University of Tehran Press

Iranian Journal of Field Crop Science

Online ISSN: 2423-8082

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

Speed Breeding in Winter Bread Wheat

Valiollah Mohammadi [1] ✉ | Reza Fathi [2] | Towhid Najafi Mirak [3]

1. Corresponding Author, Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: vmohammadi@ut.ac.ir
2. Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: r.fathi321@ut.ac.ir
3. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Seed and Plant Improvement Institute, Karaj, Iran.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: December 01, 2024
Revised: March 05, 2025
Accepted: March 26, 2025

Keywords:
Embryo culture,
generation,
gibberellic acid,
light,
speed breeding,
vernalization,
winter wheat.

Extended Abstract

Introduction. Homozygous lines are essential for breeding new cultivars in both self-pollinated and cross-pollinated species, and they are also valuable in many biological studies. Accelerating the development of high-yielding and stress-resilient wheat cultivars is indispensable for ensuring food security under the constraints of climate change, urbanization, population explosion, and emerging biotic and abiotic stresses. However, conventional breeding approaches are inherently slow, typically requiring 12–14 years to develop a new cultivar, mainly due to the long generation time of wheat and the need for multiple field seasons to achieve homozygosity and selection accuracy. To overcome these temporal limitations, speed breeding has emerged as a transformative technology that enables rapid generation advancement through controlled-environment cultivation under extended photoperiods, intense light, and optimized temperature regimes allowing breeders to produce up to six generations of wheat, barley, or other crops per year, compared with only 1–2 under normal field conditions. This technology is, however, less efficient in winter cereals due to vernalization requirement. The objective of this study was to develop an effective speed breeding protocol for winter wheat varieties.

Materials and Methods. Three winter wheat varieties, Zarineh, Gaspard, and Gascogen, three vernalization methods and two lighting regime including 360 µmol/m²/s supplied by white LEDs as well as 420 µmol/m²/s provided by white LEDs plus nearly 15% supplemental purple grow light were tested in this study. Embryo rescue technique was employed by culturing immature seeds in MS medium to further shorten the growth duration of the plants. Flowering and maturity time, total leaves number, and grains/spike were measured. The experiment was analyzed in a split factorial design with six replications.

Results and Discussion. Seed to seed generation time of Zarineh, Gaspard, and Gascogen was shortened to 95, 110, and 125 days under light vernalization followed by speed breeding. These periods were 114, 137, and 146 under cold vernalization while being 106, 124, and 136 under cold-chemical vernalization. Speed breeding under a combination of white and grow light (with 126.6 days to maturity) accelerated the growth cycle more than solely white LED lights (with 130.7 days to maturity). Zarineh completed its embryo and seed maturity in just 82 and 95 days, respectively, under speed breeding condition. Gascogen showed the longest generation time (154 days) under cold vernalization most probably due to longer vernalization requirement. The results showed that foliar application of gibberellic acid led to 7-10 days decline in generation time compared to conventional vernalization by cooling.

Conclusion. This study evidenced that 16-hour photoperiod, 420 µmol $m^{-2}s^{-1}$ light intensity provided by a combination of white LEDs (85%) and purple grow light (15%) and 23/17° C (day/night) temperature was the optimum speed breeding condition for winter wheat. Through shortening the generation time to three months, this protocol makes it possible for the breeders to advance four generations of winter lines per year.

Cite this article: Mohammadi, V., Fathi, R., & Najafi Mirak, T. (2026). Speed breeding in winter bread wheat. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *57*(2), 143-157. DOI: 10.22059/ijfcs.2025.386260.655114.

© The Authors.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: 10.22059/ijfcs.2025.386260.655114

انتشارات دانشگاه تهران

علوم گیاهان زراعی ایران

شاپا الکترونیکی: ۲۴۲۳-۸۰۸۲

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

بهنژادی سریع درگندم نان زمستانه

ولی‌اله محمدی [۱] ✉ | رضا فتحی [۲] | توحید نجفی میرک [۳]

۱. نویسنده مسئول، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: vmohammadi@ut.ac.ir

۲. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: r.fathi321@ut.ac.ir

۳. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذرکرج، کرج، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۰۶

کلیدواژه‌ها:
اسیدجیبرلیک،
بهاره‌سازی،
بهنژادی سریع،
کشت جنین،
گندم زمستانه،
نسل،
نور.

چکیده

بهنژادی سریع یکی از فناوری‌هایی است که در سال‌های اخیر برای سرعت‌بخشیدن به برنامه‌های بهنژادی در غلات و سایر گیاهان به‌کار گرفته شده است. اما نیاز به دوره بهاره‌سازی کارایی این فناوری در ارقام زمستانه را کاهش داده است. به منظور تهیه شیوه‌نامه بهنژادی سریع در گندم‌های زمستانه، سه رقم گندم زرینه،گاسپارد و گاسکوژن پس از اعمال بهاره‌سازی در اتاقک رشد ویژه بهنژادی سریع تحت شدت نور بالا و نوردوره طولانی پرورش یافتند. جهت غلبه بر خواب بذر و کاهش بیشتر دوره‌رشد گیاه از تکنیک کشت جنین بذور نارس در محیط MS بهره گرفته شد. تعداد روز تا گلدهی، تعداد روز تا رسیدن کامل، تعداد نهایی برگ و تعداد دانه در سنبله اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که محلول‌پاشی جبرلیک‌اسید هفت تا۱۰ روز نسل‌دهی ارقام را نسبت به بهاره‌سازی سرمایی کاهش داد. شدت نور ۴۲۰ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه (در فاصله ۳۰ سانتیمتری منبع نور) با ترکیب لامپ بنفش ویژه رشد (۱۵٪) و نور LED سفید (۸۵٪)، نوردوره ۶/۱۸ ساعت (روز/شب) و دمای ۱۷/۲۳ درجه سانتیگراد (روز/شب) مناسب‌ترین محیط برای بهنژادی سریع گندم‌های زمستانه است. در این شرایط مدت زمان بذر تا بذر به سه ماه کاهش یافته و امکان پرورش چهار نسل در سال فراهم می‌گردد.

استناد: محمدی، و.، فتحی، ر.، و نجفی میرک، ت. (۱۴۰۵). بهنژادی سریع درگندم نان زمستانه. *علوم گیاهان زراعی ایران، ۵۷*(۲)، ۱۴۳-۱۵۷. DOI: 10.22059/ijfcs.2025.386260.655114

ناشر: موسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان

۱. مقدمه

گندم هم از لحاظ تولید و هم از لحاظ تغذیه مهمترین محصول کشاورزی ایران و جهان است. گزینش شجره‌ای [۱]، شجره‌ای تغییریافته و یا بالک تغییریافته [۲] روش‌های اصلی بهنژادی گندم هستند که در آنها وقت و هزینه زیادی صرف خالص‌سازی مواد گیاهی از نسل F2 تا F6 می‌شود. ازآنجایی‌که این فرآیند در آزمایش‌های مزرعه‌ای شش سال به طول می‌انجامد، بهنژادگران همواره در پی کوتاه‌کردن این زمان بوده‌اند. بکارگیری نسل تک‌بذر [۳]در گلخانه و هاپلوئید مضاعف دو روشی هستند که برای این منظور پیشنهاد شده‌اند. هاپلوئید مضاعف به دلیل معایبی همچون نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی و متخصص، از بین‌رفتن بسیاری از مواد گیاهی در فرآیند تولید گیاهچه‌ها، عدم نوترکیبی کافی و ...، چندان مورد استقبال بهنژادگران واقع نشده است (Zhang *et al*., 2013). به‌تازگی در تکمیل روش نسل تک‌بذر فناوری نوینی به نام بهنژادی سریع [۴] پیشنهاد شده است که در آن با استفاده از افزایش شدت و مدت نور، سرعت رشد گیاه افزایش قابل توجهی می‌یابد و می‌توان در طول یک سال چندین نسل از گیاهان را تولید کرد (Zheng *et al*., 2013). پژوهشگران نشان داده‌اند که با بکارگیری بهنژادی سریع می‌توان هشت نسل گندم بهاره، نه نسل جو بهاره، هفت نسل کلزای بهاره و هفت نسل نخود را در یک سال تولید کرد (Zheng *et al*., 2013; Samineni *et al*., 2019; Yao *et al*., 2016; Ochatt *et al*., 2008; Watson *et al*., 2018; Ghosh *et al*., 2018). بهنژادی سریع برای اصلاح غلات بهاره با هدف افزایش سرعت رسیدن بسیار مناسب است. در این فناوری رژیم نوری و دمایی در طول شب و روز چنان تقسیم می‌شوند که گیاهان به سرعت به مرحله گلدهی وارد شده و در کمتر از دو ماه بذر تولید کنند. اما در غلات زمستانه که برای ورود به مرحله زایشی به ۶–۸ هفته دوره سرمای بهاره‌سازی نیاز دارند، از کارایی این روش به مراتب کاسته می‌شود (Cha *et al*., 2022 ; Liu *et al.*, 2016; Hogewoning *et al*., 2010).

