



Studying the grain growth process of wheat varieties under drought stress conditions using mathematical models

Afshin Tavakoli^{1*}, Alireza Hasani² and Kamran Afsahi³

1. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran (* Corresponding author: tavakoli@znu.ac.ir)
2. Ph.D. Student, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran
3. Assistant Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Comprehensive abstract

Introduction

Drought stress is one of the most important environmental stresses in different regions of the world, which causes the instability of crop production. More than 20% of the world's agricultural lands are affected by moderate to severe drought stress. The seed filling stage is the last stage in the plant development and the most important stage in the accumulation of dry matter in the seed. Seed filling rate and period and the effect of various environmental and agronomical factors on these two important parameters affecting seed weight can be predicted using the mathematical models. Quadratic, polynomial cubic, and logistic models are among the mathematical models that have been used efficiently to predict the grain growth process. The purpose of this research was to investigate the grain growth process and the accumulation of photosynthetic substances in the grain of different wheat cultivars under non-stress (control) and late season drought stress conditions using mathematical models and to investigate the effect of grain growth parameters on grain yield.

Materials and methods

This experiment was conducted as split plots based on randomized complete block design with four replications in the research field of Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran, in 2018-2019. Normal irrigation (control) and drought stress after flowering were considered as main factor and four wheat cultivars (Shiraz, Marvdasht, Azar2 and Roshan) as sub-factor. Drought stress was applied by interrupt irrigation until the soil water potential reached about -2 MPa. To investigate the grain growth process, samples were taken from the main spikes after flowering every week. After drying the spikes, the grains were separated from the spike, the weight of single-grain was calculated, and the grain growth process was investigated using different mathematical models. To determine the best model, various statistical indices including root mean square error (RMSE), corrected Akaike (AICc) and Δi were used, and the model with the lowest values of these indices was selected as the best model. Then, maximum and average grain filling rate, and grain filling period was estimated using the best selected model. The traits of plant height, main spike length, grain yield, biological yield and harvest index were also measured in addition to the grain growth process.

Research findings

Comparison of different models using RMSE, AICc and $i\Delta$ indices showed that Darroch and Baker model (model number one) was the best model to evaluate seeds growth process in this research. Investigating the growth of grains with this model showed that the final grain weight decreased in all



cultivars under drought stress conditions, and according to the prediction of this model, the lowest and highest final grain weight was belonged to Azar2 and Shiraz, respectively. Grain filling period decreased by 9.3% under drought stress conditions, and Shiraz (42.3 days) and Azar2 (34.4 days) had the highest and lowest grain filling period, respectively. Drought stress also reduced photosynthetic rate, leaf area durability, and number of grains per spike, but average and maximum grain filling rate were not affected by drought stress, which is probably due to the increase in the remobilization of photosynthetic materials under drought stress conditions. A positive and significant correlation was observed between grain filling period and grain yield under drought stress ($r=0.375$) and control ($r=0.634$) conditions. It can be concluded that the grain filling period was more important than the grain filling rate in this research. Drought stress decreased 1000-grain weight of the studied varieties by 18.3%, and Azar2 (47.70 g) and Marvdasht (33.50 g) had the highest and lowest 1000-grain weight, respectively. Grain yield and harvest index of the studied varieties also decreased by 40.8% and 22.4% under drought stress conditions, respectively, and Shiraz (4747.4 kg) and Azar2 (3179 kg) varieties produced the highest and lowest grain yield. Decrease in the harvest index indicated that drought stress reduced the grain yield more than the biological yield, which is probably due to the reducing of the grain filling period as well as disturbance in the grain filling process.

Conclusion

The results of this experiment showed that late season drought stress significantly reduced the photosynthetic rate, leaf area durability, number of grains per spike, 1000-grain weight and grain filling period, and finally led to a decrease in grain yield of the studied cultivars.

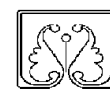
Keywords: Grain filling period, Grain filling rate, Grain yield and yield components, Late season drought stress

Received: May 28, 2023

Accepted: August 14, 2023

Cite this article:

Hasani, A.R., Tavakoli, A. and Afsahi, K. 2023. Studying the grain growth process of wheat varieties under drought stress conditions using mathematical models. *Cereal Research*, 13(2), pp. 99-114.



مطالعه روند رشد دانه ارقام گندم تحت شرایط تنش خشکی با استفاده از مدل‌های ریاضی

افشین توکلی^{۱*}، علیرضا حسنی^۲ و کامران افصیحی^۳

۱- دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران (* نویسنده مسئول):

tavakoli@znu.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

چکیده جامع

مقدمه: تنش خشکی، یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی در مناطق مختلف دنیا است که باعث ناپایداری عملکرد در گیاهان زراعی می‌شود. بیش از ۲۰ درصد از زمین‌های زراعی دنیا تحت تاثیر خشک‌سالی متوسط تا شدید قرار دارند. مرحله پر شدن دانه، آخرین مرحله در نمو گیاهان زراعی و مهم‌ترین مرحله در تجمع ماده خشک در دانه است. با استفاده از مدل‌های ریاضی می‌توان سرعت و مدت زمان پر شدن دانه و تاثیر عوامل مختلف محیطی و زراعی بر این دو ویژگی مهم تاثیرگذار بر وزن دانه را پیش‌بینی کرد. مدل‌های کوادراتیک، مکعب چند جمله‌ای و لجستیک از جمله مدل‌های ریاضی هستند که به‌صورت کارآمد جهت پیش‌بینی روند رشد دانه استفاده شده‌اند. هدف از اجرای این تحقیق، بررسی روند رشد دانه و تجمع مواد فتوسنتزی در دانه ارقام مختلف گندم تحت شرایط بدون تنش (شاهد) و تنش خشکی انتهای فصل با استفاده از مدل‌های ریاضی و بررسی تاثیر ویژگی‌های رشد دانه بر عملکرد دانه بود.

مواد و روش‌ها: آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ اجرا شد. آبیاری معمولی (شاهد) و تنش خشکی پس از گل‌دهی به‌عنوان فاکتور اصلی و چهار رقم گندم (شیراز، مرودشت، آذر ۲ و روشن) به‌عنوان فاکتور فرعی در نظر گرفته شدند. تنش خشکی با قطع آبیاری تا رسیدن پتانسیل آب خاک به حدود ۲- مگاپاسکال اعمال شد. جهت بررسی روند رشد دانه، پس از اتمام گل‌دهی به فاصله هفت روز یک‌بار از سنبله‌های اصلی نمونه‌گیری و پس از خشک شدن سنبله‌ها، دانه‌ها از سنبله جدا و وزن تک‌دانه محاسبه و سپس با استفاده از مدل‌های ریاضی مختلف، روند رشد دانه‌ها ارزیابی شد. به‌منظور تعیین بهترین مدل از شاخص‌های آماری مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، آکائیک تصحیح شده (AICc) و شاخص Δi استفاده و مدلی که کم‌ترین میزان این شاخص‌ها را داشت، به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد. در انتها حداکثر سرعت پر شدن دانه، میانگین سرعت پر شدن دانه و مدت زمان پر شدن دانه با استفاده از مدل برگزیده برآورد شد. علاوه بر روند رشد دانه، صفات ارتفاع بوته، طول سنبله اصلی، عملکرد دانه، عملکرد زیستی و شاخص برداشت نیز اندازه‌گیری شد.

یافته‌های تحقیق: مقایسه مدل‌های مختلف با استفاده از شاخص‌های RMSE، AICc و Δi نشان داد که مدل داروچ و بیکر (مدل شماره یک) بهترین مدل در ارزیابی روند رشد دانه‌ها در این تحقیق بود. بررسی رشد دانه با این مدل نشان داد که وزن نهایی دانه در تمامی ارقام در شرایط تنش خشکی کاهش یافت و طبق پیش‌بینی این مدل، کم‌ترین و بیش‌ترین وزن نهایی

دانه به ترتیب متعلق به رقم‌های آذر ۲ و شیراز بود. مدت زمان پرشدن دانه نیز تحت شرایط تنش خشکی کاهش ۹/۳ درصدی نشان داد و رقم‌های شیراز (۴۲/۳ روز) و آذر ۲ (۳۴/۴ روز) به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین مدت زمان پرشدن دانه را داشتند. تنش خشکی، سرعت فتوسنتز، دوام سطح برگ و تعداد دانه در سنبله را نیز کاهش داد، اما میانگین و حداکثر سرعت پرشدن دانه تحت تاثیر تنش خشکی قرار نگرفت که احتمالاً ناشی از افزایش انتقال مجدد مواد فتوسنتزی تحت شرایط تنش خشکی باشد. همبستگی مثبت و معنی‌داری بین مدت زمان پر شدن دانه با عملکرد دانه تحت شرایط تنش خشکی ($r=0/375$) و شاهد ($r=0/634$) مشاهده شد و می‌توان نتیجه گرفت که در این تحقیق مدت زمان پر شدن دانه مهم‌تر از سرعت پر شدن دانه بود. تنش خشکی، وزن هزار دانه ارقام مورد مطالعه را در حدود ۱۸/۳ درصد کاهش داد و رقم آذر ۲ و مرودشت به ترتیب با ۴۷/۷۰ و ۳۳/۵۰ گرم، بیش‌ترین و کم‌ترین وزن هزار دانه را داشتند. عملکرد دانه و شاخص برداشت ارقام مورد مطالعه نیز به ترتیب در حدود ۴۰/۸ درصد و ۲۲/۴ درصد تحت شرایط تنش خشکی کاهش یافتند و رقم‌های شیراز (۴۷۴۷/۴ کیلوگرم) و آذر ۲ (۳۱۷۹ کیلوگرم) بیش‌ترین و کم‌ترین عملکرد دانه را تولید کردند. کاهش شاخص برداشت نشان داد که تنش خشکی عملکرد دانه را بیش از عملکرد زیستی کاهش داده است که احتمالاً به دلیل کوتاه شدن دوره پرشدن دانه و اختلال در فرایند پر شدن دانه است.

