافته باشند و بنابراین به علت ریزش تعدادی از کپسول‌ها، تعداد نهایی کپسول در مقایسه با آبیاری مطلوب کاهش یافت، درحالی‌که در رژیم کم‌آبیاری شدید، اعمال تنش رطوبتی شدیدتر در هر چهار مرحله رشدی منجر به کاهش بیشتر تعداد شاخه‌های فرعی و تعداد کپسول در بوته شد. به عبارتی، در شرایط تنش کم‌آبیاری شدید کاهش تعداد کپسول در بوته ناشی از کاهش توأم قدرت رشد رویشی و زایشی گیاه بود. در این خصوص

نتایج مشابهی در کتان روغنی (Naserie et al., 2021) و گلرنگ (Zandi et al., 2023) نیز گزارش شده است. بر همین اساس در گیاه کتان روغنی سطوح تنش خشکی ملایم و شدید منجر به کاهش معنی‌دار تعداد کپسول در بوته شد (Sadeghian Dehkordi and Tadayyon., 2016).

در شرایط تنش‌های محیطی دیواره کپسول در حال رشد با دانه‌های درحال‌توسعه برای جذب مواد فتوسنتزی به‌شدت رقابت می‌کند و از طریق ریزش کپسول منجر به کاهش تعداد کپسول و درنهایت کاهش عملکرد دانه می‌شود (Sierts et al., 1987). همبستگی مثبت و معنی‌دار بین تعداد کپسول در بوته با تعداد شاخه فرعی در بوته (r=۰/۴۷**) بر اهمیت تعداد شاخه‌های فرعی در تعیین تعداد کپسول در بوته دلالت دارد. به عبارتی شاخه‌های فرعی مکان‌های بالقوه تشکیل کپسول بیشتر در بوته هستند (جدول ۴).

جدول ۴. ضرایب همبستگی بین صفات مورفولوژیکی و عملکرد ژنوتیپ‌های کتان روغنی در شرایط کم‌آبیاری

Table 4. Correlation coefficient between morphoological traits and yield of oilseed flax genotypes under deficit irrigation

	صفات Traits	1	2	3	4	5	6
1	عملکرد دانه Grain yield	1					
2	تعداد کپسول در بوته Capsule number per plant	0.96**	1				
3	تعداد دانه در کپسول Grain number per capsul	0.87*	0.82**	1			
4	تعداد دانه در بوته Grain number per plant	0.96**	0.84**	0.90**	1		
5	وزن دانه در بوته Grain weight per plant	0.98**	0.96**	0.89**	0.97**	1	
6	وزن هزار دانه 1000 grain weight	0.26ns	0.95**	0.06ns	0.17ns	0.27ns	1
7	تعداد شاخه فرعی Branch number	0.38*	0.47**	0.54**	0.46**	0.41**	-0.14ns
8	ارتفاع بوته Plant height	0.30ns	0.17ns	0.20ns	0.28ns	0.32*	0.53**
9	عملکرد زیست‌توده Biological yield	0.52s*	0.38**	0.52**	0.51*	0.50**	0.04ns
10	شاخص برداشت Harvest index	0.96**	0.96**	0.81**	0.92**	0.95**	0.29*
11	محتوای روغن Oil content	0.43**	0.38ns	0.38*	0.38*	0.38*	0.37*
12	عملکرد روغن Oil yield	0.98**	0.94**	0.94**	0.94**	0.29**	0.30 ns

Table 4. Continued **جدول ۴. ادامه**

	صفات Traits	7	8	9	10	11	12
7	تعداد شاخه فرعی Branch number	1					
8	ارتفاع بوته Plant height	0.20 ns	1				
9	عملکرد زیست‌توده Biological yield	0.50**	0.61**	1			
10	شاخص برداشت Harvest index	0.27 ns	0.18ns	0.29ns	1		
11	محتوای روغن Oil content	-0.03ns	0.21ns	0.02ns	0.48**	1	
12	عملکرد روغن Oil yield	0.35*	0.30*	0.48**	0.96**	0.56**	11

**:معنی‌دار در سطح ۱ درصد، *: معنی‌دار در سطح ۵ درصد،ns: غیرمعنی‌دار.

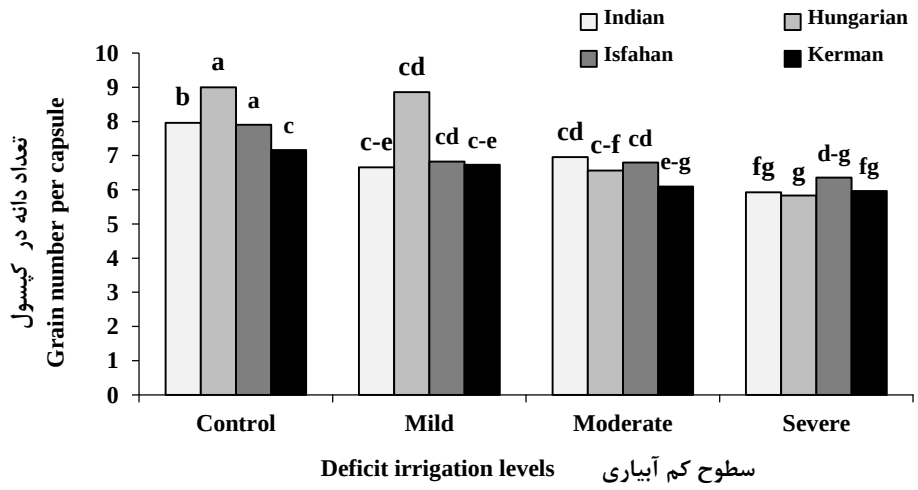
ns: not significant; *and ** significant at 5% and 1% probability levels, respectively

بدیهی است تأثیر تنش کم‌آبیاری در مرحله تشکیل کپسول (ساقه‌دهی، آغاز گلدهی) بر تعداد کپسول در بوته بیشتر خواهد بود و هرچه زمان اعمال تنش به مرحله تشکیل کپسول‌ها نزدیک‌تر باشد، اثر آن بر تعداد کپسول و درنهایت بر عملکرد دانه بیش‌تر خواهد بود. به عبارتی تأثیر کم‌آبیاری بر تعداد کپسول در بوته نشان می‌دهد که کمبود آب در مراحل اولیه رشد گیاه قادر است آغاز و توسعه اندام‌های زایشی را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد. حساسیت بالای کتان روغنی به تنش خشکی در مرحله کپسول‌دهی تا رسیدگی دانه در مطالعات قبلی نیز گزارش شده است (Shojaeian Kish et al., 2021).

نکته قابل‌توجه در این پژوهش این بود که اجزای تعیین‌کنندهٔ عملکرد به‌طور متفاوت به تیمارهای کم‌آبیاری واکنش نشان دادند، به‌گونه‌ای که مقادیر کاهش تعداد کپسول در بوته به‌مراتب بیشتر از مقادیر کاهش تعداد دانه در کپسول و وزن هزار دانه بود (جدول ۳). به هر جهت، کاهش تعداد کپسول در بوته در شرایط کم‌آبیاری به‌ویژه در مراحل اولیه رشد گیاه در مقایسه با تعداد دانه در کپسول و وزن هزار دانه مؤید این نکته است که تعداد کپسول در بوته به‌شدت بستگی به دسترسی آب در مراحل رشد رویشی و ساقه‌دهی دارد. در این خصوص نتایج مشابهی نیز در گیاه گلرنگ گزارش شده است (Zandi et al., 2023; Movahhedy-Dehnavy et al., 2009).

