University of Birjand

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

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

https://doi.org/10.22077/ESCS.2024.7014.2254

Original article

Morphological traits and grain yield of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) in response to waterlogging stress at different growth stages under field conditions

F. Askari Foroshani[1], A. Rahnama[2*], M. Meskarbashee[3], I. Kamranfar[4]

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. *Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran*
4. *Assistant Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran*

Received 3 December 2023; Accepted 22 January 2024

نسخه پیش از انتشار

Extended abstract

Introduction

Waterlogging stress is a common agricultural problem in many regions across the globe. Crop productivity is threatened primarily by waterlogging in rainfed areas. Plant growth and crop production is constrained severely by waterlogging in many regions around the world. Waterlogging significantly reduces the grain yield. Moreover, oil yield reduces mainly due to a significant decrese in grain yield under waterlogging stress condition. Waterlogging at different growth stages has different effects on crop growth and yield. In most crop plants, it was shown the different adverse effects of waterlogging on yield determination at the vegetative and reproductive stages. However, the effects of waterlogging stress at different growth stages on safflower under field conditions is not yet known.

Materials and methods

In the current study, in order to study of the influence of waterlogging stress at different growth stages on the morphological traits and grain yield of safflower under field conditions, a field experiment was carried out during 2020-2021 growing season in a split plot arrangement in randomized complete blocks design using three replicates per treatment. The study site was located at the research farm of Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. The plants were grown in the filed to ensure the environmental conditions found in flooded soils. Three waterlogging treatments were applied to plants as main plots: Well-drained controls watered weekly, mild stress (waterlogged for 24 h) and severe stress (waterlogged for 48 h). Waterlogging treatments implemented at the vegetative and reproductive stages as sub plots. After the waterlogging period, waterlogging treatments were watered with sufficient water (80% field capacity) until the end of the experiment.

Results and discussion

The waterlogging treatments at vegetative and reproductive stages significantly decreased biological yield, grain yield, number of sub-branches, branche number, capitulum number per plant, grain number

* 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).

per capitulum, grain number per plant, 1000-grain weight and oil yield. There was no significant difference between growth stages in terms of all traits except for capitulum number per plant and the number of sub-branches. The mild and severe waterlogging stress at both growth stages was led to a significant reduction in grain yield by 34 and 39%, respectively, compared to control. The waterlogging treatments at different growth stages differently reduced the grain yield. The maximum decrease was found when waterlogging occurred for 48 h at the reproductive stage. The reduction in the number of sub-branches was associated with capitulum number per plant and grain number per plant. Under waterlogged conditions, the reduction in capitulum number per plant was mainly due to the decrease in the number of sub-branches.

Conclusion
These findings indicate that safflower is more sensitive to waterlogging at the reproductive stage. The effect of waterlogging stress on grain and oil yield varied between two growth stages and waterlogging durations. Under waterlogging condition, grain yield loss occurred mainly due to a decrease in the number of sub-branches, branch number, capitulum number per plant, grain number per head and grain number per plant, which led to a significant decrease in grain yield and ultimately reducing the oil yield.

Keywords: Grain yield, Growth stage, Harvest index, Oil content

نسخه پیش از انتشار

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences

https://doi.org/10.22077/ESCS.2024.7014.2254

مقاله پژوهشی

واکنش صفات مورفولوژیک و عملکرد دانه گلرنگ زراعی (*Carthamus tinctorius* L.) به تنش غرقاب در مراحل مختلف رشدی در شرایط مزرعه

فاطمه عسکری‌فروشانی[1]، افراسیاب راهنما[2*]، موسی مسکرباشی[3]، ایمان کامرانفر[4]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد اگروتکنولوژی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۲. دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۳. استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۴. استادیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
شاخص برداشت
عملکرد دانه
عملکرد روغن
مرحله رشدی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۰۹/۱۲

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۱۱/۰۲

چکیده

تنش غرقابی به‌عنوان یکی از تنش‌های غیرزیستی محدودکنندهٔ رشد و عملکرد گیاهان زراعی در بسیاری از مناطق جهان است. به‌منظور بررسی واکنش‌های مورفولوژیک و زراعی گلرنگ در شرایط تنش غرقابی، آزمایشی به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در دانشگاه شهید چمران اهواز اجرا شد. سه سطح تنش غرقابی: شاهد، تنش غرقابی ملایم (به مدت ۲۴ ساعت) و شدید (به مدت ۴۸ ساعت) به‌عنوان عامل اصلی و تنش در مراحل رشد رویشی و زایشی به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شد. صفات مورفولوژیک و عملکرد دانه و روغن گلرنگ بسته به مدت‌زمان تنش و مرحله رشدی گیاه به‌طور متفاوتی به تنش غرقاب واکنش نشان دادند. تنش غرقاب ملایم و شدید منجر به کاهش معنی‌دار عملکرد دانه به ترتیب به میزان ۳۴ و ۳۹ درصد و عملکرد روغن به میزان ۱۶ و ۳۲ درصد در مقایسه با شاهد شد. همچنین اعمال تنش در مرحله رشد رویشی و زایشی به‌طور متفاوت عملکرد دانه و روغن را کاهش داد، به‌گونه‌ای که بیش‌ترین کاهش به ترتیب به میزان ۵۷ و ۳۵ درصد مربوط به تیمار تنش شدید در مرحله رشد زایشی بود. کاهش شدید تعداد شاخه‌های فرعی فرعی در این مرحله (۵۵ درصد)، سبب کاهش تعداد طبق در بوته و درنتیجه تعداد دانه در بوته و درنهایت کاهش عملکرد دانه شد. به عبارتی، بیشترین تأثیر تنش در مرحله زایشی از طریق کاهش تعداد شاخه‌های فرعی فرعی و به دنبال آن کاهش تعداد طبق و دانه در بوته بود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که گلرنگ در مرحله رشد زایشی به تنش غرقاب حساس‌تر است و افزایش مدت‌زمان تنش باعث افزایش حساسیت و کاهش بیشتر عملکرد دانه این گیاه می‌شود.

مقدمه

گیاهان به دلیل پیامدهای شدید ناشی از تغییرات اقلیمی جهان با چالش‌های متعددی روبرو هستند. تنش غرقابی یکی از اصلی‌ترین تنش‌های غیرزیستی است که رشد محصول را به‌شدت محدود نموده و بر عملکرد محصول در سراسر جهان تأثیر می‌گذارد (Bailey-Serres and Voesenek., 2008). برآورد شده که تنش غرقابی در مناطق وسیعی از جهان رخ می‌دهد و در حدود ۱۰ درصد سطح جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد و منجر به کاهش قابل‌توجه عملکرد می‌شود (Shabala et al., 2011). اثرات تنش غرقابی پیچیده است. مقادیر مازاد آب در ناحیهٔ ریشه می‌تواند برای گیاه مضر یا حتی کشنده باشد به‌گونه‌ای که باعث کمبود اکسیژن، کاهش تنفس و جذب عناصر غذایی توسط ریشه و کاهش سرعت فتوسنتز و اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن می‌شود (Arbona et al., 2008). تنش غرقابی با تأثیر بر تبادلات گازی، انتشار

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

دی‌اکسید کربن به برگ و همچنین تعرق را کاهش می‌دهد و به دنبال آن جذب غیرفعال آب را کاهش می‌دهد. همچنین محتوای کلروفیل برگ را کاهش و درنتیجه تجمع ماده خشک را کاهش می‌دهد (Ashraf, 2012). جذب ناکافی عناصر غذایی توسط ریشه منجر به پیری زودرس برگ و کاهش ظرفیت فتوسنتزی گیاه می‌شود (Zhang et al., 2015). در همین حال، اختلال در انتقال مواد فتوسنتزی، سبب کوتاه شدن دوره پر شدن دانه و درنهایت کاهش عملکرد دانه می‌شود (Grassiniet al., 2007). علاوه بر این، گیاه به‌منظور حفظ بقای خود مسیر مصرف انرژی برای رشد را تغییر می‌دهد و این امر منجر به کاهش رشد، ارتفاع بوته و عملکرد دانه گیاه می‌شود (Tian et al., 2021). گزارش‌های متعددی مبنی بر تأثیر تنش غرقاب بر کاهش عملکرد دانه محصولات زراعی مانند ماش (Fazeli et al., 2023)، کلزا (Gutierrez Boem et al., 1996; Wollmer et al., 2018)، پنبه (Wang et al., 2017)، جو (De San Celedonio et al., 2014) و گندم (Ploschuk et al., 2020; Wu et al., 2015) وجود دارد.