نتیجه‌گیری: در مجموع نتایج این آزمایش نشان داد که تنش خشکی پایان فصل به‌طور معنی‌داری سرعت فتوسنتز، دوام سطح برگ، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه و مدت زمان پر شدن دانه ارقام مورد مطالعه را کاهش داد و در نهایت منجر به کاهش عملکرد دانه شد.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی انتهای فصل، سرعت پرشدن دانه، طول مدت پرشدن دانه، عملکرد و اجزای عملکرد دانه

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۳

نحوه استناد به این مقاله:

حسنی، علیرضا، توکلی، افشین، و افصحی، کامران. ۱۴۰۲. مطالعه روند رشد دانه ارقام گندم تحت شرایط تنش خشکی با استفاده از مدل‌های ریاضی. *تحقیقات غلات*، ۱۳(۲): ۹۹-۱۱۴.

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) با تخصیص حدود ۲۱۸ و ۶/۷ میلیون هکتار به ترتیب از زمین‌های جهان و ایران، جایگاه اول را از لحاظ مساحت برداشت شده گیاهان زراعی را در جهان و ایران به خود اختصاص داده است (FAO, 2021). تنش‌های غیرزیستی، از مهم‌ترین عوامل نقصان عملکرد در گیاهان به شمار می‌روند. پیش‌بینی می‌شود که حدود ۷۰ درصد از کاهش عملکرد محصولات زراعی در سطح جهان، حاصل تنش‌های غیرزیستی است (Acquaah, 2012). تنش خشکی، بزرگترین تنگنای پیش‌روی گیاهان به خصوص گیاهان زراعی است که باعث ناپایداری عملکرد در مناطق مختلف دنیا می‌شود. بیش از ۲۰ درصد از زمین‌های جهان که کاربری کشاورزی دارند، دچار خشکسالی متوسط تا شدید هستند (Kogan et al., 2019). وقوع تنش خشکی در مراحل مختلف زندگی گندم می‌تواند اثرات متفاوت با شدت‌های گوناگونی بر عملکرد نهایی گیاه برجای بگذارد، میزان تأثیر تنش خشکی به عواملی مانند شدت تنش خشکی، زمان وقوع تنش خشکی در طی مراحل رشد گیاه و مدت زمان تنش بستگی دارد (Guttieri et al., 2001; Riedesel et al., 2023). تنش خشکی آخر فصل عموماً با گرمای بالا همراه است که در صورت همراه شدن این دو عامل، با خاک‌های کم‌عمق و عوامل بیماری‌زا، عملکرد به میزان بیشتری کاهش می‌یابد (Kogan et al., 2019). پژوهش‌گران نشان دادند که صفاتی که باعث تحمل و سازگاری گندم به خشکی می‌شوند، می‌توانند به‌طور معنی‌داری باعث افزایش عملکرد در این گیاه شوند (Araus et al., 2002; Olivares-Villegas et al., 2007).

مرحله پر شدن دانه، از مراحل پایانی نمو گیاه می‌باشد و مهم‌ترین بخش در تسهیم و تجمع ماده خشک در دانه است. در این مرحله، گیاه از دو منبع جهت پر کردن دانه بهره می‌برد که یکی از منابع، فتوسنتز جاری صورت گرفته توسط اندام‌های سبز و دیگری، انتقال مجدد از قسمت‌هایی همچون ساقه‌ها و برگ‌ها می‌باشد که در این میان، بخش‌های سبز نقش پررنگ‌تری را نسبت به انتقال مجدد در طول پر شدن دانه، ایفا می‌کنند (Zavieh-Mavadat, 2018). تنش خشکی می‌تواند از طریق تأثیر بر پیری زودرس برگ‌ها باعث کاهش عملکرد در گندم شود (Engel et al., 2003).

در سال‌های اخیر با استفاده از مدل‌های ریاضی مختلف، روند رشد گیاه در هر یک از مراحل نمو آن پیش‌بینی شده است. مدل‌های ریاضی، شبیه‌سازی رشد گیاهان و فرایندهای نمو گیاهان را انجام می‌دهند (Honar et al., 2012) و همچنین امکان پیش‌بینی سیستم‌های گیاهی در شرایط محیطی مختلف را فراهم می‌سازند (Pourreza et al., 2009). مدل‌های ریاضی کارآمد، می‌توانند نقاط ضعف دانش ما از اتفاقات رخ داده طی فرآیندهای نمو را آشکار سازند (Ghasemi Maham et al., 2016). جهت پیش‌بینی روند پر شدن دانه در گیاهان زراعی از مدل‌های مختلف ریاضی استفاده می‌شود که از جمله این مدل‌ها که به صورت کارآمد جهت پیش‌بینی روند رشد دانه استفاده شده‌اند، می‌توان به مدل کوادراتیک (Nass and Reiser, 1975; Bruckner and Frohberg, 1987)، مدل مکعب چند جمله‌ای (Gebeyehou et al., 1982; Bauer et al., 1985) و معادلات لجستیکی (Darroch and Baker 1990) اشاره کرد. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان سرعت و مدت زمان پر شدن دانه و تأثیر عوامل مختلف محیطی و زراعی را بر این دو پارامتر مهم تأثیرگذار بر وزن دانه پیش‌بینی کرد (Li et al., 2001). این تحقیق با هدف بررسی روند رشد دانه و تجمع مواد فتوسنتزی در دانه ارقام مختلف گندم در شرایط شاهد و تنش خشکی انتهایی فصل با استفاده از مدل‌های ریاضی و بررسی تأثیر پارامترهای رشد دانه بر عملکرد دانه انجام شد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان انجام شد. محل اجرای آزمایش در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۰ دقیقه و ۵۱ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲۴ دقیقه و ۱۹ ثانیه غربی و ارتفاع ۱۵۹۷ متر از سطح دریا قرار دارد. بافت خاک مزرعه از نوع لومی رسی بود و برخی دیگر از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

آزمایش به‌صورت کرت‌های یک بار خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار اجرا شد. آبیاری معمولی (شاهد) و تنش خشکی پس از گل‌دهی به‌عنوان فاکتور اصلی و چهار رقم گندم (شیراز، مرودشت، آذر ۲ و روشن) به‌عنوان فاکتور فرعی در نظر گرفته شدند.

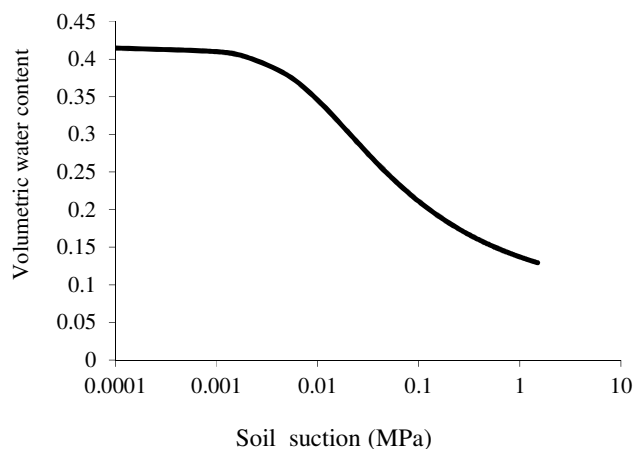
روز یکبار، از محدوده عمق ۲۵ سانتی متری خاک مزرعه صورت گرفت. زمین در مهرماه به صورت برگردان شخم زده شد و کرت‌های فرعی شامل ۶ خط ۸ متری با فاصله ۲۵ سانتی متر از یکدیگر ایجاد شدند. بذرها توسط قارچ‌کش کاربوکسی تیرام با نسبت دو در هزار ضدعفونی شدند و کاشت با استفاده از خطی کار غلات انجام گرفت. به منظور مبارزه با سن گندم، یک مرحله سم‌پاشی توسط سم دلتامترین صورت گرفت. جهت کنترل علف‌های هرز و جین دستی انجام شد.