تعداد دانه در کپسول

برهم‌کنش سطوح کم‌آبیاری و ژنوتیپ‌ها نشان داد که تعداد دانه در کپسول با اعمال تیمارهای کم‌آبیاری به‌ویژه کم‌آبیاری شدید به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. روند تغییرات تعداد دانه در بوته ژنوتیپ‌ها در تیمارهای کم‌آبیاری نشان داد که تعداد دانه در بوته ژنوتیپ اصفهان در مقایسه با سایر ژنوتیپ‌ها، از ثبات بیشتری به‌ویژه در کم‌آبیاری شدید برخوردار بود (جدول ۴). منطبق با نتایج عملکرد دانه، تیمار کم‌آبیاری متوسط و شدید به دلیل هم‌زمانی مراحل ساقه‌دهی و گلدهی با تنش رطوبتی و ایجاد اختلال در عمل گرده‌افشانی، سبب کاهش تعداد دانه در کپسول و در نتیجه عملکرد دانه گردیدند. اگرچه میزان کاهش در کم‌آبیاری شدید به دلیل شدت بالای تنش در مرحله ساقه‌دهی و گلدهی در مقایسه با کم‌آبیاری ملایم و متوسط بیشتر بود، بااین‌حال در کم‌آبیاری شدید میزان سهم کاهش عملکرد دانه به مقدار کمتری بستگی به کاهش تعداد دانه در کپسول (۲۵ درصد کاهش) در مقایسه با تعداد کپسول در بوته (۴۴ درصد کاهش) داشت (شکل ۲).



شکل ۲. مقایسه میانگین تعداد دانه در کپسول ژنوتیپ‌های کتان روغنی در شرایط کم‌آبیاری

Fig. 2. Mean comparison for grain number per capsul of oilseed flax genotypes under deficit irrigation

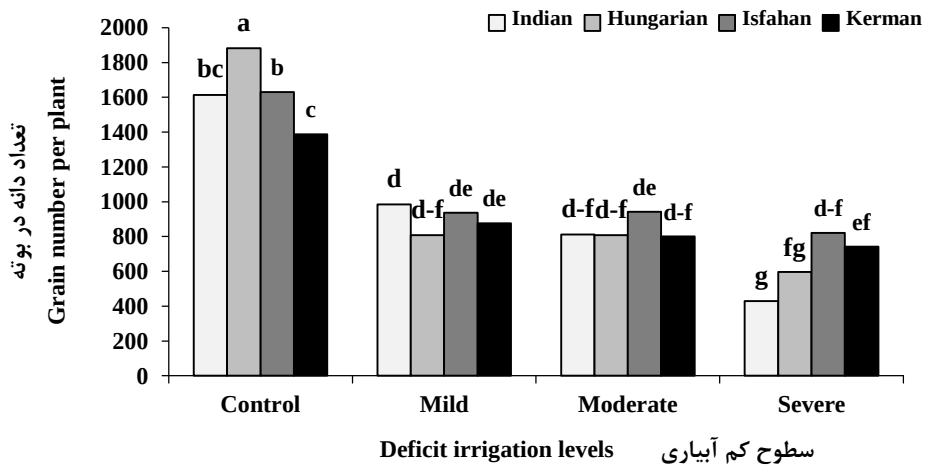
نتایج سایر مطالعات نشان می‌دهد که اعمال تنش رطوبتی در مراحل اولیه گلدهی سبب کاهش تعداد دانه در کپسول کتان روغنی (Naserie et al., 2021) و طبق گلرنگ (Zandi et al., 2023)، گردیده است. تعداد دانه در کپسول همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد دانه (r=۰/۸۷**) داشت (جدول ۴). مقادیر این ضریب همبستگی حاکی از آن

است که تعداد دانه در کپسول یکی از اجزای مهم و کلیدی تعیین‌کننده اجزای عملکرد است و مدیریت مطلوب آبیاری در مراحل رشدی بحرانی مؤثر بر این صفت جهت پایداری عملکرد بایستی موردتوجه قرار گیرد. به‌هرروی، میزان تغییرات این صفت در شرایط تنش تا حدودی کمتر از تعداد کپسول در بوته بود که می‌تواند حاکی از ثبات نسبی این جزء از عملکرد دانه در مقابل تغییرات محیطی باشد.

تعداد دانه در بوته

تعداد دانه در بوته که حاصل‌ضرب تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در کپسول است تحت تأثیر رژیم‌های کم‌آبیاری به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. مشابه با تعداد دانه در کپسول، به نظر می‌رسد که تعداد دانه در بوته ژنوتیپ اصفهان در مقایسه با سایر ژنوتیپ‌ها، از ثبات بیشتری به‌ویژه در کم-آبیاری شدید برخوردار باشد. به‌هرروی، با افزایش شدت کم‌آبیاری، شیب کاهش تعداد دانه در بوته در ژنوتیپ اصفهان و کرمان کم‌تر از ژنوتیپ مجاری و هندی بود (شکل ۳).

کاهش تعداد دانه در بوته در این آزمایش را می‌توان به کاهش تعداد شاخه‌های فرعی تحت شرایط کم‌آبیاری و در نتیجه کاهش تعداد کپسول در بوته و همچنین به میزان کمتر به کاهش تعداد دانه در کپسول نسبت داد و این کاهش‌ها به‌ویژه در ژنوتیپ هندی بیش‌تر بود. همچنین در اثر تنش رطوبتی به دلیل اختلال در گرده‌افشانی، عدم توسعه مادگی، تشدید پدیده عقیمی و سقط‌جنین، تعداد دانه در بوته کاهش می‌یابد (Naserie et al., 2021). اگرچه در این آزمایش، به دلیل ثبات نسبی تعداد دانه در کپسول ژنوتیپ‌های اصفهان و کرمان در شرایط تنش به نظر می‌رسد دلیل اصلی کاهش تعداد دانه در بوته در این دو ژنوتیپ، کاهش تولید کپسول و ریزش شاخه‌های فرعی و کپسول‌ها باشد. کاهش تعداد دانه در بوته‌های کتان روغنی در شرایط تنش خشکی در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است (Sadeghian Dehkordi and Tadayyon., 2016; Naserie et al., 2021). به نظر می-رسد در شرایط کم‌آبیاری متوسط و شدید، سهم کاهش تعداد کپسول در بوته در کاهش تعداد دانه در بوته به‌مراتب بیش‌تر از تعداد دانه در کپسول باشد. وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین تعداد دانه در بوته با تعداد شاخه فرعی (r=۰/۴۶**)، تعداد کپسول در بوته (r=۰/۹۵**)، تعداد دانه در کپسول (r =۰/۹۰**) و عملکرد دانه (r=۰/۹۶**) بر ارتباط بین این پارامتر با عملکرد دانه و سایر اجزای آن دلالت دارد.



