

ارزیابی برهمکنش ژنوتیپ × محیط برای عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گندم دوروم تحت شرایط دیم و آبیاری تکمیلی با استفاده از مدل GGE بای پلات

هاجر بدری^۱، رضا محمدی^{۲*} و علیرضا اطمینان^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۹/۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۹

چکیده

تعیین سازگاری و پایداری عملکرد دانه ارقام زراعی یکی از مراحل مهم و پرهزینه در برنامه‌های اصلاحی است که به دلیل برهمکنش ژنوتیپ در محیط (G×E) به‌سادگی امکان‌پذیر نیست. به‌منظور بررسی برهمکنش G×E در گندم دوروم، آزمایشی با ۱۶ ژنوتیپ تحت دو شرایط دیم و آبیاری تکمیلی در مزرعه پژوهشی معاونت موسسه تحقیقات کشاورزی دیم (ایستگاه سرارود کرمانشاه) طی سه سال زراعی (۹۳-۱۳۹۱) انجام شد. از روش آماری GGE بای پلات (اثر ژنوتیپ + برهمکنش G×E) برای ارزیابی پایداری و سازگاری ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مورد بررسی استفاده شد. نتایج تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه نشان داد که اختلاف بین آثار اصلی ژنوتیپ و محیط و برهمکنش G×E در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. بزرگی برهمکنش G×E تقریباً دو برابر اثر اصلی ژنوتیپ بود که بیانگر وجود محیط‌های کلان در آزمایش است. بر اساس تجزیه GGE بای پلات برای عملکرد دانه، محیط‌ها به سه محیط کلان تفکیک و ژنوتیپ‌های سازگار برای هر محیط کلان تعیین شدند. ژنوتیپ G13 با عملکرد ۲۱۶۹ کیلوگرم در هکتار بهترین ژنوتیپ از لحاظ ترکیب عملکرد و پایداری بود. لاین‌های اصلاحی G3 و G15 به ترتیب با عملکرد ۱۹۶۰ و ۳۰۴۱ کیلوگرم در هکتار دارای بیش‌ترین میانگین عملکرد تحت دو شرایط دیم و آبیاری تکمیلی بودند. نتایج این تحقیق نشان داد که امکان گزینش ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایدار نسبت به شاهد آزمایش (رقم ساجی) وجود دارد که بیانگر بهبود ژنتیکی در برنامه‌های اصلاحی گندم دوروم تحت شرایط متغیر محیطی است.

واژه‌های کلیدی: اثر اصلی ژنوتیپ، پایداری، سازگاری، محیط‌های کلان

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران
۲- استادیار پژوهش، موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، معاونت سرارود، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران
۳- استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران
* نویسنده مسئول: r.mohammadi@areeo.ac.ir

مقدمه

گندم (*Triticum spp.*) یکی از محصولات استراتژیک است و نقش مهمی در تغذیه انسان دارد و همواره از آن به‌عنوان یک سلاح مهم در مبارزه با گرسنگی استفاده شده است. ۹۰ درصد گندم تولیدی دنیا گندم نان و ۱۰ درصد به گندم دوروم اختصاص دارد. سطح زیر کشت گندم دوروم (*Triticum turgidum L. var durum*) در دنیا ۲۰ میلیون هکتار است و تولید آن در سال‌های اخیر به حدود ۳۷/۵ میلیون تن رسیده است (Guzman *et al.*, 2016). سطح زیر کشت گندم دوروم در ایران بین ۳۰۰-۴۰۰ هزار هکتار است که بیش‌تر در مناطق گرمسیری و معتدل کشور شامل استان‌های گلستان، لرستان، کهگیلویه و بویر احمد، خوزستان، فارس، ایلام، اردبیل، کرمانشاه و برخی مناطق دیگر به‌صورت پراکنده قرار دارد (Mohammadi *et al.*, 2016).

معمولاً اصلاحگران نبات و زارعین به‌دنبال یافتن ارقام با میزان عملکرد و پایداری بالا تحت شرایط محیطی مختلف هستند. قابلیت برخی از ارقام زراعی که بتوانند به‌خوبی در شرایط مختلف محیطی رشد و نمو کنند، همواره مورد توجه اصلاح‌گران نباتات بوده است. بنابراین، اصلاح‌گران در برنامه‌های اصلاحی، بر "پایداری فنوتیپی" در محیط‌های هدف جهت شناسایی ژنوتیپ‌های با تولید قابل قبول تأکید دارند. به‌طور معمول، اصلاح‌گران سعی می‌کنند ژنوتیپ‌هایی را انتخاب کنند که پایداری و عملکرد بالایی در سال‌ها و مکان‌های مختلف داشته باشند. در مجموع یک ژنوتیپ زمانی پایدار است که عملکرد آن از میانگین عملکرد یک گروه از ژنوتیپ‌های استاندارد در محیط‌های مختلف انحراف کمتری داشته باشد (Gancales *et al.*, 2003). برهمکنش ژنوتیپ × محیط (G×E) یکی از مسائل مهم در مطالعات صفات کمی می‌باشد، زیرا برهمکنش G×E تفسیر آزمایش‌های ژنتیکی را پیچیده و پیش‌بینی‌ها را مشکل می‌سازد. این موضوع به‌ویژه در اصلاح گیاهان که یک ژنوتیپ در یک محیط ویژه انتخاب و سپس در محیط دیگری مورد استفاده قرار می‌گیرد، ایجاد مشکل می‌کند (Kearsey and Pooni, 1996). برهمکنش G×E در توسعه و گسترش وارته‌های اصلاح شده، از اهمیت فراوانی برخوردار است. وجود برهمکنش G×E، نشان‌دهنده واکنش متفاوت ژنوتیپ‌ها به شرایط محیطی مختلف است، به‌عبارت دیگر بهترین ژنوتیپ در یک محیط، لزوماً "بهترین ژنوتیپ در محیط

دیگر نیست و این ممکن است باعث کاهش پیشرفت ژنتیکی شود (Mohammadi and Amri, 2013).