از سوی دیگر، کاهش عملکرد دانه در شرایط غرقاب را می‌توان به کاهش اجزای عملکرد نسبت داد. برای مثال، عملکرد دانه در گیاه کلزا و نخود، از طریق کاهش تعداد غلاف در بوته و تعداد دانه در غلاف و در گیاه جو از طریق کاهش تعداد سنبله در بوته، تعداد دانه در سنبله و وزن دانه و در گیاه گندم از طریق کاهش تعداد سنبله در بوته و وزن هزار دانه گزارش شده است (Ploschuk et al., 2020). در مطالعه دیگر کاهش عملکرد گندم و جو در شرایط غرقابی عمدتاً به دلیل کاهش تعداد دانه در سنبله گزارش شده است (De San Celedonio et al., 2014). در گیاه ماش تحت تنش غرقابی بر اهمیت تعداد غلاف در بوته نسبت به تعداد دانه در غلاف در تعیین عملکرد دانه تأکید شده است (Fazeli et al., 2023). در گیاه کلزا تحت تنش غرقابی نیز کاهش عملکرد دانه به کاهش تعداد شاخه فرعی، تعداد غلاف در بوته و تعداد دانه در غلاف نسبت داده شده است (Gutierrez Boem et al., 1996). واکنش گیاهان به شرایط غرقابی بسته به گونهٔ گیاهی، عمق و شدت و مدت‌زمان غرقابی و مرحلهٔ رشدی گیاه متفاوت است (Wu et al., 2015; Shao et al., 2013). مراحل رشدی گیاه در زمان مواجهه با تنش غرقاب می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی رشد و عملکرد گیاهان مختلف زراعی مانند گندم و جو (De San Celedonio et al., 2014)، کلزا (Gutierrez Boem et al., 1996)، نخود (Belford et al., 1985) و ماش (Fazeli et al., 2023) را تحت تأثیر قرار دهد. به‌هرروی، اثرات نامطلوب تنش غرقابی بسته به مرحله رشدی و گونه گیاهی متفاوت است. برای مثال، در بررسی تأثیر تنش غرقاب در گندم و جو مشخص شد که عملکرد دانه در زمان وقوع تنش در مراحل زایشی در مقایسه با مراحل رویشی، کاهش بیشتری نشان می‌دهد که به‌احتمال‌زیاد به اهمیت عرضه مواد فتوسنتزی در این مرحله نسبت داده می‌شود (De San Celedonio et al., 2014). درحالی‌که در کلزا گزارش شده تنش غرقاب در مرحلهٔ رویشی ساقه‌دهی سرعت رشد و عملکرد دانه را در مقایسه با مرحلهٔ زایشی ظهور گل به مقدار بیشتری کاهش داد (Wollmer et al., 2018). به نظر می‌رسد افزایش دما و کمبود فشار بخار هوا در مراحل زایشی (اواسط تا اواخر بهار) در مقایسه با مراحل رویشی (اواخر زمستان تا اوایل بهار)، می‌تواند اثرات غرقابی را تشدید کند.

گلرنگ گیاهی است که در حال حاضر برای تولید روغن کشت می‌شود (Kumar et al., 2015). بر اساس آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی سطح زیر کشت گلرنگ در ایران حدود ۳۸۴۲ هکتار و تولید آن ۵۲۳۳ تن بوده است. بر اساس همین آمار، سطح زیر کشت گلرنگ در استان خوزستان ۶۰ هکتار تولید آن ۹۸ تن بوده است (Ministry of Agriculture Jihad, 2022) و با توجه به اهمیت توسعه کشت دانه‌های روغنی پاییزه در این استان، سطح زیر کشت این گیاه در آینده نزدیک رو به گسترش خواهد بود. این گیاه شرایط ماندابی و غرقابی را تحمل نمی‌کند و می‌تواند محصول را مستعد ابتلا به بیماری ازجمله پوسیدگی ریشه کند و به نظر می‌رسد اثر غرقابی بر محصول گلرنگ در شرایط گرم شدن هوا در انتهای فصل رشد تشدید یابد (GRDC, 2017). اطلاعات اندکی در مورد واکنش گیاه گلرنگ به مدت‌زمان اعمال تنش غرقاب و تأثیر آن در مراحل مختلف رشدی گیاه وجود دارد. گزارش شده حساسیت این گیاه به شرایط ماندابی در مراحل زایشی بیشتر است به‌گونه‌ای که شرایط غرقابی ناشی از بارندگی‌های طولانی در طول مرحلهٔ گرده‌افشانی در تشکیل بذر اختلال ایجاد کرده و عملکرد دانه می‌تواند آسیب ببیند (Shahrokhnia and Sepaskhah., 2012).

استان خوزستان به لحاظ نوع خاک، دارای بافت سنگین با نفوذپذیری پایین است. در چنین شرایطی عدم زهکشی و پوشش گیاهی مناسب در کنار تغییر اقلیم و الگوی بارندگی‌ها

نسخه پیش از انتشار

سبب بروز شرایط غرقابی موقت و خسارات جبران‌ناپذیر بر محصولات کشاورزی شده است. علاوه بر این، به دلیل موقعیت جلگه‌ای خوزستان احتمال وقوع تنش غرقابی در فصول با بارندگی سنگین بسیار زیاد است. لذا بررسی وضعیت ارقام زراعی متحمل به شرایط غرقابی در مراحل مختلف رشدی و طول دوره تنش و بازیابی رشد گیاه می‌تواند به کاهش میزان خسارت وارده بر محصولات کشاورزی کمک کند. بیشتر مطالعات پیشین روی اثرات غرقابی بر واکنش‌های فیزیولوژیک گیاهان متمرکزشده‌اند. بااین‌حال، مطالعات محدودی روی اثرات تنش غرقابی در مراحل مختلف رشد بر ویژگی‌های مورفولوژیک و عملکرد دانه گلرنگ انجام شده است؛ بنابراین با توجه به اهمیت گلرنگ به‌عنوان یکی از گیاهان دانه روغنی در کشور و استان خوزستان و نیز با توجه به شرایط آب و هوایی خوزستان و نیز احتمال وقوع شرایط ماندابی و غرقاب در کشت پاییزه، این پژوهش با هدف بررسی اثرات تنش غرقابی به مدت ۱ و ۲ روز در مراحل رویشی (ابتدای ساقه‌دهی) و مرحله زایشی (۵۰ درصد تکمه‌دهی) بر ویژگی‌های مورفولوژیک و عملکردی گلرنگ انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعهٔ تحقیقاتی گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. سه سطح تنش غرقابی شامل: شاهد (بدون غرقابی)، تنش ملایم (غرقاب به مدت ۲۴ ساعت) و شدید (غرقاب به مدت ۴۸ ساعت) در کرت‌های اصلی و تنش در مراحل مختلف رشد رویشی (ساقه‌دهی) و زایشی (آغاز گلدهی) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. سطوح انتخابی تنش بر اساس نتایج آزمایش مقدماتی سال قبل تعیین شد. برای آماده‌سازی زمین، ابتدا آبیاری زمین انجام شد و پس از گاورو شدن، توسط گاوآهن برگردان‌دار زمین شخم زده شد. به‌منظور خرد کردن کلوخه‌ها و یکنواخت کردن سطح زمین دیسک و ماله زده شد. سپس اقدام به نمونه‌گیری از خاک مزرعه از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری گردید.

با توجه به نتایج آزمون خاک و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن (جدول ۱)، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار فسفر از منبع سوپر فسفات معمولی قبل از کاشت و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار پتاس قبل از کاشت، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص از منبع کود اوره به‌صورت کود پایه در زمان کاشت و کود سرک در مرحلهٔ ظهور طبق به خاک اضافه شد. از رقم گلرنگ گلدشت در این پژوهش استفاده شد. بذور روی پشته‌هایی به طول ۳ متر و فاصله بین ردیف ۶۰ سانتی‌متر و با فاصله روی ردیف ۱۵ سانتی‌متر در دو طرف پشته کشت شدند. آبیاری تیمارهای آزمایشی با استفاده از سیفون انجام شد. به‌منظور حفظ شرایط غرقابی ارتفاع پشته‌های حاشیه کرت‌ها احیا و تقویت شدند. سطح آب در طول مدت‌زمان اعمال تنش به‌طور دائم پایش و تا سطح پشته‌ها حفظ شد. به‌منظور اطمینان از عدم نشت رطوبت بین تیمارها، فاصله بین کرت‌های اصلی و همچنین کرت‌های فرعی دو متر در نظر گرفته شد. از یک نهر اصلی برای رساندن آب به کرت‌های اصلی استفاده شد در انتهای کرت‌های اصلی یک نهر عمیق به‌عنوان زهکش تعبیه شد، به‌گونه‌ای که پس از مدت‌زمان اعمال تنش از تداوم شرایط غرقاب برای مدت طولانی‌تر جلوگیری گردد. کرت‌ها به‌طور مداوم موردبررسی قرارگرفته و در صورت مشاهده کاهش سطح آب، به آن‌ها آب اضافه شد. تنش غرقابی به مدت ۱ و ۲ روز در دو مرحله رویشی (ابتدای ساقه‌دهی) و مرحله زایشی (۵۰ درصد تکمه‌دهی) همانند شرایط طبیعی در مزرعه اعمال شد.