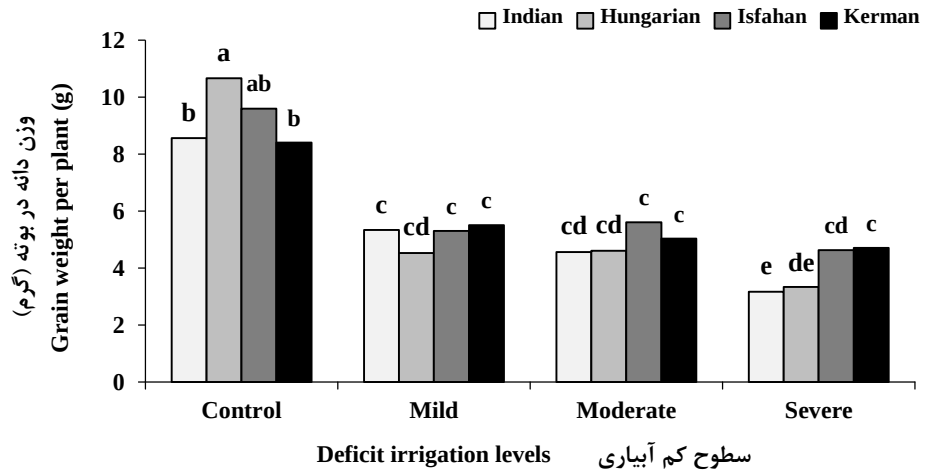
شکل ۳. مقایسه میانگین تعداد دانه در بوته ژنوتیپ‌های کتان روغنی در شرایط کم‌آبیاری

Fig. 3. Mean comparison for grain number per plant of oilseed flax genotypes under deficit irrigation

وزن دانه در بوته

برهم‌کنش سطوح کم‌آبیاری و ژنوتیپ‌ها نشان داد که در شرایط آبیاری مطلوب بالاترین میزان وزن دانه در بوته در ژنوتیپ مجاری و اصفهان (به ترتیب ۱۰/۶۶ و ۹/۶۰ گرم) و کمترین آن در ژنوتیپ‌های هندی و مجاری در شرایط کم-آبیاری شدید (به ترتیب ۳/۱۶ و ۳/۳۳ گرم) مشاهده شد. با افزایش شدت کم‌آبیاری شیب کاهش این صفت، در ژنوتیپ مجاری بیشتر از سایر ژنوتیپ‌ها بود و بین ژنوتیپ‌ها در تیمار

کم‌آبیاری شدید تفاوت معنی‌داری وجود داشت، به‌گونه‌ای که میزان کاهش وزن دانه در بوته در مقایسه با آبیاری مطلوب در ژنوتیپ‌های هندی، مجاری، اصفهان و کرمان به ترتیب ۶۳، ۶۸، ۵۱ و ۴۴ درصد بود (جدول ۴). منطبق با نتایج تعداد دانه در بوته، به نظر می‌رسد وزن دانه در بوته ژنوتیپ‌های اصفهان و کرمان در مقایسه با هندی و مجاری، از ثبات بیشتری به‌ویژه در کم‌آبیاری‌های متوسط و شدید برخوردار باشد (شکل ۴).



شکل ۴. مقایسه میانگین وزن دانه در بوته ژنوتیپ‌های کتان روغنی در شرایط کم‌آبیاری

Fig. 4. Mean comparison for grain weight per plant of oilseed flax genotypes under deficit irrigation

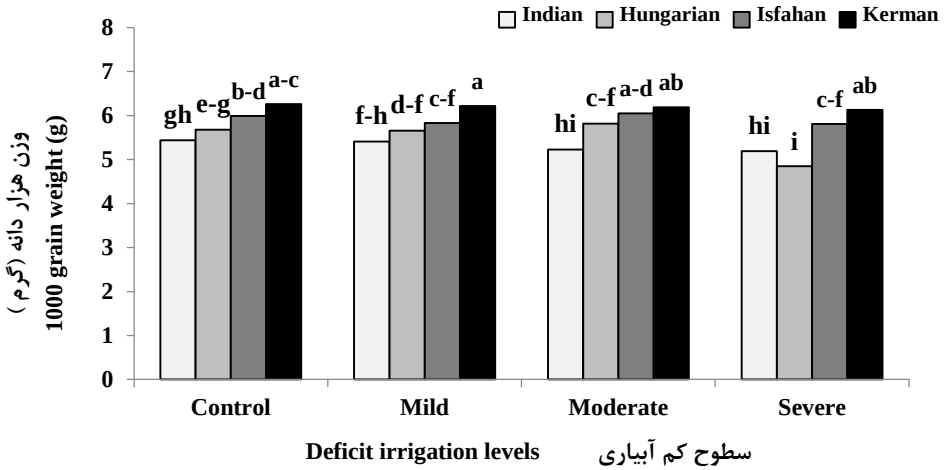
کاهش شدید وزن دانه در بوته در این آزمایش را می‌توان به کاهش قدرت رشد رویشی گیاه تحت شرایط کم‌آبیاری شدید مانند کاهش تعداد شاخه‌های فرعی و در نتیجه کاهش تعداد کپسول در بوته و به مقدار کمتر کاهش تعداد دانه در کپسول نسبت داد و این کاهش‌ها در ژنوتیپ مجاری به‌مراتب بیشتر بود. وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین وزن دانه در بوته با تعداد کپسول در بوته (r=۰/۹۶**)، و تعداد دانه در کپسول (r=۰/۸۸**) حاکی از آن است که در شرایط کم-آبیاری متوسط و شدید سهم کاهش تعداد کپسول در بوته در کاهش وزن دانه در بوته به‌مراتب بیشتر از تعداد دانه در کپسول است. وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین وزن دانه در بوته با عملکرد دانه (r=۰/۹۸**) بر ارتباط مستقیم بین این پارامتر با عملکرد دانه دلالت دارد.

وزن هزار دانه

وزن دانه یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر و تعیین‌کنندهٔ عملکرد دانه است که بستگی به سرعت و مدت‌زمان پر شدن دانه دارد. برهم‌کنش سطوح کم‌آبیاری و ژنوتیپ‌ها نشان داد که با افزایش شدت تنش رطوبتی شیب کاهش وزن هزار دانه، در ژنوتیپ مجاری بیشتر از سایر ژنوتیپ‌ها بود و بین ژنوتیپ‌ها در تیمار کم‌آبیاری شدید تفاوت معنی‌داری وجود داشت، به‌گونه‌ای که میزان کاهش در مقایسه با آبیاری مطلوب در ژنوتیپ‌های هندی، مجاری، اصفهان و کرمان به ترتیب ۵، ۱۵، ۳ و ۲ درصد بود (جدول ۴؛ شکل ۵). همان‌طور که ملاحظه می‌شود در بین اجزای عملکرد وزن هزار دانه در شرایط تنش تغییرات ناچیزی از خود نشان داد و تفاوت جزئی وزن هزار دانه ناشی از تفاوت‌های ژنتیکی و پتانسیل متفاوت ژنوتیپ‌ها است و به نظر می‌رسد بالا بودن وزن هزار دانه کتان روغنی و پایداری آن در شرایط تنش از ویژگی‌های مطلوب یک ژنوتیپ و یکی از عوامل ثبات و پایداری عملکرد است.