تمام کرت‌ها تا زمان تکمیل گل‌دهی به صورت یکسان آبیاری شدند و پس از آن، برای تیمار شاهد جهت عدم وقوع تنش خشکی، زمانی که رطوبت خاک به ۷۰ درصد ظرفیت زراعی رسید، آبیاری مجدد انجام گرفت (Meskini Vishkaei *et al.*, 2017) و تنش خشکی با قطع آبیاری اعمال شد. قطع آبیاری تا رسیدن پتانسیل آب خاک به حدود ۲- مگاپاسکال ادامه یافت و پس از آن، آبیاری مجدد انجام گرفت. جهت تعیین پتانسیل آب خاک و مشخص کردن زمان آبیاری مجدد، از منحنی رطوبتی خاک مزرعه استفاده شد (شکل ۱). نمونه‌گیری هر چهار

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

Table 1. Some physical and chemical properties of the experimental soil

Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Absorbable potassium (ppm)	Absorbable phosphorus (ppm)	Total nitrogen (%)	Organic carbon (%)
42	27	31	266	5.6	0.07	1.31



شکل ۱- منحنی رطوبتی خاک مزرعه آزمایشی

Figure 1. Soil moisture curve of experimental field

$$Y = \frac{a}{(1+be^{-kx})^{\frac{1}{n}}} \quad (\text{Mohammadi et al., 2012}) \quad (3)$$

$$Y = a * (1 - be^{-kx}) \quad (\text{Richards, 1959}) \quad (4)$$

$$Y = a + \frac{b-a}{1+e^{\frac{x-c}{d}}} \quad (\text{Cao et al., 2019}) \quad (5)$$

$$Y = ae^{-(e^{(b-cx)})} \quad (\text{Richards, 1959}) \quad (6)$$

در این روابط، Y وزن خشک دانه (گرم)، W حداکثر وزن دانه (گرم)، X تعداد روز پس از گرده‌افشانی و a ، b ، c ، d ، n و k ضرایب مرتبط با طول و سرعت پر شدن دانه در این مدل‌ها هستند. پس از برازش مدل‌ها، جهت تعیین بهترین مدل از شاخص‌های آماری شامل RMSE (Root

به منظور بررسی روند رشد دانه پس از اتمام گل‌دهی، به فاصله هر هفت روز یکبار از سنبله‌های اصلی پنج بوته نمونه‌گیری شد و پس از خشک کردن سنبله‌ها در آون در دمای ۷۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت، دانه‌ها از سنبله جدا و پس از شمارش و توزین تمامی دانه‌ها، وزن تک‌دانه محاسبه شد سپس جهت بررسی روند رشد دانه، از شش مدل ریاضی طبق روابط زیر استفاده و پس از برازش مدل‌ها، بهترین مدل انتخاب شد:

$$Y = \frac{W}{1+Be^{-cx}} \quad (\text{Darroch and Baker, 1990}) \quad (1)$$

$$Y = \frac{W}{1+e^{(a-\frac{x}{b})}} \quad (\text{Naderi et al., 2000}) \quad (2)$$

زمانی که وزن دانه به ۹۵ درصد حداکثر وزن دانه برآورد شده برسد، در نظر گرفته شد. به همین منظور، طول پر شدن دانه بر اساس مدل (۱) برای زمانی که وزن دانه برابر با 0.95W باشد، با استفاده از رابطه (۱۳) به دست آمد (Duguid and Brûlé-Babel, 1994):

$$D = \frac{\ln B + 2.944}{C} \quad (13)$$

که در آن، B و C ضرایب برآورد شده توسط مدل و D طول دوره پر شدن دانه بر حسب روز است.

حداکثر و متوسط سرعت پر شدن دانه و نیز مدت زمان پر شدن دانه بر اساس روابط بالا برای هر کرت آزمایشی جداگانه محاسبه و سپس تجزیه واریانس داده‌های به دست آمده انجام شد. همچنین با استفاده از ضرایب برآورد شده، نمودار روند رشد دانه با کمک نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۹ ترسیم شد.

علاوه بر روند رشد دانه، صفات دیگری نیز با نمونه برداری ۱۰ بوته تصادفی از هر کرت اندازه‌گیری شدند. برای به دست آوردن وزن هزار دانه تعداد هزار عدد بذر توسط دستگاه بذر شمار اتوماتیک (Pfeuffer, Germany) شمارش و وزن شد. تعداد پنجه، تعداد دانه در سنبله و ارتفاع بوته نیز پس از رسیدگی کامل دانه‌ها اندازه‌گیری شدند. عملکرد زیستی پس از رسیدگی کامل دانه‌ها پس از حذف حاشیه‌ها، با برداشت بوته‌های مساحت چهار متر مربع از هر واحد آزمایشی اندازه‌گیری شد. عملکرد دانه نیز پس از جدا کردن دانه‌ها، اندازه‌گیری و بر حسب کیلوگرم در هکتار ثبت شد. شاخص برداشت نیز از نسبت عملکرد اقتصادی (EY) به عملکرد زیستی (BY) با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه شد.

$$HI = \frac{EY}{BY} \times 100 \quad (14)$$

پس از اندازه‌گیری صفات و ثبت داده‌ها، تجزیه واریانس داده‌ها، مقایسه میانگین‌ها و برآزش مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۲ انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها نیز با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. برای ترسیم نمودارها نیز از نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۹ استفاده شد.

نتایج و بحث

مقایسه مدل‌های مختلف و انتخاب مدل مناسب

نتایج حاصل از برآورد مقادیر شاخص‌های آماری RMSE، AICc و Δi برای شش مدل برآزش شده به

(Mean Square Error)، AIC (Akaike Information Criterion) و Δi استفاده و مدلی که کم‌ترین میزان این شاخص‌ها را داشت، به عنوان مدل برگزیده انتخاب شد:

$$RMSE = \sqrt{\sum(O_i - S_i)^2 / n} \quad (7)$$

در این رابطه، n تعداد داده‌ها، O مقدار مشاهده شده و S مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل است.

$$AIC = n \log\left(\frac{SSE}{n}\right) + 2k \quad (8)$$

که در آن، SSE مجموع مربعات خطا، n تعداد داده‌ها و k تعداد پارامترهای مدل است. جهت محاسبه مقدار آکائیک تصحیح شده نیز از رابطه زیر استفاده شد:

$$AICc = AIC + 2k + \left(\frac{2k(k+1)}{n-k-1}\right) \quad (9)$$

$$\Delta i = AICc - \min AICc \quad (10)$$

در این رابطه، AICc میزان آکائیک تصحیح شده و minAICc حداقل آکائیک تصحیح شده به دست آمده از مدل‌های مختلف مورد استفاده در این تحقیق بود.

پس از بررسی مدل‌های برآزش داده شده، مدل ۱ (Darroch and Baker 1990)، به عنوان بهترین مدل بر اساس شاخص‌های بالا انتخاب شد. در ادامه، دو ضریب B و C بر اساس این مدل برآورد و سپس میزان حداکثر سرعت پر شدن دانه، میانگین سرعت پر شدن دانه و طول مدت زمان پر شدن دانه محاسبه شد.

بر اساس مدل (۱) که یک مدل لجستیک است، حداکثر سرعت پر شدن دانه زمانی به دست می‌آید که وزن دانه به نصف وزن نهایی دانه رسیده باشد (Duguid and Brûlé-Babel, 1994). متوسط سرعت پر شدن دانه نیز نشان دهنده میانگین سرعت تجمع ماده خشک در دانه طی پر شدن دانه است. حداکثر و متوسط سرعت پر شدن دانه به ترتیب از روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه شد:

$$R = \frac{WC}{4} \quad (11)$$

$$R_{Mean} = \frac{W}{D} \quad (12)$$

در این روابط، R و R_{Mean} به ترتیب حداکثر و متوسط سرعت پر شدن دانه (گرم در روز)، W حداکثر وزن خشک دانه (گرم)، D طول دوره پر شدن دانه بر حسب روز و C ضریب برآورد شده توسط مدل است.

از لحاظ نظری، در مدل برآزش داده شده (مدل ۱)، وزن خشک دانه هرگز به حداکثر وزن خشک برآورد شده نخواهد رسید. بنابراین جهت برآورد طول دوره پر شدن دانه در این تحقیق فاصله زمانی شروع پر شدن دانه تا

ضرایب مدل (۱) دارای مفهوم زیستی هستند، این مدل به‌عنوان بهترین مدل جهت مطالعه روند رشد دانه انتخاب شد. از این مدل در تحقیقات دیگری نیز جهت مطالعه روند رشد دانه و برآورد پارامترهای سرعت و مدت زمان پرشدن دانه در گندم استفاده شده است (Brdar *et al.*, 2016; Mohammadi Gonbad *et al.*, 2006). پس از انتخاب مدل شماره (۱)، ضرایب W، B و C برای هر یک از رقم‌های گندم مورد مطالعه تحت دو شرایط آبیاری نرمال و تنش خشکی برآورد شد که نتایج در جدول ۳ ارائه شده است.