جدول ۱. نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1. The results of physical and chemical analysis of soil

بافت خاک	هدایت الکتریکی	اسیدیته	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	مواد آلی
Soil texture	**EC**	**pH**	**N**	**P**	**K**	**O.M**
	$dS.m^{-1}$		%	----------$mg.kg^{-1}$----------		%
Sandy loam	2.8	7.8	0. 04	13	151	0.53

پس از پایان فصل رشد و رسیدگی کامل دانه‌ها، به‌منظور اندازه‌گیری عملکرد دانه و عملکرد زیست‌توده نمونه‌برداری از مساحت یک مترمربع برای هر واحد آزمایشی با رعایت اثر حاشیه انجام شد. همچنین از تعداد ۱۰ بوته در هر واحد آزمایشی برای اندازه‌گیری اجزای عملکرد نظیر تعداد طبق در بوته، تعداد دانه در طبق، تعداد دانه در بوته، وزن هزار دانه و

ارتفاع بوته تا طبق مرکزی، ارتفاع اولین شاخه فرعی از سطح، تعداد شاخه فرعی و تعداد شاخه فرعی فرعی استفاده شد. جهت تعیین محتوای روغن دانه، پس از برداشت، محتوای روغن دانه با کمک حلال اتر و با روش سوکسله (FOSS, Model SOCCET 2050) (Banat et al., 2013) تعیین گردید. عملکرد روغن در واحد سطح نیز از حاصل‌ضرب عملکرد دانه و محتوای روغن محاسبه شد.

تجزیه‌وتحلیل داده‌های صفات موردمطالعه با نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ انجام شد و برای مقایسه میانگین از آزمون دانکن در سطح احتمال معنی‌دار پنج درصد استفاده شد.

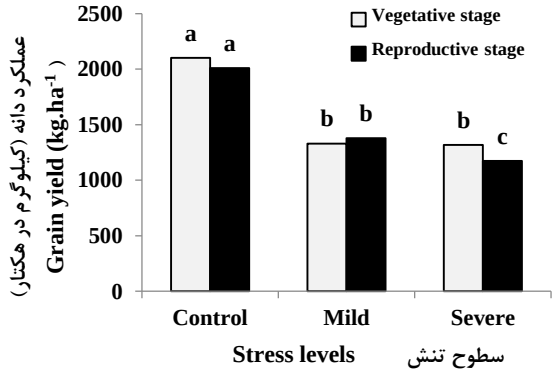
نتایج و بحث

بین سطوح تنش ازنظر کلیه صفات موردبررسی به‌جز ارتفاع اولین شاخه از سطح زمین در سطح یک و پنج درصد تفاوت معنی‌داری وجود داشت، درحالی‌که بین مراحل رشدی تنها ازنظر تعداد طبق در بوته و تعداد شاخه فرعی فرعی در سطح یک درصد تفاوت معنی‌داری وجود داشت. برهم‌کنش عملکرد دانه، تعداد طبق در بوته و تعداد شاخه فرعی فرعی در سطح پنج درصد معنی‌دار بود ولی برای سایر صفات معنی‌دار نبود (جدول ۲).

عملکرد دانه

آبیاری مطلوب بیشترین و تنش غرقابی شدید کمترین عملکرد دانه را به خود اختصاص داد. به عبارتی، تنش غرقاب ملایم و شدید در مقایسه با شاهد منجر به کاهش معنی‌دار عملکرد دانه به ترتیب به میزان ۳۴ و ۳۹ درصد شد (جدول ۳). همچنین اعمال تنش در مرحله رشد رویشی و زایشی به‌طور متفاوتی عملکرد دانه را کاهش داد، به‌گونه‌ای که بیش‌ترین کاهش به میزان ۵۷ درصد مربوط به تیمار تنش شدید در مرحله رشد زایشی بود (شکل ۱). کاهش قابل‌توجه تعداد شاخه‌های فرعی فرعی در این مرحله (۵۵ درصد)، سبب کاهش تعداد طبق در بوته و درنتیجه تعداد دانه در بوته و درنهایت کاهش عملکرد دانه شد.

میزان کاهش عملکرد بسته به عوامل مختلف مانند مدت‌زمان تنش، مراحل رشدی و عمق تنش غرقابی می‌تواند متفاوت باشد (Wu et al., 2015; Shao et al., 2013). مشخص‌شده عملکرد دانه در مرحله گل‌دهی در مقایسه با مراحل رشدی قبلی، به مقدار بیشتری کاهش می‌یابد و این کاهش به اهمیت عرضه مواد فتوسنتزی در آن مرحله و عوامل تأثیرگذار دیگر مانند تاریخ کاشت و دمای بالای هوا در انتهای فصل رشد نسبت داده شده است (De San Celedonio et al., 2014).



شکل ۱. تأثیر تنش غرقابی در مرحله رشد رویشی و زایشی بر عملکرد دانه گلرنگ

Fig. 1. Effect of waterlogging stress at vegetative and reproductive stages on grain yield of safflower

گزارش شده است که تنش غرقابی در مرحله طویل شدن ساقه کلزا منجر به کاهش ۷۵ درصدی عملکرد دانه می‌شود، درحالی‌که این کاهش در شرایط مواجهه با تنش در مرحله ابتدای گل‌دهی به ۸۵ درصد می‌رسد (Wollmer et al., 2018). علاوه بر آن از سایر عوامل تأثیرگذار بر کاهش عملکرد دانه می‌توان به تغییرات فیزیولوژیک و مورفولوژیک مانند اجزای عملکرد، وزن زیست‌توده و تخصیص مواد به دانه و وزن هزار دانه اشاره کرد (Ploschuk et al., 2018). بر همین اساس مشخص‌شده تغییر مقادیر عملکرد دانه در کلزا دارای ارتباط بالایی با تغییرات تجمع و توزیع مجدد مواد فتوسنتزی به دانه است (Wang et al., 2016). در این پژوهش نیز تنش غرقاب از طریق تأثیر بر اجزای عملکرد ازجمله تعداد طبق در بوته، تعداد دانه در طبق، تعداد دانه در بوته، وزن هزار دانه و همچنین کاهش تعداد شاخه‌های فرعی و فرعی فرعی سبب کاهش عملکرد دانه گردید. تأثیر تنش در مرحله زایشی به‌ویژه از طریق تأثیر بر تعداد شاخه فرعی فرعی و به دنبال آن کاهش تعداد طبق در بوته تا حدودی بیشتر از مرحله رویشی بود (شکل ۱).

نسخه پیش از انتشار

جدول ۲. میانگین مربعات صفات زراعی و عملکردی گلرنگ در شرایط تنش غرقابی در مرحله رشد رویشی و زایشی

Table 2. Mean square for agronomic and yield traits of safflower under waterlogging stress condition at vegetative and reproductive

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	عملکرد دانه Grain yield	تعداد طبق در بوته Capitulum number per plant	تعداد دانه در طبق Grain number per capitulum	تعداد دانه در بوته Grain number per plant	وزن هزار دانه 1000 grain weight	تعداد شاخه فرعی Branch number	تعداد شاخه فرعی فرعی Number of sub-branches
بلوک Block	2	17502*	7.01^{ns}	10.92^{ns}	1094^{ns}	29^{ns}	0.046^{ns}	7.54*
تنش غرقابی Waterlogging stress (WS)	2	1143005**	193.01**	579.9**	35240**	147*	3.77**	80.1**
خطای a Error a	4	6498	1.35	27.82	1820	12.55	0.11	1.42
مرحله رشدی Growth stage (GS)	1	22656^{ns}	28.22**	1.680^{ns}	2688^{ns}	5.33^{ns}	0.226^{ns}	26.18**
GS × WS	2	35986*	8.61*	26.98^{ns}	2881^{ns}	3.11^{ns}	0.767^{ns}	12.6*
خطای b Error b	6	13109	3.5	42.92	1309	24	0.30	1.84
ضریب تغییرات C.V (%)		*7.44*	*8.58*	*20.21*	*10.39*	*9.49*	*6.96*	*9.66*

جدول ۲. ادامه

Table 2. Continued

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع اولین شاخه از سطح زمین Height of the first branch	ارتفاع بوته Plant height	عملکرد زیست‌توده Biological yield	شاخص برداشت Harvest index	محتوای روغن Oil content	عملکرد روغن Oil yield
بلوک Block	2	6.45^{ns}	3.77^{ns}	45666^{ns}	2.2^{ns}	24.1^{ns}	8382*
تنش غرقابی Waterlogging stress (WS)	2	17.28^{ns}	18.7*	11216985**	42.9**	41.9*	34548**
خطای a Error a	4	5.76	3.42	54166	1.57	13.5	1563
مرحله رشدی Growth stage (GS)	1	9.67^{ns}	4.95^{ns}	6192630^{ns}	10.88^{ns}	0.20^{ns}	499^{ns}
GS × WS	2	4^{ns}	1.21^{ns}	4775709^{ns}	8.82^{ns}	0.095^{ns}	1450^{ns}
خطای b Error b	6	3.5	11.56	4053034	25.63	5.99	1472
ضریب تغییرات C.V (%)		*3.62*	*3.66*	*25.0*	*25.83*	*9.39*	*9.75*

**:معنی‌دار در سطح ۱٪، *: معنی‌دار در سطح ۵٪، ns: غیر معنی‌دار.

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

کاهش عملکرد دانه در شرایط تنش غرقاب در گیاهان کلزا و نخود، از طریق کاهش تعداد دانه در غلاف و کاهش تعداد غلاف در بوته، در گیاه جو از طریق کاهش وزن دانه، تعداد سنبله و تعداد دانه در سنبله و در گیاه گندم، از طریق کاهش تعداد سنبله در بوته و وزن هزار دانه گزارش شده است (Ploschuk et al., 2020). به هر جهت، کاهش معنی‌دار عملکرد دانه در شرایط غرقابی بیانگر ظرفیت بازیابی و تحمل پایین گیاه در برابر سطوح تنش اعمال شده بود.

