

# Crop Science Research in Arid Regions

homepage: <https://cropscience.uoz.ac.ir/>

## Research Article

Volume 7, Issue 1, 2025, P. 139-155

### Investigating the effect of physiological characteristics of durum wheat on yield under rainfed conditions using multivariate statistical methods

Hoshang Rahmati <sup>\*a</sup>, Ali Nakhzari Moghadam <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Department of Agriculture, Faculty of Technical and Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

<sup>b</sup> Department of Plant Production, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran

\*Corresponding Author: [hoshang.rahmatipnu@pnu.ac.ir](mailto:hoshang.rahmatipnu@pnu.ac.ir)

Received: 8 August 2024 Accepted: 30 September 2024

DOI: 10.22034/CSRAR.2024.472463.1429

#### How to cite this article:

Rahmati, H. and Nakhzari Moghadam, A., 2025. Investigating the effect of physiological characteristics of durum wheat on yield under rainfed conditions using multivariate statistical methods. *Crop Science Research in Arid Regions*, 7(1), 139-155. <https://doi.org/10.22034/csrar.2024.472463.1429>

#### Abstract

**Introduction:** Drought is one of the most important limiting factors for wheat production in the world and it affects the plant from different aspects. Drought stress causes many physiological changes, including changes in relative water content, vegetation index and photosynthetic efficiency of wheat, which ultimately causes a significant reduction in plant growth parameters and grain yield. Basically, the response of plants to drought stress is complex; because it is a combination of the effect of stress, plant reactions to stress, time, intensity, and duration of stress occurrence in different years and places, and therefore the amount of damage also varies greatly depending on the growth stage of the plant at the time of stress occurrence. The most damage caused by drought stress in Iran is in the stage of wheat grain filling. Durum wheat (*Triticum durum*, Desf) is an important food product with heavy gluten and non-sticky dough, ideal for making pasta and spaghetti.

**Materials and Methods:** In order to investigate the relationship between physiological characteristics and grain yield in durum wheat cultivars under rainfed conditions, 10 durum wheat genotypes were studied in the form of a randomized complete block design with 3 replications during the cropping years of 2017 - 2018 and 2018 - 2019, in Kohdasht city of Lorestan province was evaluated. Seed yield traits and physiological characteristics of photosynthetic pigments, vegetation index, relative water content, leaf protein and light use efficiency were investigated.

**Results and Discussion:** The phenotypic correlation of the traits showed that all the physiological traits had a positive relationship with the yield, and among the eight investigated traits, the relationship between the chlorophyll a, total chlorophyll and vegetation index with grain yield was significant at the 5% level, but the other five traits had a non-significant relationship. Based on Principle components analysis for traits among genotypes, two components were extracted that explained 83.2% of the variance. According to the distribution diagram of traits based on two components, it was observed that vegetation index and relative leaf water content had the most relationship with seed yield. According to the path analysis, it was observed that the two traits of light use efficiency and total chlorophyll had the highest positive effect on grain yield with direct effects of 1.392 and 0.772, respectively, and leaf protein and chlorophyll b with the effects of direct -0.646 and -0.884 had the



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

most negative effect on grain yield. On the other hand, it was observed that chlorophyll-a and carotenoids had a positive indirect effect on yield through the two traits of total chlorophyll and light use efficiency, and relative leaf water content and vegetation index also had a positive indirect effect on grain yield through light use efficiency. And finally, all traits except the vegetation index had a negative indirect effect on yield through chlorophyll-b.

**Conclusion:** In general, it can be stated that all the physiological characteristics investigated under rainfed conditions were directly or indirectly effective on the yield of durum wheat, and among these traits, total chlorophyll and light use efficiency directly had the most positive effect on the seed yield. Photosynthetic pigments also increased seed yield through total chlorophyll and light use efficiency. The vegetation index, leaf protein and relative water content of leaves also increased the seed yield by increasing the efficiency of light use. All the traits, except the vegetation index, increased the yield through a negative indirect effect on chlorophyll b. Based on this, it is recommended that in breeding programs, in order to improve yield under dryland conditions, selection be made based on two characteristics: total chlorophyll and light use efficiency to increase yield.

**Keywords:** Path analysis, Plant physiology, Seed yield, Water stress, Wheat

## بررسی تاثیر خصوصیات فیزیولوژیک گندم دوروم بر عملکرد تحت شرایط دیم با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره

هوشنگ رحمتی<sup>۱\*</sup>، علی نخزری مقدم<sup>۲</sup>

۱- گروه کشاورزی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲- گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران

\* مسئول مکاتبه: [hoshang.rahmatipnu@pnu.ac.ir](mailto:hoshang.rahmatipnu@pnu.ac.ir)

DOI: 10.22034/CSRAR.2024.472463.1429

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۸

### چکیده

خشکی باعث تغییرات متعدد فیزیولوژیک و کاهش قابل توجه پارامترهای رشد گیاه و عملکرد گندم شده و ساختار ارتباط بین پارامترهای فیزیولوژیک، رشدی و عملکردی نسبت به شرایط نرمال را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به منظور بررسی ارتباط بین خصوصیات فیزیولوژیک با عملکرد دانه گندم دوروم تحت شرایط دیم، تعداد ۱۰ ژنوتیپ در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در طی سال‌های زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۷ و ۱۳۹۸-۱۳۹۹ در شهرستان کوه‌دشت با شرایط آب و هوایی نیمه گرمسیری ارزیابی شد. بر اساس داده‌های مرکب از دو سال آزمایش، همبستگی فنوتیپی صفات نشان داد که تمام خصوصیات فیزیولوژیک با عملکرد همبستگی مثبت داشتند. همبستگی سه صفت کلروفیل a، کلروفیل کل و شاخص سبزیگی با عملکرد دانه در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. بر اساس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی صفات شاخص سبزیگی و محتوای آب نسبی برگ بیشترین ارتباط را با عملکرد دانه داشتند. با توجه به تجزیه علیت دو صفت کارایی مصرف نور و کلروفیل کل، به ترتیب با میزان اثرات مستقیم ۱/۳۹۲ و ۰/۷۷۲ دارای بیشترین تاثیر مثبت بر عملکرد دانه بودند و صفات پروتئین برگ و کلروفیل b به ترتیب با میزان اثرات مستقیم ۰/۶۴۶- و ۰/۸۸۴- بیشترین تاثیر منفی بر عملکرد دانه داشتند. رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی نیز از طریق دو صفت کلروفیل کل و کارایی مصرف نور، سبب افزایش عملکرد شدند. شاخص سبزیگی، پروتئین برگ و محتوای آب نسبی برگ نیز با بالا بردن کارایی مصرف نور موجب افزایش عملکرد شدند. بر این اساس گزینش بر اساس صفات کلروفیل کل و کارایی مصرف نور در شرایط دیم به منظور بهبود عملکرد در برنامه‌های اصلاحی توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تجزیه علیت، تنش رطوبتی، عملکرد دانه، فیزیولوژی گیاهی، گندم

### مقدمه

۵۰ درصد سطح زیر کشت و تولید جهانی گندم دوروم را تشکیل می‌دهند. خارج از منطقه مدیترانه، کانادا، مکزیک، ایالات متحده آمریکا، روسیه، قزاقستان، آذربایجان و هند تولیدکنندگان بزرگ گندم دوروم هستند که سه کشور اول، مهم‌ترین آن‌ها می‌باشند (Mohammadi and Haghparsat, 2022).

بخش بسیار وسیعی از اراضی زیر کشت گندم در جهان و ایران در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته است و در این مناطق به سبب کمبود آب و در نتیجه حادث شدن تنش خشکی در محیط رشد گندم عملکرد گیاه به شکل قابل توجهی کاهش می‌یابد (Shirvani et al., 2021). از طرفی تنوع زیاد در میزان و پراکنش بارندگی و به تبع آن تغییرات عملکرد محصول در سال‌های مختلف از مشکلات مهم تولید پایدار در دیمزارها به شمار می‌رود (Najafi et al., 2022). خشکی

گندم دوروم (*Triticum turgidum* L. var. durum) تنها گندم تتراپلوئید است که به دلیل خواص منحصربه‌فرد دانه و کاربردهای متنوع آن همچنان در دنیا کشت می‌شود (Ahmadi, 2021). این گیاه دومین گونه زراعی مهم گندم و دهمین محصول زراعی مهم دنیا است که حدود شش درصد سطح زیر کشت گندم را شامل می‌شود و تولید سالانه آن بین ۳۷ تا ۴۰ میلیون تن می‌باشد. کشورهای با شرایط آب و هوایی مدیترانه‌ای، بزرگ‌ترین تولیدکنندگان گندم دوروم و بزرگ‌ترین مصرف‌کننده محصولات و فرآورده‌های آن هستند. از لحاظ تاریخی، گندم دوروم به محیط‌های کپارش و با بارندگی متغیر و با تنش گرمایی انتهای فصل رشد، مانند شرایط مدیترانه، سازگار است. در واقع، کشورهای حوزه مدیترانه (الجزایر، ترکیه، ایتالیا، مراکش، سوریه، تونس، فرانسه، اسپانیا و یونان) تقریباً

محلول کاهش نشان می‌دهد (Abdoli et al., 2013; Keshavarznia et al., 2017). تحقیقات نشان داده است که اندازه‌گیری میزان پرولین در شرایط تنش می‌تواند شاخص مناسبی در جهت یافتن لاین‌های مقاوم باشد (Shahbazi et al., 2016).