گندم‌های زمستانه برای گذر از رشد رویشی و ورود به مرحله زایشی نیازمند گذراندن یک دوره سرما هستند که از آن به‌عنوان بهاره‌سازی یاد می‌شود. این پدیده روی بسیاری از گیاهان مانند گندم، جو و کلزا شناسایی شده است. عوامل مختلفی مانند سن، شدت (درجه حرارت) و مدت سرما، روش سرمادهی، ژنوتیپ، مرحله نمو و هورمون‌های رشد بر فرآیند بهاره‌سازی تاثیرگذار هستند (Rawson *et al*., 1998). بهاره‌سازی فرآیندی کمی می‌باشد که بسته به شرایط محیطی متوقف و یا برگشت کرده یا دوباره از سر گرفته می‌شود. اندازه‌گیری کمی بهاره‌سازی به شیوه‌های متفاوتی صورت می‌گیرد که عبارتند از تعداد روز تا سنبله‌دهی [۵]، درجه–روز رشدی [۶] و تعداد نهایی برگ [۷] در ساقه اصلی (Wang *et al*., 1995). گندم از طریق کاهش فاصله زمانی روز تا گلدهی به تامین نیاز بهاره‌سازی واکنش نشان می‌دهد، صفت روز تا گلدهی تحت تاثیر ژن‌های بهاره‌سازی [۸]، طول روز [۹] و زودرسی ذاتی می‌باشد. وضعیت غالب ژن‌های بهاره‌سازی *VrnA1* موجب تسریع آغازش برگ‌ها و *VrnA2* موجب کاهش سرعت آغازش برگ و گل می‌شود (Kiss *et al*., 2014; Turner *et al*., 2010; Mahfoozi *et al*., 2008; Trevaskis *et al*., 2007).

شوربلال و همکاران گزارش کردند که استفاده از ماده شیمیایی جبرلیک‌اسید موجب حذف نیاز بهاره‌سازی در گندم زمستانه می‌گردد (Shourbalal *et al*., 2019). پژوهشگران در سال ۲۰۲۲ روش جدیدی را برای تسریع بهاره‌سازی معرفی کردند که در آن سرعت بهاره‌سازی با بکارگیری دمای ۱۰ درجه سانتیگراد، دوره نوری ۸/۱۶ ساعت (روشنایی/ تاریکی) و قرار دادن بذر در سطح خاک و بذردهی گندم‌های زمستانه افزایش می‌یابد (Cha *et al*., 2022). سونگ و همکاران (۲۰۲۲) نیز نوعی بهاره‌سازی را برای بهنژادی سریع در گندم نیمه‌زمستانه به‌کار بردند. اما محدودیت هر دو مقاله این بود که هیچ یک نتوانسته بودند سرمادهی متداول را از بهاره‌سازی گندم‌های زمستانه حذف نمایند.

1. Pedigree
2. Modified bulk
3. Single seed descent
4. Speed breeding
5. Days to heading
6. Days to heading
7. Final leaf number
8. Vrn genes
9. Photoperiod genes

روش‌های متداول اصلاح گندم، مستلزم شش نسل خودگشنی برای دست‌یابی به لاین‌های خالص هستند که این مدت در مزرعه شش سال و در گلخانه حداقل سه سال به طول می‌انجامد. در بهنژادی سریع تلاش شده است این فرآیند به حداقل ممکن کاهش یابد. اگرچه بکارگیری بهنژادی سریع در کاهش تعداد روز تا نسل‌دهی گندم بهاره بسیار سودمند بوده و در ایران نیز شیوه‌نامه آن توسط محمدی و همکاران (۲۰۲۴) بومی‌سازی و گزارش شده است، نیاز بهاره‌سازی از کارایی این فناوری در گندم‌های زمستانه کاسته است. از این‌رو بهنژادگران در جستجوی راهکارهایی هستند تا گیاه را وادار کنند دوره بهاره‌سازی را در زمان کوتاه‌تری طی کند. در این راستا، پژوهش حاضر دو هدف را دنبال می‌کرد: نخست یافتن روشی برای کاهش دوره بهاره‌سازی در گندم‌های زمستانه و دوم تلفیق بهنژادی سریع و بهاره‌سازی سریع جهت تسریع نسل‌دهی در گندم‌های زمستانه.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲–۱. طرح آزمایشی

آزمایش به‌صورت اسپلیت‌فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه عامل و شش تکرار در اتاقک رشد گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشگاه تهران در سال ۱۴۰۲–۱۴۰۱ انجام شد. عامل‌های مورد آزمایش عبارت بودند از: عامل روشنایی (به‌عنوان عامل اصلی) شامل نور سفید و ترکیب نور سفید و بنفش، سه روش مختلف بهاره‌سازی شامل بهاره‌سازی سرمایی، بهاره‌سازی نوری و بهاره‌سازی شیمیایی–سرمایی و سه رقم گندم شامل زرینه، گاسپارد و گاسکوژن.

۲–۲. تیمارهای بهاره‌سازی

بذرها قبل از کشت در سینی نشا داخل پتری به مدت ۲۴ ساعت داخل آب خیسانده شده و سپس به پتری‌های جدید روی کاغذ صافی منتقل و پنج روز در شرایط اتاق (۲۱–۲۳ درجه سانتیگراد) نگهداری شدند. سپس گیاهچه‌های با وضعیت رشدی بهتر انتخاب و به سینی‌های نشا منتقل شدند. بستر کشت از پیت‌ماس (فری‌پیت) با شن به نسبت یک به یک تهیه شد. در این پژوهش از سینی‌های نشا ۲۸ سلولی استفاده شده و بذرهای جوانه‌زده در عمق حدود یک تا دو سانتی‌متری قرار داده شدند به‌گونه‌ای‌که در هر سلول دو بذر قرار داده شد. سپس سینی‌های نشا به داخل اتاقک رشد منتقل شدند که مطابق گزارش محمدی و همکاران (۲۰۲۴) از نور دوره ۶/۱۸ ساعت (روز/شب)، شدت نور ۴۲۰ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه (در فاصله ۳۰ سانتیمتری منبع نور)، دمای ۱۷/۲۳ درجه سانتیگراد (روز/شب) برای شرایط بهنژادی سریع استفاده شد (شکل ۱). شدت نور به دو روش نور سفید و مخلوط بنفش و سفید (به نسبت ۸۵٪ سفید و ۱۵٪ بنفش) تامین شد. برای تامین نور سفید از لامپ‌های ۲۳ وات LED متراکم COB شرکت نمانور و برای تامین نور اضافی بنفش از والواشرهای ویژه رشد با ترکیب سه به یک نور قرمز و آبی استفاده شد. ترکیب نور بنفش و سفید در شکل‌ها و نمودارهای این مقاله به اختصار بنفش نامیده خواهد شد. میزان رطوبت به‌طور طبیعی و بدون کنترل ۸۵/۶۵ درصد (روز/شب) بود. گیاهچه‌ها در این شرایط تا مرحله شش‌برگی پرورش یافتند و سپس به یکی از سه روش بهاره‌سازی زیر تیمار شدند. آبیاری تا مرحله شش‌برگی روزانه و سپس به‌صورت دو روز در میان انجام شد:

۲–۳. بهاره‌سازی سرمایی

گیاهچه‌های شش‌برگی به سردخانه چهار درجه سانتیگراد با نوردوره ۸/۱۶ ساعت (روز/شب) با شدت نور ۲۸۵ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه منتقل شدند. روشنایی به‌وسیله مجموعه‌ای از لامپ‌های معمولی LED خانگی کم‌مصرف ۱۵ وات تامین شد. تعداد روز بهینه برای بهاره‌سازی سرمایی برای هر رقم بر اساس مقاله شریفی و همکاران (۲۰۱۱) طوری انتخاب شد که تعداد روز تا رسیدن به حداقل ممکن کاهش یابد. بنابراین رقم زرینه ۱۴ روز، گاسپارد ۱۸ روز و گاسکوژن ۲۴ روز در سردخانه نگهداری و سپس دوباره به اتاقک رشد با شرایط بهنژادی سریع که پیشتر توضیح داده شد بازگردانده و تا مرحله رسیدن نگهداری شدند. برای اطمینان از وقوع بهاره‌سازی، وجود برجستگی دوگانه در گیاهچه‌ها زیر بینوکولر بررسی شد.