مطالعات مربوط به سنجش پایداری ارقام در حدود نیم قرن پیش با روش تجزیه واریانس معمولی آغاز شد. از آن پس محققین روش‌های مختلفی را جهت شناسایی ارقام با پایداری فنوتیپی معرفی کردند. روش‌هایی مانند روش رگرسیون ابرهات و راسل (Eberhart and Russell, 1966)، فیلی و ویلکینسون (Finlay and Wilkinson, 1963)، واریانس پایداری شوکلا (Shukla, 1972) و آماره برتری لین و بینز (Lin and Binns, 1988) ارائه شده‌اند که در شناسایی ارقام پرمحصول و پایدار به محقق کمک کنند.

روش‌های مرسوم آماری همیشه برای تجزیه آزمایش‌های عملکرد موثر نیستند. تجزیه واریانس تنها مدل افزایشی را محاسبه می‌کند و برهمکنش G×E را به‌عنوان یک منبع تغییر فرض می‌کند و آنرا به اجزای آن تجزیه نمی‌کند. روش GGE بای‌پلات یکی از روش‌های آماری چند متغیره می‌باشد که برای تجزیه برهمکنش G×E استفاده شده است (Yan *et al.*, 2000). در روش GGE بای‌پلات، اثر محیط حذف می‌شود و آثار اصلی ژنوتیپ و برهمکنش G×E در آزمایش‌های چندمحیطی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بر این اساس ژنوتیپ‌ها می‌توانند بر مبنای عملکرد در محیط‌های جداگانه، تمام محیط‌ها، ترکیب پایداری و عملکرد و سازگاری خصوصی و عمومی ارزیابی شوند و ژنوتیپ ایده‌آل نیز مشخص شود. محیط‌ها نیز به‌طور همزمان ارزیابی و بر اساس توانایی در تشخیص ژنوتیپ‌ها و میزان نمایندگی برای سایر محیط‌ها گروه‌بندی می‌شوند (Yan and Tinker, 2006). همچنین روش GGE بای‌پلات قادر به شناسایی الگوهای "کدام ژنوتیپ (ها) برای کدام محیط (ها)" می‌باشد که در تعیین محیط‌های کلان و شناسایی ژنوتیپ‌های مناسب برای هر یک از محیط‌های کلان اهمیت دارد (Yan and Tinker, 2006). طبق تعریف یک محیط کلان به گروهی از محیط‌ها اطلاق می‌شود که در آن یک ژنوتیپ خاص بهترین عملکرد (واکنش محیطی) را داشته باشد (Yan and Rajcan, 2002). با توجه به سادگی تفسیر گرافیکی نتایج حاصل از مدل GGE بای‌پلات، امروزه از آن در تجزیه برهمکنش G×E در کشاورزی به‌صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

لاین‌ها با استفاده از روش GGE بای‌پلات تحت دو شرایط دیم و آبیاری تکمیلی بود.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق ۱۶ ژنوتیپ گندم دوروم انتخابی از برنامه اصلاحی گندم دوروم موسسه تحقیقات کشاورزی دیم که واجد ویژگی‌های زراعی مطلوب برای شرایط دیم بودند، تحت دو شرایط دیم و آبیاری تکمیلی طی سه سال زراعی (۹۳-۱۳۹۱) در مزرعه پژوهشی معاونت موسسه تحقیقات کشاورزی دیم (ایستگاه تحقیقات دیم سرارود- کرمانشاه) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار مورد ارزیابی قرار گرفتند. ایستگاه تحقیقات دیم سرارود با مشخصات طول جغرافیایی ۴۷ درجه و بیست دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و بیست دقیقه و ارتفاع ۱۳۵۱ متر از سطح دریا در ۱۵ کیلومتری کرمانشاه قرار دارد و دارای شرایط آب و هوایی معتدل سرد و با متوسط بارندگی بلندمدت ۴۲۵ میلی‌متر است. لازم به ذکر است که آزمایش‌های دیم و آبیاری تکمیلی در هر سال زراعی به‌طور مجزا و با فاصله حدود ۵۰۰ متر از یکدیگر انجام شدند.

به‌منظور برآورد درجه تنش اعمال‌شده در شرایط دیم

و آبیاری تکمیلی، شدت تنش ($SI = 1 - \frac{\bar{Y}_s}{\bar{Y}_p}$) بر اساس

روش روزیل و هامبلین (Rosielle and Hamblin, 1981) برآورد شد که در آن \bar{Y}_s و \bar{Y}_p به ترتیب میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی هستند. اسامی ژنوتیپ‌ها در جدول ۱ ارایه شده است. در هر محیط، عملیات تهیه زمین طبق اصول متعارف انجام گرفت و کودهای لازم طبق توصیه کارشناسان آب و خاک براساس ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار فسفات آمونیوم و ۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره محاسبه و در هر دو شرایط بطور یکسان در مرحله کاشت مصرف شد. هر ژنوتیپ در شش خط شش متری با فاصله خطوط ۲۰ سانتی‌متر و تراکم ۴۰۰ بذر در متر مربع کشت شد. مبارزه با علف‌های هرز و آفات و بیماری‌ها طبق توصیه‌های کارشناسان انجام شد. اولین بارندگی پس از کاشت به‌عنوان تاریخ کاشت منظور شد از این تاریخ به بعد در طرح آزمایشی دیم تا زمان برداشت هیچ آبیاری انجام نشد، اما در آزمایش آبیاری تکمیلی در دو مرحله (گلدهی و دانه‌بندی) آبیاری به روش بارانی انجام شد.