داده‌های وزن خشک دانه در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که گفته شد، مدل با کم‌ترین میزان شاخص‌های RMSE، AICc و Δi ، به‌عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب شد. در انتخاب بهترین مدل، علاوه بر شاخص‌های اشاره شده، سادگی مدل و داشتن مفاهیم زیستی ضرایب موجود در مدل نیز از معیارهای انتخاب مدل جهت بررسی روند رشد دانه بودند. مطابق نتایج به‌دست آمده، مدل‌های (۱) و (۲) دارای کم‌ترین مقادیر این شاخص‌ها بودند و بنابراین بهترین برآورد را بر داده‌های وزن خشک دانه داشتند (جدول ۲). در مقایسه این دو مدل، با توجه به اینکه

جدول ۲- مقایسه مدل‌ها بر اساس شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) آکائیک تصحیح شده (AICc) و Δi
Table 2. Comparison of the models based on root mean square error (RMSE), corrected Akaike (AICc) and Δi statistical indices

Model	RMSE	AICc	Δi
1	0.075825	-3276.49	0.0000
2	0.075825	-3276.49	0.0000
3	0.075811	-3274.53	1.9634
4	0.087583	-3186.65	89.8443
5	0.075804	-3274.59	1.9041
6	0.076883	-3267.86	8.6360

جدول ۳- ضرایب برآورد شده برای مدل شماره (۱) در ارقام مورد مطالعه تحت شرایط آبیاری نرمال و تنش خشکی
Table 3. Evaluated coefficients for the model number 1 in the studied varieties under normal irrigation and drought stress conditions

Variety	Condition	W	B	C
Azar2	Normal	0.0534	24.9190	0.1734
	Drought stress	0.0507	23.9915	0.1847
Roshan	Normal	0.0552	17.2194	0.1367
	Drought stress	0.0484	24.6679	0.1709
Marvdasht	Normal	0.0442	31.4965	0.1647
	Drought stress	0.0402	29.9445	0.1797
Shiraz	Normal	0.0507	47.3462	0.1531
	Drought stress	0.0439	52.4879	0.1729

روند رشد دانه

خشکی است (Tavakoli *et al.*, 2009). در رقم شیراز وقوع تنش خشکی بیش‌تر تجمع ماده خشک در دانه را کاهش داده است که منجر به افت بیش‌تر وزن نهایی دانه شده است (شکل ۲). سرعت پرشدن دانه و مدت پرشدن دانه تعیین‌کننده وزن نهایی دانه است (Sehgal *et al.*, 2018). نتایج تجزیه واریانس مدت زمان پرشدن دانه بیانگر تاثیر معنی‌دار تنش خشکی و رقم در سطح یک درصد است (جدول ۴). مقایسه میانگین مدت زمان پرشدن دانه نشان‌دهنده کاهش ۹/۳ درصدی این پارامتر در شرایط تنش خشکی است (جدول ۵). تنش خشکی

بررسی روند رشد دانه با مدل (۱) نشان داد که وزن نهایی دانه در تمام ارقام در شرایط تنش خشکی نسبت به شاهد کاهش یافته است (جدول ۳ و شکل ۲). میزان کاهش وزن نهایی دانه طبق پیش‌بینی انجام شده توسط مدل در ارقام مختلف متفاوت بود. رقم آذر ۲ (۵ درصد) کم‌ترین و رقم شیراز (۱۳/۴ درصد) بیش‌ترین میزان کاهش وزن نهایی دانه را نشان دادند (جدول ۳). رقم شیراز یک رقم آبی و حساس به تنش خشکی است، ولی رقم آذر ۲ یک رقم دیم با مقاومت بیش‌تر نسبت به تنش

نتایج تجزیه واریانس میانگین و حداکثر سرعت پر شدن دانه نشان داد که ارقام مختلف تفاوت معنی داری از نظر میانگین و حداکثر سرعت پر شدن دانه داشتند (جدول ۴) و بیشترین مقادیر میانگین و حداکثر سرعت پر شدن دانه در رقم آذر ۲ به ترتیب با مقادیر ۰/۰۰۱۵۲ و ۰/۰۰۲۳۵ گرم در روز به ثبت رسید. کمترین میانگین سرعت پر شدن دانه نیز با مقدار ۰/۰۰۱۱۲ گرم در روز در رقم شیراز مشاهده شد که تفاوت معنی داری با رقم مرودشت نداشت (جدول ۵).

طول دوره پر شدن دانه همبستگی مثبت و معنی داری با عملکرد دانه تحت شرایط تنش خشکی ($r = 0.375$) و شاهد ($r = 0.634$) نشان داد. بالاتر بودن میزان همبستگی در شرایط شاهد نشان داد که افزایش طول دوره پر شدن دانه در این شرایط از اهمیت بیشتری برخوردار است و افزایش آن می تواند به بهبود عملکرد کمک کند. در مقابل سرعت پر شدن دانه در هر دو شرایط همبستگی منفی و معنی داری با عملکرد دانه نشان داد. بنابراین می توان اهمیت بیشتر دوره پر شدن دانه نسبت به سرعت پر شدن دانه را در این آزمایش نتیجه گیری کرد.

ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان داد که اثر ساده رقم و آبیاری بر ارتفاع بوته به ترتیب در سطوح احتمال یک و پنج درصد معنی دار بود (جدول ۴). مقایسه میانگین رقم ها نشان داد که رقم آذر ۲ با ۱۰۱/۵۳ سانتی متر بیشترین و رقم مرودشت با ۸۶/۸۴ سانتی متر کمترین میزان ارتفاع بوته را داشتند که با دو رقم شیراز و روشن تفاوت معنی داری نداشت. نتایج نشان داد که اعمال تنش خشکی پس از گل دهی، باعث کاهش ۸/۱۳ درصدی ارتفاع بوته نسبت به شرایط شاهد شد (جدول ۵). کاهش کم ارتفاع بوته در شرایط تنش به این دلیل بوده است که تنش خشکی در این تحقیق در مرحله گلدهی اعمال شد و بوته های گندم بخش زیادی از رشد طولی خود را تا این زمان انجام داده اند و قطع آبیاری در این مرحله با اینکه کاهش معنی داری در ارتفاع بوته ایجاد کرد، ولی این تاثیر زیاد نبود (جدول ۵). تاثیر کم تنش خشکی در مرحله گلدهی بر ارتفاع بوته در تحقیقات محققین دیگر نیز گزارش شده است (Nabipour et al., 2002; Shahbazi et al., 2016).

باعث تسریع فرایند پیری در گیاه می شود و طول دوره پر شدن دانه را کاهش می دهد (Sehgal et al., 2018). پر شدن دانه در گیاهان جو، گندم، برنج و سورگوم ارتباط نزدیکی با پیری گیاه و فرایند پیری نیز ارتباط نزدیکی با هورمون آبسزیک اسید (ABA) دارد (Yu et al., 2015). هورمون ABA می تواند باعث القاء هماهنگ بیان ژن های مرتبط با پیری شود (Yang et al., 2004). در این تحقیق نیز احتمالاً تنش خشکی با القاء فرایند پیری در ارقام گندم مورد مطالعه، طول دوره پر شدن دانه را کاهش داده است. کاهش طول دوره پر شدن دانه بر اثر تنش خشکی در تحقیقات محققین دیگر نیز گزارش شده است که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد (Ahmadi and Baker, 2001; Ahmadi et al., 2009).