هنگامی‌که گیاه در مراحل مختلف رشد، تحت تأثیر تنش-های محیطی قرار می‌گیرد مواد ذخیره‌ای اندام‌های هوایی نقش مهمی در پر شدن دانه‌ها دارند. به‌عبارت‌دیگر، سرعت فتوسنتز، طول دورهٔ پر شدن دانه و میزان انتقال مواد ذخیره‌شده به دانه بر وزن دانه مؤثر است (Naserie et al., 2021). تنش رطوبتی از طریق کوتاه شدن دوره رشد، سبب کاهش دوره مؤثر پر شدن دانه و کاهش تولید و انتقال مواد فتوسنتزی به دانه و در نتیجه کاهش وزن دانه می‌شود. تنش رطوبت در مرحله گلدهی منجر به عقیمی و ریزش گل‌ها و عدم رشد دانه می‌شود و در مرحله پر شدن دانه باعث

چروکیدگی دانه و درنهایت کاهش وزن آن می‌شود (Mozzafari et al., 2000). به‌هرروی، وزن دانه صفتی ژنتیکی است، ولی بسته به زمان وقوع تنش در مراحل مختلف رشدی تحت تأثیر عوامل محیطی نیز قرار می‌گیرد. در این پژوهش، کاهش مقادیر وزن هزار دانه در شرایط کم‌آبیاری شدید را می‌توان به کاهش درصد رطوبت قابل‌دسترس (۶۰ درصد) در مرحله پر شدن دانه نسبت داد. کاهش وزن هزار دانه بوته‌های کتان روغنی در شرایط تنش خشکی قبلاً نیز گزارش شده است (Sadeghian Dehkordi and Tadayyon., 2016; Naserie et al., 2021).



شکل ۵. مقایسه میانگین وزن هزار دانه ژنوتیپ‌های کتان روغنی در شرایط کم‌آبیاری

Fig. 5. Mean comparison for 1000 grain weight of oilseed flax genotypes under deficit irrigation

تعداد شاخه فرعی

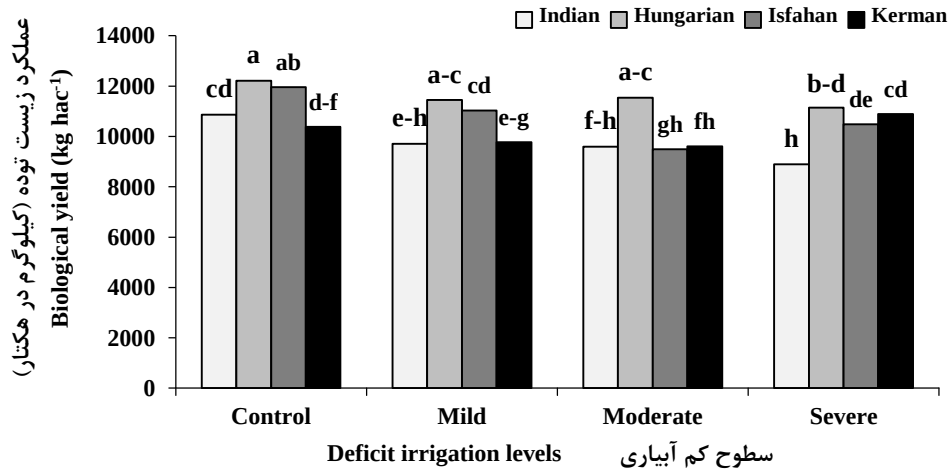
تعداد شاخه فرعی در بوته در تعیین تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول و درنهایت عملکرد دانه نقش مهمی دارد. تعداد شاخه فرعی با اعمال رژیم‌های کم‌آبیاری به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. بیش‌ترین تعداد شاخه فرعی در تیمار آبیاری مطلوب و کم‌ترین مقدار در رژیم کم‌آبیاری ملایم (۱۵ درصد کاهش) مشاهده شد. همچنین ژنوتیپ مجاری دارای بیشترین تعداد شاخه فرعی و ژنوتیپ کرمان دارای کمترین تعداد ساقه فرعی در بوته بود (جدول ۳). تعداد شاخه فرعی در بوته نقش مهمی در تعیین تعداد دانه در بوته و عملکرد دانه دارد. در این پژوهش، در تیمار کم‌آبیاری ملایم، اعمال تنش رطوبتی در مرحله رشد رویشی سبب کاهش قدرت رویشی گیاه و کاهش تعداد شاخه‌های فرعی در بوته شد. احتمال می‌رود در شرایط تنش با افزایش سرعت گذر از مرحله رویشی به زایشی، تعداد شاخه فرعی در بوته کاهش یابد. به‌هرحال در تیمارهای کم‌آبیاری متوسط و شدید، علیرغم اعمال تنش در مراحل رشد رویشی، ساقه‌دهی و آغاز گلدهی، کاهش کمتری در تعداد شاخه فرعی در بوته مشاهده شد. گزارش شده با افزایش فواصل آبیاری در شرایط کم-آبیاری، تعداد سلول‌های آغازین تشکیل‌شده جهت تولید انشعابات اولیه ساقه کاهش می‌یابد و منجر به کاهش تعداد شاخه اصلی می‌شود (Cox and Jollif et al.,1986). همبستگی مثبت و معنی‌دار بین تعداد شاخه فرعی با تعداد طبق در بوته (r=۰/۶۸**) نیز مؤید این نکته بود. به نظر می-رسد علت کاهش تعداد کپسول در ژنوتیپ مجاری علیرغم تعداد بیشتر شاخه فرعی به دلیل رشد رویشی بیش‌ازحد بوته-های این ژنوتیپ قبل از گلدهی باشد به‌گونه‌ای که اعمال کم‌آبی در زمان گلدهی سبب عدم تعادل بین تقاضای اندام-های موجود و تولید مواد فتوسنتزی می‌شود. در این شرایط گیاه برای حفظ تعادل، بخشی از رشد خود را از طریق کاهش تعداد کپسول از دست می‌دهد (Zandi et al., 2023; Naserie et al., 2021). گفته می‌شود در شرایط تنش خشکی افزایش تولید اتیلن منجر به ریزش شاخه‌های اضافی می‌شود (Naserie et al., 2021).