۲–۴. بهاره‌سازی شیمیایی–سرمایی

همه مراحل همانند تیمار سرمایی بود به استثنای اینکه گیاهچه‌های شش‌برگی قبل از جابجایی به سردخانه به وسیله محلول ۱۰ میلی‌گرم در لیتر مایع ورنا که نوعی جیبرلیک‌اسید ویژه تسریع بهاره‌سازی است محلول‌پاشی شدند (Shourbalal *et al*., 2019).

شکل ۱. اتاقک رشد بهنژادی سریع.
Figure 1. Speed breeding chamber.

۲–۵. بهاره‌سازی نوری

گیاهچه‌ها در تمام دوره رشد از کاشت تا رسیدن، در اتاقک رشد با شرایط بهنژادی سریع (ترکیب لامپ بنفش ویژه رشد و نور LED سفید، نوردوره ۱۸ ساعت روشنایی و دمای ۱۷/۲۳ درجه سانتیگراد (روز/شب) پرورش یافتند. پس از تشکیل سنبله، بخشی از بذرهای نارس هر تیمار برای کشت جنین مورد استفاده قرار گرفت. هدف از کشت جنین حذف دوره خواب احتمالی (یک تا دو هفته‌ای) و حذف دوره پرشدن دانه است که در شرایط عادی بین ۳۰–۴۰ روز طول می‌کشد.

جهت تعیین کوتاه‌ترین زمان ممکن برای برداشت بذر نارس، پس از گذشت ۲۰روز از گرده‌افشانی، هر روز یک سنبله از هر رقم جدا کرده و جنین آن خارج شده و در پتری‌دیش حاوی محیط کشت MS کشت شدند و این کار تا روز سی‌ام ادامه یافت. کشت جنین‌ها و سپس انتقال جوانه‌ها به سینی نشا مطابق روش محمدی و همکاران (۲۰۲۴) انجام شد. نخستین روزی که بذر هر رقم داخل پتری‌دیش جوانه زد به‌عنوان زمان بهینه آن رقم جهت کشت جنین تعیین گردید. صفات تعداد تا روز سنبله‌دهی و تعداد روز تا رسیدن جنین، تعداد روز تا رسیدن کامل (زرد شدن بذر) و تعداد نهایی برگ ثبت شدند. مهم ترین شیوه‌ای که پژوهشگران برای کمی‌سازی بهنژادی سریع مورد استفاده قرار می‌دهند اندازه‌گیری تعداد روز تا سنبله‌دهی و تعداد روز تا رسیدن کامل گیاه است (Cha *et al*., 2022).

۲–۶. تجزیه‌های آماری

پس از جمع‌آوری داده‌ها و ثبت در نرم‌افزار اکسل، تجزیه‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS (SAS Institute, 2008) صورت گرفت. قبل از تجزیه واریانس، از نرمال‌بودن توزیع خطای آزمایشی در هر یک از تیمارها و یکنواخت‌بودن آن در بلوک‌های آزمایشی اطمینان حاصل شد. مقایسه میانگین داده‌ها براساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح یک درصد صورت گرفت.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جداول ۱و۲) نشان داد که تعداد روز تا سنبله‌دهی، تعداد روز تا تشکیل جنین بالغ، تعداد روز تا رسیدن کامل، تعداد نهایی برگ و تعداد دانه در سنبله در ارقام مختلف گندم به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر روش‌های مختلف بهاره‌سازی و کیفیت نور و ژنوتیپ قرار گرفت که در ادامه به بحث و بررسی بیشتر آنها خواهیم پرداخت.

جدول ۱. تجزیه واریانس برخی از صفات فنولوژیک گندم در شرایط بهنژادی سریع.
Table 1. ANOVA for some wheat phenological traits under speed breeding condition.

Sources of variance	Mean Squares			
	df	Days to maturity	Days to embryo maturity	Days to heading
Block	5	14.19 **	18.31 *	26.46 ns
Light	1	464.59*	655.14**	227.12**
Error1	5	1.74	3.11	8.24
Genotype	2	13723.27**	7757.67**	8558.92**
Vernalization	2	2618.67**	1956.02**	2834.28**
Light×Genotype	2	97.81**	84.78**	18.1
Light×vernalization	2	135.39**	57.81**	246.28**
Genotype×vernalization	4	171.94**	23.91**	74.06**
Light× Genotype×vernalization	4	55.20**	32.99**	86.14**
Error 2	80	4.09	5.98	27.55
Coefficient of variation	-	0.95	1.85	2.28

*، **و ns: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و غیر معنی‌دار.

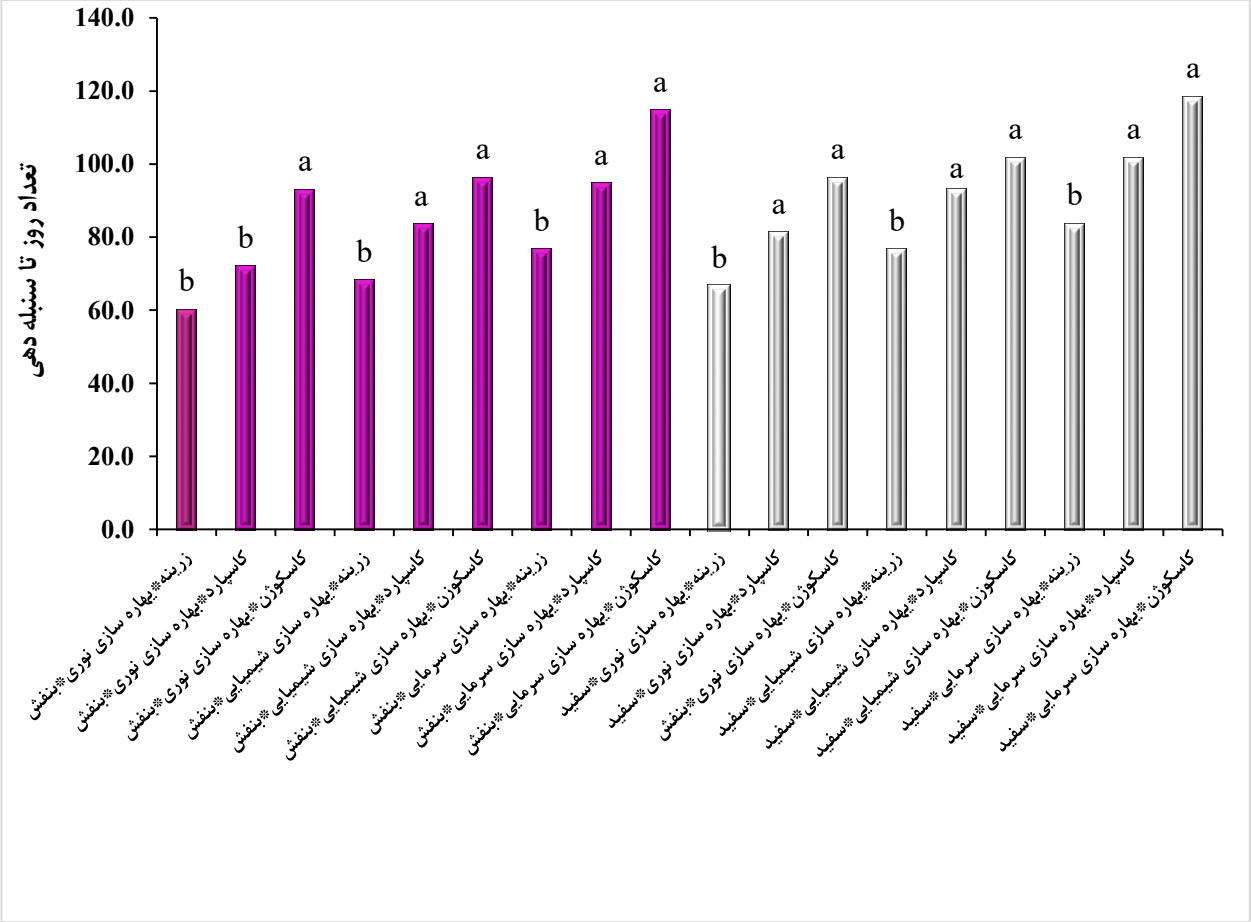
جدول ۱. (ادامه)
Table 1. (continued).

Sources of variance	Mean Squares		
	df	NO of Final leaves	Kernels/spike
Block	5	0.47 ns	0.69 ns
Light	1	30.08**	52.08**
Error1	5	0.38	52.08
Genotype	2	16.36**	427.56**
Vernalization	2	1.36 ns	35.39**
Ligh×t*Genotype	2	12.25**	53.69**
Light×vernalization	2	1.19 ns	13.36**
Genotype×vernalization	4	0.76 ns	1.45 ns
Light× Genotype×vernalization	4	2.90 ns	1.09 ns
Error 2	80	0.45	1.19
Coefficient of variation	-	14.13	9.61

* ، **و ns: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و غیر معنی‌دار.