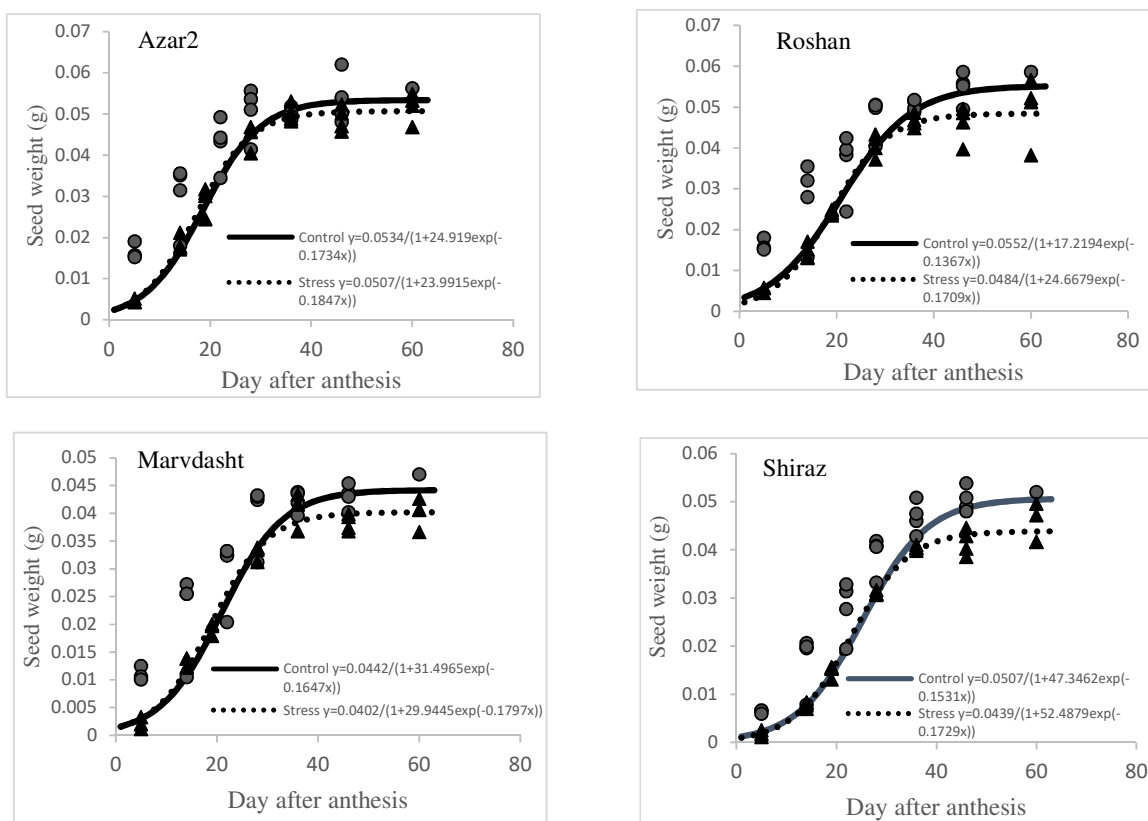
علاوه بر تنش خشکی ارقام مورد مطالعه نیز از نظر طول دوره پر شدن دانه با یکدیگر اختلاف معنی دار داشتند (جدول ۴). بیشترین مدت پر شدن دانه (۴۲/۳ روز) مربوط به رقم شیراز و کوتاهترین مدت زمان مربوط به رقم آذر ۲ (۳۴/۴ روز) است (جدول ۵). ارقام مختلف از لحاظ ژنتیکی با یکدیگر متفاوت بوده و طول دوره رشد همچنین طول دوره پر شدن دانه آنها متفاوت است. دستور و همکاران (Dastoor et al., 2014) با مطالعه ده لاین گندم مشاهده کردند که طول دوره پر شدن دانه در لاین های مطالعه شده در شرایط تنش و شرایط شاهد با یکدیگر متفاوت بود.

نتایج تجزیه واریانس میانگین سرعت پر شدن دانه و حداکثر سرعت پر شدن دانه نشان داد که این پارامترها تحت تاثیر تنش خشکی قرار نگرفتند (جدول های ۴ و ۵). سرعت پر شدن دانه تحت تاثیر میزان فراهمی مواد فتوسنتزی و انتقال آن به دانه ها است (Sehgal et al., 2018). مواد فتوسنتزی لازم جهت پر شدن دانه از فتوسنتز جاری و انتقال مجدد مواد فتوسنتزی تامین می شود. تنش خشکی فتوسنتز و انتقال مجدد را به صورت متفاوتی تحت تاثیر قرار می دهد و باعث کاهش فتوسنتز جاری و افزایش انتقال مجدد مواد فتوسنتزی می شود (Sehgal et al., 2018). به نظر می رسد در این پژوهش نیز احتمالاً افزایش انتقال مجدد مواد فتوسنتزی تحت شرایط تنش خشکی تا حدی کمبود فتوسنتز جاری را جبران کرده و باعث شده است که سرعت پر شدن دانه تحت تاثیر قرار نگیرد.

اجزای عملکرد

نتایج تجزیه واریانس تعداد پنجه در بوته بیانگر تاثیر معنی‌دار بین ارقام گندم در سطح احتمال یک درصد بود، در حالی که تنش خشکی تاثیر معنی‌داری بر این صفت نداشت (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که رقم آذر ۲ بیش‌ترین و رقم شیراز کم‌ترین تعداد پنجه را داشتند (جدول ۵). تعداد پنجه از ویژگی‌های ژنتیکی ارقام است که تحت تاثیر شرایط محیطی هم قرار می‌گیرد. در این مطالعه، تنش خشکی در زمان گلدهی و بعد از شکل‌گیری پنجه‌ها اعمال شد و بنابراین تاثیری بر این صفت نداشت. تعداد دانه در سنبله نیز تحت تاثیر تنش خشکی قرار نگرفت، ولی ارقام در سطح احتمال یک درصد با یکدیگر تفاوت داشتند (جدول ۴). مقایسه میانگین تعداد دانه در سنبله بیانگر این بود که رقم مروودشت (۴۵/۷ عدد) بیش‌ترین و رقم آذر ۲ (۲۹/۳۷ عدد) کم‌ترین

تعداد دانه در سنبله را به‌خود اختصاص دادند (جدول ۵). مطابق با نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش مبنی بر معنی‌دار نشدن اثر تنش خشکی بر تعداد دانه در سنبله، سنجری و یزدان سپاس (Sanjari and Yazdansepas, 2008) و کیمورتو و همکاران (Kimurto *et al.*, 2003) نیز گزارش کردند که ارقام گندم مورد بررسی آن‌ها از نظر تعداد دانه در سنبله تحت تاثیر تنش خشکی قرار نگرفتند. در مطالعه باغبان خلیل‌آباد و همکاران (Baghban *et al.*, 2019) نیز اعمال تنش‌های خفیف تا متوسط، تاثیر معنی‌داری بر تعداد دانه در سنبله نداشت. با توجه به اینکه در تحقیق حاضر، تنش خشکی پس از تکمیل گل‌دهی اعمال شده است و تعداد دانه در سنبله در مراحل قبل از اعمال تنش تعیین شده است، بنابراین صفات فوق تحت تاثیر تنش خشکی پس از مرحله گل‌دهی قرار نگرفتند.



شکل ۲- روند انباشت ماده خشک دانه ارقام گندم در شرایط شاهد و تنش خشکی

Figure 2. Grain dry matter accumulation of wheat cultivars under control and drought stress conditions

جدول ۴- تجزیه واریانس صفات، در ارقام گندم در شرایط شاهد و تنش خشکی

Table 4. Analysis of variance for the studied traits in wheat cultivars under control and drought stress conditions

Source of variation	df	Mean square									
		Plant height	No. of tiller	No. of grains per spike	1000-grain weight	Grain yield	Biological yield	Harvest index	Grain filling period	Maximum grain filling rate	Average grain filling rate
Replication (R)	3	13.44 ^{ns}	0.08 ^{ns}	14.49 ^{ns}	1.27 ^{ns}	611178.61 ^{ns}	1003286.38 ^{ns}	23.05 ^{ns}	122.01414 ^{**}	2.87785 ^{ns}	3.34276 ^{ns}
Irrigation (I)	1	477.09 ^{**}	0.18 ^{ns}	107.31 ^{ns}	533.75 ^{**}	35315372.86 ^{**}	83043731.47 ^{**}	577.61 ^{**}	112.84032 ^{**}	5.74376 ^{ns}	2.21678 ^{ns}
E _a (R×I)	3	24.01	0.03	65.80	11.62	152421.60	786422.13	17.25	2.14016	6.95749	1.36597
Cultivar (C)	3	398.41 ^{**}	0.51 ^{**}	527.22 ^{**}	256.75 ^{**}	3604186.11 ^{**}	5357726.52 [*]	125.65 ^{**}	260.25984 ^{**}	1.34055 ^{**}	8.56356 ^{**}
C×I	3	2.24 ^{ns}	0.01 ^{ns}	18.67 ^{ns}	4.59 ^{ns}	479453.63 ^{ns}	1900661.97 ^{ns}	25.96 ^{ns}	6.47399 ^{ns}	4.63666 ^{ns}	1.03973 ^{ns}
E _b	18	343.09	1.58	606.76	113.76	3717041.57	25086063.9	165.75	156.43831	7.98828	1.10362
CV (%)	-	4.78	35.43	14.64	6.19	11.07	10.89	8.17	7.66	10.47	6.14

^{ns}, * and ** Not-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

جدول ۵- مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری شده در ارقام گندم مورد مطالعه و بین دو شرایط شاهد و تنش خشکی

Table 5. Comparisons of means of the measured traits in the studied wheat cultivars and between control and drought stress conditions