یان و همکاران (Yan *et al.*, 2000) از روش GGE بای‌پلات برای گروه‌بندی محیط‌های مورد کشت گندم زمستانه در کانادا استفاده و محیط‌ها را به دو محیط کلان گروه‌بندی کردند که متفاوت از گروه‌بندی قدیمی بود که آن‌ها را به چهار گروه تقسیم کرده بود. در تحقیقی محمدی و عمری (Mohammadi and Amri, 2013) از مدل GGE بای‌پلات به‌منظور تعیین ژنوتیپ‌های گندم دوروم با عملکرد و پایداری بالا در محیط‌های دیم و آبیاری تکمیلی استفاده و با استفاده از مدل GGE بای‌پلات لاین‌های اصلاحی برتر از ارقام شاهد را معرفی کردند. مسلمی و همکاران (Moslemi *et al.*, 2012) به‌منظور ارزیابی عملکرد دانه و اجزای عملکرد ۲۱ ژنوتیپ پیشرفته گندم به‌همراه ارقام شاهد آذر-۲ و الوند به‌صورت دیم و آبیاری تکمیلی بر اساس مدل GGE بای‌پلات، ژنوتیپ‌های برتر از لحاظ عملکرد و پایداری را تعیین کردند. شارما و همکاران (Sharma *et al.*, 2010) از مدل GGE بای‌پلات برای یافتن ژنوتیپ‌های گندم زمستانه با عملکرد و پایداری بالا از بین ۲۵ ژنوتیپ حاصل از برنامه‌های اصلاح گندم‌های زمستانه بین‌المللی سیمیت در آسیای مرکزی و غرب آسیا استفاده و پنج ژنوتیپ با عملکرد و پایداری بالا را شناسایی کردند. بادو آپراکو و همکاران (Badu-Apraku *et al.*, 2012) نیز به‌منظور تجزیه برهمکنش $G \times E$ برای ۱۲ ژنوتیپ ذرت زودرس در ۱۷ مکان و تعیین محیط‌های کلان و ژنوتیپ‌های پایدار با سازگاری مناسب به مناطق غرب آفریقا از مدل GGE بای‌پلات استفاده و مشخص کردند که مدل GGE بای‌پلات قادر به شناسایی سه محیط به‌عنوان هسته اصلی محیط‌های کلان برای آزمون‌های ناحیه‌ای عملکرد ذرت در غرب آفریقا بود. استفاده از مدل GGE بای‌پلات به‌منظور استخراج اطلاعات موجود در برهمکنش $G \times E$ برای ژنوتیپ‌های مختلف گیاهان زراعی در سال‌ها و مکان‌های مختلف مفید است. این روش با نمایش گرافیکی برهمکنش $G \times E$ به اصلاح‌گر کمک می‌کند تا به‌سادگی، پایداری ژنوتیپ‌ها و ترکیب پایداری با عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف را ارزیابی کنند. همچنین استفاده از این روش امکان بررسی روابط میان محیط‌ها و شناسایی محیط‌های هدف در برنامه‌های اصلاحی را آسان می‌کند (Yan *et al.*, 2000).

در این تحقیق نیز چند لاین اصلاحی گندم دوروم طی سه سال مورد ارزیابی قرار گرفتند که هدف از آن بررسی برهمکنش $G \times E$ ، پایداری عملکرد دانه و سازگاری این

$$Y_{ij} - \bar{Y}_{.j} = \lambda_1 \zeta_{i1} \eta_{j1} + \lambda_2 \zeta_{i2} \eta_{j2} + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

در پایان هر سال زراعی و پس از رسیدن محصول، برداشت به وسیله کمباین آزمایشی وینتراشتاگر انجام و عملکرد کرت‌های آزمایشی پس از توزین بر حسب کیلوگرم در هکتار ثبت شد. تجزیه واریانس مرکب داده‌ها با فرض ثابت بودن اثر ژنوتیپ و تصادفی بودن اثر سال و مکان، پس از اطمینان از یکنواخت بودن خطاهای آزمایشی با استفاده از آزمون کلوموگروف- اسمیرنوف و نرم‌افزار Minitab ver. 15 انجام شد. سپس، برهمکنش $G \times E$ با استفاده از مدل آماری GGE بای‌پلات برای عملکرد دانه ۱۶ ژنوتیپ مورد بررسی در شش محیط دیم و آبیاری تکمیلی به وسیله نرم‌افزار GenStat ver. 15 انجام گرفت. تجزیه مجموع مربعات برهمکنش $G \times E$ به منظور برآورد سهم مولفه‌های اصلی برهمکنش انجام می‌شود. در این حالت مجموع مربعات برهمکنش به مولفه‌های اصلی معنی‌دار و غیرمعنی‌دار تبدیل و مولفه‌های اصلی برهمکنش غیرمعنی‌دار به صورت برهمکنش باقیمانده در مدل تعریف می‌شوند.

از مدل آماری GGE بای‌پلات بر اساس رابطه (۱) جهت تجزیه برهمکنش $G \times E$ برای عملکرد دانه استفاده شد:

عملکرد ژنوتیپ i ام در محیط j ام، $\bar{Y}_{.j}$ میانگین عملکرد همه ژنوتیپ‌ها در محیط j ام، λ_1 و λ_2 به ترتیب مقادیر منفرد اولین و دومین مولفه اصلی، ζ_{i1} و ζ_{i2} به ترتیب ضرایب اولین و دومین مولفه اصلی و η_{j1} و η_{j2} به ترتیب ضرایب اولین و دومین مولفه برای محیط j ام و ε_{ij} باقیمانده مدل است. با توجه به مدل بالا، GGE بای‌پلات بر اساس دو مولفه اول و دوم ($PC1 + PC2$) تشکیل شد. بر این اساس، از الگوی "کدام ژنوتیپ - کدام محیط‌ها" در مدل GGE بای‌پلات به منظور بررسی برهمکنش متقاطع و غیرمتقاطع و تعیین محیط‌های کلان در برنامه اصلاحی گندم دوروم استفاده شد. همچنین برای ارزیابی میزان پایداری ژنوتیپ‌ها و انتخاب هم‌زمان عملکرد و پایداری و تعیین ژنوتیپ ایده‌آل از مدل GGE بای‌پلات استفاده شد.