مقایسه میانگین اثر متقابل روشنایی و رقم و روش‌های بهاره‌سازی (جدول ۱) نشان داد که بین تیمارهای آزمایشی اختلاف معنی‌دار وجود داشت و تیمار ترکیب نور بنفش با سفید در رقم زرینه به همراه روش بهاره‌سازی نوری با میانگین ۶۰ روز کم‌ترین مدت زمان تعداد روز تا سنبله‌دهی و تیمار نور سفید به همراه روش بهاره‌سازی سرمایی در رقم گاسکوژن با میانگین ۱۱۴/۱۶روز بیشترین مدت روز تا سنبله‌دهی را موجب شد. بر اساس برش‌دهی اثر متقابل رقم × روش‌های بهاره‌سازی از اثر متقابل کیفیت نور

× رقم × بهاره‌سازی (جدول ۱) و نتایج مقایسات میانگین اثرات متقابل کیفیت نور ×رقم × روش‌های بهاره‌سازی (شکل ۲) مشاهده شد که نور ترکیبی بنفش و سفید موجب کاهش تعداد روز تا سنبله‌دهی در تمام تیمارها می‌گردد. چا و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که با افزایش شدت و طول مدت نور باعث کاهش تعداد روز تا سنبله‌دهی می‌شود. آنها همچنین نشان دادند که استفاده از LEDهای ویژه رشد باعث افزایش سرعت رشد گیاه و در نتیجه کاهش تعداد روز تا سنبله‌دهی می‌شود. این پژوهشگران معتقد بودند که بهترین صفت برای کمی‌کردن بهنژادی سریع، اندازه‌گیری تعداد روز تا سنبله‌دهی است و با کاهش تعداد روز تا سنبله‌دهی می‌توان سه نسل در سال گندم زمستانه را در اتاقک رشد پرورش داد.



شکل ۲. اثر برهمکنش کیفیت نور × رقم در بهاره‌سازی بر تعداد روز تا سنبله‌دهی گندم. حروف مشابه سر ستون‌ها نشان‌دهنده غیر معنی‌داری تفاوت میانگین‌ها در آزمون دانکن می‌باشد.

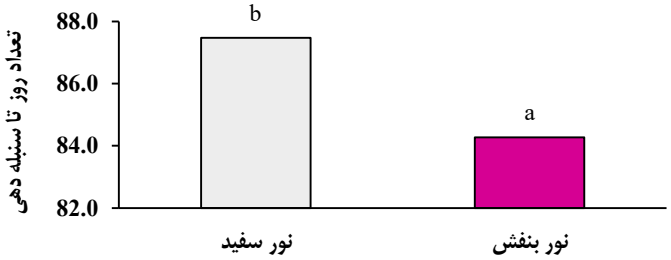
Figure 2. The effect of lightquality× variety× vernalization on days to heading in wheat. Similar letters show nonsignificant means based on Duncan's test.

۳–۱. تاثیر کیفیت نور بر تعداد روز تا سنبله‌دهی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی نور در سطح یک درصد معنی‌دار است (جدول ۱). ترکیب نور بنفش با سفید با میانگین ۸۴/۲۶ روز تا رسیدن کامل باعث تسریع نسل‌دهی در گندم زمستانه نسبت به نور سفید با میانگین ۸۷/۴۸ روز تا سنبله‌دهی شد (شکل ۳). چا و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند استفاده از لامپ‌های ویژه رشد و افزایش شدت و طول دوره نوری باعث افزایش سرعت رشد در رقم گندم بهاره‌سازی شد که در نتیجه ۳۸ روز پس از کشت وارد مرحله سنبله‌دهی شد.

شواهد نشان می‌دهد که در ناحیه پرتوهای بین ۶۱۰– ۷۰۰ نانومتر (قرمز) و پرتوهای بین ۴۰۰–۵۱۰ نانومتر (آبی) از طیف مرئی، کلروفیل و سایر رنگدانه‌ها دارای بیشینه جذب هستند. ترکیبی از دو طیف نوری قرمز و آبی به نسبت سه به یک (که به ظاهر بنفش دیده می‌شود) باعث برانگیخته شدن الکترون‌ها در فتوسیستم‌های سلول گیاهی می‌شود که انرژی نوری را به انرژی

شیمیایی در کلروفیل سلول‌های برگ گیاه تبدیل می‌کند (Hogewoning *et al*., 2010; Massa *et al*., 2008). به‌همین‌دلیل از این طیف برای تولید لامپ‌های ویژه رشد به منظور افزایش سرعت رشد و نمو گیاهان استفاده می‌کنند. وادار نمودن گیاه به گلدهی از طریق اعمال شدت نور در بهنژادی گیاهانی مانند چغندر قند نیز صورت می‌گیرد (یزدی‌صمدی و همکاران (۲۰۱۰)).



شکل ۳. اثر کیفیت نور بر تعداد روز تا سنبله‌دهی گندم. حروف غیر مشابه سر ستونها نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها در آزمون دانکن می‌باشد.

Figure 3. The effect of lightqualit on days to heading in wheat. Different letters show statistically significant means based on Duncan's test.

۳–۲. تاثیر روش‌های بهاره‌سازی بر تعداد روز تا سنبله‌دهی

بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱)، روش‌های مختلف بهاره‌سازی تفاوت معنی‌داری داشتند. بهاره‌سازی نوری (شکل ۴) با میانگین ۷۷/۹۱ کمترین و بهاره‌سازی سرمایی با ۹۵/۴۴ روز بیشترین تعداد روز تا سنبله‌دهی را داشت. چا و همکاران (۲۰۲۲) توانستند با تلفیق بهاره‌سازی سریع و بهنژادی سریع زمان تولید نسل در گندم زمستانه را به‌طور چشمگیری کاهش داده و ارقام زمستانه را پنج نسل در سال پرورش دهند. این پژوهشگران بذرها را در سطح خاک در معرض یک دوره نوری طولانی ۲۲ ساعت روشنایی در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده و سپس به شرایط بهنژادی سریع منتقل می‌نمودند. نتایج آنها نشان داد که از میان ۵۱ رقم گندم آزمایش شده، ۴۵ رقم به‌طور موفقیت‌آمیزی با این روش به گلدهی ر سیدند (شش رقم واکنش مطلوبی نداشتند).

شکل ٤. اثر روش‌های مختلف بهاره‌سازی بر تعداد روز تا سنبله‌دهی. حروف غیر مشابه سر ستونها نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها در آزمون دانکن می‌باشد.

Figure 4. The effect of vernalization methods on days to heading in wheat. Different letters show statistically significant means based on Duncan's test.

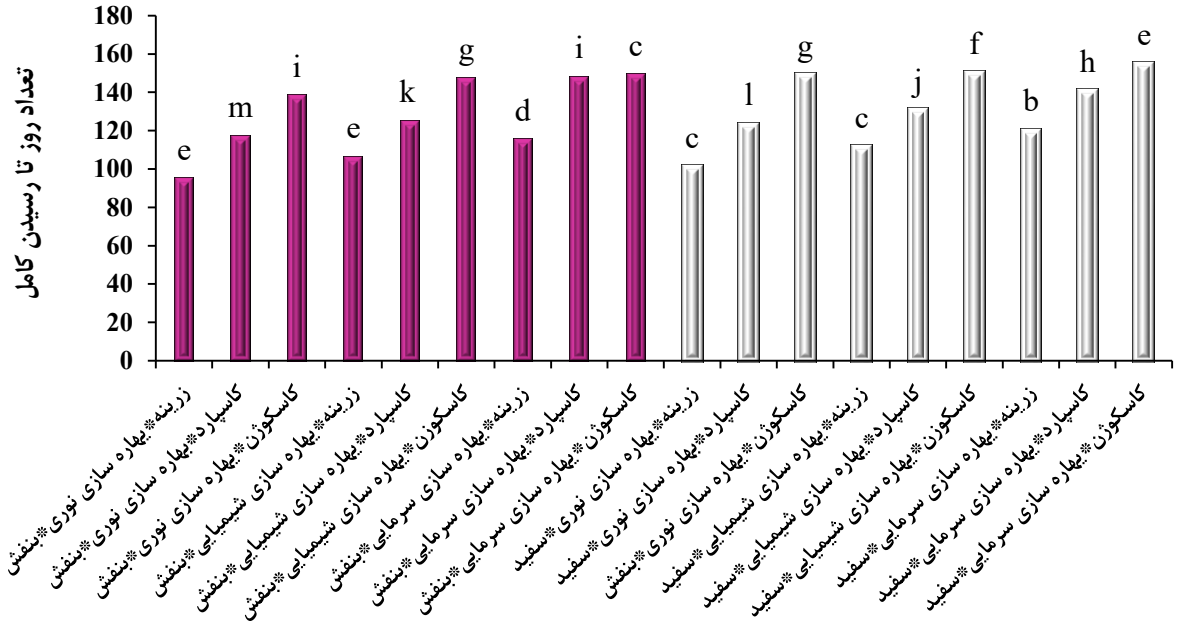
۳–۳. تاثیرکیفیت نور بر تعداد روز تا رسیدن کامل

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) نشان می‌دهد اثر اصلی نور در سطح یک درصد معنی‌دار شده است. ترکیب نور بنفش با سفید با میانگین ۱۲۶/۵۵ روز تا رسیدن کامل باعث تسریع نسل‌دهی در گندم زمستانه نسبت به نور سفید با میانگین ۱۳۰/۷۰ روز شد (شکل ۶).