ارتفاع بوته

ارتفاع بوته یکی از صفات تأثیرگذار بر عملکرد گیاه در برداشت مکانیزه است. آبیاری مطلوب دارای بیش‌ترین و کم‌آبیاری شدید با کاهش ۹ درصدی دارای کمترین ارتفاع بوته بود (جدول ۳). ژنوتیپ مجاری و هندی به ترتیب دارای بیشترین و کمترین ارتفاع بوته بود (جدول ۳). ارتفاع بوته کتان روغنی همانند بسیاری از دانه‌های روغنی قبل از مرحله گلدهی تعیین می‌گردد و کاهش ارتفاع ناشی از اعمال تنش خشکی در مرحله رویشی شدیدتر است و هرچه زمان تنش به انتهای فصل رشد نزدیک‌تر باشد تأثیر آن بر ارتفاع بوته کمتر است. تنش خشکی در مرحله رشد رویشی از طریق کاهش فشار آماس، باعث کاهش رشد و توسعه سلول می‌شود و کاهش رشد و نمو، سبب محدودیت اندازه اندام‌ها و توقف رشد طولی ساقه می‌شود (Naserie et al., 2021). در تیمار آبیاری مطلوب، گیاه در شرایط مطلوب رطوبتی قرار داشته و شرایط لازم برای افزایش تعداد و اندازه سلول فراهم می‌گردد. در مقابل، وقوع تنش در کم‌آبیاری شدید با کاهش ۶۰ و ۵۰ درصدی رطوبت قابل‌دسترس به ترتیب در مراحل رشد رویشی و ساقه‌دهی گیاه از طریق کاهش توسعه سلولی و فتوسنتز و تولید ماده خشک سبب کاهش طویل شدن ساقه گردید. از سوی دیگر کاهش ارتفاع گیاه با افزایش شدت تنش رطوبتی به‌ویژه در مرحله ساقه‌دهی به اختلال در فتوسنتز به‌واسطه محدودیت دسترسی گیاه به آب و دی‌اکسید کربن و کاهش تولید و تخصیص مواد فتوسنتزی به بخش‌های در حال رشد گیاه نسبت داده شده است (Manvelian et al., 2021). همبستگی مثبت و معنی‌دار ارتفاع بوته و عملکرد زیست‌توده (r=۰/۶۱**) بر نقش اساسی ارتفاع بوته در افزایش عملکرد زیست‌توده گیاه اشاره دارد (جدول ۴).

عملکرد زیست‌توده

برهم‌کنش سطوح کم‌آبیاری و ژنوتیپ‌ها نشان داد که اعمال رژیم‌های کم‌آبیاری به‌طور متفاوتی منجر به کاهش معنی‌دار عملکرد زیست‌توده در هر چهار ژنوتیپ شد (شکل ۶).



شکل ۶. مقایسه میانگین عملکرد زیست‌توده ژنوتیپ‌های کتان روغنی در شرایط کم‌آبیاری

Fig. 6. Mean comparison for biological yield of oilseed flax genotypes under deficit irrigation

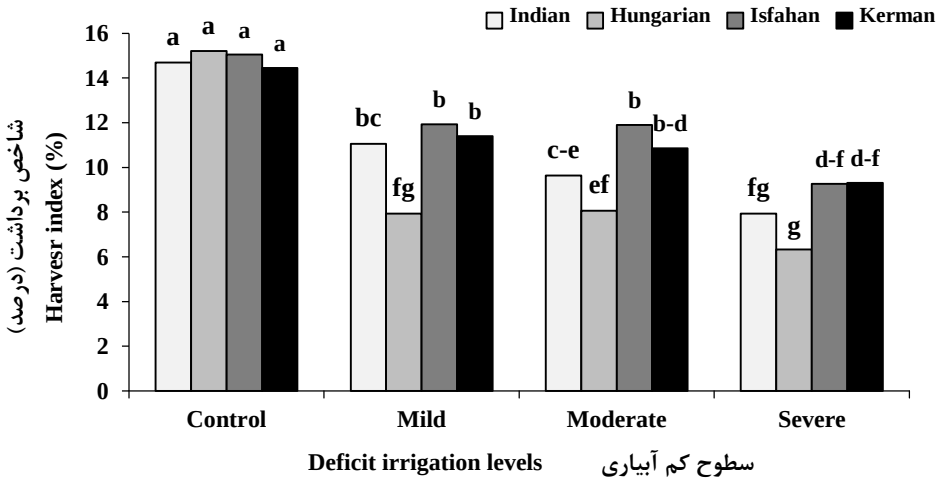
بیش‌تر بودن عملکرد زیست‌توده در ژنوتیپ مجاری را می‌توان به بیشتر بودن ارتفاع بوته و تعداد شاخه‌های فرعی آن نسبت داد (جدول ۳). همبستگی مثبت و معنی‌دار عملکرد زیست‌توده با ارتفاع بوته (r=۰/۶۱**) و تعداد ساقه فرعی (r=۰/۵۰**) مؤید این نکته بود. عملکرد زیست‌توده بیشتر ژنوتیپ‌ها در شرایط کم‌آبیاری متوسط و شدید به‌طور قابل‌توجهی کمتر از رژیم آبیاری مطلوب و کم‌آبیاری ملایم بود به‌گونه‌ای که میزان کاهش عملکرد زیست‌توده در مقایسه با آبیاری مطلوب در ژنوتیپ‌های هندی، مجاری، اصفهان و کرمان در کم‌آبیاری متوسط به ترتیب ۱۱، ۵، ۲۱ و ۱۴ درصد و در کم‌آبیاری شدید به ترتیب ۱۸، ۹، ۹ و ۵ درصد بود (جدول ۴). احتمال می‌رود که تنش رطوبتی در مراحل رویشی، ساقه‌دهی و گلدهی از طریق کاهش سطح و دوام برگ و کاهش استفاده از نور خورشید جهت فتوسنتز و همچنین اختلال در گلدهی و تولید کپسول و کاهش احتمال

تبدیل گل به بذر باعث کاهش عملکرد دانه و زیست‌توده شده است.

کاهش عملکرد زیست‌توده در شرایط تنش رطوبتی در پژوهش‌های متعددی (Naserie et al., 2021; Zandi et al., 2023) گزارش شده است. عملکرد زیست‌توده همبستگی بالایی با تعداد کپسول در بوته (r=۰/۵۲**) و تعداد دانه در کپسول (r=۰/۵۲**) داشت، لذا به نظر می‌رسد این ارتباط نقش مهمی در تولید عملکرد زیست‌توده و عملکرد دانه داشته باشد و باتوجه‌به اهمیت تنش رطوبتی در زراعت گیاهان دانه روغنی در بسیاری از مناطق کشور، انتخاب ارقام مناسب کاشت در منطقه بر اساس عملکرد زیست‌توده و گزینش ارقام دارای عملکرد زیست‌توده و شاخص برداشت بالا از اهمیت خاصی برخوردار است (Zandi et al., 2023). در این پژوهش برتری عملکرد زیست‌توده با نتایج عملکرد دانه نیز انطباق داشت (جدول ۳).

شاخص برداشت

برهم‌کنش سطوح کم‌آبیاری و ژنوتیپ‌ها نشان داد که شاخص برداشت با اعمال کم‌آبیاری به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت و میزان کاهش در بین ژنوتیپ‌ها در سطوح مختلف کم‌آبیاری تفاوت معنی‌داری وجود داشت (شکل ۷). تفاوت بین ژنوتیپ‌های کتان روغنی ازنظر شاخص برداشت قبلاً نیز گزارش شده است (Naserie et al., 2021). با افزایش شدت تنش شاخص برداشت روند کاهشی داشت، به‌طوری‌که بیشترین مقدار (۱۵/۲ درصد) در ژنوتیپ مجاری در شرایط آبیاری مطلوب و کمترین مقدار (۶/۳ درصد) در شرایط کم‌آبیاری شدید گزارش شد (جدول ۴). مقادیر شاخص برداشت وابستگی زیادی به تغییرات عملکرد دانه دارد. دلیل تغییرات جزئی این صفت در ژنوتیپ اصفهان را می‌توان به بالا بودن عملکرد زیست‌توده آن در مواجه با تنش رطوبتی و کارایی بهتر انتقال مواد فتوسنتزی از مبدأ به مخزن و حفظ عملکرد دانه آن نسبت داد (جدول ۴).