جدول ۱- ژنوتیپ‌ها و مشخصات شرایط محیطی مورد مطالعه در این تحقیق

Table 1. The genotypes and characteristics of the environmental conditions studied in this research

Code	Genotype	Environment				
		Code	Growing season	Condition	Rainfall (mm)	Irrigation (mm)
G1	Saji (Check)	RF91	1390-91	Rainfed	303	50
G2	G-1252	IR91	1390-91	Irrigated	303	
G3	61-130	RF92	1391-92	Rainfed	394	50
G4	BCRIS/BICUM//...	IR92	1391-92	Irrigated	394	
G5	D94528/3/2*STOT//...	RF93	1392-93	Rainfed	401	50
G6	CBC509HILE/SOMAT_3.1/3/...	IR93	1392-93	Irrigated	401	
G7	MINIMUS/COMBDUCK_2//...					
G8	MINIMUS/COMBDUCK_2//CHAM_3/3/...					
G9	CF4-JS 1//RASCON_39/TILO_1					
G10	PNE/2*RASCON_37/3//...					
G11	SORA/2*PLATA_12//...					
G12	1A.1D 5+10-6/2*WB881//1A.1D 5+106/3*MOJO/3/SOOTY_9/RASCON					
G13	INTER_16/SNITAN/9//...					
G14	CF4JS40/10/PLATA_10/6//...					
G15	P91.272.3.1/3*MEXI75/3//...					
G16	SORA/2*PLATA_12/3//...					

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه برای ۱۶ ژنوتیپ مورد مطالعه در شش محیط در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین ژنوتیپ‌ها، محیط‌ها و برهمکنش GxE در سطح احتمال یک درصد وجود داشت. معنی‌دار بودن برهمکنش GxE نشان داد که واکنش ژنوتیپ‌ها به محیط‌های مورد بررسی متفاوت است که بیانگر تفاوت در رتبه ژنوتیپ‌ها از محیطی به محیط دیگر می‌باشد. بزرگی برهمکنش GxE نسبت به اثر ژنوتیپ حدود دو برابر بود که حاکی از وجود محیط‌های

کلان (Yan *et al.*, 2000) در آزمایش‌های عملکرد گندم دوروم تحت شرایط دیم و آبیاری تکمیلی بود. تاثیر کم ژنوتیپ در توجیه تنوع موجود احتمالاً به این دلیل است که در سال‌های گذشته در برنامه‌های اصلاحی گندم دوروم ژنوتیپ‌های برتر از لحاظ عملکرد انتخاب شده و این محیط و برهمکنش GxE نقش کم‌تری در توجیه تنوع موجود داشته‌اند که با سایر نتایج گزارش شده مطابقت داشت (Yan *et al.*, 2000; Samonte *et al.*, 2005; Fan *et al.*, 2007; Rose *et al.*, 2008).

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس مرکب ۱۶ ژنوتیپ گندم دوروم مورد مطالعه در شش محیط (دو شرایط دیم و آبیاری تکمیلی طی سه سال زراعی، ۹۳-۱۳۹۱)

Table 2. Combined analysis of variance for 16 durum wheat genotypes studied in six environments (two rainfed and supplemental conditions during three years, 2011-14)

Source of variations	df	Mean squares	Percent to total sum of square
Genotype (G)	15	686632**	2.17
Environment (E)	5	80185130**	84.47
Block/E	12	898938**	2.27
G×E interaction	75	304400**	4.81
Residual of G×E interaction	39	166536 ^{ns}	28.4
Experimental error	180	165449	6.27
Total	287	1653740	

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

دانه، به‌طور متوسط ۱۰۶۳ کیلوگرم در هکتار عملکرد دانه را افزایش داد و نشان داد که ژنوتیپ‌ها طی سه سال آزمایش در شرایط دیم نسبت به شرایط آبیاری تکمیلی به‌طور متوسط تحت تنش متوسط (شدت تنش یا SI برابر با ۴۱ درصد) بوده‌اند. تحت شرایط دیم، لاین‌های اصلاحی گندم دوروم G2، G3، G6 و به‌ترتیب با میانگین عملکرد ۱۹۶۰، ۱۸۳۲ و ۱۸۱۲ کیلوگرم در هکتار برتر از رقم شاهد ساجی (G1) بودند و لاین‌های G8، G9 و G15 دارای کم‌ترین میانگین عملکرد در شرایط دیم بودند (جدول ۳). در شرایط آبیاری تکمیلی، لاین اصلاحی G15 با میانگین عملکرد ۳۰۴۱ کیلوگرم در هکتار از رقم شاهد با عملکرد ۲۹۴۹ کیلوگرم در هکتار برتر بود. لاین‌های G14، G5 و G8 به‌ترتیب کم‌ترین میانگین عملکرد را در شرایط آبیاری تکمیلی داشتند (جدول ۳).

به‌منظور بررسی واکنش ژنوتیپ‌ها در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی، میانگین سه ساله عملکرد ژنوتیپ‌ها تحت دو شرایط دیم و آبیاری تکمیلی در جدول ۳ ارائه شد. نتایج نشان داد که واکنش ژنوتیپ‌ها در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی متفاوت بود که ناشی از نقش محیط بر عملکرد ژنوتیپ‌ها می‌باشد. میانگین کل عملکرد ژنوتیپ‌ها برابر با ۲۰۷۳ کیلوگرم در هکتار و دامنه تغییرات عملکرد بین ۱۸۰۴ (لاین G14) تا ۲۳۹۵ (لاین G15) کیلوگرم در هکتار بود. از لحاظ میانگین عملکرد، ژنوتیپ G1 (رقم شاهد ساجی) دارای رتبه دوم (۲۳۵۹ کیلوگرم در هکتار) بود و سایر لاین‌های اصلاحی عملکرد دانه کم‌تری نسبت به رقم شاهد داشتند (جدول ۳). میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها در شرایط دیم ۱۵۴۲ کیلوگرم در هکتار و در شرایط آبیاری تکمیلی ۲۶۰۵ کیلوگرم در هکتار بود. بنابراین، اعمال دو بار آبیاری در مرحله گلدهی تا پرشدن

جدول ۳- میانگین عملکرد دانه ۱۶ ژنوتیپ گندم دوروم مورد مطالعه تحت شرایط دیم و آبیاری تکمیلی در سه سال
Table 3. Average grain yield for 16 durum wheat genotypes under rainfed and supplemental irrigation conditions in three years

Genotype	Total average grain yield (kg.ha ⁻¹)	Average grain yield under rainfed conditions (kg.ha ⁻¹)	Average grain yield under supplemental irrigation conditions (kg.ha ⁻¹)
G1	2360	1770	2949
G2	2273	1832	2715
G3	2323	1960	2685
G4	2106	1519	2693
G5	1902	1467	2337
G6	2189	1812	2565
G7	1998	1445	2552
G8	1844	1284	2404
G9	1882	1272	2492
G10	1870	1301	2438
G11	1933	1286	2580
G12	2025	1396	2654
G13	2169	1737	2600
G14	1804	1324	2283
G15	2395	1748	3041
G16	2106	1523	2690
Total average	2073	1542	2605

آبیاری تکمیلی IR93 بود که ژنوتیپ G14 برترین ژنوتیپ در آن بود. بنابراین، ژنوتیپ‌های G15 و G3 برای هر دو شرایط دیم و آبیاری تکمیلی مناسب بودند. مسلمی و همکاران (Moslemi *et al.*, 2012) نیز جهت ارزیابی عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گندم در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی، از مدل GGE بای پلات استفاده و ژنوتیپ‌های مناسب برای هر دو شرایط را شناسایی کردند.