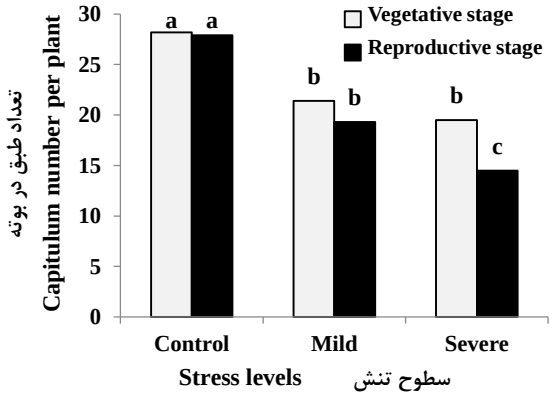
تعداد طبق در بوته

تنش غرقابی سبب کاهش معنی‌دار تعداد طبق در بوته شد به‌گونه‌ای که آبیاری مطلوب دارای بیشترین و تنش غرقابی شدید دارای کمترین تعداد طبق در بوته بود. به عبارتی تنش

نسخه پیش از انتشار

غرقابی ملایم و شدید سبب کاهش به ترتیب ۲۷ و ۳۹ درصدی تعداد طبق در مقایسه با آبیاری مطلوب شد. همچنین تأثیر تنش غرقابی در مرحله زایشی بر تعداد طبق در بوته به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از مرحله رویشی بود (جدول ۳). به‌گونه‌ای که بیشترین درصد کاهش در مرحله رشد زایشی و زایشی در شرایط تنش ملایم ۲۴ و ۳۱ درصد و در شرایط تنش شدید ۳۱ و ۴۸ درصد در مقایسه با شرایط غیر تنش بود (شکل ۲).

زمان وقوع تنش به‌عنوان یکی از اجزای مؤثر بر اجزای عملکرد گیاه محسوب می‌گردد. در پژوهش حاضر تنش غرقابی از طریق کاهش تعداد شاخه‌های فرعی و فرعی فرعی سبب کاهش تعداد طبق در بوته گردید. به نظر می‌رسد میزان این تأثیر بر تعداد شاخه‌های فرعی فرعی که هم‌زمان با رشد زایشی است بیشتر بوده است. تعداد طبق در بوته دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد دانه (r=۰/۹۰**)، تعداد شاخه فرعی (r=۰/۸۰**) و تعداد شاخه فرعی فرعی (r=۰/۹۴**) بود که به اهمیت نقش افزایش تعداد شاخه فرعی و فرعی فرعی در تولید طبق و به دنبال آن تولید عملکرد نهایی دلالت دارد. در گیاه گندم گزارش شده که تنش در مرحله رشدی رویشی سبب کاهش تعداد پنجه و درنتیجه کاهش تعداد سنبله در بوته شد، درحالی‌که در مرحله گرده‌افشانی و پر شدن دانه به ترتیب سبب کاهش تعداد گل و به دنبال آن تعداد دانه در سنبله و وزن دانه شد (Marti et al., 2015). در گیاه ماش تحت تنش غرقابی نیز بر اهمیت تعداد غلاف در بوته نسبت به تعداد دانه در غلاف در تعیین عملکرد دانه تأکید شده است (Fazeli et al., 2023).



شکل ۲. تأثیر تنش غرقابی در مرحله رشد رویشی و زایشی بر تعداد طبق در بوته گلرنگ

Fig. 2. Effect of waterlogging stress at vegetative and reproductive stages on capitulum number per plant of safflower

جدول ۳. تأثیر تنش غرقابی در مراحل رشد رویشی و زایشی بر برخی صفات زراعی و عملکردی گلرنگ

Table 3. Effect of waterlogging stress at vegetative and reproductive stage on some agronomic and yield traits of safflower

تیمارها Treatments	عملکرد دانه Grain yield (kg.ha^{-1})	تعداد طبق در بوته Capitulum number per plant	تعداد دانه در طبق Grain number per capitulum	تعداد دانه در بوته Grain number per plant	وزن هزار دانه 1000 grain weight (g)	تعداد شاخهٔ فرعی Branch number	تعداد شاخه فرعی فرعی Number of sub-branches
تنش غرقابی Waterlogging stress							
شاهد Control	2056 a	28.1 a	42.5 a	428 a	57.2 a	8.8 a	18.1 a
تنش غرقابی (۲۴ ساعت) Waterlogging stress (24h)	1353 b	20.3 b	31.3 b	341 b	50.3 b	7.5 b	13 b
تنش غرقابی (۴۸ ساعت) Waterlogging stress (48h)	1256 b	17.0 c	22.9 b	275 b	47.6 b	7.4 b	11 c
مرحله رشدی Growth stage							
رشد رویشی Vegetative stage	1590 a	23.1 a	32.6 a	360 a	52.2 a	8.0 a	15.3 a
رشد زایشی Reproductive stage	1519 a	20.5 b	31.9 a	336 a	51.1 a	7.8 a	12.9 b

نسخه پیش از انتشار

Table 3. Continued **جدول ۳. ادامه**

Treatments تیمارها	ارتفاع اولین شاخه از زمین Height of the first branch	ارتفاع بوته Plant height	عملکرد زیست‌توده Biological yield	شاخص برداشت Harvest index	محتوای روغن Oil content	عملکرد روغن Oil yield
	cm		kg.ha^{-1}	%	%	kg.ha^{-1}
تنش غرقابی Waterlogging stress						
شاهد Control	52.9 ^{a}	94.4 ^{a}	9590 ^{a}	22.2 ^{a}	24.0 ^{b}	469 ^{a}
تنش غرقابی (۲۴ ساعت) Waterlogging stress (24 h)	49.7 ^{a}	90.9 ^{b}	7586 ^{b}	19.7 ^{b}	28.9 ^{a}	393 ^{b}
تنش غرقابی (۴۸ ساعت) Waterlogging stress (48 h)	52.2 ^{a}	92.8 ^{ab}	6977 ^{b}	16.8 ^{c}	24.8 ^{ab}	317 ^{c}
مرحله رشدی Growth stage						
رشد رویشی Vegetative stage	50.9 ^{a}	93.2 ^{a}	8638 ^{a}	18.8 ^{a}	25.9 ^{a}	412 ^{a}
رشد زایشی Reproductive stage	52.3 ^{a}	92.1 ^{a}	7465 ^{a}	20.3 ^{a}	26.1^{a}	396 ^{a}

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

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.

نسخه پیش از انتشار

تعداد دانه در طبق

تنش غرقابی ملایم و شدید سبب کاهش ۲۶ و ۴۶ درصدی تعداد دانه در طبق در مقایسه با شرایط عدم تنش شد (جدول ۳). تعداد دانه در طبق به‌عنوان یکی از اجزای مهم عملکرد دانه گلرنگ با افزایش مدت‌زمان تنش در هر دو مرحله رویشی و زایشی کاهش یافت، به‌گونه‌ای که آبیاری مطلوب بیشترین (۴۳/۸ و ۴۱/۲ دانه به ترتیب در مرحله رویشی و زایشی) و تنش غرقابی شدید کمترین (۲۰/۸ و ۲۵/۱ دانه به ترتیب در مرحله رویشی و زایشی) تعداد را به خود اختصاص داد. هرچند بین مرحله رویشی و زایشی تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای مشاهده نشد (جدول ۳).

به نظر می‌رسد تنش غرقابی به‌ویژه در مرحله زایشی همانند سایر تنش‌های غیر زیستی با تأثیر بر اندام‌های گل و کاهش گلچه‌ها سبب اختلال در باروری و کاهش تعداد دانه در طبق شد. در این مرحله حساس، گل‌های جدید به‌طور فعال رشد می‌کنند و درحالی‌که گلچه‌های اولیه که رشد را آغاز کرده‌اند در ادامه از بین می‌روند و به‌طور قابل‌توجهی باعث کاهش تعداد دانه در طبق می‌شود. نتایج مشابهی بر روی سایر گیاهان زراعی مشاهده شده است (Marti et al., 2015). تأثیر تنش غرقابی بر جذب مواد مغذی و محدودیت تولید کربوهیدرات‌ها، به همان اندازه مرگ گلچه‌های اولیه، سبب محدودیت دسترسی به منابع برای اندام‌زایشی می‌گردد (Ferrante et al., 2013). تعداد دانه در طبق همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد دانه (r=۰/۷۴**) نشان داد (جدول ۴) که این همبستگی بیانگر اهمیت تعداد دانه در طبق بر میزان عملکرد دانه است. به نظر می‌رسد یکی از اجزای مهم و کلیدی تعیین‌کننده اجزای عملکرد، تعداد دانه در طبق باشد و تغییرات این صفت بایستی در شرایط تنش مدنظر قرار گیرد (Sheikh Mamo et al., 2023).