شکل ۷. مقایسه میانگین شاخص برداشت ژنوتیپ‌های کتان روغنی در شرایط کم‌آبیاری

Fig. 7. Mean comparison for harvest index of oilseed flax genotypes under deficit irrigation

شاخص برداشت بیانگر چگونگی تسهیم مواد پرورده بین بخش‌های رویشی و زایشی گیاه است. تغییرات این شاخص وابستگی زیادی به عملکرد دانه و عوامل مؤثر بر اجزای آن ازجمله تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در کپسول دارد. به‌هرحال گزارش‌هایی مبنی بر کاهش (Sadeghian Dehkordi and Tadayyon, 2016) یا عدم‌تغییر (Naserie et al., 2021). همبستگی بالای شاخص برداشت با عملکرد دانه (r=۰/۹۶**)، تعداد کپسول در بوته (r=۰/۹۶**)، تعداد دانه در کپسول (r=۰/۸۱**)، و وزن دانه در بوته (r=۰/۹۵**) نشان می‌دهد که با حفظ یا افزایش عملکرد دانه و اجزای آن در شرایط تنش، امکان افزایش شاخص برداشت با حفظ عملکرد زیست‌توده وجود دارد.

محتوای روغن

محتوای روغن تنها در رژیم کم‌آبیاری شدید به‌طور معنی‌داری در مقایسه با آبیاری مطلوب (۷ درصد) کاهش یافت. ژنوتیپ مجاری دارای بیشترین (۳۱/۶ درصد) و ژنوتیپ هندی دارای کمترین (۲۸/۷ درصد) میزان محتوای روغن بود (جدول ۳).

در رابطه با تأثیر تنش رطوبتی بر محتوای روغن دانه‌های روغنی گزارش‌های متناقضی وجود دارد. در همین راستا گزارش‌های مبنی بر افزایش (Singh et al., 2016)، کاهش (Sadeghian Dehkordi and Tadayyon, 2021) یا عدم‌تغییر (Salek Mearaji and Tavakoli, 2020) محتوای روغن در شرایط خشکی وجود دارد. از سوی دیگر، گزارش شده که اعمال یک، دو و سه مرتبه آبیاری تکمیلی در شرایط دیم منجر به افزایش محتوای روغن کتان به ترتیب به میزان ۲۹، ۳۱ و ۳۲ درصد شد (Rahimi et al., 2020). برخی پژوهشگران به کاهش کربوهیدرات‌های قابل‌دسترس در شرایط تنش خشکی جهت ساخت روغن اشاره کرده‌اند (Awasthi et al., 2014). از سوی دیگر در زمان وقوع تنش، فرآیندهای آنزیمی و تشکیل پروتئین، منجر به مصرف مواد فتوسنتزی می‌شوند و تولید ترکیبات فعال زیستی گیاه را در برابر عوارض ناشی از تنش محافظت می‌کند و از این طریق بر عملکرد محصول و محتوای روغن تأثیر می‌گذارد (Sanchez-Martín et al., 2018). احتمال می‌رود تنش رطوبتی از طریق اختلال در پر شدن دانه و تأثیر بر وزن دانه و همچنین افزایش نسبت پوسته به مغز باعث کاهش درصد روغن شود.

عملکرد روغن

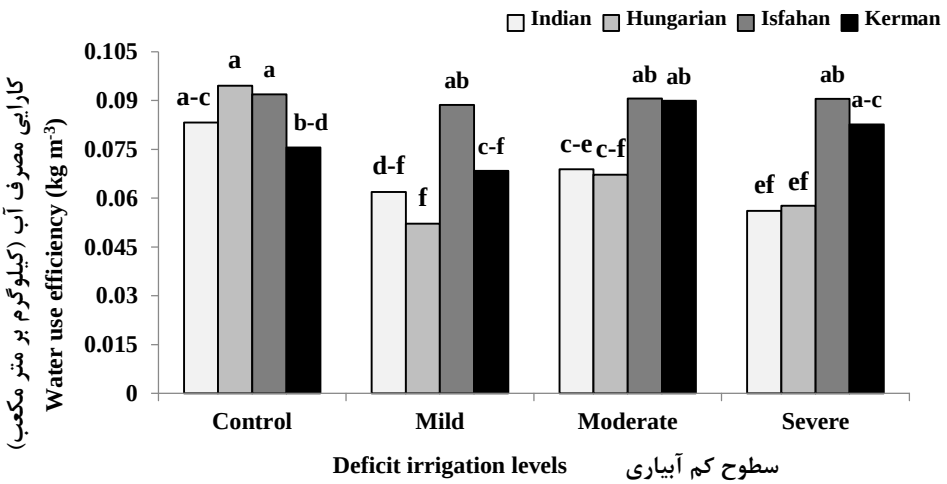
آبیاری مطلوب بیشترین و کم‌آبیاری شدید کمترین عملکرد روغن را به خود اختصاص داد. همچنین ژنوتیپ اصفهان و هندی به ترتیب دارای بیشترین و کمترین میزان عملکرد روغن بود (جدول ۳). رژیم‌های کم‌آبیاری ملایم، متوسط و شدید منجر به کاهش معنی‌دار عملکرد روغن در هر چهار ژنوتیپ به ترتیب به میزان ۳۵، ۴۰ و ۵۲ درصد نسبت به آبیاری مطلوب شد (جدول ۳). کاهش عملکرد روغن در شرایط تنش کم‌آبی در پژوهش‌های متعددی گزارش گردیده است (Zandi et al., 2023; Manvelian et al., 2021). عملکرد روغن تحت تأثیر تغییرات عملکرد دانه و محتوای روغن به رژیم‌های آبیاری قرار می‌گیرد. در این پژوهش میزان تأثیرپذیری عملکرد روغن از درصد روغن ناچیز بود و مقادیر کاهش عملکرد روغن در رژیم‌های کم‌آبیاری منطبق با مقادیر کاهش عملکرد دانه و ناشی از تغییر در اجزای اصلی تعیین‌کنندهٔ عملکرد دانه بود. به عبارتی، دلیل اصلی کاهش عملکرد روغن به کاهش عملکرد دانه ناشی از کم‌آبیاری در مراحل رشد سریع ساقه و گلدهی از طریق تأثیر بر تعداد شاخه فرعی، تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در بوته علی‌رغم تغییر در محتوای روغن نسبت داده می‌شود. همبستگی بالای بین عملکرد روغن با تعداد شاخه فرعی (r=۰/۳۵*)، تعداد دانه در بوته (r=۰/۹۴**) و تعداد کپسول در بوته (r=۰/۹۴**)، نیز مؤید این نکته بود. در همین راستا، در پژوهش‌های پیشین کمترین و بیشترین مقدار کاهش عملکرد روغن به ترتیب در زمان وقوع تنش خشکی در مرحله رشد رویشی و زایشی گلرنگ گزارش شده است (Singh et al., 2016). تنش خشکی طول دوره پر شدن دانه را کاهش داده و فرصت بیشتری برای تجمع پروتئین در دانه‌ها فراهم می‌کند، در نتیجه درصد روغن گیاه کاهش می‌یابد (Ferasat et al., 2012). در این پژوهش، عملکرد بالای روغن ژنوتیپ اصفهان را می‌توان عملکرد بالای دانه این ژنوتیپ نسبت داد (جدول ۳). به نظر می‌رسد رتبه‌بندی ژنوتیپ‌های دانه روغنی ازنظر عملکرد روغن عمدتاً به‌وسیله عملکرد دانه تعیین شود.