Treatment		Plant height (cm)	No. of tiller	No. of grains per spike	1000-grain weight (g)	Grain yield (kg.ha ⁻¹)	Biological yield (kg.ha ⁻¹)	Harvest index (%)	Grain filling period (day)	Maximum grain filling rate (g/day)	Average grain filling rate (g/day)
Irrigation	Control	95.03 ^a	0.91 ^a	41.46 ^a	44.66 ^a	5152.2 ^a	12450 ^a	41.38 ^a	40.345 ^a	0.00199 ^a	0.00127 ^a
	Stress	87.30 ^b	0.76 ^a	37.80 ^a	36.49 ^b	3051.1 ^b	9228.1 ^b	32.88 ^b	36.589 ^b	0.00202 ^a	0.00127 ^a
	Azar2	101.53 ^a	1.20 ^a	29.37 ^c	47.07 ^a	3179 ^c	9632.9 ^b	32.69 ^b	34.416 ^c	0.00235 ^a	0.00152 ^a
Cultivar	Shiraz	89.74 ^b	0.65 ^b	44.55 ^a	39.47 ^c	4747.4 ^a	11266.7 ^a	41.36 ^a	42.305 ^a	0.00181 ^b	0.00112 ^c
	Marvdasht	86.84 ^b	0.67 ^b	47.50 ^a	33.50 ^d	4090.1 ^b	11413.3 ^a	35.06 ^b	39.401 ^{ab}	0.00197 ^b	0.00113 ^c
	Roshan	86.55 ^b	0.82 ^b	37.10 ^b	42.25 ^b	4390 ^{ab}	11043.3 ^a	39.41 ^a	37.748 ^b	0.00191 ^b	0.00132 ^b

Means followed by similar letter in each columns are not significantly different based on Duncan's multiple range test at 5% probability level.

اثرات جبرانی اجزای عملکرد بر یکدیگر است که با افزایش یکی از اجزاء، جزء دیگر عملکرد کاهش می‌یابد.

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده آبیاری و رقم بر عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). با توجه به جدول مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۵)، خشکی انتهایی فصل تأثیر منفی بر عملکرد دانه داشت و مقدار آن را $40/8$ درصد در مقایسه با شرایط شاهد کاهش داد. کاهش عملکرد دانه ناشی از کاهش اجزای عملکرد است. در این تحقیق، تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار وزن هزار دانه شد، ولی کاهش تعداد دانه در سنبله معنی‌دار نبود (جدول ۵). کاهش عملکرد دانه در اثر تنش خشکی انتهایی فصل توسط محققین دیگر نیز گزارش شده است (Kirigwi *et al.*, 2004; Rajala *et al.*, 2009). اعمال تنش خشکی باعث ایجاد اختلال در فرآیند فتوسنتز جاری گیاه می‌شود (Ehdaie *et al.*, 2008)، و در نتیجه تأمین کربوهیدرات‌هایی که باعث پر شدن دانه از طریق منابع حاصل از فتوسنتز جاری می‌شوند، دچار اختلال شده و در نهایت این موضوع باعث کاهش شدید عملکرد در تنش‌های اعمال شده در انتهای فصل می‌شود (Shah and Paulsen, 2003). در این تحقیق، تنش خشکی با کاهش طول دوره پر شدن دانه، وزن نهایی دانه را کاهش داد و باعث کاهش عملکرد دانه شد. همبستگی مثبت و معنی‌داری ($r = 0/607$) بین عملکرد دانه و طول دوره پر شدن دانه مشاهده شد. گونزالز و همکاران (Gonzalez *et al.*, 2010) بیان کردند که تنش خشکی از طریق کاهش میزان فتوسنتز و طول عمر بافت‌های فتوسنتز کننده گیاه مانند برگ‌ها، تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه را که از اجزای مهم عملکرد نهایی هستند، کاهش می‌دهد و در نهایت منجر به کاهش عملکرد دانه می‌شود. مقایسه میانگین عملکرد دانه ارقام مورد بررسی تفاوت معنی‌داری را نشان داد و رقم شیراز بیش‌ترین ($4747/4$ کیلوگرم) و آذر ۲ کم‌ترین (3179 کیلوگرم) میزان عملکرد دانه را داشتند (جدول ۵). کم‌تر بودن عملکرد دانه رقم آذر ۲ در بین همه ارقام مورد مطالعه مربوط به تعداد دانه کم‌تر آن در سنبله است (جدول ۵).

نتایج تجزیه واریانس عملکرد زیستی نشان داد که این صفت، تحت تأثیر معنی‌دار ارقام مختلف و شرایط آبیاری

نتایج تجزیه واریانس وزن هزار دانه نشان داد که اثر ساده آبیاری و رقم تأثیر معنی‌داری بر این صفت در سطح احتمال یک درصد داشتند (جدول ۴). مقایسه میانگین وزن هزار دانه نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش $18/3$ درصد وزن هزار دانه نسبت به شرایط شاهد شد (جدول ۵). کاهش وزن هزار دانه در اثر تنش خشکی آخر فصل، در مطالعات مختلف مشاهده شده و دلایل گوناگونی برای آن بیان شده است که از جمله می‌توان به کاهش تقسیم سلولی که منجر به کاهش تعداد سلول‌های آندوسپرم می‌شود، کاهش عرضه مواد فتوسنتزی که منجر به کاهش بیوسنتز نشاسته در سلول‌های آندوسپرم می‌شود (Ahmadi and Baker, 2001) و نیز کاهش فعالیت آنزیم‌های موثر در بیوسنتز نشاسته اشاره کرد. در بیوسنتز نشاسته چندین آنزیم نقش مهمی دارند که از آن جمله می‌توان به AGPase، SSS و SBE اشاره کرد (Morell *et al.*, 2001). مطالعات مختلف نشان داده است که میزان بیان ژن‌های رمزکننده این آنزیم‌ها و نیز فعالیت این آنزیم‌ها تحت شرایط تنش خشکی کاهش می‌یابد (Hurkman *et al.*, 2003; Saedipour, 2011; Bing *et al.*, 2014). بنابراین کاهش تجمع کربوهیدرات‌ها به دلیل محدودیت‌های وجود ساکارز در دانه، کاهش سنتز نشاسته در دانه‌های در حال رشد و کاهش طول دوره پر شدن دانه در نهایت باعث کاهش اندازه بذر می‌شود. کاهش وزن هزار دانه در اثر تنش خشکی در دوره پر شدن دانه به میزان $11/2$ و $26/4$ درصد به ترتیب در تحقیقات ملک و همکاران (Malek *et al.*, 2019) و عبدلی و سعیدی (Abdoli and Saeidi, 2012) نیز گزارش شده است.

نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها نشان دهنده تفاوت معنی‌دار ارقام مورد مطالعه از نظر وزن هزار دانه بود. در بین ارقام مورد بررسی، رقم آذر ۲ ($47/70$ گرم) بیش‌ترین و رقم مرودشت ($33/50$ گرم) کم‌ترین وزن هزار دانه را داشتند (جدول ۵). وزن هزار دانه همبستگی مثبت و معنی‌داری را با میانگین سرعت پر شدن دانه در شرایط تنش ($r = 0/877$) و شاهد ($r = 0/755$) نشان داد. در حالی که مدت زمان پر شدن دانه با آن همبستگی نداشت. بنابراین می‌توان گفت افزایش سرعت پر شدن دانه باعث افزایش وزن هزار دانه می‌شود. وزن هزار دانه همبستگی منفی و معنی‌داری را با جزء دیگر عملکرد یعنی تعداد دانه در سنبله در هر دو شرایط تنش ($r = -0/610$) و شاهد ($r = -0/838$) نشان داد. این همبستگی منفی مربوط به

بیشترین و رقم‌های آذر ۲ و مرودشت کمترین میزان شاخص برداشت را نشان دادند (جدول ۵).

نتیجه‌گیری کلی

بررسی روند رشد دانه با استفاده از مدل‌های ریاضی نشان داد که این مدل‌ها می‌توانند با دقت زیاد شاخص‌های رشد دانه، مانند سرعت پر شدن و طول دوره پر شدن دانه را پیش‌بینی کنند. در بین شاخص‌های برآورد شده، طول دوره پر شدن دانه همبستگی خوبی با عملکرد دانه نشان داد و بنابراین از این پارامتر می‌توان در انتخاب ارقام و بهبود شرایط زراعی جهت افزایش تولید استفاده کرد. همچنین پیش‌بینی مدل بیانگر کاهش طول دوره پر شدن دانه در شرایط تنش خشکی بود که به دنبال خود وزن هزار دانه و عملکرد دانه را کاهش داد. در بین رقم‌های گندم مطالعه شده، رقم آذر ۲ که یک رقم دیم و مقاوم به خشکی است، بیشترین سرعت پر شدن دانه و بیشترین وزن نهایی دانه را داشت، ولی طول دوره پر شدن دانه آن کم‌تر از سایر رقم‌ها بود و به علت پایین بودن تعداد دانه در خوشه در این رقم، عملکرد نهایی دانه آن نیز کم‌تر از سه رقم دیگر مطالعه شده بود.