میانگین عملکرد دانه و پایداری ژنوتیپ‌های مورد بررسی به‌طور همزمان در شکل ۲ ارایه شده است. محوری که با فلش و دایره نشان داده شده است، محور میانگین عملکرد محیطی (ATC) نامیده می‌شود و شاخصی است که میانگین عملکرد ژنوتیپ‌های آزمایش را با متوسط کل مقایسه می‌کند (Yan and Tinker, 2006). ژنوتیپ‌هایی که در سمت راست محور (محور سنجش پایداری) عمود بر ATC قرار دارند، دارای عملکرد بیش‌تر از متوسط و ژنوتیپ‌های واقع در سمت چپ این محور، دارای عملکرد کم‌تر از متوسط هستند. ژنوتیپ‌های با طول تصویر کم‌تر روی محور ATC، دارای کم‌ترین نقش در برهمکنش بوده و پایدار هستند و برعکس ژنوتیپ‌های با طول تصویر بیش‌تر روی محور ATC ناپایدار هستند (Yan and Kang, 2003). بنابراین، ژنوتیپ‌هایی مانند G6، G13 و G4 که دارای عملکرد بیش‌تر از متوسط و طول

به‌منظور بررسی گرافیکی برهمکنش G×E از تجزیه GGE بای پلات استفاده شد. یکی از جنبه‌های مهم تجزیه گرافیکی مدل GGE بای پلات، نمودار چندضلعی برهمکنش G×E است که با استفاده از این نمودار می‌توان تفسیر برهمکنش G×E را به خوبی انجام داد. نمودار چندضلعی برهمکنش G×E برای ۱۶ ژنوتیپ گندم دوروم در شش محیط در شکل ۱ ارایه شده است. نتایج نشان داد که GGE بای پلات ۷۵/۰۸ درصد از کل تغییرات (مولفه اول ۴۹/۰۲ و مولفه دوم ۲۶/۰۶ درصد) را توجیه کرد که بیانگر توجیه درصد بالایی از تغییرات برهمکنش G×E به‌وسیله مدل GGE بای پلات است. شش ژنوتیپ شامل ژنوتیپ‌های G1، G3، G5، G15، G16، G14 و G10 در رأس چندضلعی قرار گرفتند که بدین معنی است که این ژنوتیپ‌ها دارای بیش‌ترین عملکرد در برخی از محیط‌ها یا دارای کم‌ترین عملکرد در برخی دیگر از محیط‌ها هستند (Yan *et al.*, 2000).

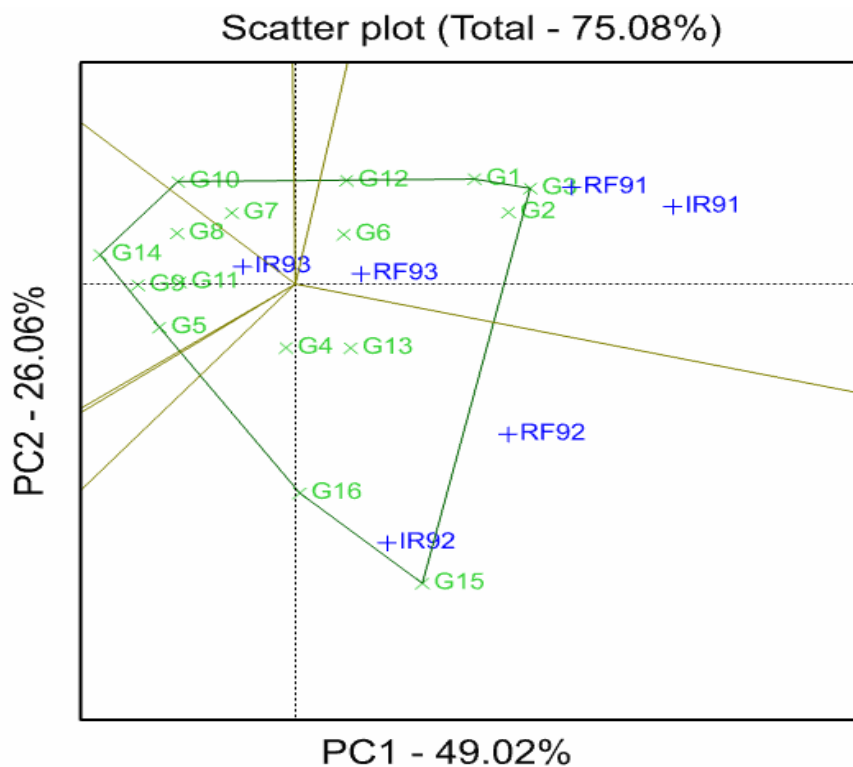
در این تحقیق سه محیط کلان تشخیص داده شد. اولین محیط کلان، محیط‌های دیم RF92 و آبیاری تکمیلی IR92 بودند که در آن‌ها G15 برترین ژنوتیپ بود. دومین محیط کلان، محیط‌های دیم RF91 و RF93 و آبیاری تکمیلی IR91 بودند که ژنوتیپ G3 بیش‌ترین عملکرد را در آن‌ها داشت. سومین محیط کلان نیز فقط شامل محیط

G4 و G6 نیز با میانگین عملکرد بالاتر از متوسط جزء ژنوتیپ‌های پایدار بودند. لاین‌های G1، G2، G3، G15 و G1 به ترتیب با بیش‌ترین میانگین عملکرد جزء ناپایدارترین ژنوتیپ‌ها بودند که نشان‌دهنده سازگاری این ژنوتیپ‌ها به برخی از محیط‌ها می‌باشد. در این بررسی، پایدارترین ژنوتیپ‌ها (یعنی G4 و G11) دارای میانگین عملکرد کم‌تر از متوسط بودند. استفاده از مدل GGE بای‌پلات برای ارزیابی پایداری و ترکیب پایداری و عملکرد به‌طور هم‌زمان در گیاهان زراعی توسط یان و همکاران (Yan *et al.*, 2000) در گندم، کانگ و همکاران (Kang *et al.*, 2006) در لوبیا و فان و همکاران (Fan *et al.*, 2007) در ذرت مورد استفاده و تاکید قرار گرفته است.