تعداد دانه در بوته

در واکنش به تنش غرقاب، تعداد دانه در بوته به‌طور معنی‌داری کاهش یافت، به‌گونه‌ای که بیشترین تعداد دانه در بوته در آبیاری مطلوب مشاهده شد و با افزایش شدت تنش تعداد دانه در بوته در تنش ملایم و شدید به ترتیب به میزان ۲۰ و ۳۶ درصد در مقایسه با آبیاری مطلوب کاهش یافت (جدول ۳). بین مراحل رشدی اختلاف معنی‌داری به لحاظ تعداد دانه در بوته وجود نداشت (جدول ۲ و ۳).

تعداد دانه در بوته به دنبال کاهش تعداد طبق در بوته و تعداد دانه در طبق کاهش یافت. ضرایب همبستگی مثبت و معنی‌دار بین تعداد دانه در بوته، با تعداد دانه در طبق

(r=۰/۷۴**) و تعداد طبق در بوته (r=۰/۸۴**) بر اهمیت این دو جزء عملکرد بر تعداد دانه در بوته تأکید دارد (جدول ۴). اگرچه به نظر می‌رسد نقش تعداد طبق در بوته به دلیل تأثیر نامطلوب تنش غرقابی بر تعداد شاخه‌های فرعی و فرعی فرعی و درنتیجه کاهش تعداد طبق در بوته به‌مراتب بیشتر از تعداد دانه در طبق باشد (جدول ۲). منطبق با نتایج این پژوهش در گیاه کلزای تحت تنش غرقابی سه‌روزه نیز کاهش تعداد دانه در بوته به کاهش تعداد شاخه فرعی، تعداد غلاف در بوته و تعداد دانه در غلاف نسبت داده شده است (Gutierrez Boem et al., 1996). درواقع کاهش تعداد دانه در بوته مرتبط با کاهش شدید تعداد طبق در بوته بود. بر همین اساس در تعیین عملکرد دانه گلرنگ در شرایط تنش، تعداد طبق در بوته به‌مراتب از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و همبستگی مثبت و معنی‌دار با عملکرد دانه (r=۰/۹۱**) نیز بیانگر اهمیت تعداد طبق در بوته بر تعداد دانه در بوته و درنتیجه عملکرد دانه است.

وزن هزار دانه

وزن هزار دانه تحت تأثیر هر دو شرایط غرقابی ملایم و شدید در مقایسه با آبیاری مطلوب به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (به ترتیب ۱۲ و ۱۷ درصد)، به‌گونه‌ای که بیشترین وزن هزار دانه در تیمار آبیاری مطلوب و کمترین مقدار آن در شرایط تنش غرقابی شدید مشاهده شد که با تیمار تنش ملایم تفاوت معنی‌داری نداشت. بین مرحله رویشی و زایشی نیز تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای مشاهده نشد (جدول ۳).

گزارش‌هایی مبنی بر تأثیر تنش بر وزن دانه تحت تأثیر مرحله رشدی وجود دارد، همچنان که در گیاه کلزای تحت تنش غرقاب مشخص‌شده که اثر تنش بر تخصیص مواد فتوسنتزی به دانه، تنها در زمان پر شدن دانه بود، درحالی‌که وزن دانه در مراحل رویشی تحت تأثیر غرقابی قرار نگرفت (Gutierrez-Boem et al., 1996). اگرچه عدم‌تغییر وزن

جدول ۴. ضرایب همبستگی بین صفات زراعی و عملکردی گلرنگ در شرایط غرقابی

Table 4. Correlation coefficient between agronomic and yield traits of sufflower under waterlogging stress

	صفات Traits	1	2	3	4	5	6
1	عملکرد دانه Grain yield	1					
2	تعداد طبق در بوته Capitulum number per plant	0.907**	1				
3	تعداد دانه در طبق Grain number per capitulum	0.566*	0.760**	1			
4	تعداد دانه در بوته Grain number per plant	0.873**	0.839**	0.737**	1		
5	وزن هزار دانه 1000 grain weight	0.702**	0.705**	0.650**	0.776**	1	
6	تعداد شاخه فرعی Branch number	0.838**	0.805**	0.760**	0.699**	0.589*	1
7	تعداد شاخه فرعی فرعی Number of sub-branches	0.845**	0.944**	0.673**	0.693**	0.558*	0.783**
8	ارتفاع اولین شاخه از زمین Height of the first branch	0.355ns	0.031ns	0.142ns	0.719**	0.366ns	0.202ns
9	ارتفاع بوته Plant height	0.484*	0.481*	0.410*	0.324ns	0.534*	0.576*
10	عملکرد زیست‌توده Biological yield	0.621**	0.634**	0.478*	0.571*	0.672**	0.762**
11	شاخص برداشت Harvest index	0.486*	0.382ns	-0.356ns	0.377ns	0.078ns	0.156ns
12	محتوای روغن Oil content	-0.355ns	-0.371ns	-0.363ns	-0.479*	-0.215ns	-0.499*
13	عملکرد روغن Oil yield	0.790**	0.572*	0.544*	0.666**	0.650**	0.573*

نسخه پیش از انتشار

Table 4. Continued **جدول ۴. ادامه**

	صفات Traits	7	8	9	10	11	12	13
7	تعداد شاخه فرعی فرعی Number of sub-branches	1						
8	ارتفاع اولین شاخه از زمین Height of the first branch	0.011^{ns}	1					
9	ارتفاع بوته Plant height	0.497*	0.512*	1				
10	عملکرد زیست‌توده Biological yield	0.594**	0.204^{ns}	0.676**	1			
11	شاخص برداشت Harvest index	0.368^{ns}	0.090^{ns}	-0.152^{ns}	-0.372^{ns}	1		
12	محتوای روغن Oil content	-0.237^{ns}	-0.292^{ns}	-0.382^{ns}	-0.365^{ns}	-0.049^{ns}	1	
13	عملکرد روغن Oil yield	0.727**	0.115^{ns}	-0.297^{ns}	0.454*	0.403*	0.258^{ns}	1

**:معنی‌دار در سطح ۱٪، *: معنی‌دار در سطح ۵٪، ns: غیر معنی‌دار.

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

دانه در شرایط غرقاب در مراحل مختلف رشدی گیاه ماش نیز گزارش شده است (Fazeli et al., 2023). به‌هرروی، وزن هزار دانه نیز به‌عنوان یکی از اجزای عملکرد در روند کاهش میزان عملکرد دانه بی‌تأثیر نبود و تنش غرقاب با تأثیر بر تخصیص مواد فتوسنتزی به‌سوی دانه سبب باعث کاهش آن شد. در این پژوهش، همبستگی مثبت و معنی‌دار وزن هزار دانه با عملکرد دانه (r=۰/۷۰**) بر نقش وزن دانه در تعیین عملکرد دانه دلالت دارد (جدول ۴).

تعداد شاخه فرعی و شاخه فرعی فرعی

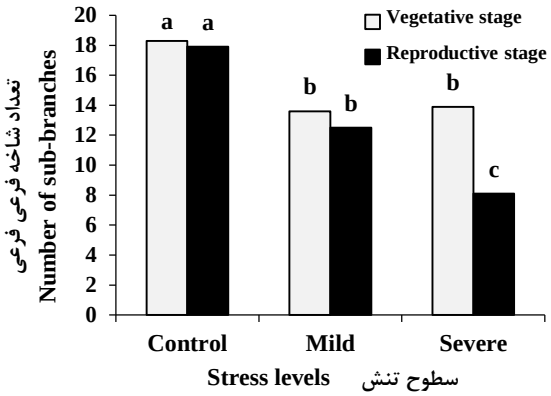
نتایج تجزیه واریانس حاکی از تأثیر نامطلوب هر دو سطح تنش غرقاب بر تعداد شاخه فرعی بود، درحالی‌که بین مراحل رشدی و برهم‌کنش تنش و مراحل رشدی تفاوت معنی‌داری ازنظر تعداد شاخه فرعی وجود نداشت (جدول ۱). بیشترین تعداد شاخه فرعی در تیمار آبیاری مطلوب بود که تحت تأثیر هر دو سطح تنش، به‌طور یکسان و معنی‌داری به کمترین مقدار کاهش یافت (جدول ۳). همچنین بین سطوح تنش و مراحل مختلف رشدی در سطح یک درصد و برهم‌کنش سطوح تنش و مراحل مختلف رشدی در سطح پنج درصد ازنظر تعداد شاخه فرعی فرعی تفاوت معنی‌داری وجود داشت (جدول ۲).