کارایی مصرف آب بر اساس عملکرد روغن

بیشترین کارایی مصرف آب برای عملکرد روغن مربوط به آبیاری مطلوب و ژنوتیپ مجاری و اصفهان و کمترین مقدار مربوط به کم‌آبیاری ملایم و ژنوتیپ مجاری بود. کارایی مصرف آب بر اساس عملکرد روغن ژنوتیپ‌ها با اعمال تیمارهای کم‌آبیاری روند متفاوتی نشان داد به‌گونه‌ای که در ژنوتیپ هندی و مجاری کاهش یافت درحالی‌که در ژنوتیپ اصفهان روند ثابت و در ژنوتیپ کرمان روند افزایشی نشان داد. اگرچه مقادیر آن در کم‌آبیاری متوسط به‌مراتب بیشتر از کم‌آبیاری ملایم و شدید بود (شکل ۸). به‌طورکلی، روند تغییرات کارایی مصرف آب ژنوتیپ‌ها برای عملکرد روغن در تیمارهای کم‌آبیاری نشان داد که کارایی مصرف آب ژنوتیپ اصفهان و کرمان در مقایسه با سایر ژنوتیپ‌ها، از ثبات بیشتری برخوردار بود (شکل ۸).

بر اساس نتایج مقایسه میانگین عملکرد روغن دانه، در شرایط کم‌آبیاری ژنوتیپ اصفهان و کرمان دارای عملکرد روغن بیشتری در مقایسه با ژنوتیپ هندی و مجاری بودند و منطبق با این نتایج، میانگین کارایی مصرف آب به ازای روغن تولیدی این دو ژنوتیپ هم به‌مراتب بالاتر از دو ژنوتیپ دیگر بود؛ زیرا اعمال تیمارهای کم‌آبیاری ملایم، متوسط و شدید باعث کاهش ۲۰، ۳۵ و ۴۰ درصدی مقدار آب مصرفی در مقایسه با آبیاری مطلوب شد و با توجه به تخصیص مقادیر مشابه آب مصرفی بین ژنوتیپ‌ها در هر تیمار کم‌آبیاری، مقادیر راندمان مصرف آب متناسب با تغییرات عملکرد روغن

در هر ژنوتیپ تغییر یافت. بر اساس این یافته‌ها، به نظر می‌رسد اعمال تیمار کم‌آبیاری متوسط با حفظ ۶۰ درصدی رطوبت قابل‌دسترس در کل دورهٔ رشدی کتان و علیرغم کاهش ۴۲ و ۳۱ درصدی عملکرد روغن در ژنوتیپ‌های اصفهان و کرمان، باعث کاهش ۳۵ درصدی مقدار آب مصرفی در طول دوره رشد این ژنوتیپ‌ها شد. بر همین اساس ژنوتیپ‌های اصفهان و کرمان در سطح کم‌آبیاری متوسط، دارای پایداری بیشتر عملکرد روغن و کارایی مصرف آب بودند.



شکل ۸. مقایسه میانگین کارایی مصرف آب ژنوتیپ‌های کتان روغنی در شرایط کم‌آبیاری

Fig. 8. Mean comparison for water use efficiency of oilseed flax genotypes under deficit irrigation

نتیجه‌گیری نهایی

در این پژوهش اعمال رژیم‌های کم‌آبیاری بسته به مرحله رشدی گیاه و شدت تنش به‌طور متفاوتی باعث کاهش عملکرد و اجزای آن و عملکرد روغن شد. ژنوتیپ‌های اصفهان و کرمان به دلیل عملکرد دانه بالاتر دارای مقادیر عملکرد روغن بالاتری بودند به‌گونه‌ای که در سطوح ملایم و متوسط کم‌آبیاری، پایداری عملکرد ژنوتیپ اصفهان و در سطوح شدید کم‌آبیاری پایداری عملکرد ژنوتیپ اصفهان و کرمان بیشتر از سایر ژنوتیپ‌ها بود که این امر ممکن است با سازگاری بهتر این ژنوتیپ‌ها با شرایط تنش کم‌آبیاری در مراحل رشد سریع ساقه و پر شدن دانه مرتبط باشد. به نظر می‌رسد این دو ژنوتیپ از طیف سازگاری نسبتاً خوبی در تحمل به شرایط کم‌آبیاری برخوردار باشند. هرچند کاهش عملکرد این ارقام در شرایط کم‌آبیاری نیز قابل‌ملاحظه بود. اعمال تیمار کم‌آبیاری متوسط با حفظ ۶۰ درصدی رطوبت قابل‌دسترس در کل دورهٔ رشدی کتان و علیرغم کاهش ۴۳ و ۳۷ درصدی عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های اصفهان و کرمان، باعث کاهش ۳۵ درصدی مقدار آب مصرفی شد. لذا این سطح کم‌آبیاری و ژنوتیپ‌های اصفهان و کرمان در شرایط کمبود آب در مناطق نیمه‌خشک، با پایداری بیشتر عملکرد دانه و روغن در شرایط کم‌آبیاری توصیه می‌گردد. همچنین با توجه به بیشترین تأثیر نامطلوب کم‌آبیاری شدید بر عملکرد دانه در مرحله گلدهی پیشنهاد می‌شود در شرایط محدودیت آب، آبیاری مرحله گلدهی در اولویت قرار گیرد در شرایط محدودیت آب، اعمال کم‌آبیاری در مرحله رسیدگی دانه انجام گردد.

سپاسگزاری

نویسندگان از حمایت‌های مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در راستای اجرای این پژوهش به شماره پژوهانه SCU.AA1400.96 سپاسگزاری می‌نمایند.