همچنین گزارش شده است که به دلیل سهولت اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیک در شرایط کنترل‌شده، می‌توان جهت دستیابی به ارقام متحمل به تنش در برنامه‌های بلندمدت اصلاحی از این صفات استفاده کرد (Asadi and Hatami, 2021)؛ اما در مورد ارتباط صفات فیزیولوژیک در شرایط تنش وجود همبستگی‌های منفی و مثبت معنی‌دار گزارش شده است (Keshavarznia et al., 2017).

بر همین اساس می‌توان بیان داشت که صفات فیزیولوژیک مختلف در شرایط تنش واکنش متفاوتی دارند و روند واکنش صفات نسبت به تنش کاملاً همسو نمی‌باشد. از این رو نیاز است که ارتباط بین خصوصیات فیزیولوژیک با همدیگر و با عملکرد بیشتر مورد بررسی قرار گیرد تا در برنامه‌های اصلاحی از صفاتی استفاده شود که بیشتر بر عملکرد مؤثر بوده و همچنین در برنامه‌های اصلاحی تعادلی در بین افزایش یا کاهش خصوصیات فیزیولوژیک مدنظر قرار گیرد؛ بر همین اساس تجزیه علیت بیشتر به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی اهمیت صفات مؤثر بر عملکرد به کار می‌رود. در واقع عملکرد، صفت کمی پیچیده‌ای است که تحت تأثیر عوامل متعدد محیطی و ژنتیکی قرار می‌گیرد، همچنین به دلیل تعداد زیاد ژن کنترل‌کننده، قابلیت توارث پایین دارد، لذا جهت افزایش عملکرد، در روش‌های اصلاحی، انتخاب بر مبنای صفات مرتبط با عملکرد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Hakimipoor and Mostafav, 2011). بنابراین با توجه به آنچه بیان شد، این تحقیق به‌منظور ارزیابی ارتباط صفات فیزیولوژیک در شرایط دیم با همدیگر و نهایتاً عملکرد دانه در گندم دوروم بر اساس روش‌های چند متغیره انجام شد.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق ۱۰ ژنوتیپ گندم دوروم تهیه‌شده از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان در دو سال زارعی مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۱).

به‌عنوان یک تنش چندبعدی، گیاهان را در سطوح مختلف تحت تأثیر قرار می‌دهد (Rahmati et al., 2020). اساساً پاسخ گیاهان به تنش خشکی پیچیده است؛ زیرا ترکیبی از تأثیر تنش، واکنش‌های گیاه در مقابل تنش، زمان، شدت و طول دوره وقوع تنش در سال‌ها و مکان‌ها مختلف است و به همین دلیل میزان خسارت نیز با توجه به مرحله رشد گیاه در زمان وقوع تنش بسیار متفاوت است (Kilic and Yagbasanlar, 2010). همچنین تحمل خشکی تحت تأثیر خصوصیات مختلف مورفولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی می‌باشد و از دیدگاه فیزیولوژیک با محتوای آب نسبی برگ، میزان آب نسبی از دست‌رفته، تجمع پرولین و اسید آسبزیک، تنظیم اسمزی، کلروفیل فلورسنس تبادل روزنه‌ای و کارایی مصرف آب و دیگر خصوصیات فیزیولوژیک مرتبط می‌باشد (Mohammadi et al., 2010). لذا درک کامل مبانی فیزیولوژیک تحمل تنش می‌تواند برای انتخاب ارقام متحمل و افزایش بهره‌وری مفید باشد (Lizana et al., 2006). به عبارتی مطالعه صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی می‌تواند به شناخت راهکارهایی برای انتخاب ارقام متحمل و افزایش عملکرد در شرایط متنوع محیطی از جمله شرایط تنش خشکی کمک کنند (Abdoli et al., 2013). در هر حال آگاهی از تغییرات فیزیولوژیک مؤثر بر بهبود ژنتیکی پتانسیل عملکرد گندم، برای شناخت دقیق‌تر عوامل محدودکننده عملکرد به‌منظور تعیین استراتژی‌های اصلاح نباتات در آینده ضروری است (Asadi et al., 2018).

مرحله رشد رویشی در تعیین پاسخ نهائی عملکرد دانه به تنش خشکی اهمیت زیادی دارد. بررسی پاسخ فیزیولوژیک گیاه در شرایط رشد رویشی می‌تواند تا حد زیادی سازوکارهای پاسخ عملکرد دانه را نیز به تنش خشکی آشکار نماید (Sadegzadeh et al., 2014). در این مرحله کمبود آب از بزرگ شدن سلول‌ها قبل از تقسیم سلولی جلوگیری کرده و با تأثیر بر فرآیندهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی مثل فتوسنتز، تنفس، انتقال مجدد، جذب یونی، کربوهیدرات‌ها، سوخت‌وساز مواد لندوخته‌ای و سازمان‌یابی رشد، موجب کاهش رشد گیاه می‌شود (Jaleel et al., 2007). همچنین گزارش شده است که در شرایط تنش کم‌آبی غلظت پروتئین‌های محلول، محتوی کلروفیل a و b، نسبت کلروفیل a/b، شاخص سبزیگی کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II، محتوای آب نسبی و غلظت کربوهیدرات‌های

جدول ۱- لیست ژنوتیپ‌های مورد مطالعه گندم دوروم

Table 1- The list of studied durum wheat genotypes

منشأ	شجره نامه	نام ژنوتیپ
Origin	Pedigree	Genotype name
ایکاردا	Jori C69/Hau	اومرابی ۳
ICARDA	RA/INTER_16/SNITAN/9/USDA595/3/D67.3	Omrabi3
سیمیت	ARDENTE//6/BI//CRA/4/ALO/5/HUI/YAV_1	هانا
CIMMYT	7/HUI/YAV79/8/POD_9	Hana
ایکاردا	MEXICALI 75	آریا
ICARDA		Arya
ایکاردا	MRB11//SNIPE/MAGH/3/RUFOM-7	ساجی
ICARDA		Saji
سیمیت	ZHONG ZUO/2*GREEN-3	بهرنگ
CIMMYT	030Y--SORA/2*PLATA12, CD96587-G-1M	Behrang
سیمیت	040PAP-040YRL-4H-1Y- 0B	شبرنگ
CIMMYT		Shabrang
ایکاردا	15/A/Maragheh	مراغه ۱
ICARDA		Maragheh 1
ایکاردا	18/A/maragheh	مراغه ۲
ICARDA		Maragheh 2
ایکاردا	SHWA/MALD/Aaz	دی ام-۷۳-۱۳
ICARDA		DM-73-13
ایتالیا	Capeiti: EIT16/Cappelli	دهدشت
Italy		Dehdasht

خاک، برای تأمین نیاز کودی پیش از کاشت ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفات آمونیوم، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم و ۷۰ کیلوگرم در هکتار اوره به خاک داده شد. زمین محل آزمایش به عمق ۲۵ سانتی‌متر شخم شد تا کود با خاک مخلوط شود. بعد از تسطیح و آماده‌سازی بستر، کشت در هر دو سال در تاریخ ۱۰ آذرماه انجام شد. بذور قبل از کشت با قارچ‌کش ویتاواکس با نسبت دو در هزار ضدعفونی شدند. در مرحله پنجه‌زنی، میزان ۴۰ گرم اوره ۴۶ درصد به‌صورت سرک به هر کرت اضافه شد (معادل ۱۱۰ کیلوگرم در هکتار اوره). وجین دستی نیز در بهار طی دو مرحله انجام گرفت. برای مبارزه با سن گندم از سم دسیس به میزان ۰/۳ لیتر در هکتار ماده تجاری و برای مبارزه با زنگ زرد از سم التو به میزان ۰/۵ لیتر در هکتار ماده تجاری استفاده شد.