تعداد شاخه‌های فرعی در بوته در تعیین تعداد طبق در بوته، تعداد دانه در طبق و درنهایت عملکرد دانه نقشی اساسی دارند. با اعمال سطوح تنش غرقابی تعداد شاخه‌های فرعی فرعی در بوته به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. به‌هرحال بیشترین تعداد شاخه‌های فرعی فرعی در بوته در تیمار آبیاری مطلوب (۱۸/۵ عدد) و کمترین مقدار در تنش غرقابی ملایم و شدید (به ترتیب ۱۳ و ۱۱ عدد) مشاهده شد. به عبارتی تنش غرقابی ملایم و شدید باعث کاهش ۲۹/۸ و ۴۰/۵ درصدی تعداد شاخه‌های فرعی فرعی در مقایسه با آبیاری مطلوب شد (جدول ۲). بیشترین تأثیر تنش بر تعداد شاخه‌های فرعی فرعی در مرحله رشد زایشی مشاهده شد به‌گونه‌ای که تنش در مرحله زایشی سبب کاهش ۱۶ درصدی تعداد شاخه‌های فرعی فرعی در مقایسه با تنش در مرحله رشد رویشی شد (جدول ۲). در تیمار تنش ملایم، اعمال تنش غرقاب در مرحله رویشی و زایشی به ترتیب سبب کاهش ۲۵ و ۳۰ درصدی تعداد شاخه‌های فرعی فرعی در مقایسه با آبیاری مطلوب شد، در حاکی که در تنش شدید مقادیر این کاهش به ترتیب برابر با ۲۴ و ۵۵ درصد بود. به عبارتی تنش غرقاب در مرحله زایشی به‌ویژه تنش شدید به‌شدت سبب کاهش تعداد شاخه‌های فرعی فرعی در مقایسه با آبیاری مطلوب شد (شکل ۳).

این کاهش معنی‌دار در مرحله زایشی نشان‌دهنده حساسیت این مرحله نسبت به افزایش شدت تنش بود. کاهش شدید تعداد طبق در بوته در شرایط تنش شدید مرحله زایشی نیز

نسخه پیش از انتشار

می‌تواند به دلیل کاهش شدید تعداد شاخه‌های فرعی فرعی در این سطح تنش و مرحله رشدی باشد (شکل ۲).



شکل ۳. تأثیر تنش غرقابی در مرحله رشد رویشی و زایشی بر تعداد شاخه فرعی فرعی دانه گلرنگ

Fig. 3. Effect of waterlogging stress at vegetative and reproductive stages on number of sub-branches of safflower

وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین تعداد طبق در بوته با تعداد شاخه‌های فرعی فرعی (r=۰/۹۵**) نیز بر نقش و اهمیت تعداد شاخه‌های فرعی فرعی در تعیین تعداد طبق در بوته و درنهایت عملکرد دانه تأکید دارد. گزارش شده است که کاهش غلظت نیتروژن در ساقه اصلی گندم در خاک غرقابی منجر به کاهش سرعت تولید پنجه می‌گردد (Belford et al., 1985) و امکان تولید پنجه جدید نشان‌دهنده توانایی ظرفیت بازیابی زیست‌توده و پنجه است و این ظرفیت تولید پنجه در گیاه در ارتباط با در دسترس بودن نیتروژن در زمان بازیابی از تنش است (Cannell et al, 1980). علاوه بر آن، در بررسی زمان‌های مختلف غرقاب در مراحل مختلف رشدی پنبه مشاهده شد، تعداد گره و تعداد شاخه با افزایش مدت‌زمان تنش در مراحل مختلف رشدی در مقایسه با شاهد کاهش یافت و این میزان کاهش در مرحله گلدهی در مقایسه با سایر مراحل رشدی به‌طور قابل‌توجهی بیشتر بود (Wang et al., 2017). وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین عملکرد دانه با تعداد شاخه فرعی (r=۰/۸۳**) و تعداد شاخه فرعی فرعی (r=۰/۸۴**) و همچنین همبستگی بین تعداد شاخه فرعی و فرعی فرعی (r=۰/۷۸**) بر اهمیت حفظ تعداد شاخه‌های فرعی در شرایط تنش و تأثیر آن بر تعداد شاخه-های فرعی فرعی و درنتیجه حفظ عملکرد دانه دلالت دارد.

ارتفاع بوته

ارتفاع بوته تنها تحت اثر شرایط غرقاب قرار گرفت (جدول ۲). ارتفاع بوته با اعمال تنش غرقاب ملایم به‌طور معنی‌داری کاهش یافت، درحالی‌که در تیمار تنش شدید این کاهش معنی‌دار نبود. بین مرحله رویشی و زایشی تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای ازنظر ارتفاع بوته مشاهده نشد (جدول ۳).

ارتفاع بوته از صفات مهم و تأثیرگذار بر عملکرد گیاه در برداشت مکانیزه است. ارتفاع بوته گلرنگ در مرحله ساقه‌بندی تعیین می‌گردد، بنابراین در این پژوهش، وقوع تنش در هر دو مرحله رویشی و زایشی از طریق کاهش فتوسنتز و تولید ماده خشک سبب کاهش ارتفاع بوته گردید. در تیمار آبیاری مطلوب، گیاه در شرایط مطلوب رشد قرار داشته و شرایط لازم برای افزایش تعداد، اندازه سلول و رشد فراهم می‌گردد، در مقابل با اعمال سطوح تنش غرقاب، توسعه سلولی کاهش‌یافته و منجر به کاهش رشد و طویل شدن ساقه می‌گردد. کاهش جزئی ارتفاع گیاه در شرایط شدت تنش رطوبتی را می‌توان تأثیر تنش غرقابی بر جذب مواد مغذی و محدودیت تولید کربوهیدرات‌ها نسبت داد (Ferrante et al., 2013). به عبارتی محدودیت جذب عناصر توسط ریشه گیاه در خاک غرقابی منجر به اثرات نامطلوب آن بر رشد اندام هوایی و تولید زیست‌توده و به دنبال آن کاهش ارتفاع بوته شد.

ارتفاع اولین شاخه فرعی

ارتفاع اولین شاخه فرعی تا سطح تحت تأثیر سطوح تنش غرقاب، مراحل رشدی و برهم‌کنش آن قرار نگرفت (جدول ۲). اگرچه تنش غرقاب ملایم دارای پایین‌ترین ارتفاع در مقایسه با آبیاری مطلوب و تنش غرقاب شدید بود (جدول ۳). ارتفاع اولین شاخه فرعی تا سطح زمین همبستگی مثبت و معنی‌داری با ارتفاع بوته (r=۰/۵۱۲*) داشت (جدول ۴) و این همبستگی بیانگر این نکته بود که با افزایش ارتفاع بوته، فاصله اولین شاخه فرعی از سطح زمین افزایش می‌یابد. همبستگی مثبت و معنی‌دار بین ارتفاع انشعابات تا سطح زمین با ارتفاع بوته قبلاً نیز گزارش شده است (Zandi et al., 2023).

عملکرد زیست‌توده

تنش غرقاب سبب کاهش معنی‌دار عملکرد زیست‌توده در هر دو سطح تنش ملایم و شدید گردید، به‌گونه‌ای که میزان کاهش عملکرد زیست‌توده در شرایط تنش ناشی از تنش

غرقابی ملایم و شدید در مقایسه با آبیاری مطلوب به ترتیب به میزان ۲۱ و ۲۷ درصد بود (جدول ۳).

در خاک‌های مستعد شرایط غرقاب، کاهش تنفس ریشه در اثر کمبود اکسیژن رشد گیاه را محدود می‌کند (Huang and Johnson, 1995). در چنین شرایطی، انتقال اکسیژن بین ریشه‌ها و اندام هوایی تحت تأثیر قرارگرفته و سبب سرکوب فرآیندهای وابسته به اکسیژن و مهار جذب کربن و فتوسنتز می‌شود و درنهایت، تغییرات در متابولیسم گیاه و جذب مواد مغذی تحت شرایط کمبود اکسیژن، باعث محدود شدن رشد و کاهش زیست‌توده و عملکرد دانه می‌شود (Gutierrez-Boem et al., 1996).

در این پژوهش کاهش عملکرد زیست‌توده در مرحلهٔ زایشی تا حدودی بیشتر از مرحله رویشی بود. در گندم نیز مشاهده شد تنش در مرحلهٔ رشد زایشی نسبت به مرحلهٔ رشد طولی ساقه، با کاهش بیشتر ماده خشک ریشه و زیست‌توده بوته مواجه شد که این کاهش بیانگر ظرفیت پایین سیستم ریشه‌ای برای بازیابی و کاهش سطح برگ و استفاده بیشتر از کربوهیدرات و درنتیجه کاهش ماده خشک کل گیاه بود (De San Celedonio et al., 2017). همبستگی مثبت و معنی‌دار عملکرد زیست‌توده با عملکرد دانه (r=۰/۶۲**)، تعداد طبق در بوته (r=۰/۶۳**)، تعداد دانه در بوته (r=۰/۵۷**)، وزن هزار دانه (r=۰/۶۷**)، ارتفاع بوته (r=۰/۶۷**) و تعداد شاخه فرعی فرعی (r=۰/۵۹**) بر نقش اجزای عملکرد در تعیین عملکرد زیست‌توده تأکید دارد (جدول ۴) و نیز در بین اجزای عملکرد، بیشترین میزان همبستگی را با تعداد شاخه فرعی (r=۰/۷۶**)، دارا بود؛ بنابراین، این امر به اهمیت بالای تعداد شاخه فرعی در تولید عملکرد زیست‌توده و نیز حفظ فتوسنتز به لحاظ تولید ماده خشک گیاه و عملکرد نهایی تأکید دارد.