تصویر کوتاه‌تر بر محور ATC بودند، به‌عنوان ژنوتیپ‌های با عملکرد و پایداری بالا شناسایی شدند. ژنوتیپ‌های G15 و G14 نیز به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین میانگین عملکرد را داشتند که در توافق با میانگین داده‌های اصلی و بیانگر درستی مدل GGE بای‌پلات بود (Yan, 2002). رتبه گرافیکی میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها بر اساس شکل ۲ به ترتیب زیر بود:

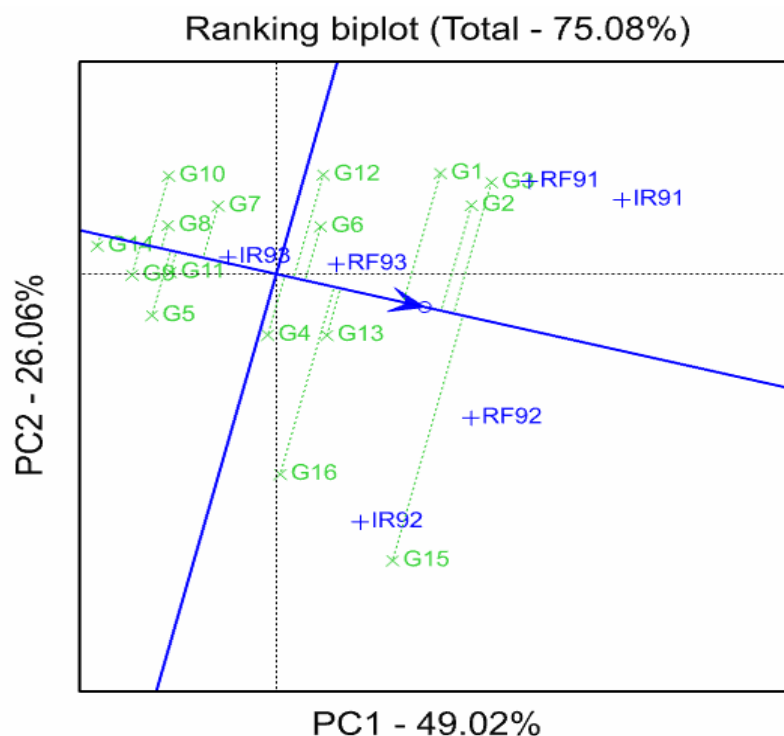
G15>G3>G2>G1>G13>G16>G6>G12>G4>
G7>G11>G5>G8>G10>G9>G14

بر اساس ترکیب میانگین عملکرد و پایداری، لاین G13 دارای بهترین ترکیب عملکرد و پایداری بود. ژنوتیپ‌های



شکل ۱- نمودار چندضلعی GGE بای‌پلات برای ۱۶ ژنوتیپ گندم دوروم در شش محیط (دو شرایط دیم و آبیاری تکمیلی طی سه سال زراعی، ۹۳-۱۳۹۱). نام ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

Figure 1. Polygon view of GGE biplot for 16 durum wheat genotypes across six environments (two rainfed and supplemental conditions during three years, 2011-14). The name of genotypes and environments are shown in Table 1.

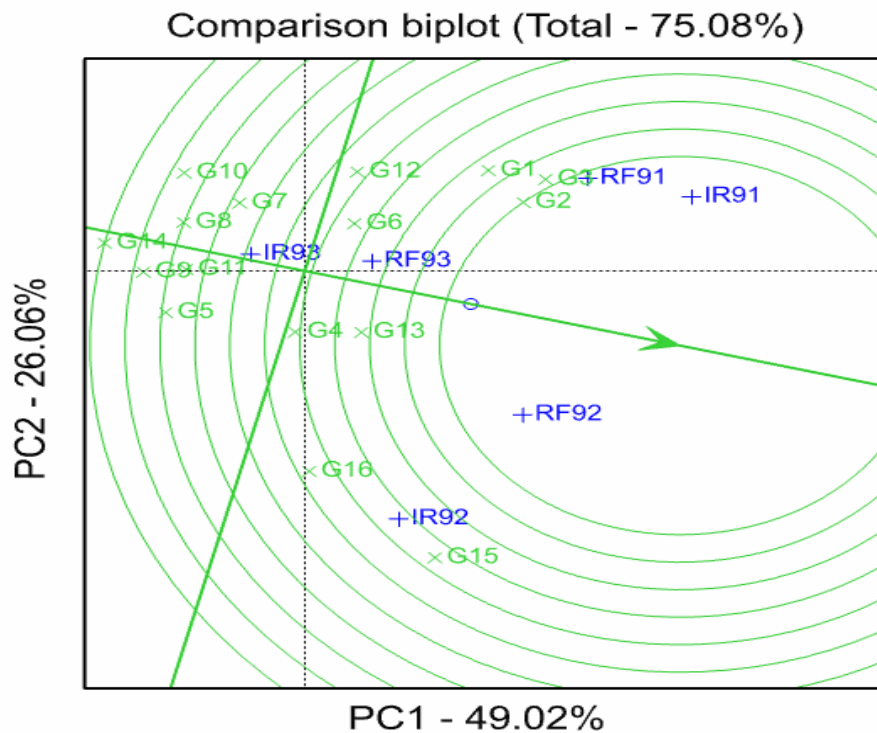


شکل ۲- نمودار GGE بای پلات برای ارزیابی هم‌زمان عملکرد و پایداری ۱۶ ژنوتیپ گندم دوروم در شش محیط (دو شرایط دیم و آبیاری تکمیلی طی سه سال زراعی، ۹۳-۱۳۹۱). نام ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

Figure 2. GGE biplot for simultaneous evaluation of mean yield and stability of 16 durum wheat genotypes across six environments (two rainfed and supplemental conditions during three years, 2011-14). The name of genotypes and environments are shown in Table 1.