نمونه‌گیری جهت اندازه‌گیری خصوصیات فیزیولوژیک با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه و اطمینان از اعمال تنش خشکی بر ژنوتیپ‌های مورد بررسی انجام شد. لوله‌ای شدن برگ‌ها در اوایل صبح مبنای اعمال تنش خشکی بر گیاهان لحاظ گردید (Jafarian and Maghsoudi Maud, 2015).

تحقیق حاضر در مزرعه تحقیقاتی شهرستان کوهدشت متعلق به مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، با ارتفاع ۱۱۹۵ متر از سطح دریا و موقعیت جغرافیایی ۴۷ درجه و ۶۰ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۵۳ دقیقه عرض شمالی اجرا شد. طبق تقسیم‌بندی اقلیمی دومارتن، کوهدشت دارای اقلیم نیمه گرمسیری با تابستان گرم و خشک می‌باشد. متوسط حداقل دما ۶/۹- درجه سانتی‌گراد و متوسط حداکثر دما ۲۴/۶ درجه سانتی‌گراد است. در دو سال زراعی، میزان بارندگی به ترتیب ۴۸۳ و ۶۵۰ میلی‌متر بود. افزایش دما در اواخر فصل یعنی در اواخر اردیبهشت تا تیرماه در این منطقه که معمولاً با قطع بارندگی همراه است، زراعت دیم را با تنش خشکی مواجه می‌سازد. نتایج آزمون خاک مزرعه از عمق صفر تا ۶۰ سانتی‌متری به همراه میانگین بارش و دمای ماهانه طی دو سال زراعی به شرح جدول ۲ بود.

این پژوهش به‌صورت بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۷ و ۱۳۹۷-۱۳۹۸ در شرایط دیم اجرا شد. هر کرت شامل شش خط سه متری به فاصله خطوط ۲۰ سانتی‌متر و تراکم ۳۵۰ بذر در مترمربع بود. طبق آزمایش

کارایی مصرف نور اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیک به شرح زیر اقدام شد. تمامی اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در آزمایشگاه مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان انجام شد.

برای انجام یادداشت‌برداری‌ها، از هر ژنوتیپ در هر تکرار ۱۰ بوته به صورت تصادفی با در نظر گرفتن اثر حاشیه‌ای انتخاب شدند. در هر کرت، صفت عملکرد دانه، به همراه صفات فیزیولوژیک محتوای رطوبت نسبی برگ، کلروفیل a و b، کلروفیل کل، کاروتنوئید، شاخص سبزی‌نگی، پروتئین برگ و

جدول ۲- مشخصات خاک مزرعه تحقیقاتی در عمق صفر تا ۶۰ سانتی‌متری، میانگین بارش و دمای ماهیانه طی دو سال زراعی

Table 2- Soil characteristics of the research field at a depth of 0 to 60 cm, average monthly rainfall and temperature during two crop years

آهن Iron (ppm)	کربن آلی Organic carbon(%)	نیتروژن کل Total N (%)	پتاسیم قابل جذب Available K (ppm)	فسفر قابل جذب Available P(ppm)	هدایت الکتریکی Ec×10 <sup>3</sup>	اسیدیته خاک pH	خصوصیت Character						
2.8	1.17	0.16	230	5.8	1.28	7.85	میزان Value						
شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	بور Boron (ppm)	مس Copper (ppm)	روی Zinc (ppm)	منگنز Manganese (ppm)	خصوصیت Character						
35	38	27	0.6	0.50	0.73	6.5	میزان Value						
شهریور September	مرداد August	تیر July	اردیبهشت June	خرداد May	فروردین April	اسفند March	بهمن February	دی January	آذر December	آبان November	مهر October	سال زراعی Crop year	
0.0	0.0	0.0	7.1	181.7	57.8	53.8	68.2	34.6	56.2	7.7	0.0	بارش (mm) Rainfall	۱۳۹۶-۱۳۹۷
26.1	29.1	28.9	23.7	16.5	14.5	8.4	3.8	6.5	6.3	14.6	18.8	دما (oC) Temperature	2017-2018
0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	283.5	63.6	103.2	82.1	109.1	135.6	12.3	بارش (mm) Rainfall	۱۳۹۷-۱۳۹۸
26.3	29.6	28.6	24.7	16.4	11.6	7.0	6.2	5.9	8.6	13.2	20.6	دما (oC) Temperature	2018-2019

بلو G250 موجود در معرف اسیدی به مولکول پروتئین بود. برای اندازه‌گیری غلظت پروتئین، ۲۰ میکرولیتر عصاره استخراج شده را در ۸۰ میکرولیتر بافر استخراج رقیق و پنج میلی‌لیتر معرف کوماکسی بلو تازه به آن افزوده و دو دقیقه به هم زده شد. پس از پنج دقیقه، میزان جذب نوری آن در طول موج ۵۹۵ نانومتر توسط دستگاه الیزا قرائت شد و از بافر استخراج به‌عنوان شاهد استفاده شد. غلظت پروتئین محلول در نمونه با توجه به جذب نمونه و با استفاده از منحنی استاندارد به دست آمد و محتوی پروتئین محلول محاسبه گردید.

برای اندازه‌گیری محتوی کلروفیل و کاروتنوئیدها از روش (Lichtenthaler and Wellburn, 1983) استفاده شد. به‌منظور اندازه‌گیری کارایی مصرف نور نیز میزان تابش دریافتی به‌وسیله دستگاه تابش‌سنج (مدل SF-80T) مجهز به حس‌گر

پس از پر شدن دانه شاخص سبزی‌نگی اندازه‌گیری شد. برای این منظور از هر کرت ۱۰ بوته انتخاب شده و قرائت اسپد (مدل Spad-502) از سه نقطه برگ پرچم در اول صبح انجام گرفت. از اعداد به‌دست‌آمده از هر کرت میانگین گرفته شد و عدد حاصل برای آن کرت در نظر گرفته شد.

همچنین برای اندازه‌گیری پروتئین، ابتدا ۰/۵ گرم نمونه برگ در نیتروژن مایع کاملاً خرد شد. سپس دو میلی‌لیتر محلول بافر تریس اسیدکلریدریک به آن اضافه و در داخل هاون چینی کاملاً هم‌وزنیزه شد. فازهای مخلوط حاصل در لوله اپیندورف و به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه توسط سانتریفیوژ جداسازی و پس از آن فاز بالایی جهت قرائت محتوی پروتئین محلول جدا شد (Reddy et al., 2004). مبنای روش اندازه‌گیری پروتئین اتصال رنگ کوماکسی بریانت

نسبی برگ در شرایط تنش در مورد گندم وجود دارد (Rahmati et al., 2018; Asadi et al., 2020). اما در مورد کلروفیل b تاثیرپذیری آن به محیط بیشتر ناشی از تاثیر تنش بر این صفت است بر همین اساس در شرایط تنش برای گندم گزارش شده است که میزان کلروفیل a کاهش و میزان کلروفیل b افزایش دارد (Amiri et al., 2013) و نتیجه‌گیری بدست آمده از این تحقیق نیز ممکن است ناشی از این پدیده باشد.

### همبستگی فنوتیپی صفات

نتایج همبستگی فنوتیپی صفات نشان داد که تمام خصوصیات فیزیولوژیک با عملکرد رابطه مثبت داشتند که در بین هشت صفت مورد بررسی رابطه‌ی سه صفت کلروفیل a، کلروفیل کل و شاخص سبزی‌نگی با عملکرد دانه در سطح پنج درصد معنی‌دار بود، اما پنج صفت دیگر رابطه معنی‌دار نداشتند (جدول ۴). بررسی همبستگی عملکرد دانه گندم با صفات مختلف در شرایط متفاوت محیطی، می‌تواند تا حدودی به درک روابط بین صفات با عملکرد کمک نماید (Afiuni and Mahlouji, 2006). به عبارتی، کارایی انتخاب برای عملکرد دانه را می‌توان با گزینش صفات فیزیولوژیک که ارتباط مستقیم و مثبتی با عملکرد دانه دارند و سریع و آسان نیز اندازه‌گیری می‌شوند، افزایش داد (Najafi et al., 2022). مطابق با نتیجه این تحقیق در گندم بهاره نیز همبستگی مثبت و معنی‌دار میزان کلروفیل با عملکرد دانه گزارش شده و بیان شده است که کاهش میزان کلروفیل در شرایط تنش و در ادامه کاهش میزان فتوسنتز سبب کاهش عملکرد دانه می‌شود (Naghavi et al., 2016)، بنابراین میزان سبزی‌نگی گیاه با عملکرد در ارتباط است. در شرایط دیم میزان کاروتنوئید سبب کاهش اثر تنش رطوبتی می‌شود (Feiziasl et al., 2019)، به نظر می‌رسد کاهش میزان کاروتنوئید به‌عنوان سازوکاری برای مقابله با تنش می‌باشد (Sadegzadeh et al., 2014). نتایج تحقیقات در تربیت‌کاله نشان داد که همبستگی منفی و معنی‌دار میزان کاروتنوئید با عملکرد در شرایط تنش وجود داشت (Saed-Moucheshi et al., 2019)، اما از طرف دیگر در گندم دروم گزارش شد که تنش خشکی سبب کاهش میزان کاروتنوئید و در ادامه عملکرد دانه می‌شود (Pour-Aboughadareh et al.,

یک متری در بالا و پایین سایه‌انداز گیاهی در مرحله شیری شدن و رسیدگی دانه اندازه‌گیری شد (Slafer and Savin, 1994)، سپس درصد جذب تابش<sup>۱</sup> (Fischer, 2001) و ضریب خاموشی نور<sup>۲</sup> (Ezzat Ahmadi et al., 2012) محاسبه شد.