شاخص برداشت

نتایج تجزیه واریانس، بیانگر تأثیر معنی‌دار سطوح تنش بر شاخص برداشت بود (جدول ۲). بیشترین شاخص برداشت مربوط به تیمار آبیاری مطلوب و کمترین آن مربوط به تنش شدید بود و با افزایش شدت تنش بین سطوح تنش نیز اختلاف معنی‌داری مشاهده شد. بین مراحل رشدی به لحاظ مقدار شاخص برداشت تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای وجود نداشت، بااین‌حال کمترین شاخص برداشت در مرحله رشدی رویشی مشاهده شد (جدول ۳).

مدت‌زمان تنش غرقاب و زمان وقوع آن ازجمله عوامل تأثیرگذار تنش غرقاب بر عملکرد دانه و عملکرد زیست‌توده است. به نظر می‌رسد در تنش ملایم به دلیل قرار گرفتن گیاه در شرایط غرقاب با مدت‌زمان کمتر در مقایسه با تنش شدید، عملکرد دانه در مقایسه با عملکرد زیست‌توده کمتر تحت تأثیر تنش قرار گرفته است و همین امر سبب برتری مقادیر شاخص برداشت در مقایسه با تنش شدید شد (جدول ۳). به‌هرروی، نتایج سایر تحقیقات تنش غرقابی در گندم نشان داد، تنش غرقابی قبل از مرحله گل‌دهی تأثیری بر وزن زیست‌توده و شاخص برداشت نداشت، درحالی‌که پس از گل‌دهی سبب کاهش وزن زیست‌توده و افزایش شاخص برداشت شد (Ding et al., 2020).

محتوای روغن

محتوای روغن تنها تحت تأثیر تنش قرار گرفت (جدول ۲). بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، کمترین و بیشترین محتوای روغن به ترتیب از آبیاری مطلوب به میزان ۲۴ درصد و تنش غرقابی ملایم به میزان ۲۸/۹ درصد حاصل شد. در شرایط تنش شدید تفاوت معنی‌داری در درصد روغن مشاهده نشد. به عبارتی با شروع تنش ملایم محتوای روغن افزایش یافت (جدول ۳). افزایش معنی‌دار محتوای روغن در شرایط تنش ملایم را می‌توان به تأثیرپذیری بیشتر ساخت کربوهیدرات‌ها از تنش غرقاب و درنتیجه کاهش بیشتر عملکرد دانه این ارقام نسبت داد، به عبارتی سهم کاهش ساخت کربوهیدرات‌ها بیشتر از سهم ساخت روغن بوده و این موضوع به‌صورت افزایش محتوای روغن نمایان شده است درحالی‌که به نظر می‌رسد در شرایط تنش شدید سهم این کاهش یکسان باشد (جدول ۳).

به دلیل انجام تحقیقات اندک در زمینه تأثیر تنش غرقاب بر دانه‌های روغنی، اطلاعات اندکی در خصوص تأثیر آن بر محتوای روغن دانه‌های روغنی وجود دارد. گفته می‌شود کاهش جذب نیتروژن در زمان غرقاب در مرحله طویل شدن ساقه، سبب کاهش محتوای پروتئین دانه می‌شود (Gutierrez-Boem et al., 1996) و ازآنجایی‌که درصد پروتئین دانه رابطه‌ای عکس با محتوای روغن دارد، بنابراین هرچه درصد پروتئین بالا باشد، محتوای روغن کاهش می‌یابد و بالعکس (Brennan et al., 2000). در گیاه کلزا گزارش شده که در شرایط تنش غرقاب محتوای روغن از ۴۲ به ۴۵ درصد افزایش یافت، درحالی‌که درصد پروتئین پس از تنش در

نسخه پیش از انتشار

مراحل غنچه‌دهی و گل‌دهی کاهش یافت (Wollmer et al., 2018). در همین راستا گزارش‌هایی مبنی بر افزایش محتوای روغن در شرایط تنش خشکی (Saini and Westgate et al., 2000) و گرما (Sheikh Mamo et al., 2023) وجود دارد. برخی پژوهشگران گزارش دادند که این صفت عمدتاً به ژنتیک گیاه بستگی دارد و تحت اثر محیط قرار نمی‌گیرد (Koutroubas et al., 2008). از سوی دیگر، برخی معتقدند تفاوت محتوای روغن در بین ژنوتیپ‌ها نتیجه برهم‌کنش ژنوتیپ و محیط است و بیان ژن‌های کنترل‌کننده تولید روغن تابعی از شرایط محیط است (Hussain et al., 2016). مشخص‌شده محتوای کربوهیدرات‌های محلول می‌تواند به دانه یعنی منبع اصلی کربن برای متابولیسم چربی دانه‌های کلزا منتقل شود (Khan et al., 2018)؛ بنابراین، وضعیت فتوسنتز و سیستم ریشه‌ای در جذب مواد مغذی و مدت‌زمان تنش و مراحل رشدی می‌تواند بر محتوای روغن بذر مؤثر واقع شود. در زمان وقوع تنش، پویایی گیاه تغییر می‌کند و اولویت انتقال مواد فتوسنتزی برای رشد دانه‌ها ممکن است تغییر یابد و کاهش دسترسی به آب ممکن است باعث افزایش جزئی محتوای روغن دانه‌ها شود.

عملکرد روغن

عملکرد روغن در تنش ملایم و شدید در مقایسه با آبیاری مطلوب به‌طور معنی‌داری به ترتیب به میزان ۱۶ و ۳۲ درصد کاهش یافت (جدول ۳). بیشترین عملکرد روغن در آبیاری مطلوب و کمترین مقدار آن در تنش شدید مشاهده شد (جدول ۲). عملکرد روغن به دو عامل عملکرد دانه و محتوای روغن بستگی دارد و کاهش عملکرد روغن در تنش ملایم و شدید علی‌رغم افزایش محتوای روغن، کاهش عملکرد دانه بود؛ بنابراین علی‌رغم افزایش محتوای روغن، عملکرد روغن کاهش یافت (Sheik Mamo et al., 2023). در این پژوهش کم‌ترین عملکرد روغن در تنش غرقابی شدید مشاهده شد که این امر به کاهش عملکرد دانه ناشی از تنش غرقاب از طریق اثر بر تعداد شاخه فرعی، تعداد طبق در بوته و تعداد دانه در بوته علیرغم تغییر در محتوای روغن نسبت داده می‌شود. وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین عملکرد روغن با عملکرد دانه (r=۰/۷۹**)، تعداد شاخه فرعی (r=۰/۷۳**)، تعداد دانه در بوته (r=۰/۶۷**)، وزن هزار دانه (r=۰/۶۵**) نیز بر نقش عملکرد دانه و اجزای آن در تعیین عملکرد روغن تأکید دارد (جدول ۴).

نتیجه‌گیری نهایی

در این پژوهش تنش غرقابی ملایم و شدید منجر به کاهش معنی‌دار عملکرد دانه و روغن شد. تنش غرقاب از طریق تأثیر بر اجزای عملکرد مانند تعداد طبق در بوته، تعداد دانه در طبق، تعداد دانه در بوته، وزن هزار دانه و همچنین کاهش تعداد شاخه‌های فرعی و فرعی فرعی سبب کاهش عملکرد دانه و درنهایت عملکرد روغن گردید. واکنش به تنش در مراحل رشد رویشی و زایشی متفاوت بود، به‌گونه‌ای که تأثیر تنش در مرحله زایشی به‌ویژه از طریق تأثیر بر تعداد شاخه فرعی فرعی و به دنبال آن کاهش تعداد طبق در بوته به‌مراتب بیشتر از مرحله رویشی بود. بیش‌ترین مقدار کاهش تعداد شاخه‌های فرعی فرعی، تعداد طبق در بوته و تعداد دانه در بوته و درنتیجه کاهش عملکرد دانه و روغن مربوط به تیمار تنش شدید در مرحله رشد زایشی بود. درمجموع یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که گلرنگ در مرحله رشد زایشی به تنش غرقاب حساس‌تر است و افزایش مدت‌زمان تنش باعث افزایش حساسیت و کاهش بیشتر عملکرد دانه این گیاه می‌شود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان از حمایت‌های معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز به شماره پژوهانه SCU.AA99.96 کمال قدردانی را دارند.