مقایسه میانگین اثر متقابل روشنایی و رقم و روش‌های بهاره‌سازی (جداول ۱و۲) نشان داد که بین تیمارهای آزمایشی اختلاف معنی‌دار وجود دارد. بهاره‌سازی نوری به‌وسیله ترکیب نور بنفش و سفید در رقم زرینه با میانگین ۹۵ روز کمترین مدت زمان رسیدن کامل و بهاره‌سازی سرمایی (و سپس پرورش در اتاقک رشد بهنژادی سریع تحت نور سفید) در رقم گاسکوژن با میانگین ۱۵۴/۱۶روز بیشترین مدت روز تا رسیدن کامل را موجب شد. در مقایسه میانگین اثر متقابل کیفیت نور ×رقم × روش‌های بهاره‌سازی (شکل ۵) مشاهده شد که نور مخلوط بنفش و سفید موجب کاهش تعداد روز تا رسیدن کامل در تمام تیمارها می‌گردد.

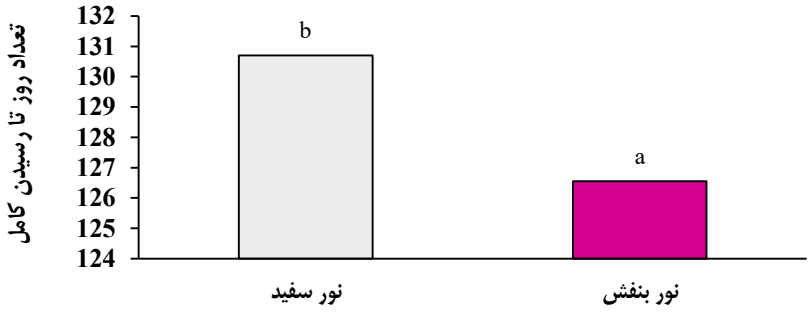
مطالعات اخیر نشان داده است که استفاده از نورهای مصنوعی و افزایش نوردوره در گلخانه و اتاقک‌های رشد باعث کاهش تعداد روز تا سنبله‌دهی، کاهش تعداد روز تا تشکیل جنین بالغ و کاهش تعداد روز تا رسیدن کامل در گندم می‌شود (Ghosh *et al*., 2018, Watson *et al*., 2018, Zheng *et al*., 2013). چا و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از لامپ‌های LED و افزایش نوردوره در اتاقک‌های رشد توانستند گندم نیمه‌رمستانه را سه نسل در سال پرورش دهند. محمدی و همکاران (۱۴۰۳) نشان دادند که پرورش گیاهان زیر ترکیب نور بنفش و سفید نسبت به نور سفید یک هفته نسل‌دهی گندم بهاره را در شرایط بهنژادی سریع سرعت می‌بخشد.

در شکل ۷ چرخه کامل بهنژادی سریع در رقم زرینه نشان داده شده است. بدین‌صورت که در این رقم ۱۴ روز پس از کشت (روز صفر) بهاره سازی نوری شروع شد، روز ۲۸ ام شروع فاز زایشی و ثابت شدن برگ‌های ساقه اصلی، روز ۷۰ ام شروع سنبله‌دهی، روز ۹۷ ام بلوغ جنین و روز ۱۱۴ ام رسیدن کامل این رقم بود.

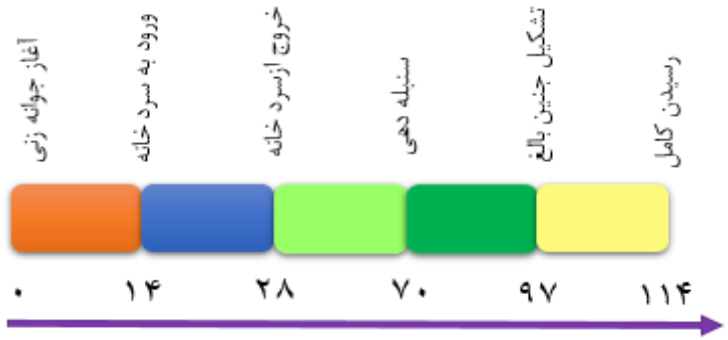


شکل ۵. اثر برهمکنش کیفیت نور×رقم × بهاره‌سازی بر تعداد روز تا رسیدن کامل. حروف مشابه سر ستونها نشان‌دهنده غیر معنی‌داری میانگین‌ها در آزمون دانکن می‌باشد.

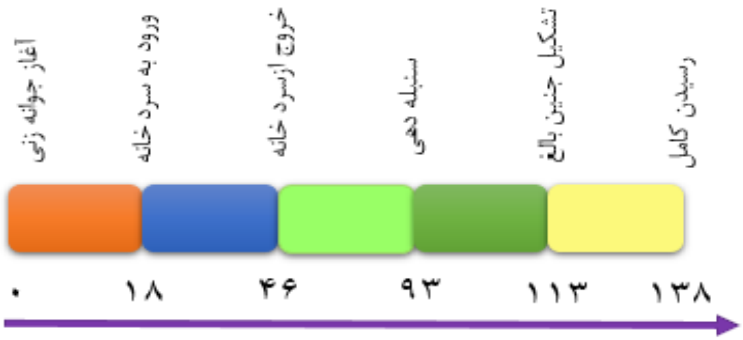
Figure 5. The effect of lightquality× variety× vernalization on days to maturity in wheat. Similar letters show nonsignificant means based on Duncan's test.



شکل ٦. اثر کیفیت نور بر تعداد روز تا رسیدن کامل گندم. حروف غیر مشابه سر ستونها نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها در آزمون دانکن می‌باشد.
Figure 6. The effect of light quality on days to maturity in wheat. Different letters show statistically significant means based on Duncan's test.



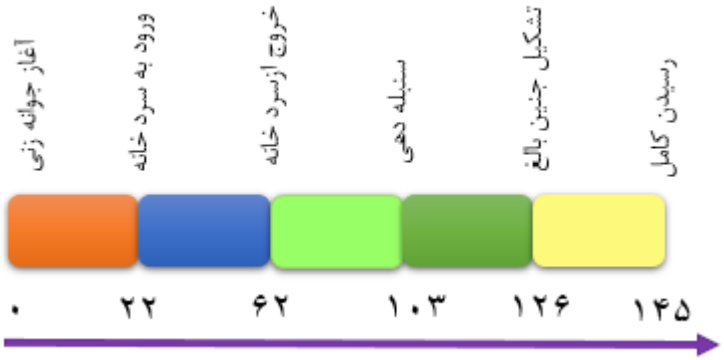
شکل ۷. نمو رقم زرینه با تیمار سرما و نور بنفش.
Figure 7. Growth cycle of Zarineh in speed breeding.



شکل ۸. نمو رقم گاسپارد با تیمار سرما و نور بنفش.
Figure 8. Growth cycle of Gaspard in speed breeding.

چرخه رشد گاسپارد در بهنژادی سریع (شکل ۸) نشان می‌دهد که ۱۸ روز پس از کشت، بهاره‌سازی نوری شروع شده است و روز ۴۶ ام شروع فاز زایشی و ثابت‌شدن برگ‌های ساقه اصلی، روز ۹۳ ام شروع سنبله‌دهی، روز ۱۱۳ ام بلوغ جنین و روز ۱۳۸ ام رسیدن کامل این رقم بوده است. شکل ۹ چرخه بهنژادی سریع در رقم گاسکوژن را نشان می‌دهد. در این رقم روز ۲۳ ام بهاره‌سازی نوری شروع می‌شود، روز ۶۳ ام شروع فاز زایشی و ثابت‌شدن برگ‌های ساقه اصلی، روز ۱۰۳ ام شروع سنبله‌دهی، روز ۱۲۴ ام بلوغ جنین و روز ۱۴۵ ام رسیدن کامل است.