به‌عنوان مرجع ارزیابی، دایره‌های هم‌مرکزی به‌منظور تعیین گرافیکی فاصله بین ژنوتیپ‌های مطالعه شده با ژنوتیپ ایده‌آل ایجاد شد (شکل ۳). این دایره‌های هم‌مرکز با برخورداری از ژنوتیپ ایده‌آل در مرکز، به تجسم فاصله بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه و ژنوتیپ ایده‌آل کمک می‌کنند. بنابراین، G13 که نزدیک‌ترین ژنوتیپ به ژنوتیپ ایده‌آل است، مطلوب‌تر از کلیه ژنوتیپ‌های مورد آزمایش از نظر عملکرد و پایداری در محیط‌های دیم و آبیاری تکمیلی بود (شکل ۳). در مقابل، ژنوتیپ G14 که دارای بیش‌ترین فاصله از ژنوتیپ ایده‌آل است، به‌عنوان لاین نامناسب برای هر دو شرایط تعیین شد.

دایره کوچک در شکل ۳ که روی محور افقی ATC واقع است و با یک پیکان نشان داده شده است، بیانگر ژنوتیپ ایده‌آل است که به‌وسیله دو معیار تعریف می‌شود: (۱) دارای بالاترین عملکرد در محیط‌های مورد مطالعه باشد و (۲) کاملاً پایدار نسبت به شرایط محیطی باشد، زیرا روی محور ATC قرار گرفته است (Yan, 2002). این ژنوتیپ به‌عنوان لاینی که دارای بیش‌ترین طول روی محور ATC (بیشترین عملکرد) و دارای حداقل نقش در برهمکنش $G \times E$ (کم‌ترین طول تصویر) باشد، تعریف شده است. چنین ژنوتیپ ایده‌آلی به ندرت در واقعیت وجود دارد. با این حال، می‌توان از آن به‌عنوان یک مرجع برای ارزیابی ژنوتیپ‌های مورد نظر استفاده کرد. به‌منظور استفاده از ژنوتیپ ایده‌آل



شکل ۳- نمودار GGE بای پلات برای ارزیابی ژنوتیپ ایده‌آل در شش محیط (دو شرایط دیم و آبیاری تکمیلی طی سه سال زراعی، ۹۳-۱۳۹۱). نام ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

Figure 3. GGE biplot for evaluation of ideal genotype across six environments (two rainfed and supplemental conditions during three years, 2011-14). The name of genotypes and environments are shown in Table 1.

نتایج‌گیری کلی
نتایج این تحقیق نشان داد که محیط مهم‌ترین عامل در تغییرات عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف می‌باشد. واکنش ژنوتیپ‌ها در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی متفاوت بود و بنابراین ژنوتیپ‌های مناسب برای شرایط دیم متفاوت از شرایط آبیاری تکمیلی بودند. بر اساس نتایج حاصل، لاین‌های اصلاحی G3 و G15 به دلیل داشتن پتانسیل بالای عملکرد به ترتیب در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی و نیز برتری نسبت به رقم شاهد ساجی، به عنوان

لاین‌های اصلاحی امیدبخش می‌توانند در برنامه اصلاحی گندم دوروم مورد توجه بیشتر باشند. لاین اصلاحی G13 با توجه به داشتن ترکیب مناسب عملکرد و پایداری به عنوان یک ژنوتیپ مناسب در محیط‌های متغیر می‌تواند مورد بررسی بیشتر قرار گیرد. نتایج حاصل نشان داد که امکان گزینش ژنوتیپ‌های با عملکرد و پایداری بالا (لاین G13) نسبت به شاهد آزمایش (ساجی) وجود دارد که بیانگر بهبود ژنتیکی برای عملکرد و پایداری در برنامه‌های اصلاحی گندم دوروم تحت شرایط متغیر محیطی دیم می‌باشد.

References

- Badu-Apraku, Oyekunle, B., Obeng-Antwik, M., Osuman, A. S. Ado, S. G. Couliba, Y. N. Yallou, C. G. Abdulai, M., Boakyewa, G. A. and Didjeira, A. 2012.** Performance of extra-early maize cultivars based on GGE biplot and AMMI analysis. *Journal of Agricultural Science (Cambridge)* 150: 473-483.
- Eberhart, S. A. and Russell, W. A. 1966.** Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science* 6: 36-40.
- Fan, X. M., Kang, M. S., Chen, H., Zhang, Y., Tan, J. and Xu, C. 2007.** Yield stability of maize hybrids evaluated in multi-environment trials in Yunnan, China. *Agronomy Journal* 99: 220-228.
- Finlay, K. W. and Wilkinson, G. N. 1963.** The analysis of adaptation in a plant breeding programme. *Australian Journal of Agricultural Research* 14: 742-754.