منابع

Arbona, V., Hossain, Z., López-Climent, M. F., Pérez-Clemente, R. M., Gómez-Cadenas, A., 2008. Antioxidant enzymatic activity is linked to waterlogging stress tolerance in citrus. Physiology Plantarum. 132, 452–466. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2007.01029.x

Ashraf, M.A., 2012. Waterlogging stress in plants: A review. African Journal of

نسخه پیش از انتشار

Agricultural Research. 7, 1976-1981. https://doi.org/10.5897/AJARX11.084

Bailey-Serres, J., Voesenek, L.A.C.J., 2008. Flooding stress: Acclimations and genetic diversity. Annual Review of Plant Biology. 59, 313-339. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092752

Banat, F., Pal, P., Jwaied, N., Al-Rabadi, A. 2013. Extraction of Olive Oil from Olive Cake using Soxhlet Apparatus. American Journal of Oil and Chemical Technologies. 1, 1-8. https://doi.org/10.14266/ajoct14-1

Belford, R.K., Cannell, R.Q., Thomson, R.J., 1985. Effects of single and multiple waterloggings on the growth and yield of winter wheat on a clay soil. Journal of the Science of Food and Agriculture. 36, 142-156. https://doi.org/10.1002/jsfa.2740360304

Brennan, R.F., Mason, M.G., Walton, G.H., 2000. Effect of nitrogen fertilizer on the concentrations of oil and protein in canola (*Brassica napus* L.) seed. Journal of Plant Nutrition. 23, 339-348. https://doi.org/10.1080/01904160009382020

Cannell, R.Q., Belford, R.K., Gales, K., Dennis, C.W., Prew, R.D., 1980. Effects of waterlogging at different stages of development on the growth and yield of winter wheat. Journal of the Science of Food and Agriculture. 31, 117-132. https://doi.org/10.1002/jsfa.2740310203

De San Celedonio, R.P., Abeledo, L.G., Miralles, D.J. 2014. Identifying the critical period for waterlogging on yield and its components in wheat and barley. Plant and Soil. 378, 265-277. https://www.jstor.org/stable/42952797

De San Celedonio, R.P., Abeledo, L.G., Mantese, A.I., Miralles, D.J., 2017. Differential root and shoot biomass recovery in wheat and barley with transient waterlogging during preflowering. Plant and Soil. 417, 481-498. https://doi.org/10.1007/s11104-017-3274-1

Ding, J., Liang, P., Wu, P., Zhu, M., Li, C., Zhu, X., Gao, D., Chen, Y., Guo, W., 2020. Effects of waterlogging on grain yield and associated traits of historic wheat cultivars in the middle and lower reaches of the Yangtze River, China. Field Crops Research. 264, 107695. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107695

Fazeli, S.B., Rahnama, A., Hassibi, P., 2022. Effect of waterlogging stress on yield and yield components and photosynthetic characteristics of two Mung bean cultivars in Ahvaz conditions. Plant Productions. 45, 95-108. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22055/ppd.2020.30538.180

Ferrante, A., Savin, R., Slafer, G.A., 2013.Floret development and grain setting differences between modern durum wheats under contrasting nitrogen availability. Journal of Experimental Botany. 64, 169-184. https://doi.org/10.1093/jxb/ers320

Grassini, P., Indaco, G.V., Pereira, M.L., Hall, A.J., Trápani, N., 2007. Responses to short-term waterlogging during grain filling in sunflower. Field Crops Research. 101, 352-363. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.12.009

GRDC., 2017. GrowNotes Safflower Northern, Grains Research and Development Corporation, Australia.

Gutierrez Boem, F.H., Lavado, R.S., Porcelli, C.A., 1996. Note on the effects of winter and spring waterlogging on growth, chemical composition and yield of rape seed. Fied Crops Research. 47, 175-179. https://doi.org/10.1016/0378-4290(96)00025-1

Huang, B., Johnson, J.W., 1995. Root respiration and carbohydrate status of two wheat genotypes in response to hypoxia. Annals of Botany. 75, 423-427. https://doi.org/10.1006/anbo.1995.1041

Hussain, M.I., Lyra, D.A., Farooq, M., Nikoloudakis, N., Khalid, N., 2016. Salt and drought stresses in safflower: a review. Agronomy for Sustainable Development, 36, 4. https://doi.org/10.1007/s13593-015-0344-8

Khan, S., Anwar, S., Kuai, J., Noman, A., Shahid, M., Din, M., Ali, A., Zhou, G., 2018. Alteration in yield and oil quality traits of winter rapeseed by lodging at different planting density and nitrogen rates. Scientific Reports. 8, 634. https://doi.org/10.1038/s41598-017-18734-8

Koutroubas, S. D., Papakosta, D. K., Doitsinis. A., 2008. Nitrogen utilization efficiency of safflower hybrids and open-pollinated varieties under Mediterranean conditions. Field Crops Research. 107, 56-61. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.12.009

Kumar, S., Ambreen, H., Murali, T.V., Bali, S., Agarwal, M., Kumar, A., Goel, S., Jagannath, A., 2015. Assessment of genetic diversity and population structure in a global reference collection of 531 accessions of *Carthamus tinctorius* L. (safflower) using AFLP markers. Plant Molecular Biology Reporter. 33, 1299-

1313. https://doi.org/10.1007/s11105-014-0828-8

Marti, J., Savin, R., Slafer, G.A., 2015. Wheat yield as affected by length of exposure to waterlogging during stem elongation. Journal of Agronomy and Crop Science 201, 473-486. https://doi.org/10.1111/jac.12118

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

Ploschuk, R.A., D.J. Miralles., T.D. Colmer., E.L. Ploschuk., G.G. Striker., 2018. Waterlogging of winter crops at early and late stages: Impacts on leaf physiology, growth and yield. Frontiers in Plant Science. 9, 1863. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01863

Ploschuk, R.A., Mirales, D.J., Colmer, T.D., Striker, G.G., 2020. Waterlogging differentially affects yield and its components in wheat, barley, rapeseed and field pea depending on the timing of occurrence. Journal of Agronomy and Crop Science. 206, 363-375. https://doi.org/10.1111/jac.12396

Saini, H.S., Westgate. M.E., 2000. Reproductive development in graincrops during drought. Advances in Agronomy. 68, 59-96. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60843-3

Shabala, S., 2011. Physiological and cellular aspects of phytotoxicity tolerance in plants: the role of membrane transporters and implications for crop breeding for waterlogging tolerance. New Phytologist. 190, 289-298. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03575.x

Shahrokhnia, M.H., Sepaskhah, A.R., 2017. Physiologic and agronomic traits in safflower under various irrigation strategies, planting methods and nitrogen fertilization. Industrial Crops and Products. 95, 126-139. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.021

Shao, G.C., Lan, J.J., Yu, S.E., Liu, N., Guo, R.Q., She, D.L., 2013. Photosynthesis and growth of winter wheat in response to waterlogging at different growth stages. Photosynthetica. 51, 429-437. https://doi.org/10.1007/s11099-013-0039-9

Sheikh Mamo, B., Rahnama, A., Hassibi, P., 2023. The influence of terminal heat stress onphysiological and yield characteristics of promising sunflower cultivars in Ahvaz climate condition. Environmental Stresses in Crop Sciences. 16, 835-851. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22077/escs.2023.4928.2107

Tian, L., Zhang, Y., Chen, P., Zhang, F., Li, J., Yan, F., Dong, Y., Feng, B., 2021. How does the waterlogging regime affect crop yield? A global meta-analysis. Frontiers in Plant Science. 12, 634898. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.634898

Wang, C., Hai, J., Yang, J., Tian, J., Chen, W., Chen, T., Wang, H., 2016. Influence of leaf and silique photosynthesis on seeds yield and seeds oil quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.). European Journal of Agronomy. 74, 112-118. https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.12.008

Wang, X., Deng, Z., Zhang, W., Meng, Z., Chang, X., Lv M., 2017. Effect of waterlogging duration at different growth stages on the growth, yield and quality of cotton. PLoS ONE 12, e0169029. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169029

Wollmer, A.C., Pitann, B., Muehling, K.H., 2018. Waterlogging events during stem elongation or flowering affect yield of oilseed rape (*Brassica napus* L.) but not seed quality. Journal of Agronomy and Crop Science. 204, 165-174. https://doi.org/10.1111/jac.12244

Wu, X., Tang, Y., Li, C., Wu, C., Huang, G., 2015. Chlorophyll fluorescence and yield responses of winter wheat to waterlogging at different growth stages. Plant Production Science. 18, 284-294. https://doi.org/10.1626/pps.18.284

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]. http://cpj.ahvaz.iau.ir/article-1-1614-fa.html

Zhang, Y., Song, X., Yang, G., Li, Z., Lu, H., Kong, X., Eneji, A.E., Dong, H., 2015. Physiological and molecular adjustment of cotton to waterlogging at peak-flowering in relation to growth and yield. Field Crops Research. 179, 164-172. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.05.001