ترکیب تعداد ۸۰ درصد LED قرمز و ۲۰ درصد LED آبی کارآمدترین ترکیب نور بنفش در فتوسنتز است که بیشترین رشد گیاهان در اتاقک‌های رشد را در پی دارد (Pennisi *et al*., 2019; Karimi *et al*., 2022). تاثیر مثبت نور بنفش بر سرعت رشد و رسیدن گیاهان در مطالعات مختلف بهنژادی سریع تایید شده است (Cha *et al*., 2022; Watson *et al*., 2018; Ghosh *et al*., 2018). سونگ و همکاران (۲۰۲۲) با اضافه‌کردن نور فرا سرخ به نور اتاقک رشد بهنژادی سریع ارقام کلزای به شدت زمستانه را وادار به گلدهی سریع نمودند.



شکل ۹. نمو رقم گاسکوژن با تیمار سرما و نور بنفش.
Figure 9. Growth cycle of Gascogen in speed breeding.

۳–۴. تاثیر شرایط بهنژادی سریع بر تعداد نهایی برگ

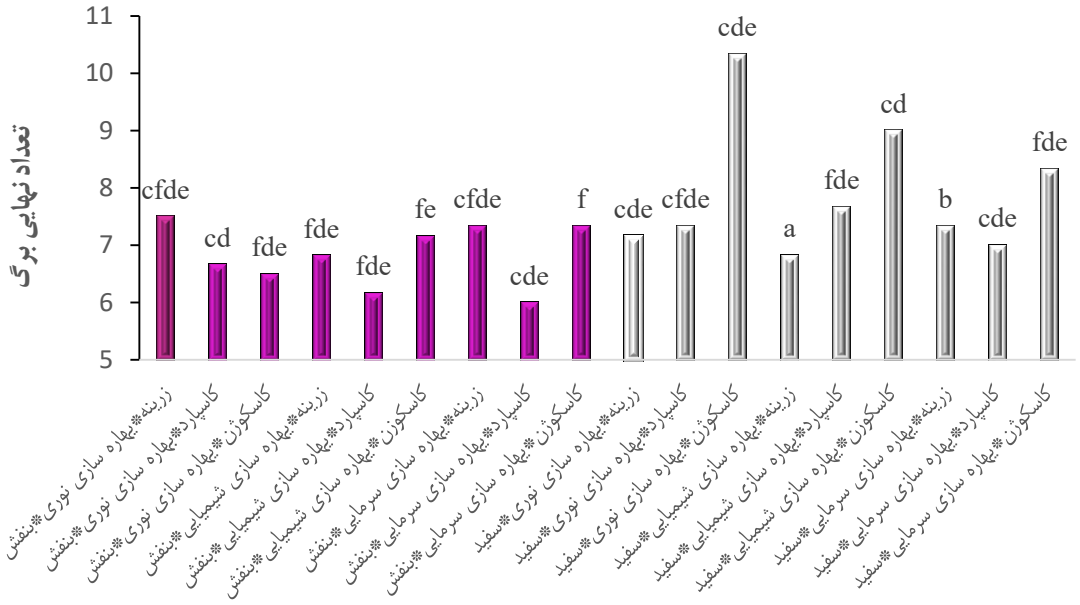
برای تعیین مراحل بیولوژیکی و فنولوژیکی غلات از روش‌های اندازه‌گیری واحد حرارتی، تعداد روز و یا روش شمارش تعداد برگ نهایی استفاده می‌شود. طبق نظر ونگ و همکاران (۱۹۹۵) از بین این روش‌ها، تنها تعداد نهایی برگ تغییرات بیولوژیک و فنولوژیک نظیر انتقال از مرحله رویشی به زایشی را مستقیما منعکس کرده و شاخص مناسبی برای تعیین نقطه تکمیل بهاره‌سازی است. بهاره‌سازی باعث کاهش تعداد نهایی برگ می‌شود. مطابق مقاله فوق تعیین تعداد نهایی برگ در شرایط کنترل‌شده به این صورت است که در انتهای هر دوره بهاره‌سازی، گیاهان از دمای پایین به شرایط دمایی ۲۰ درجه سانتیگراد منتقل و برگ‌ها یروی ساقه اصلی آنها شمارش می‌شوند تا اینکه برگ پرچم ظاهر شده و تعداد نهایی برگ روی ساقه اصلی تعیین شود. به‌عبارت دیگر، بهاره‌سازی وقتی به نقطه تکمیل می‌رسد که تعداد برگ گیاه ثابت باقی بماند و گیاه دیگر نتواند افزایش یا کاهش برگ داشته باشد.

اثر متقابل روشنایی با رقم با روش‌های بهاره‌سازی (شکل ۱۰) نشان داد که بین تیمارهای آزمایشی از نظر تعداد نهایی برگ اختلاف معنی‌دار وجود دارد. بهاره‌سازی و نور بنفش در رقم گاسپارد با میانگین ۶ برگ کمترین و نور سفید و بهاره‌سازی سرمایی در گاسکوژن با میانگین ۱۰/۱۷ بیشترین تعداد نهایی برگ را داشتند. سرحدی و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که در ارقام زمستانه غلات بعد از قرار گرفتن در مقابل سرمای بهاره‌سازی تعداد نهایی برگ کاهش می‌یابد و سپس به نقطه‌ای می‌رسد که بعد از آن تعداد نهایی برگ ثابت می‌ماند که این دامنه، محدوده تکمیل بهاره‌سازی نامیده می‌شود. بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱)، روش‌های مختلف بهاره‌سازی اگر چه از نظر آماری تفاوت معنی‌داری از نظر تعداد برگ نهایی داشتند، اما این تفاوت چشمگیر نبود؛ به‌طوری‌که بهاره‌سازی نوری (شکل ۱۱) با میانگین ۷/۲۲ کمترین و بهاره‌سازی سرمایی با ۷/۶۸ برگ بیشترین تعداد روز تا رسیدن کامل را داشت.

۳–۵. تاثیر شرایط بهنژادی سریع بر تعداد دانه در سنبله

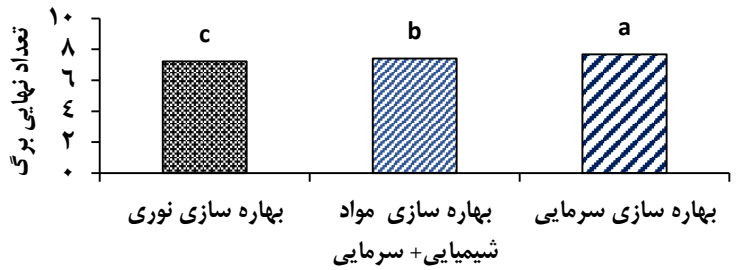
مقایسه میانگین اثر متقابل روشنایی در رقم در روش‌های بهاره‌سازی (شکل ۱۲) نشان داد که بین تیمارهای آزمایشی اختلاف معنی‌دار وجود دارد و تیمار بهاره‌سازی با نور سفید در رقم کاسگوژن با میانگین ۶/۸ کمترین تعداد دانه در سنبله و بهاره‌سازی با

نور سفید در رقم زرینه با میانگین ۱۶/۲ بیشترین تعداد دانه در سنبله را تولید کرد. چا و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که اگرچه بهنژادی سریع موجب کاهش تعداد دانه در سنبله در برخی از ارقام می‌شود اما این امر اشکالی در فرایند بهنژادی ایجاد نمی‌کند زیرا تعداد کافی دانه سالم برای برای نسل بعد تولید می‌شود.



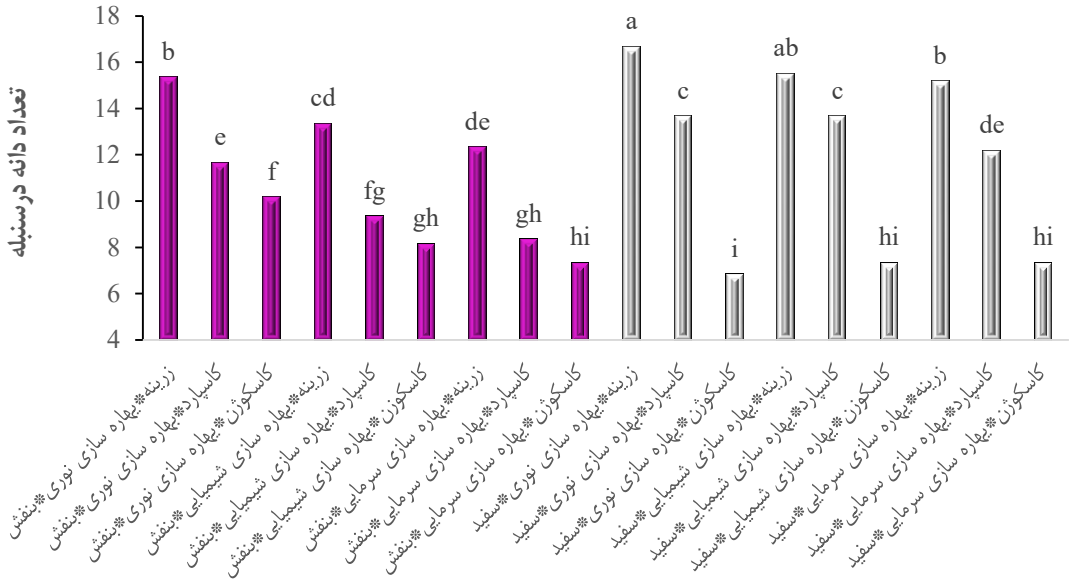
شکل ۱۰. اثر برهمکنش کیفیت نور×رقم × بهاره‌سازی بر تعداد نهایی برگ. حروف غیر مشابه سر ستونها نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین-ها در آزمون دانکن می‌باشد.