- Gabriel, K. R. 1971.** The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. *Biometrika* 58: 453-467.
- Gancales, P. S., Bortoletto, N., Mellomartins, A. L., Costa, R. B. and Gallo, P. B. 2003.** Genotype-environment interaction and phenotypic stability for girth growth and rubber yield hevea clones in saopaulo state. Brazil. *Genetics and Molecular Biology* 26 (4): 441-448.
- Gauch, H. G. 1992.** Statistical analysis of regional yield trials: AMMI analysis of factorial designs. Elsevier, Amsterdam, Netherlands. 278 p.
- Guzman, C., Autrique, J. E., Mondal, S., Singh, R. P., Govindan, V., Morales-Dorantes, A., Romano, G. P., Crossa, J., Ammar, K. and Pena, R. J. 2016.** Response to drought and heat stress on wheat quality, with special emphasis on bread-making quality, in durum wheat. *Field Crops Research* 186: 157-165.
- Kang, M. S., Aggarwal V. D. and Chirwa, R. M. 2006.** Adaptability and stability of bean cultivars as determined via yield stability statistic and GGE biplot analysis. *Journal of Crop Improvement* 15: 97-120.
- Kearsey, M. J. and Pooni H. S. 1996.** The genetical analysis of quantitative traits. Plant genetics group. School of Biological Sciences, The University of Birmingham.
- Lin, C. S. and Binns, M. R. 1988.** A superiority measure of cultivar performance for cultivar \times location data. *Canadian Journal of Plant Sciences* 68: 193-198.
- Mohammadi, R. and Amri, A. 2013.** Genotype \times environment interaction and genetic improvement for yield and yield stability of rainfed durum wheat in Iran. *Euphytica* 192: 227-249.
- Mohammadi, R., Abdolahi, A., Mohammadi, M. S., Elahi, K. and Yari, S. R. 2016.** Evaluation of yield gap of durum wheat genotypes under research and farmer's fields conditions. *Research Achievements for Fields and Horticulture Crops* 5 (2): 133-141. (In Persian with English Abstract).
- Moslemi, M., Roustaii, M. and Rashidi, V. 2012.** Evaluation of grain yield and yield components in bread wheat genotypes under different moisture regimes. *Seed and Plant Improvement Journal* 28 (4): 611-630. (In Persian with English Abstract).
- Rakshit, S., Ganapathy, K. N., Gomashe, S. S., Rathore, A., Ghorade, R. B., Nagesh-Kumar, M. V., Ganesmurthy, K., Jain, S. K., Kamtar, M. Y., Sachan, J. S., Ambekar, S. S., Ranwa, B. R., Kanawade, D. G., Balusamy, M., Kadam, D., Sarkar, A., Tonapi, V. A. and Patil, J. V. 2012.** GGE biplot analysis to evaluate genotype, environment and their interactions in sorghum multi-location data. *Euphytica* 85: 465-479.
- Rose, I. V. L. W., Das, M. K. and Taliaferro, C. M. 2008.** A comparison of dry matter yield stability assessment methods for small numbers of genotypes of bermudagrass. *Euphytica* 164: 19-25.
- Rosielle, A. A. and Hamblin, J. 1981.** Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment. *Crop Science* 21: 943-946.
- Samonte, S. O. P. B., Wilson, L. T., McClung, A. M. and Medley, J. C. 2005.** Targeting cultivars onto rice growing environments using AMMI and SREG GGE biplot analysis. *Crop Science* 45: 2414-2424.
- Sharma, R. C., Morgounov, A. I., Braun, H. J., Akin, B., Keser, M., Bedoshvili, D., Bagci, A., Martius, C. and van Ginkel, M. 2010.** Identifying high yielding stable winter wheat genotypes for irrigated environments in central and west Asia. *Euphytica* 171: 53-64.
- Shukla, G. K. 1972.** Some statistical aspects of partitioning genotype-environmental components of variability. *Heredity* 29: 237-245.
- Yan, W. 2002.** Singular value partitioning in biplot analysis of multi-environment trial data. *Agronomy Journal* 94: 990-996.
- Yan, W. and Kang, M. S. 2003.** GGE Biplot analysis: A graphical tool for breeders, geneticists and agronomists. 1st Ed. CRC Press LLC., Boca Roton, Florida. 271 p.
- Yan, W., Hunt, L. A., Sheng, Q. and Szlavnic, Z. 2000.** Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Science* 40: 597-605.
- Yan, W. and Tinker, N. A. 2006.** An integrated system of biplot analysis for displaying, interpreting, and exploring genotype-by-environment interactions. *Crop Science* 45: 1004-1016.
- Yan, W. and Rajcan, I. R. 2002.** Biplot analysis of test sites and trait relations of soybean in Ontario. *Crop Science* 42: 11-20.



University of Guilan
Faculty of Agricultural
Sciences

Cereal Research
Vol. 8, No. 1, Spring 2018 (73-83)

Study of genotype \times environment interaction for grain yield of durum wheat genotypes under rainfed and supplemental irrigation conditions by GGE biplot

Hajar Badri¹, Reza Mohammadi^{2*} and Alireza Etmnan³

Received: November 29, 2017

Accepted: January 29, 2018

Abstract

Determining adaptability and stability of crop varieties is one of the most important stages in plant breeding programs, which it is costly and is not easy to do due to genotype \times environment (G \times E) interaction effects. To study G \times E interaction for grain yield in durum wheat, an experiment with 16 durum wheat genotypes was carried out in a randomized complete block design with three replications under rainfed and supplemental irrigation conditions at research field of Dryland Agricultural Research Sub-Institute (Sararood Station), Kermanshsh, Iran, during three growing seasons (2011-14). The GGE (G + G \times E) biplot was applied to study G \times E interaction. Combined analysis of variance showed significant differences ($P < 0.01$) between genotypes, environments and G \times E interaction effects. The G \times E interaction variance was greater about two times than genotypic variance, indicating the possibility of existing environmental groups for genotype adaptation. The GGE biplot analysis indicated that the environments were classified into three mega-environments with winning genotypes. Biplot analyses identified the breeding line G13 (2169 kg.ha⁻¹) as the best genotype with high yielding and stability performance. The breeding lines G3 and G15 with 1960 and 3041 kg.ha⁻¹, respectively, had the highest mean yield under rainfed and supplemental irrigation conditions, indicating the superiority of these two lines than the check cultivar in the both rainfed and supplemental irrigation conditions. In conclusion, positive increase in yield and yield stability is attributable predominately to genetic improvement in durum wheat breeding lines under variable environments.

Keywords: Adaptability, Genotypic main effect, Mega-environments, Stability

1. Former M. Sc. Student, Dept. of Agronomy and Plant Breeding, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

2. Research Assist. Prof., Dryland Agricultural Research Institute, Sararood Branch, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Kermanshah, Iran

3. Assist. Prof., Dept. of Agronomy and Plant Breeding, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

* Corresponding author: r.mohammadi@areeo.ac.ir