در نهایت تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها شامل همبستگی فنوتیپی صفات، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و تجزیه علیت با نرم‌افزارهای SPSS 18، Minitab 16 و Path2 انجام شد.

### نتایج و بحث

#### برآورد اجزاء واریانس

نتایج تجزیه واریانس و برآورد اجزاء واریانس ژنتیکی و محیطی نشان داد (جدول ۳) که در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی برای تمام صفات به استثناء عملکرد دانه و کلروفیل b اختلاف معنی‌دار وجود داشت و سهم واریانس ژنتیکی برای تمام صفات به استثناء عملکرد دانه، کلروفیل b و محتوای آب نسبی بسیار بیشتر از واریانس محیطی بود. بنابراین می‌توان بیان داشت که در بین ژنوتیپ‌ها برای صفات دارای اختلاف معنی‌دار پتانسیل ژنتیکی متفاوتی در شرایط دیم وجود داشت، مطابق این نتیجه‌گیری در بین ۲۵ ژنوتیپ گندم دوروم برای تمام صفات به جزء عملکرد دانه تنوع معنی‌دار گزارش شد و نتیجه گیری شد که در شرایط دیم لاین‌های مورد بررسی واکنش متفاوتی داشتند (Alvandi et al., 2015).

بالا بودن سهم واریانس ژنتیکی از واریانس فنوتیپی برای اکثر صفات مورد بررسی در بین ژنوتیپ‌ها بیانگر تاثیر پتانسیل ژنتیکی متفاوت ژنوتیپ‌ها برای صفات در شرایط تنش است. بر همین اساس گزارش شده است که به جز صفت عملکرد دانه بیشتر صفات در گندم دارای سهم واریانس ژنتیکی بالایی هستند و نشان دهنده سهم و تاثیر بیشتر ژنتیک بر این صفات در شرایط تنش است (Bavandpouri, 2022).

برای صفات آب نسبی برگ، عملکرد و کلروفیل b تاثیر محیط بیشتر بود، برای دو صفت عملکرد و میزان آب نسبی برگ این نتیجه‌گیری طبیعی به نظر می‌رسد زیرا گزارشات متعدد در زمینه‌ی تاثیر محیط بر عملکرد دانه و همچنین آب

<sup>2</sup> - Light Extinction Coefficient

<sup>1</sup>- Intercepted Radiation

شامل می‌شود و ثبات پروتئینی تحت شرایط دیم به مفهوم حفظ فعالیت‌های آنزیمی برگ در این شرایط است (Siosemardeh *et al.*, 2013)، بنابراین حفظ محتوای پروتئین در شرایط دیم در گیاه بیانگر توان فتوسنتزی مناسب در این شرایط است (Rahmati and Nakhzari Moghadam, 2024) که منجر به جلوگیری از کاهش عملکرد می‌شود. مطابق با نتایج این تحقیق رابطه مثبت غیر معنی‌دار بین پروتئین برگ و عملکرد در شرایط تنش در گندم نان گزارش شده است (Bavandpouri, 2022).

2020) که مطابق با نتایج این تحقیق بود. علاوه بر این تحت شرایط دیم که میزان آب قابل دسترس محدود است، محتوای رطوبت نسبی برگ می‌تواند توانمندی گیاه در مواجهه با تنش خشکی را نشان دهد (Baghbankhalilabad *et al.*, 2019)، بر همین اساس حفظ محتوای نسبی رطوبت برگ سبب جلوگیری از کاهش عملکرد خواهد شد. در هر حال مطابق با نتایج این تحقیق وجود رابطه مثبت بین محتوای آب نسبی برگ با عملکرد دانه در گندم تحت شرایط تنش گزارش شده است (Bavandpouri, 2022). محتوای پروتئین محلول برگ تمام ترکیبات آنزیمی را نیز

جدول ۳- تجزیه واریانس و برآورد اجزاء واریانس صفات مورد بررسی گندم دوروم در شرایط دیم

Table 3- Variance analysis and estimation of variance components of durum wheat traits of under rainfed conditions

منابع تغییرت و اجزای واریانس Variation sources and components	درجه آزادی Degree of freedom	عملکرد دانه Seed yield	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total Chlorophyll	کاروتنوئید Carotenoid	کارایی مصرف نور Light use efficiency	پروتئین برگ Leaf protein	شاخص سبزیگی Vegetation index	محتوای آب نسبی Relative water content
تکرار Replication	2	895.5 <sup>ns</sup>	0.172 <sup>*</sup>	0.034 <sup>ns</sup>	0.313 <sup>ns</sup>	0.007 <sup>ns</sup>	0.0001 <sup>ns</sup>	0.001 <sup>ns</sup>	3.91 <sup>ns</sup>	85.69 <sup>ns</sup>
ژنوتیپ Genotype	9	1441 <sup>ns</sup>	1.415 <sup>*</sup>	0.210 <sup>ns</sup>	2.447 <sup>**</sup>	0.674 <sup>**</sup>	0.116 <sup>**</sup>	0.688 <sup>**</sup>	33.39 <sup>**</sup>	44.85 <sup>**</sup>
خطا Error	18	1380	0.124	0.110	0.219	0.073	0.014	0.088	8.13	18.94
درصد ضریب تغییرات Coefficient of variation percentage		20.40	6.44	3.86	17.00	4.22	10.08	9.56	4.55	6.24
واریانس فنوتیپی Phenotypic variance		1400	0.554	0.143	0.962	0.273	0.048	0.288	16.55	27.58
واریانس محیطی Environmental variance		1380	0.124	0.110	0.219	0.073	0.014	0.088	8.13	18.94
واریانس ژنتیکی Genetical variance		20.34	0.430	0.033	0.743	0.200	0.034	0.2	8.42	8.64
درصد واریانس محیطی Environmental variance percentage		98.55	22.37	76.74	22.77	26.71	29.17	30.56	49.14	68.68
درصد واریانس ژنتیکی Genetical variance percentage		1.45	77.63	23.26	77.23	73.29	70.83	69.44	50.87	31.32

\*\* معنی‌دار در سطح ۱ درصد؛ \* معنی‌دار در سطح ۵ درصد؛ <sup>ns</sup> اختلاف غیر معنی‌دار

\*\* Significant at 1% level; \* Significant at 5% level; <sup>ns</sup> Non-significant difference

نسبی برگ، پروتئین برگ و شاخص سبزیگی معنی‌دار نبود و در دیگر موارد در سطح یک یا پنج درصد معنی‌دار شد. مطابق با این نتیجه گیری در گندم بهاره نیز همبستگی بالا و معنی‌دار بین صفات فیزیولوژیک گزارش شده است (Mohammadi *et al.*

از طرف دیگر صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی مورد بررسی باهم دیگر رابطه مثبت نشان دادند که این ارتباط تنها برای صفت محتوای آب نسبی برگ با کارایی مصرف نور و پروتئین برگ و همچنین کلروفیل a با سه صفت محتوای آب

مورد ارزیابی بود و تغییر در این خصوصیات سبب تغییرات عملکرد در شرایط دیم می‌باشد. (al., 2013). با توجه به بررسی همبستگی صفات فیزیولوژیکی می‌توان بیان داشت که عملکرد تحت تأثیر تمام خصوصیات

جدول ۴- ضریب همبستگی فنوتیپی صفات مورد بررسی با روش پیرسن

Table 4- Phenotypic correlation coefficient of investigated traits by Pearson's method