Figure 10. The effect of lightquality× variety× vernalization on the number of leaves in wheat. Different letters show significant means based on Duncan's test.



شکل ۱۱. اثر نوع تیمار بهاره‌سازی بر تعداد نهایی برگ. حروف غیر مشابه سر ستونها نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها در آزمون دانکن می‌باشد.

Figure 11. The effect of vernalization methods on the number of leaves in wheat. Different letters show statistically significant means based on Duncan's test.



شکل ۱۲. اثر برهمکنش کیفیت نور ×رقم × بهاره‌سازی بر تعداد دانه در سنبله. حروف غیر مشابه سر ستونها نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها در آزمون دانکن می‌باشد.

Figure 12. The effect of lightquality× variety× vernalization on the number of kernels/spike in wheat. Different letters show significant means based on Duncan's test.

۴. نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش تلفیق روش‌های مختلف بهاره‌سازی با تکنیک بهنژادی سریع بود. علاوه‌بر بهاره‌سازی سرمایی معمول، دو روش بهاره‌سازی شیمیایی–سرمایی و بهاره‌سازی نوری مورد آزمایش قرار گرفتند. بهاره‌سازی شیمیایی به کمک جبیرلیک‌اسید، بهاره-سازی سرمایی هفت تا ۱۰ روز مدت زمان بهاره‌سازی را در ارقام مختلف کاهش دادند. بهاره‌سازی نوری برای نخستین بار در این پژوهش ابداع و مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که می‌توان با استفاده از شدت نور و نوردوره طولانی نیاز بهاره‌سازی را از نمو گیاه حذف کرد. مقایسه تاثیر روش‌های مختلف بهاره‌سازی بر بهنژادی سریع نشان داد که بهاره‌سازی نوری نسبت به بهاره‌سازی شیمیایی–سرمایی در کاهش مدت نسل‌دهی گندم‌های زمستانه موثرتر بود؛ به‌طوری‌که اولی ۲۳ روز و دومی ۱۷ روز تعداد روز تا رسیدن گیاه را کاهش دادند. نتایج نشان داد که بین ارقام مورد مطالعه، رقم زرینه در شرایط بهاره‌سازی نوری به وسیله ترکیب نور بنفش و سفید با شدت ۴۲۰ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه (در فاصله ۳۰ سانتیمتری منبع نور) کمترین تعداد روز تا رسیدن جنین (۸۲) و رسیدن کامل (۹۵ روز) را داشت (شکل ۴). درحالی‌که برای همین رقم، بیشترین مدت زمان لازم برای رسیدن کامل در شرایط نور سفید و بهاره‌سازی سرمایی با میانگین ۱۱۸/۳۳ روز مشاهده شد. بیشترین زمان رسیدن کامل مربوط به رقم گاسکوژن در شرایط نور سفید و بهاره‌سازی سرمایی با میانگین ۱۵۴/۶۶ بود. تاثیر ترکیب نور بنفش و سفید بر صفات مرتبط با زودرسی (تعداد روز تا گلدهی، تعداد روز تا تشکیل جنین و تعداد روز تا رسیدن کامل) بیشتر از نور سفید بود و رقم‌هایی که با تیمار ترکیب نور بنفش و سفید رشد کرده بودند شش تا ۱۰ روز زودرس‌تر از تیمار نور سفید بودند. ارقام مورد مطالعه گندم از لحاظ صفت روز تا رسیدن کامل ۲۰ تا ۳۲ روز اختلاف داشتند. زرینه، گاسپارد و گاسکوژن در شرایط بهاره‌سازی سرمایی به‌ترتیب به ۱۱۴، ۱۳۷ و ۱۴۶، در شرایط سرمایی–شیمیایی ۱۰۶ ، ۱۲۴ و ۱۳۶ و در بهاره‌سازی نوری ۹۵، ۱۱۰ و ۱۲۵ روز تا رسیدن کامل نیاز داشتند (شکل ۴)؛ درحالی‌که این مدت در مزرعه بیش از ۲۷۰ روز به درازا می‌انجامد. ۲۳ روز پس از گرده‌افشانی، بهترین زمان کشت بذر نارس بود و زودتر از این زمان، جنین‌ها قادر به رشد در محیط کشت نبودند. محمدی و همکاران (۲۰۲۴) این زمان را در گندم بهاره ۱۸–۱۶ روز پس از گرده‌افشانی گزارش کرده‌اند. مشاهدات نشان داد که بین بهاره‌سازی و بهنژادی سریع رابطه مستقیم وجود دارد: یعنی هر چقدر شرایط بهنژادی سریع برای گیاه مطلوب‌تر باشد نیاز بهاره‌سازی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، تیمار سرما در بهاره‌سازی سرمایی سرعت پر شدن دانه و رسیدن دانه را نسبت به بهاره‌سازی نوری افزایش می‌دهد. برای مثال، اگر چه نیاز

سرمایی رقم زرینه برای سنبله‌دهی، در شرایط بهاره‌سازی نوری صفر است، زمانی‌که تحت بهاره‌سازی سرمایی قرار می‌گیرد سریع‌تر می‌رسد و مرحله پر شدن دانه آن نسبت به بهاره‌سازی نوری کوتاه‌تر می‌گردد. می‌توان نتیجه گرفت وجود دوره کوتاهی از سرما، دوره نسل‌دهی گندم‌های زمستانه را حتی در بهاره‌سازی نوری کوتاه‌تر می‌کند. نتایج نشان داد که شرایط شدت نور ۴۲۰ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه (در فاصله ۳۰ سانتیمتری منبع نور) با ترکیب لامپ بنفش ویژه رشد (۱۵٪) و نور LED سفید (۸۵٪)، نوردوره ۶/۱۸ ساعت (روز/شب) و دمای ۱۷/۲۳ درجه سانتیگراد (روز/شب) بهترین شرایط برای بهنژادی سریع گندم‌های زمستانه است. در این محیط مدت زمان بذر تا بذر در گندم‌های زمستانه مانند رقم زرینه به سه ماه کاهش یافت. بدین‌ترتیب امکان پرورش چهار نسل گندم زمستانه در سال برای بهنژادگران فراهم خواهد بود. دستاورد جالب این مطالعه که برای نخستین بار مشاهده و گزارش می‌شود این است که بهاره‌سازی گندم‌های زمستانه تنها به‌وسیله نور و بدون نیاز به سرما نیز امکان‌پذیر است.

۵. منابع

Currey, J., & Lopez R.G. (2013). Cuttings of impatient, pelargunium and petunia propagated under light-emitting diodes and high-pressure sodium lamp have vomparable growth, morphology, gas exchange and post-transplant performance. *Horticultural Science, 48*(4), 428-434.

Cha, J., Hickey, L.T., O'Connor, K., Alahmad, S., Lee, J.H., Dinglasan, E., Park, H., Lee, S.M., Hirsz, D., Kwon, S.W., Kwon, Y., Kim, K.M., Ko, J.M., Shin, D., & Dixon, L.E. (2022). Speed vernalization to accelerate generation advance in winter cereal crops. *Molecular Plant, 15*, 1–10.

Ghosh, S., Watson, A., Gonzalez-Navarro, O.E., Ramirez-Gonzalez, R.H., Yanes, L., Mendoza-Sua´rez, M., Simmonds, J., Wells, R., Rayner, T., & Green, P. (2018). Speed breeding in growth chambers and glasshouses for crop breeding and model plant research. *Nature Protocols, 13*, 2944–2963. https://doi.org/10.1038/s41596-018-0072-z.