تضاد منافع

نویسنده (گان) تایید می‌کند که این تحقیق در غیاب هر گونه روابط تجاری یا مالی که می‌تواند به عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

رعایت اخلاق در نشر

نویسنده (گان) اعلام می‌کند که در نگارش این مقاله به‌طور کامل از اخلاق نشر از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پیروی کرده‌اند. همچنین این مقاله حاصل یک کار تحقیقاتی اصیل بوده و تا کنون به‌طور کامل به هیچ زبانی و در هیچ نشریه یا همایشی چاپ و منتشر نشده و هیچ اقدامی نیز برای انتشار آن در هیچ نشریه یا همایشی صورت نگرفته و نخواهد گرفت.

اجازه انتشار مقاله

نویسنده (گان) با چاپ این مقاله به صورت دسترسی باز موافقت کرده و کلیه حقوق استفاده از محتوا، جدول‌ها، شکل‌ها، تصویرها و غیره را به ناشر واگذار می‌کنند.

در سطح احتمال یک درصد قرار گرفته است (جدول ۴). مقایسه میانگین‌ها نیز نشان داد که عملکرد زیستی در اثر تنش خشکی آخر فصل، ۲۵/۹ درصد نسبت به شاهد کاهش داشت (جدول ۵). برزگری و همکاران (Barzegari *et al.*, 2020)، گزارش کردند که اعمال تنش خشکی آخر فصل در مرحله پر شدن دانه در گندم، باعث کاهش ۲۲ درصدی در عملکرد زیستی شد. دستفال و همکاران (Dastfal *et al.*, 2011) و احمدی لاهیجانی و امام (Ahmadi Lahijani and Emam, 2013)، نیز به ترتیب کاهش ۳۲/۲ درصدی و ۲۲/۵ درصدی عملکرد زیستی را در اثر تنش خشکی آخر فصل در تحقیقات خود گزارش کردند. ژانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2023) نشان دادند که رابطه مستقیمی بین عملکرد زیستی و سرعت فتوسنتز وجود دارد و کاهش عملکرد زیستی در شرایط تنش خشکی ناشی از کاهش فتوسنتز است. مقایسه میانگین ارقام نشان داد که رقم مرودشت بیشترین و رقم آذر ۲، کمترین میزان عملکرد زیستی را داشتند (جدول ۵). اختلاف عملکرد زیستی ارقام در تحقیقات مختلف گزارش شده است و این اختلاف به ویژگی‌های مختلف ارقام مانند سرعت فتوسنتز، تعداد پنجه، ارتفاع بوته و دیگر ویژگی‌ها که معمولاً به‌صورت ژنتیکی کنترل می‌شوند و تحت تاثیر محیط رشد گیاه نیز قرار می‌گیرند، نسبت داده شده است (Golipour *et al.*, 2016, Ahmadizadeh *et al.*, 2011).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تاثیر ارقام و شرایط آبیاری بر شاخص برداشت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). مقایسه میانگین داده‌ها نیز نشان داد که شاخص برداشت در شرایط تنش خشکی آخر فصل، ۲۲/۴ درصد نسبت به شرایط شاهد کاهش یافت (جدول ۵). کاهش شاخص برداشت در شرایط تنش نشان دهنده این است که تنش خشکی عملکرد دانه را بیش از عملکرد زیستی کاهش داده است که احتمالاً به دلیل کوتاه شدن دوره پر شدن دانه و اختلال در فرایند پر شدن دانه است. نصیری خلیل‌الهی و همکاران (Nasiri Khalilelahi *et al.*, 2020) و عبدالشاهی و همکاران (Abdolshahi *et al.*, 2010) در گزارش‌های خود اعلام کردند که خشکی انتهای فصل با تاثیر منفی بر عملکرد دانه کاهش شاخص برداشت را به دنبال دارد. مقایسه میانگین‌ها نیز نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین شاخص برداشت رقم‌های گندم مورد مطالعه وجود داشت و رقم‌های شیراز و روشن

References

- Abdoli, M. and Saeidi, M. 2012.** Using different indices for selection of resistant wheat cultivars to post anthesis water deficit in the west of Iran. *Annals of Biological Research*, 3(3), pp. 1322-1333.
- Abdolshahi, R.A., Taleii, A., Omidi, M. and Yazdi Samadi, B. 2010.** Study of Physiological and Morphological Traits Related to Drought Tolerance in Bread Wheat. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 41(2), pp. 247-258. [In Persian]. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20084811.1389.41.2.5.6>
- Acquaah, G. 2012.** Principles of Plant Genetics and Breeding. Second Edition. Hoboken, NJ. Wiley.
- Ahmadi, A. and Baker, D.A. 2001.** The effect of water stress on grain filling processes in wheat. *Journal of Agricultural Science*, 136, pp. 257-269. <https://doi.org/10.1017/S0021859601008772>.
- Ahmadi, A., Joodi, M. and Janmohammdi, M. 2009.** Late defoliation and wheat yield: Little evidence of post anthesis source limitation. *Field Crops Research*, 113, pp. 90-93. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.04.010>.
- Ahmadizadeh, M., Shahbazi, H., Valizadeh, M. and Zaefizadeh, M. 2011.** Genetic diversity of durum wheat landraces using multivariate analysis under normal irrigation and drought stress conditions. *African Journal of Agricultural Research*, 6(10), pp. 2294-2302. <https://doi.org/10.5897/AJAR11.157>.
- Ahmadi Lahijani, M.J. and Emam, Y. 2013.** Response of wheat genotypes to terminal drought stress using physiological indices. *Journal of Crop Production and Processing*, 3(9), pp. 163-176. [In Persian]. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22518517.1392.3.9.13.6>.
- Araus, J.L., Slafer, G.A., Reynolds, M.P. and Royo, C. 2002.** Plant breeding and drought in C3 cereals: What should we breed for?. *Annals of Botany*, 89, pp. 925-940. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf049>.
- Baghban Khalil Abad, S., Khazaei, H.R. and Kafi, M. 2019.** Effect of deficit irrigation on kernel yield, yield components and some physiological traits of different varieties of bread wheat and durum wheat. *Applied Field Crops Research*, 32(1), pp. 1-12. [In Persian] <https://doi.org/10.22092/AJ.2018.116367.1220>.
- Barzegari, M., Emam, Y. and Zamani, A. 2020.** Yield components and grain yield responses of four wheat cultivars to growth retardant cycocel under terminal drought stress conditions. *Journal of Crop Production and Processing*, 10(3), pp. 139-156. [In Persian]. <https://doi.org/10.47176/jcpp.10.3.20124>.
- Bauer, A., Frank, A.B. and Black A.L. 1985.** Estimation of spring wheat grain dry matter assimilation from air temperature. *Agronomy Journal*, 77(5), pp. 743-752. <https://doi.org/10.2134/agronj1985.000219620077000500019x>.
- Brdar, M., Kobiljski, B. and Balalić-Kraljević, M. 2006.** Grain filling parameters and yield components in wheat. *Genetika*, 38(3), pp. 175-181. <https://doi.org/10.2298/GENSR0603175B>.
- Bruckner, P.L. and Frohberg, R.C. 1987.** Stress tolerance and adaptation in spring wheat. *Crop Science*, 27, pp. 31-36. <https://doi.org/10.2135/cropsci1987.0011183X002700010008x>.
- Cao, L., Shi, P.-J., Li, L. and Chen, G. 2019.** A new flexible sigmoidal growth model. *Symmetry*, 11, 204. <https://doi.org/10.3390/sym11020204>.
- Darroch, B.A. and Baker, R.J. 1990.** Grain filling in three spring wheat genotypes: statistical analysis. *Crop Science*, 30, pp. 525-529. <https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000030009x>.
- Dastfal, M., Brati, V., Emam, Y., Haghghatnia, H. and Ramazanpour, M. 2011.** Evaluation of grain yield and its components in wheat genotypes under terminal drought stress conditions in Darab region. *Seed and Plant Production Journal*, 27(2), pp. 195-217. [In Persian]. <https://doi.org/10.22092/SPPJ.2017.110432>.
- Dastoor, A., Asghari-Zakaria, R. and Shahbazi, H. 2014.** Evaluation of wheat genotypes for yield and grain-filling rate of wheat genotypes under non stress and post anthesis drought stress conditions. *Journal of Agroecology*, 6(3), pp. 561-570. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/JAG.V6I3.23874>.
- Duguid, S.D. and Brûlé-Babel, A.L. 1994.** Rate and duration of grain filling in five spring wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *Canadian Journal of Plant Science*, 74, pp. 681-686. <https://doi.org/10.4141/cjps94-123>.
- Ehdaie, B., Alloush, G.A. and Wainies, J.G. 2008.** Genotypic variation in linear rate of grain growth and contribution of stem reserves to grain yield in wheat. *Field Crops Research*, 106(1), pp. 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.10.012>.