صفات Traits	عملکرد دانه Seed yield	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total Chlorophyll	کاروتنوئید Carotenoid	کارایی مصرف نور Light use efficiency	پروتئین برگ Leaf protein	محتوای آب نسبی Relative water content
کلروفیل a Chlorophyll a	0.721*							
کلروفیل b Chlorophyll b	0.511	0.754*						
کلروفیل کل Total Chlorophyll	0.698*	0.981**	0.866**					
کاروتنوئید Carotenoid	0.596	0.755*	0.925**	0.845**				
کارایی مصرف نور Light use efficiency	0.624	0.679*	0.874**	0.772**	0.925**			
پروتئین برگ Leaf protein	0.361	0.576	0.825**	0.680*	0.782**	0.857**		
محتوای آب نسبی Relative water content	0.574	0.581	0.779**	0.670*	0.742*	0.589	0.433	
شاخص سبزی‌نگی Vegetation index	0.651*	0.577	0.676*	0.637*	0.657*	0.636*	0.684*	0.677*

\* همبستگی در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار (دو طرفه)

\* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

\*\* همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار (دو طرفه)

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

محتوای آب نسبی برگ، شاخص سبزی‌نگی و پروتئین برگ بیشترین رابطه با عملکرد دانه را داشتند و صفات کارایی مصرف نور، کاروتنوئید، کلروفیل a، b و کلروفیل کل دارای رابطه کمتری با عملکرد بودند، هرچند تمام صفات بر اساس مؤلفه اول با عملکرد همسو بودند. در مقابل بر اساس مؤلفه دوم صفات محتوای آب نسبی برگ، شاخص سبزی‌نگی، کلروفیل a و کلروفیل کل بیشترین رابطه با عملکرد دانه را داشتند و صفات کلروفیل b، کاروتنوئید، کارایی مصرف نور و پروتئین برگ رابطه کمتری با عملکرد دانه داشتند و دارای یک روند جداگانه بودند، یا به عبارتی با عملکرد دانه همسو نبودند. اما در مجموع با توجه به نمودار مشاهده شد که صفات کلروفیل کل و کلروفیل a در یک گروه قرار داشتند و بر اساس هر دو مؤلفه مقادیر ویژه مثبت

### تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

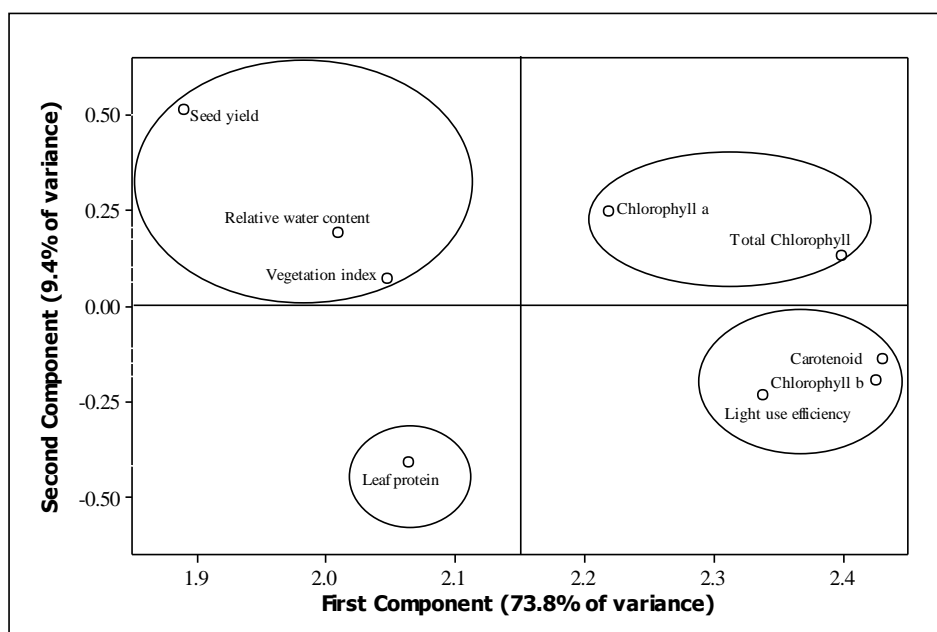
بر اساس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای صفات مورد بررسی در بین ۱۰ ژنوتیپ مورد مطالعه دو مؤلفه استخراج شد که مؤلفه اول ۷۳/۸ درصد و مؤلفه دوم ۹/۴ درصد از واریانس را توجیه نمودند و در مجموع با دو مؤلفه اول، ۸۳/۲ درصد از واریانس کل توجیه شد. بیان درصد بالای از واریانس با دو مؤلفه اول نشانگر ارتباط صفات با همدیگر یا به عبارتی همسو بودن تغییرات صفات می‌باشد، که این نتیجه‌گیری تأییدی بر نتایج همبستگی صفات بود.

با توجه به اینکه هدف از این تجزیه بررسی رابطه صفات با عملکرد بود، تنها نمودار پراکنشی صفات بر اساس دو مؤلفه در شکل ۱ ارائه شد و مشاهده شد که بر اساس مؤلفه اول صفات

کارایی مصرف نور با محتوای آب نسبی برگ نیز در ارتباط است و در شرایط تنش کم شدن محتوای آب نسبی برگ موجب تأثیر منفی بر کارایی مصرف نور می‌شود ( *Rahimi et al., 2019* ). محتوای آب نسبی برگ تحت تأثیر اثر افزایشی ژن‌ها بوده و وراثت‌پذیری خصوصی بالایی دارد که می‌توان بازده ژنتیکی نسبتاً بالایی برای بهبود این صفت در شرایط دیم انتظار داشت ( *Maleky et al., 2019* ). این صفت بیشتر سبب افزایش فتوسنتز و تعرق بیشتر گیاه می‌شود ( *Chandrasekar et al., 2000* ) و به‌عنوان شاخصی مهم در تعیین وضعیت آبی گیاه و شناسایی ارقام متحمل به تنش خشکی ( *Rezaie et al., 2020* ) در جهت بهبود عملکرد دانه مؤثر است که مطابق با نتایج این تحقیق است. علاوه بر این نتایج تحقیقات نشان داده است که تحت شرایط دیم، افزایش پرولین با کاهش میزان پروتئین کل به‌منظور سنتز و تجمع بیشتر پرولین به هنگام تنش همراه است ( *Ghaderi et al., 2021* ). از طرف دیگر نقش فعال کاروتنوئیدها در دفاع آنتی‌اکسیدانی در شرایط تنش خشکی سبب می‌شود که در این شرایط به دلیل کم کردن گونه‌های فعال اکسیژن، میزان کاروتنوئید کاهش یابد ( *Samsami et al., 2020* ) که در مجموع این کاهش در میزان کاروتنوئید و پروتئین محلول در جهت ثبات و پایداری عملکرد دانه می‌باشد.

داشتند، از طرف دیگر صفات کلروفیل b، کاروتنوئید و کارایی مصرف نور با داشتن مقادیر ویژه مثبت برای مولفه اول و مقادیر ویژه منفی برای مولفه دوم در یک قسمت از نمودار قرار گرفتند و صفت پروتئین برگ با داشتن مقادیر ویژه منفی برای هر دو مولفه به تنهایی در یک گروه قرار گرفت و در نهایت بر اساس دو مؤلفه اول صفات شاخص سبزی‌نگی و محتوای آب نسبی برگ بیشترین رابطه با عملکرد دانه را داشتند و در یک گروه قرار گرفتند (شکل ۱).

محتوای سبزی‌نگی برگ‌ها یکی از عوامل کلیدی در تعیین سرعت فتوسنتز و تولید ماده خشک می‌باشد که کاهش آن به دلیل تخریب ساختمان کلروفیل در شرایط تنش خشکی است ( *Ghosh, 2004* ). کاهش محتوای کلروفیل در تنش خشکی به دلیل کم شدن عوامل لازم برای سنتز کلروفیل و تخریب ساختمان آن می‌باشد، بدین معنی که کاتابولیسم کلروفیل در شرایط تنش خشکی افزایش می‌یابد که علت عمده آن علاوه بر موارد ذکر شده می‌توان به دلیل پیری زودرس برگ‌ها در اثر اختلال هورمونی ناشی از تنش خشکی باشد ( *Moradgholi et al., 2023* ). در هر حال کاهش محتوای کلروفیل و به دنبال آن کم شدن شاخص سبزی‌نگی در گیاه منجر به کم شدن فعالیت فتوسنتزی و کاهش میزان کارایی مصرف نور شده و در نتیجه عملکرد نیز کاهش می‌یابد. نتایج تحقیقات نشان داده که میزان



شکل ۱- بای‌پلات پراکنش صفات بر اساس دو مؤلفه اول حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی صفات مورد بررسی در ۱۰ ژنوتیپ گندم دوروم

Figure 1- Traits scatter plot for the first two components resulting from principal component analysis of the investigated traits in 10 durum wheat genotypes