Hickey, L.T., Hafeez, A., Robinson, H., Jackson, S.A., Leal-Bertioli, S.C.M., Tester, M., Gao, C., Godwin, I.D., Hayes, B.J., & Wulff, B.B.H. (2019). Breeding crops to feed 10 billion. *Nature Biotechnology, 37,* 744–754. https://doi.org/10.1038/s41587-019-0152-9.

Hogewoning, S.W., Trouwborst, G., Maljaars, H., Poorter, H., van Ieperen, W., & Harbinson, J. (2010). Blue light dose–responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *Journal of Experimental Botany*, *61,* 3107-3117.

Karimi, M., Aliniaeifard, S., Mohammadian, M., Hami, A., Seifkalhor, M., Rozban, M.R., & Mousavi, H. (2022). Effect of different light spectra on growth and morphology of lettuce in plant factory system. *Agricultural Mechanization and Systems Research, 23*(83), 69-86. Doi: 10.22092/amsr.2023.360729.1433.

Kiss, T., Balla, K., Veisz, O., Láng, L., Bedő, Z., & Griffiths, S. (2014) Allele frequencies in the *VRN-A1*, *VRN-B1* and *VRN-D1* vernalization response and *PPD-B1* and *PPD-D1* photoperiod sensitivity genes, and their effects on heading in a diverse set of wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.). *Molecular Breeding*, *34*(2), 297–310. pmid:25076837.

Kumar, A.A., Mishra, P., Kumari, K., & Panigrahi, K.C. (2012). Environmental stress influencing plant development and flowering. *Frontiers in Bioscience (Schol Ed), 4,* 1315-1324.

Kalaji, H.M., Jajoo, A., Oukarroum, A., Brestic, M., Zivcak, M., Samborska, I.A., Cetner, M.D., Łukasik, I., Goltsev, V., & Ladle, R.J. (2016). Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. *Acta Physiologiae Plantarum, 38,* 102. https://doi.org/10.1007/s11738-016-2113.

Liu, H., Zwer, P., Wang, H., Liu, C., Lu, Z., Wang, Y., & Yan, G. (2016). A fast generation cycling system for oat and triticale breeding. *Plant Breeding, 135*(5), 574-579.

Mahfoozi, S., Limin, A.E., & Fowler, D.B. (2001), Influence of vernalization and photoperiod responses on cold hardiness in winter cereals. *Crop Science, 41,* 1006-1011. https://doi.org/10.2135/cropsci2001.4141006x.

Mahfoozi, S., Hosseini-Salekdeh, G., Mardi, M., & Karimzadeh, G. (2008). Freezing resistance from the lab to the field in wheat: *What should we breed for Proceedings of the 10th Crop Science s Congress*, Karaj, Iran. (In Persian).

Massa, G.D., Kim, H.H., Wheeler, R.M., & Mitchell, C.A. (2008). Plant productivity in response to LED lighting. *Horticultural Science, 43,* 1951-1956.

Mohammadi, V., Soltani, F., & Najafi, T. (2024). The impact of drought stress and light quality on wheat speed breeding. *Iranian Journal of Field Crop Science*. (Under Press).

Ochatt, S.J., & Sangwan, R.S. (2008). In vitro shortening of generation time in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 93*(2), 133-137.

Pennisi, G., Orsini, F., Blasioli, S., *et al*. (2019). Resource use efficiency of indoor lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation as affected by red:blue ratio provided by LED lighting. *Scientific Reports, 9,* 14127. https://doi.org/10.1038/s41598-019-50783-z.

Rawson, H.M., Zajac, M., & Penros, L.D.J. (1998). Effects of seedling temperature and its duration on development of wheat cultivars differing in vernalization response. *Field Crops Research, 57,* 289-300.

Rosenzweig, C., & Tubiello, F.N. (1996). Effects of changes in minimum and maximum temperature on wheat yield in the central U.S.A simulation study. *Agricultural and Forest Meteorology, 80,* 215-230.

Samineni, S., Sen, M., Sajja, S.B., & Gaur, P.M. (2020). Rapid generation advance (RGA) in chickpea to produce up to seven generations per year and enable speed breeding. *The Crop Journal*, *8*(1), 164-169.

Sarhadi, E., Mahfoozi, S., Majidi Hervan, A., & Amini, A. (2012). Determination of vernalization requirement and cold tolerance in two bread wheat cultivars. *Iranian Journal of Crop Sciences*, *14*(1), 29 -43. (In Persian).

Sharifi, H.R., Kiani, M.R., & Gorbani, A. (2011). Response of some beard wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes to vernalization. *Seed and Plant Production Journal*, *29*(2), 129-145. Doi: 10.22092/sppj.2017.110428.

Shourbalal, S.K., Soleymani, A., & Javanmard, H.R. (2019). Shortening vernalization in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) using plant growth regulators and cold stratification. *Journal of Cleaner Production*, *219,* 443-450.

Song, Y., Duan, X., Wang, P., Li., X., Yuan, X., Wang, Zh., Wan, L., Yang, G., & Hong, D. (2022). Comprehensive speed breeding: A high-throughput and rapid generation system for long-day crops. *Plant Biotechnology Journal, 20,* 13–15. Doi: 10.1111/pbi.13726.

Sysoeva, M.I., Markovskaya, E.F., & Shibaeva, T.G. (2010). Plants under continuous light: A review. *Plant Stress 4,* 5–17.

Trevaskis, B., Bagnall, D.J., Ellis, M.H., Peacock, W.J., & Dennis, E.S. (2003). MADS box genes control vernalization-induced flowering in cereals. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 100, 13 099–13 104. Doi:10.1073/pnas.1635053100.

Trevaskis, B., Greenup, A., Peacock, W.J., & Dennis, E.S. (2009). The molecular biology of seasonal flowering-responses in *Arabidopsis* and the cereals. *Annals of Botany, 103*, 1165–1172. Doi:10.1093/aob/mcp063.

Trevaskis, B., Hemming, M.N., Fieg, S., Peacock, W.J., & Dennis, E.S. (2009). Regions associated with repression of the barley (*Hordeum vulgare*) *VERNALIZATION1* gene are not required for cold induction. *Molecular Genetics and Genomics*, *282,* 107–117. Doi:10.1007/s00438- 009-0449-3.

Trevaskis, B., Hemming, M.N., Peacock, W.J., & Dennis, E.S. (2008). Lowtemperature and daylength cues are integrated to regulate FLOWERING LOCUS T in barley. *Plant Physiology, 147,* 355–366. Doi:10.1104/pp.108.116418.

Trevaskis, B., Tadege, M., Hemming, M.N., Peacock, W.J., Dennis, E.S., & Sheldon, C. (2007). Short vegetative phase-like MADS-box genes inhibit floral meristem identity in barley. *Plant Physiology, 143,* 225–235. Doi:10.1104/pp.106.090860.

Trevaskis, B., Hemming, M., Dennis, E., & Peacock, J. (2007). The molecular basis of vernalization-induced flowering in cereals. *Trends in Plant Science, 12*(8), 352-357.

Turner, A., Beales, J., Faure, S., Dunford, R., & Laurie, D. (2005) The pseudo-response regulator Ppd-H1 provides adaptation to photoperiod in barley. *Science*, *310*, 1031–1034.

Tester, M., & Langridge, P. (2010). Breeding technologies to increase crop production in a changing world. *Science, 327*(5967), 818-822.

Watson, A., Ghosh, S., Williams, M., Cuddy, W., & Simmonds, J. (2018). Speed breeding is a powerful tool to accelerate crop research and breeding. *Nature Plants, 4,* 23–29.

Wheeler, R., Mackowiak, C.K., & Sager, J.C. (1991). Soybean stem growth under high pressure sodium with supplemental blue lighting. *Agronomy Journal, 83*, 903-906.

Yao, Y., Zhang, P., Liu, H., Lu, Zh., & Yan, G. (2016). A fully in vitro protocol towards large scale production of recombinant inbred lines in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 128,* 655–661.

Yao, Y., Zhang, P., Wang, H.B., Lu, Z.Y., Liu, C.J., Liu, H., & Yan, G.J. (2016). How to advance up to seven generations of canola (*Brassica napus* L.) per annum for the production of pure line populations. *Euphytica, 209*(1), 113-119.

Yan, G., Liu, H., Wang, H., Lu, Z., Wang, Y., Mullan, D., & Liu, C. (2017). Accelerated generation of selfed pure line plants for gene identification and crop breeding. *Frontiers in Plant Science, 8*, 1786.

Yazdi-Samadi, B., Mohammadi, V., & Abdmishani, S. (2010). *Breeding Field Crops*. *Nashre Daneshgahi, Tehran.*

Zheng, Z., Wang, H.B., Chen, G.D., Yan, G.J., & Liu, C.J. (2013). A procedure allowing up to eight generations of wheat and nine generations of barley per annum. *Euphytica, 191*(2), 311-316.