- Engel, R.E., Long, D.S. and Carlson, G.R. 2003. Predicting straw yield of hard red spring wheat. *Agronomy Journal*, 95(6), pp. 1454-1460. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.10.012>.
- FAO. 2021. FAOSTAT agriculture. Food and Agriculture Organization of United Nations. From <http://fao.org/crop/statistics>.
- Gebeyehou, G., Knott, D.R. and Baker R.J. 1982. Rate and duration of grain filling in durum wheat cultivars. *Crop Science*, 22(2), pp. 337-340. <https://doi.org/10.2135/cropsci1982.0011183X002200020033x>.
- Ghasemi Maham, S., Torabi, B. and Dadrasi, A. 2016. Modeling growth and yield of winter wheat in Hamadan province. *Journal of EcoPhysiology*, 10(33), pp. 186-199. [In Persian]. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085958.1397.10.33.17.4>.
- Golipour, S., Ebadi, A. and parmoon, G. 2016. Components of different genotypes of grain of bread wheat. *Crop Physiology Journal*, 8(31), pp. 111-128. [In Persian]. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.2008403.1395.8.31.7.1>.
- Gonzalez, A., Bermejo, V. and Gimeno, B. S. 2010. Effect of different physiological traits on grain yield in barley grown under irrigated and terminal water deficit conditions. *The Journal of Agricultural Science*, 148(3), pp. 319-328. <https://doi.org/10.1017/S0021859610000031>.
- Gutteri, M.J., Stark, J.C., O'Brien, K. and Souza, E. 2001. Relative sensitivity of spring wheat grain yield and quality parameters to moisture deficit. *Crop Science*, 41(2), pp. 327-335. <https://doi.org/10.2135/cropsci2001.412327x>.
- Honar, T., Sabet-Sarvestani, A., Sepaskhah, A., Kamgar-Haghighi, A.A. and Shams, Sh. 2012. Simulation of soil water content and yield of canola using CRPSM. *Journal of Water and Soil Science*, 16(59), pp. 45-57. [In Persian]. <https://doi.org/20.1001.1.24763594.1391.16.59.4.7>.
- Kimurto, P.K., Kinyua, M.G. and Nijoroge, M.J. 2003. Response of bread wheat genotypes to drought stimulation under a mobile rain shelter in Kenya. *African Crop Science Journal*, 11(3), pp. 225-234. <https://doi.org/10.4314/acsj.v11i3.27572>.
- Kirigwi, F.M., Van Ginkel, M., Trethowan, R., Sears, R.G., Rajaram, S. and Paulsen, G.M. 2004. Evaluation of selection strategies for wheat adaptation across water regimes. *Euphytica*, 135, pp. 361-371. <https://doi.org/10.1023/B:EUPH.0000013375.66104.04>.
- Kogan, F., Guo, W. and Yang, W. 2019. Drought and food security prediction from NOAA new generation of operational satellites. *Geomatics, Natural Hazards and Risk Journal*, 10(1), pp. 651-666. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1541257>.
- Li, A., Hou, Y. and Trent, A. 2001. Effects of elevated atmospheric CO₂ and drought stress on individual grain filling rates and durations of the main stem in spring wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106, pp. 289-301. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00221-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00221-5).
- Malek, M.M., Galavi, M., Ramroudi, M. and Nakhzari Moghaddam, A. 2019. Evaluation of drought tolerance of wheat cultivars under water deficiency stress after flowering. *Journal of Crop Production*, 12(2), pp. 123-136. [In Persian]. <https://doi.org/10.22069/EJCP.2019.15545.2161>.
- Meskini Vishkaei, F., Mohammadi, M.H., Neishabouri, M.R. and Shekari, F. 2017. A model to estimate soil water depletion coefficient using plant and soil properties. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(4), pp. 749-758. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2017.212087.667505>.
- Mohammadi Gonbad, R., Esfahani, M., Roustaei, M. and Sabouri, H. 2016. Effect of planting dates on grain filling of bread wheat genotypes under rainfed condition of Gonbad-e-Qabus region. *Cereal Research*, 6(3), pp. 307-321. [In Persian]. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22520163.1395.6.3.4.6>.
- Nabipour, A.R., Yazdi-Samadi, B., Zali, A.A. and Poustini, K. 2002. Effect of morphological traits and their relations to stress susceptibility index in several wheat genotypes. *Desert Journal*, 7(1), pp. 31-48. [In Persian].
- Naderi, A., Hashemi Dezfouli, A., Rezaie, A., Majidi Heravan, E., Nourmohammadi, G. and Yarmohammadi, M. 2000. Exponential model parameters evaluation of dry matter and nitrogen accumulation trends in grain of spring wheat genotypes using linear regression method. *Seed and Plant Journal*, 16(4), pp. 471-480. [In Persian]. <https://doi.org/10.22092/SPIJ.2017.110920>.
- Nasiri Khalilalahi, S., Sasani, S., Ahmadi, G.H. and Daneshvar, M. 2020. Effect of terminal drought stress on some agronomic traits of 20 elite bread wheat genotypes. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 13(3), pp. 683-699. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/escs.2020.2226.1564>.

- Nass, H.G. and Reiser, B. 1975.** Grain filling period and grain yield relationships in spring wheat. *Canadian Journal of Plant Science*, 55, pp. 673-678. <https://doi.org/10.4141/cjps75-107>.
- Olivares-Villegas, J.J., Reynolds, M.P. and McDonald, G.K. 2007.** Drought adaptive attributes in the Seri/Babax hexaploid wheat population. *Functional Plant Biology*, 34, pp. 189-203. <https://doi.org/10.1071/FP06148>.
- Pourreza, J., Soltani, A., Naderi, A. and Ayneband, A. 2009.** Modeling leaf production and senescence in wheat. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 6(5), pp. 498-507.
- Rajala, A., Hakala, K., Makela, P., Muurinen, S. and Peltonen-Sainio, P. 2009.** Spring wheat response to timing of water deficit through sink and grain filling capacity. *Field Crops Research*, 114(2), pp. 263-271. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.08.007>.
- Richards, F.J. 1959.** A flexible growth functions for empirical use. *Journal of Experimental Botany*, 10(2), pp. 290-301. <https://doi.org/10.1093/jxb/10.2.290>.
- Riedesel, L., Mo'ller, M., Horney, P., Golla, B., Piepho, H.-P., Kautz, T. and Feike, T. 2023.** Timing and intensity of heat and drought stress determine wheat yield losses in Germany. *PLoS ONE* 18(7), e0288202. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0288202>.
- Sanjari, P.A. and Yazdanehpas, A. 2008.** Evaluation of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under pre- and post-anthesis drought stress conditions. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 10(2), pp. 109-121. <https://doi.org/20.1001.1.16807073.2008.10.2.1.5>.
- Sehgal, A., Sita, K., Siddique, K.H.M., Kumar, R., Bhogireddy, S., Varshney, R.K., HanumanthaRao, B., Nair, R.M., Prasad, P.V. and Nayyar, H. 2018.** Drought or/and heat-stress effects on seed filling in food crops: Impacts on functional biochemistry, seed yields, and nutritional quality. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1705. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01705>.
- Shah, N.H. and Paulsen, G.M. 2003.** Interaction of drought and high temperature on photosynthesis and grain-filling of wheat. *Plant and Soil*, 257, pp. 219-226. <https://doi.org/10.1023/A:1026237816578>.
- Shahbazi, H., Arzani, A. and Esmaelzadeh Moghaddam, M. 2016.** Effects of drought stress on physiological characteristics in wheat recombinant inbred lines. *Journal of Plant Process and Function*, 5(15), pp. 123-132. [In Persian]. <https://doi.org/20.1001.1.23222727.1395.5.15.1.4>.
- Tavakoli, A., Ahmadi, A. and Alizadeh, H. 2009.** A study of some physiological aspects of yield in drought tolerant vs susceptible wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars under post anthesis drought stress conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 40(1), pp. 197-211. [In Persian]. <https://doi.org/20.1001.1.20084811.1388.40.1.19.1>.
- Yang, J., Zhang, J., Wang, Z., Xu, G. and Zhu, Q. 2004.** Activities of key enzymes in sucrose-to-starch conversion in wheat grains subjected to water deficit during grain filling. *Plant Physiology*, 135, pp. 1621-1629. <https://doi.org/10.1104/pp.104.041038>.
- Yu, S.M., Lo, S.F. and Ho, T.H.D. 2015.** Source-sink communication: Regulated by hormone, nutrient, and stress cross-signaling. *Trends in Plant Science*, 20, pp. 844-857. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.10.009>.
- Zavieh Mavadat, L. 2018.** Timing of nitrogen application effect on source-sink limitation in wheat cultivars under terminal water deficit stress. Ph.D. Dissertation. Urmia University. Iran. [In Persian].
- Zhang, L., Chang, Q., Hou, X., Wang, J., Chen, S. and Zhang, Q., Wang, Z., Yin, Y. and Liu, J. 2023.** The effect of high-temperature stress on the physiological indexes, chloroplast ultrastructure, and photosystems of two herbaceous peony cultivars. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42, pp. 1631-1646. <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10647-9>.