## تجزیه علیت

نتایج تجزیه علیت تأثیر صفات فیزیولوژیکی مورد بررسی بر عملکرد دانه در جدول ۵ و نمودار حاصل با حذف اثرات مستقیم و غیر مستقیم ضعیف در شکل ۲ ارائه شده است. در بین ۸ صفت مورد بررسی، دو صفت کارایی مصرف نور و کلروفیل کل، به ترتیب با میزان اثرات مستقیم ۱/۳۹۲ و ۰/۷۷۲ دارای بیشترین تأثیر مثبت بر عملکرد دانه بودند. فتوسنتز نیروی محرکه اصلی است که بر توزیع ماده خشک و تشکیل اندام تأثیر می‌گذارد، در واقع اساس تولید گیاه و عامل اصلی تعیین‌کننده عملکرد محصول است (Dong et al., 2019) که میزان کلروفیل و کارایی مصرف نور دو عامل مهم و تأثیرگذار بر فتوسنتز می‌باشد. نتایج تحقیقات نشان داد که میزان نور جذب‌شده توسط گندم با عملکرد زیست‌توده هوایی دارای رابطه خطی بود، همچنین بیان‌شده که بین کارایی مصرف آب و کارایی مصرف نور رابطه خطی وجود دارد، به عبارتی با افزایش کارایی مصرف آب در گندم کارایی مصرف نور نیز افزایش می‌یابد (Kukul and Irmak, 2020).

در مقابل صفات پروتئین برگ و کلروفیل b به ترتیب با میزان اثرات مستقیم ۰/۶۴۶- و ۰/۸۸۴- بیشترین تأثیر منفی بر عملکرد دانه داشتند. گزارش شده که سطح تنش در افزایش یا کاهش پروتئین‌های محلول مؤثر است و با افزایش شدت تنش میزان پروتئین‌های محلول افزایش می‌یابد. همچنین ارقام مقاوم به تنش در شرایط تنش بالا نیز کاهش کمتری در پروتئین‌های محلول نشان می‌دهند (Ghaderi et al., 2021)؛ اما به نظر می‌رسد در شرایط این تحقیق پروتئین‌های محلول در بین ارقام با عملکرد بیشتر روند کاهشی داشته و سبب ارتباط منفی عملکرد با پروتئین‌های محلول شده است؛ اما از طرف دیگر مشاهده شد که پروتئین محلول از طریق کارایی مصرف نور تأثیر غیر مستقیم بالایی بر عملکرد دارند. به نظر می‌رسد در شرایط دیم افزایش سیستم‌های آنزیمی و پروتئین‌های درگیر در فتوسنتز سبب افزایش کارایی مصرف نور می‌شود (منبع) که منجر به افزایش عملکرد می‌گردد.

در مورد کلروفیل b هر چند اثر مستقیم منفی بر عملکرد داشت، اما از طریق کلروفیل کل و کارایی مصرف نور اثر غیر مستقیم مثبت بالا بر عملکرد نشان داد و این مسئله سبب شد که مجموع اثرات مستقیم و غیر مستقیم این صفت مثبت شود و همبستگی مثبت بالایی با عملکرد نشان دهد. مهم‌ترین دلیل این نتیجه‌گیری به تغییرات دو نوع کلروفیل a و b تحت شرایط تنش خشکی مرتبط است، زیرا گزارش شده است که کلروفیل

b در شرایط تنش ملایم روند افزایشی دارد (Amiri et al., 2013)، اما در مقابل کلروفیل a دارای روند کاهشی است (Hassanpour Lescokelaye et al., 2015). در مواردی نیز بیان شده است که تنش خشکی کوتاه‌مدت در گندم باعث توقف کامل فتوسنتز و افزایش نسبت کلروفیل a/b می‌شود ولی اثری بر محتوای کلروفیل برگ ندارد (Abdoli et al., 2013). در ارتباط با کاهش کلروفیل a در اثر تنش خشکی، بیان شده است که تولید رادیکال‌های اکسیژن افزایش یافته و این رادیکال‌های آزاد باعث پراکسیداسیون و در نتیجه تجزیه‌ی این رنگیزه می‌شوند (Amiri et al., 2013). در مجموع بیان شده است که کاهش کلروفیل در شرایط تنش خشکی می‌تواند جنبه سازشی داشته باشد زیرا کاهش کلروفیل سبب کاهش الکترون برانگیخته طی فتوسنتز شده و خسارت‌های ناشی از تشکیل رادیکال‌های آزاد اکسیژن کم می‌شود (Kraner et al., 2002).

کمترین تأثیر مستقیم نیز به کلروفیل a با میزان اثر مستقیم ۰/۰۶۵ اختصاص داشت. در هر حال در گزارش‌های متعدد کاهش میزان کلروفیل a بر اثر تنش خشکی گزارش شده است (Baghbankhalilabad et al., 2019; Abdoli et al., 2013; Siosemardeh et al., 2013). از طرف دیگر مشاهده شد که کلروفیل a و کاروتنوئید از طریق دو صفت کلروفیل کل و کارایی مصرف نور دارای تأثیر غیر مستقیم مثبت بر عملکرد بودند و از طریق کلروفیل b نیز تأثیر غیر مستقیم منفی بر عملکرد داشتند. کاروتنوئیدها به‌طور غیر مستقیم تولید گونه‌های اکسیژن را کاهش می‌دهند (Groppa and Benavides, 2008) و به‌طور کلی، کاهش مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی در شرایط تنش خشکی می‌تواند به دلیل تخریب ساختمان کلروپلاست و دستگاه فتوسنتزی، فتواکسیداسیون و واکنش آن‌ها با گونه‌های فعال اکسیژن باشد (Neocleous and Nasilakakis, 2007). کاروتنوئیدها می‌توانند انرژی را به کلروفیل a منتقل کرده و دامنه طول موج‌های مؤثر برای فتوسنتز را افزایش دهند (Colasuonno et al., 2017) و بر همین اساس نقش مهمی در فتوسنتز و افزایش عملکرد دارند. محتوای آب نسبی برگ نیز از طریق کارایی مصرف نور تأثیر غیر مستقیم مثبت و از طریق کلروفیل b تأثیر غیر مستقیم منفی بر عملکرد دانه داشت و در نهایت شاخص سبزیگی از طریق کارایی مصرف نور دارای تأثیر غیر مستقیم مثبت بر عملکرد بود. کارایی مصرف نور بیانگر کارایی در انتقال و ذخیره‌ی مواد فتوسنتزی به اندام‌های هوایی و تولید ماده خشک

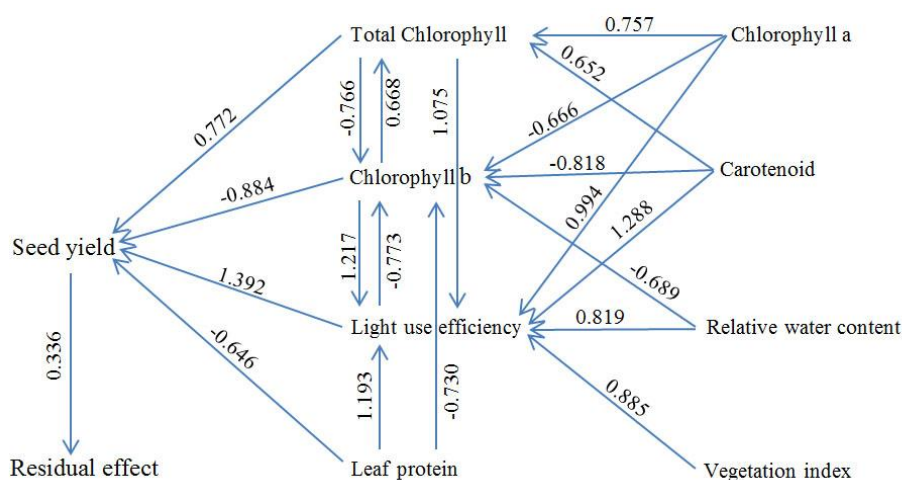
کل است که از یک واحد تابش است که تحت تأثیر شاخص سطح برگ، سرعت رشد و آرایش مناسب و یکنواخت برگ است (Rezvani et al., 2014)، نتایج تحقیقات نشان داده است که تنش رطوبتی از عوامل مؤثر بر کارایی مصرف نور است (Ezzat

کل است که از یک واحد تابش است که تحت تأثیر شاخص سطح برگ، سرعت رشد و آرایش مناسب و یکنواخت برگ است (Rezvani et al., 2014)، نتایج تحقیقات نشان داده است که تنش رطوبتی از عوامل مؤثر بر کارایی مصرف نور است (Ezzat

جدول ۵- اثرات مستقیم (اعداد روی قطر)، غیر مستقیم و اثرات کل صفات فیزیولوژیک بر عملکرد دانه گندم دوروم