منابع

Awasthi, R., Kaushal, N., Vadez, V., Turner, N.C., Berger, J., Siddique, K.H.M., Nayyar, H., 2014. Individual and combined effects of transient drought and heat stress on carbon assimilation and seed filling in chickpea. Functional Plant Biology. 41(11), 1148-1167. https://doi.org/10.1071/FP13340

Bauer, P.J., Stone, K.C., Foulk, J.A., Dodd, R.B., 2015. Irrigation and cultivar effect on flax fiber and seed yield in the Southeast USA. Industrial Crops and Products. 67, 7-10. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.12.053

Cox, W.J., Jollif, G.D., 1986. Growth and yield of sunflower and soybean under soil water deficits. Agronomy Journal. 78, 266-230. https://doi.org/10.2134/agronj1986.00021962007800020002x

Cui, H.Y., Hu, F.L., Fang, Z.S., Wang, H.L., Niu, J.Y., Xu, W.C., 2015. Effects of irrigations on dry matter accumulation, distribution, grain yield and water use efficiency in oil flax. Agricultural Research in the Arid Areas. 33, 34-40. https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-7601.2015.05.07

FAO. 2022. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL

Fereres, E., Soriano, M.A., 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. Journal of Experimental Botany. 58, 147-159. https://doi.org/10.1093/jxb/erl165

Ferasat, M., Sajedi, N.A., Mirzakhani, M., 2012. Effects of drought stress on yield and yield components in safflower genotypes (*Carthamus tinctorius)*. Iranian Journal of Field Crops Research. 10, 346-353. [In Persian with English summary]. https://doi.org/10.22067/gsc.v10i2.16221

Fernández, J.E., Perez-Martin, A., Torres-Ruiz, J.M., Cuevas, M.V. Rodriguez-Dominguez, C.M., Elsayed-Farag, S., Morales-Sillero, A., García, J.M., Hernandez-Santana, V., Diaz-Espejo, A., 2013. A regulated deficit irrigation strategy for hedgerow olive orchards with high plant density. Plant and Soils. 372, 279–295 https://doi.org/10.1007/s11104-013-1704-2

Gao, Y.H., 2020. Oilseed flax (*Linum usitatissimum* L.), an emerging functional cash crop of China. Oil Crop Science. 5, 23. https://10.1016/j.ocsci.2020.04.002

Istanbulluoglu, A., Konukcu, F., Kocaman, I., Sener, M., 2015. The effects of deficit irrigation regimes on yield and growth components of linseed (*Linum Usitatissimum* L.). Journal of Agricultural Science and Engineering. 1, 08-113. https://www.aiscience.org/journal/jase

Ma, L.S., Li, Y.J., Wu, P.T., Zhao, X.N., Gao, X.D., Chen, X.L., 2020. Recovery growth and water use of intercropped maize following wheat harvest in wheat/maize relay strip intercropping. Field Crops Research. 256. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107924

Manvelian, J., Weisany, W., Tahir, N.A.R., Jabbari, H., Diyanat, M., 2021. Physiological and biochemical response of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars to zinc application under drought stress. Industrial Crops and Products. 172, 15. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.05.011406905

Ministry of Agriculture Jihad. 2022. Annual harvested area, production, and yield in 2021-2022. [In Persian].

Moatshe, O.G., Emongor, V.E., Balole, T.V., Tshwenyane, S.O., 2020. Safflower genotypeby plant density on yield and phenological characteristics. African Crop Science Journal. 28, 145-163. https://doi.org/10.4314/acsj.v28i1.11S

Movahhedy-Dehnavy, M., Modares-Sanavy, S.A.M., Mokhtassi-Bidgoli, A.M., 2009. Foliar application of zinc and manganese improves seed yield and quality of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) grown under water deficit stress. Industrial Crops and Products. 30, 82-9. [In Persian with English summary]. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.02.004

Mozzafari, F., Ghorbanli, S., Babai, M., Farzami, A., 2000. The effect of water stress on the seed oil of *Nigella sativa* L. Journal of Essential Oil Research. 12, 36-38. https://doi.org/10.1080/10412905.2000.9712036

Naserie, B., Saeidi, M., Khorami vafa, M., Sharifi, R., Khoshkhooi, S., 2021. The effect of different methods of seed pretreatment on agronomic characteristics of flaxseed under post flowering drought stress in Kermanshah region. Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 31, 227-247. [In Persian with English summary]. https://doi.org/10.22034/saps.2021.39483.2479

Rahimi, M.M., Nour Mohamadi, G., Aeinehband, A., Afshar, I., Moafpourian,G., 2009. Effects of sowing time and different nitrogen levels on quantitative and qualitative charecteristics of oil Flax (*Linum usitatissimum* L.). Seed and Plant Production Journal, 25, 79-91. [In Persian with English summary]. https://doi.org/10.22092/sppj.2017.110365

Sadeghian Dehkordi, S.A., Tadayyon, A., 2016. Response of linseed (*Linum usitatissimum* L.)

to bio-fertilizer, nitrogen and phosphorus chemical fertilizer under drought stress conditions. Journal of Plant Echophysiology. 8, 72-89. [In Persian with English summary]. https://doi.org/20.1001.1.20085958.1395.8.27.6.7

Salek Mearaji, H., Tavakoli, A., 2020. Evaluation of yield and some traits of two safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars under different irrigation regimes. Environmental Stresses in Crop Sciences. 13, 763-775. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22077/escs.2020.2254.1575

Shojaeian Kish, F., Yadavi, A., Movahhedi Dehnavi, M., Salehi, A., Hamidian, M., 2021. Improvement of physiological characteristics and nutrient uptake of linseed (*Linum usitatissimum*) with biofertilizers application under irrigation withholding at different growth stages. Plant Process and Function. 10, 265-282. [In Persian with English summary]. http://jispp.iut.ac.ir/article-1-1449-fa.html

Sanchez-Martín, J., Canales, F., Tweed, J., Lee, M., Rubiales, D., Gomez-Cadenas, ´A., Prats, E., 2018. Fatty acid profile changes during gradual soil water depletion in oats suggests a role for jasmonates in coping with drought. Frontiers in Plant Science. 9, 77-100. https://doi.org/10.3389/fpls.01077

Singh, S., Angadi, S.V., Grover, K., Begna, S., Auld, D., 2016. Drought response and yield formation of spring safflower under different water regimes in the semiarid Southern High Plains. Agricultural Water Management. 163, 354-362. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.010

Sierts, H.P., Geisler, G., Leonard, J., Diepenbrock, W., 1987. Stability of yield components from winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). Journal of Agronomy and Crop Science. 158, 107-113. https://doi.org/10.1111/j.1439-037x.1987.tb01153

Wei, B., Hou, K., Zhang, H., Wang, X., Wu, W., 2020. Integrating transcriptomics and metabolomics to studies key metabolism, pathways and candidate genes associated with drought-tolerance in *Carthamus tinctorius* L. Under drought stress. Industrial Crops and Products. 151, 112465. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112465

Zandi, R., Rahnama, A., Meskarbashi, M., 2023. Effect of deficit irrigation regimes on photosynthetic, morpho-physiological and yield traits of safflower (*Carthamus tinctorious* L.) in Ahvaz climate condition. Crop Physiology Journal. 15, 19-40. [In Persian with English Summary]. https://cpj.ahvaz.iau.ir/article-1-1614-en.html

Zhao, B.Q., Gao, Y.H., Yan, B., Cui, Z.J., Wang, H.D., Cao, Z., 2020. Varied previous crops on improving oilseed flax productivity in semiarid Loess Plateau in China. Oil Crop Science. 5, 187-193. https://10.1016/j.ocsci.2020.12.002