Table 5- Direct (numbers on diameter), indirect and total effects of physiological traits on durum wheat seed yield

صفات Traits	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total Chlorophyll	کاروتنوئید Carotenoid	کارایی مصرف نور Light use efficiency	پروتئین برگ Leaf protein	محتوای آب نسبی Relative water content	شاخص سبزیگی Vegetation index
کلروفیل a Chlorophyll a	0.065	0.049	0.064	0.049	0.044	0.037	0.038	0.037
کلروفیل b Chlorophyll b	-0.666	-0.884	-0.766	-0.818	-0.773	-0.730	-0.689	-0.598
کلروفیل کل Total Chlorophyll	0.757	0.668	0.772	0.652	0.596	0.524	0.517	0.491
کاروتنوئید Carotenoid	-0.453	-0.554	-0.507	-0.599	-0.555	-0.469	-0.445	-0.394
کارایی مصرف نور Light use efficiency	0.944	1.217	1.075	1.288	1.392	1.193	0.819	0.885
پروتئین برگ Leaf protein	-0.372	-0.533	-0.439	-0.505	-0.553	-0.646	-0.280	-0.442
محتوای آب نسبی Relative water content	0.170	0.229	0.197	0.218	0.173	0.127	0.294	0.199
شاخص سبزیگی Vegetation index	0.272	0.319	0.300	0.310	0.300	0.323	0.319	0.472
اثر کل Total effects	0.721	0.511	0.698	0.596	0.624	0.361	0.574	0.651
اثر باقیمانده Residual effect	0.336							



شکل ۲- نمودار تجزیه علیت صفات فیزیولوژیک مؤثر بر عملکرد دانه گندم دوروم

Figure 2- Path analysis diagram of effective physiologic triats on seed yield of durum wheat

## نتیجه‌گیری کلی

در یک جمع‌بندی کلی می‌توان بیان داشت که تمام خصوصیات فیزیولوژیک مورد بررسی تحت شرایط دیم بر روی عملکرد گندم دوروم یا به‌صورت مستقیم یا غیر مستقیم مؤثر بودند که در این بین صفات کلروفیل کل و کارایی مصرف نور مستقیماً بیشترین تأثیر مثبت بر عملکرد را داشتند. رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی نیز از طریق دو صفت کلروفیل کل و کارایی مصرف نور سبب افزایش عملکرد شدند. شاخص

سبزینگی، پروتئین برگ و محتوای آب نسبی برگ نیز با بالا بردن کارایی مصرف نور موجب افزایش عملکرد شدند. تمام صفات از طریق تأثیر غیر مستقیم منفی بر کلروفیل b باعث افزایش عملکرد بودند. بر این اساس دو صفت کلروفیل کل و کارایی مصرف نور در بین صفات مورد بررسی، تأثیر بیشتری بر افزایش عملکرد گندم دوروم در شرایط دیم داشتند و انجام برنامه‌های اصلاحی برای این دو صفت مفید می‌باشد.

## References

- Abdoli, M., Saeidi, M., Jalali-Honarmand, S., Mansourifar, S. and Eghbal-Ghobadi, M., 2013. Evaluation of some physiological and biochemical traits and their relationships with yield and its components in some improved wheat cultivars under post-anthesis water deficit. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 6(1), pp.47-63. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/escs.2013.137>
- Afiuni, D. and Mahlouji, M., 2006. Correlation analysis of some agronomic traits in Wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under salinity stress. *Seed and Plant*, 22(2), pp.186-197. [In Persian].
- Ahmadi, Gh., 2021. Relationship between developmental traits and grain yield in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) under terminal drought stress condition. *Applied Research in Field Crops*, 33(4), pp.84-107. [In Persian].
- Alvandi, R., Mohammadi, R. and Shooshtari, L., 2015. Genetic diversity of durum wheat genotypes using agronomic characteristics and molecular markers, *Seed and Plant Journal*, 31(3), pp.441-458. [In Persian]. <https://doi.org/10.22092/spij.2017.111269>
- Amiri, R., Bahraminejad, S. and Sasani, S., 2013. Evaluation of genetic diversity of bread wheat genotypes based on physiological traits in non-stress and terminal drought stress conditions. *Cereal Research*, 2(4), pp.289-305. [In Persian].
- Asadi, A., Askary Kelestani, A.R., Mirfakhraii, R., Abasi, A. and Khodadadi, M., 2018. Genetic variation of bread wheat genotypes for some important physiological traits under chilling stress, *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 11(1), pp.171-183. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/escs.2017.195.1049>
- Asadi, A.A. and Hatami, A., 2021. Effect of Water Deficit Stress on Physiological Characteristics in Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Process and Function*, 10(41), pp.115-128. [In Persian].
- Asadi, A.A., Valizadeh, M., Mohammadi, S.A. and Khodarahmi, M., 2020. Genetic analysis of response to water deficit stress based on physiological traits in Wheat. *Plant Genetic Researches*, 6 (2), pp.1-20. <https://doi.org/10.29252/pgr.6.2.1>
- Baghbankhalilabad, 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>

- Bavandpouri, F., 2022. Association mapping of in vitro and In vivo indicators of drought tolerance in bread wheat. Ph. D. Thesis. Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran, 429 P. [In Persian].
- Chandrasekar, V., Sairam, R.K. and Srivastava, G.C., 2000. Physiological and biochemical responses of hexaploid and tetraploid wheat to drought stress. *Agronomy & Crop Science*, 185, pp.219-227. <https://doi.org/10.1046/j.1439-037x.2000.00430.x>
- Colasuonno, P., Lozito, M.L., Marcotuli, L., Nigro, D., Giancaspro, A., Mangini, G., Vita, P.D., Mastrangelo, A. M., Pecchioni, N., Houston, K., Simeone, R., Gadaleta, A. and Blanco, A., 2017. The carotenoid biosynthetic and catabolic genes in wheat and their association with yellow pigments. *BMC Genomics*, 18, 122. <https://doi.org/10.1186/s12864-016-3395-6>
- Dong, H., Zhang, X., Li, J., Zhang, C., Wei, T., Yang, Z., Cai, T., Zhang, P., Ding, R. and Jia, Z., 2019. Photosynthetic characteristics and grain yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in response to fertilizer, precipitation, and soil water storage before sowing under the ridge and furrow system: A path analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 272–273, pp.12-19. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.015>
- Ezzat Ahmadi, M., Nourmohammadi, Gh., Ghodsi, M. and Kafi, M., 2012. Evaluation of Water and Radiation Use Efficiencies of Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes under Different Moisture and Photosynthetic Conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 10(1), pp.225-239. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/gsc.v10i1.14512>
- Feiziasl, V., Fotovat, A., Astarai, A., Lakzian, A. and Jafarzadeh, J., 2019. Determination of Chlorophyll Content and Nitrogen Status Using SPAD in Dryland Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 17(2), pp.221-240. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/gsc.v17i2.68973>
- Fischer, R.A., 2001. Selection traits for improving yield potential. In: Reynolds, M.P., Ortiz-Monasterio J.I., McNab, A., (eds). *Application physiology in wheat breeding* (pp. 148–159). CIMMYT, Mexico, D.F.
- Ghaderi, A., Jahanbakhsh Godehkahriz, S. and Raeisi sadati S.Y., 2021. Study of total protein content, soluble sugar, proline content and P5CS gene expression in leaves of three wheat cultivars under drought stress. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 12(4), pp.125-144. [In Persian].
- Ghosh, P.K., 2004. Growth, yield, competition and economics of groundnut/cereal fodder intercropping systems in the semi-arid tropics of India. *Field Crops Research*, 88(2-3), pp.227–237. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.015>
- Groppa, M.D. and Benavides, M.P., 2008. Polyamines and abiotic stress: recent advances. *Amino Acids*, 34, pp.35-45. <https://doi.org/10.1007/s00726-007-0501-8>
- Hakimipoor, A. and Mostafavi, Kh., 2011. Evaluation of yield relationships and grain yield components in bread wheat using path analysis. *Journal of Plant Production Sciences*, 1(1), pp.25-28. [In Persian].
- Hassanpour Lescokelaye, K., Ahmadi, J., Daneshyan, J. and Hatami, S., 2015. Changes in Chlorophyll, Protein and Antioxidant Enzymes on Durum Wheat under Drought Stress. *Journal of Crop Breeding*, 7(15), pp.76-87. [In Persian].

- Jafarian, T. and Maghsoudi Maud, A.A., 2015. Wheat leaf rolling under drought stress and its effect on yield and yield components, *Journal of Crop Production*, 8(2), pp.117-132. [In Persian].
- Jaleel, C.A., Manhvannan, P., Kishorekumar, A., Sankar, B., Gopi, R., Somasundaram, R. and Panneerselvam, R., 2007. Alterations in osmasundaram, antioxidant enzymes and indole alkaloid levels in *Catharanthus roseus* exposed to water deficit. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 59, pp.150-157. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2007.05.001>
- Keshavarznia, R., Peyghambari, S.A. and Bihamta, M., 2017. The impact of seedling drought stress and recovery on chlorophyll fluorescence parameters and physiological characteristics of wheat. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 48(1), pp.39-45. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2017.202541.654065>
- Kilic, H. and Yagbasanlar, T., 2010. The effect of drought stress on grain yield, yield components and some quality traits of durum wheat (*Triticum durum* ssp. durum) cultivars. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca Journal*, 38(1), pp.164-170. <https://doi.org/10.15835/nbha3814274>
- Kranner, I., Beckett, R. P., Wornik, S., Zorn, M., & Pfeifhofer, H. W. (2002). Revival of a resurrection plant correlates with its antioxidant status. *The Plant Journal*, 31, 13–24. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.2002.01329.x>
- Kukul, M.S. and Irmak, S., 2020. Interrelationships between water use efficiency and light use efficiency in four row crop canopies. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 3(1), e20110. <https://doi.org/10.1002/agg2.20110>
- Lichtenthaler, H. and Wellburn, A.R., 1983. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11, pp.591-592. <https://doi.org/10.1042/bst0110591>
- Lizana, C., Wentworth, M. and Martinez, J.P., 2006. Differential adaptation of two varieties of common bean to abiotic stress. I.Effects of drought on yield and photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*, 57, pp.685–697. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj062>
- Maleky, AA., Saba J. and Shekary F., 2009. Inheritance of leaf relative water content in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) under rainfed conditions. *Journal of Agricultural Knowledge*, 19(2), pp.177-183. [In Persian]
- Mohammadi, M., Mirfakhraei, R. and Abbasi, A., 2013. Study of genetic variation on response to spring cold stress in iranian bread wheat cultivars using multivariate statistical methods. *Journal of Crop Production*, 6(2), pp.149-166. [In Persian]. <https://doi.org/10.1001.1.2008739.1392.6.2.9.7>
- Mohammadi, R. and Haghparast, R., 2022. Review; Durum wheat: production, nutritional value and economic importance. *Cereal Biotechnology and Biochemistry*, 1(3), pp.414-445. [In Persian]. <https://doi.org/10.22126/cbb.2022.8385.1021>
- Mohammadi, R., Daryaei, A., & Rajabi, R. (2010). Study of agro-physiological characteristics related to drought tolerance in advanced durum genotypes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 8(3), 403–414. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/gsc.v8i3.7754>

- Mohammadi, S.S. and Prasanna, B., 2003. Analysis of genetic diversity in crop plants salient statistical tools and considerations. *Crop Science*, 43, pp.1235-1248. <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.1235>
- Moradgholi, A., Mobasser, H., Ganjali, H., Fanaie, H. and Mehraban, A., 2023. Improving the water use efficiency, greenness index, and wheat grain yield under various irrigation regions using biofertilizer. *Journal of Plant Production Sciences*, 13(1), pp.43-58. [In Persian]
- Naghavi, M.R., Moghaddam, M., Toorchi, M. and Shakiba, M.R., 2016. Evaluation of Spring Wheat cultivars for Physiological, morphological and agronomic traits under drought stress. *Journal of Crop Breeding*, 8(18), pp.64-77. [In Persian]. <https://doi.org/10.29252/jcb.8.18.64>
- Najafi, S., Mohammadi, R., Shooshtari, L., Etminan, A. and Mehrabi, A.M., 2022. Evaluation of morpho-physiological diversity of Durum Wheat genotypes using genotype  $\times$  trait biplot method. *Journal of Crop Breeding*, 14(44), pp.211-226. [In Persian]. <https://doi.org/10.52547/jcb.14.44.211>
- Neocleous, D. and Nasilakakis, M., 2007. Effects of NaCl stress on red raspberry (*Rubus idaeus* L. "Autumn Bliss"). *Scientia Horticulture*, 112, pp.282-289. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.12.025>
- Pour-Aboughadareh, A., Etminan, A., Abdelrahman, M.K., Siddique, H.M. and Phan Tran, L.S., 2020. Assessment of biochemical and physiological parameters of durum wheat genotypes at the seedling stage during polyethylene glycolinduced water stress. *Plant Growth Regulation*, 92, pp.81-93. <https://doi.org/10.1007/s10725-020-00621-4>
- Rahimi, Z., Hosseinpanahi, F. and Siosemardeh, A., 2019. Evaluation of yield, radiation and water use efficiency of drought resistant and susceptible Wheat cultivars under different irrigation levels. *Plant Production and Genetics*, 2(1), pp.19-34. [In Persian]
- Rahmati, H. and Nakhzari Moghadam, A., 2024. Evaluation of agronomic and physiological characteristics of durum wheat cultivars under rainfed and supplementary irrigation conditions. *Cereal Biotechnology and Biochemistry*, 2(4), pp.446-467. [In Persian]. <https://doi.org/10.22126/cbb.2024.10445.1068>
- Rahmati, H., Nakhzari Moghadam, A., RahemiKarizaki, A. and Avarseji, Z., 2020. Evaluation of drought tolerance in Durum Wheat genotypes using drought tolerance indices. *Journal of Crop Breeding*, 12(33), pp.174-183. [In Persian]. <https://doi.org/10.29252/jcb.12.33.174>
- Rahmati, M., Ahmadi, A. and Hosseinpour, T., 2018. Study of genetic variability, heritability and relationship between grain yield and yield-related traits on bread wheat genotypes under dry land conditions. *Journal of Crop Breeding*, 10(25), pp.167-175. [In Persian]. <https://doi.org/10.29252/jcb.10.25.167>
- Reddy, A.R., Chaitanya, K.V. and Vivekanandan, M., 2004. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. *Journal of Plant Physiology*, 161, pp.1189-1202. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.01.013>
- Rezaie, A., Bijanzadeh, E. and Behpouri, A., 2020. Evaluation of weed control on biochemical characteristics, relative water content, and grain yield of mixed cropping of Wheat cultivars *Iranian Journal of Field Crops Research*, 18(3), pp.297-308. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/gsc.v18i3.85660>

- Rezvani, H., Asghari, J., Ehteshami, S.M.R. and Kamkar, B., 2014. Investigation of light use efficiency and light extinction coefficient of Wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars in competition with wild Mustard (*Sinapis arvensis* L.) at Gorgan. *Journal of Plant Process and Function*, 3(8), pp. 97-110. [In Persian]
- Sadegzadeh, N., Hajiboland, R. and Sadegzadeh, B., 2014. Different physiological response to drought in bread and durum wheat genotypes. *Iranian Dryland Agronomy Journal*, 3(1), pp.21-32. [In Persian]. <https://doi.org/10.22092/idaj.2014.100526>
- Saed-Moucheshi, A., Razi, H., Dadkhodaie, A., Ghodsi, M. and Dastfal, M., 2019. Association of biochemical traits with grain yield in triticale genotypes under normal irrigation and drought stress conditions. *Australian Journal of Crop Science*, 13(02), pp.272-281. <https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.02.p1403>
- Samsami, S., Bazrafshan, F., Zare, M., Amiri, B. and Bahrani, A., 2020. Interaction Between Different Levels of Nitrogen Fertilizer and Drought Stress on Photosynthetic Pigments and Yield in Four Wheat Cultivars. *Journal of Plant Ecophysiology*, 12(43), pp.171-184. [In Persian]
- Shahbazi, H., Arzani, A. and Esmaelzadeh Moghadm, M., 2016. Effects of drought stress on physiological characteristics in Wheat recombinant inbred lines. *Plant Process and Function*, 5 (15), pp.123-132. [In Persian]
- Shirvani, F., Daneshvar, M., Mohammadi, R. and Ismaili, A., 2021. Evaluation of agro-physiological characteristics and drought tolerance in some of Durum Wheat breeding genotypes. *Journal of Crop Breeding*, 12(36), pp.117-135. [In Persian]. <https://doi.org/10.52547/jcb.12.36.117>
- Siosemardeh, A., khalvandi, M., Bahram nejad, B. and Roohi, E., 2013. Effect of water stress on gas exchanges, leaf soluble protein and chlorophyll content of Sardari Wheat ecotypes. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 43(4), pp.573-588. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2013.29414>
- Slafer, G.A. and Savin, R., 1994. Sink-source relationships and grain mass at different positions within the spike in wheat. *Field Crops Research*, 37, pp.39-49. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)90080-9](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)90080-9)