



"مقاله پژوهشی"

ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌های گندم دوروم به روش GGE بای پلات

رحمت‌الله کریمی‌زاده^۱، طهماسب حسین‌پور^۲، جبار آلت‌جعفری‌بای^۳، کمال شهبازی هومونلو^۴، محمد آرمیون^۵
و پیمان شریفی^۶

۱- موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کهگیلویه و بویراحمد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گچساران، ایران

۲- مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران

۳- مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گنبد، ایران

۴- مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اردبیل، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مغان، ایران

۵- مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران

۶- دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران، (نویسنده مسؤل: sharifi@iaurasht.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۹/۳/۱۳ تاریخ پذیرش: ۹۹/۵/۲۷

صفحه: ۱ تا ۱۷

چکیده

تعداد ۱۹ لاین گندم دوروم برگزیده از آزمون مقدماتی عملکرد به همراه رقم شاهد دهدشت در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در پنج منطقه گچساران، گنبد، مغان، خرم‌آباد و ایلام طی سه سال زراعی ۱۳۹۴-۱۳۹۱ بررسی شدند. تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثر ژنوتیپ، سال و مکان و برهمکنش سال × مکان، سال × ژنوتیپ و ژنوتیپ × سال × مکان بر عملکرد دانه معنی‌دار بود. آزمون اسکریت نشان داد که چهار مؤلفه اصلی اول سهم قابل توجهی در توجیه برهمکنش ژنوتیپ در محیط (GEI) داشتند، به طوری که مؤلفه اصلی اول و دوم به ترتیب ۲۲/۷۰٪ و ۱۸/۷۱٪ از تغییرات را توجیه می‌کردند. نمودار موزائیکی نشان داد که ۱۱/۵۴٪ از تنوع کل ناشی از اثر ژنوتیپ و ۸۸/۴۶٪ ناشی از برهمکنش ژنوتیپ در محیط بود. نمودار گرمایی نیز نشان داد که ژنوتیپ‌های ۱۶، ۱۹ و ۲۰ دارای عملکرد بالا در بسیاری از محیط‌ها بودند. نمای چندضلعی بای پلات نشان داد که ژنوتیپ‌های ۸، ۷، ۲۰ و ۱۳ با توجه به نزدیک بودن به مبدأ بای پلات، ژنوتیپ‌هایی با پایداری عمومی بالا به محیط‌های آزمایشی بودند و همچنین ژنوتیپ‌های ۱۸، ۱۵ و ۱۱ سازگار به هیچ کدام از محیط‌ها نبودند. مطالعه همزمان اثر ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ در محیط با نمای محور تستر متوسط (ATC) از بای پلات نشان داد که ژنوتیپ‌های نزدیک به محور ATC، شامل ژنوتیپ‌های ۲، ۷، ۱ و ۲۰ علاوه بر پایدار بودن نسبت به بقیه ژنوتیپ‌ها، دارای عملکرد بالاتر از متوسط کل بودند و می‌توانند به عنوان ژنوتیپ‌های پایدار در نظر گرفته شوند. نمای بای پلات ژنوتیپ ایده‌آل نیز نشان داد که ژنوتیپ‌های ۱ و ۲ نزدیک‌ترین ژنوتیپ به ژنوتیپ ایده‌آل و در نتیجه مطلوب‌ترین آن‌ها بودند. نمای برداری GGE بای پلات نشان داد که محیط‌های با توانایی تمایز و نمایندگی (۱ و ۳)، محیط‌های مناسبی برای انتخاب ژنوتیپ‌های سازگار بودند. در مجموع، ژنوتیپ‌های ۸، ۷، ۲۰ و ۱۳ با نماهای مختلف بای پلات، علاوه بر پایداری از عملکرد بالاتری نیز برخوردار بودند و می‌توانند برای گزینش یا توصیه رقم استفاده شوند.

واژه‌های کلیدی: تنوع ژنتیکی، ژنوتیپ در محیط، ژنوتیپ ایده‌آل، نمودار موزائیکی، نمودار گرمایی

مقدمه

برهمکنش ژنوتیپ در محیط یکی از چالش‌های بزرگ در بررسی صفات کمی است (۱۹). درباره برهمکنش ژنوتیپ در محیط اظهار شده است که اگر GEI برای صفتی وجود نداشته باشد، گزینش بهترین ژنوتیپ‌ها آسان خواهد بود (۴۳). اثر معنی‌دار برهمکنش ژنوتیپ × محیط بر عملکرد دانه در گندم دوروم، در مطالعه‌های پژوهشگران دیگری نیز گزارش شده است (۶، ۱۱، ۲۳). همچنین آقائی و همکاران (۳) در پژوهشی، اثر معنی‌دار برهمکنش ژنوتیپ در محیط را در لاین‌های امید بخش گندم دوروم گزارش کردند. ابزارهای مختلفی برای مطالعه GEI وجود دارد و به‌زادگران باید روش‌هایی را بکار ببرند که به‌طور کارآمد و دقیق واکنش ژنوتیپ‌ها را در محیط‌های آزمایشی چندگانه اندازه‌گیری کنند (۴۰). یکی از روش‌های پیشنهادی، روش GGE بای پلات است که اثرات GEI را در یک نمودار واحد تجسم می‌کند و مقایسه ژنوتیپ‌ها و برهمکنش آن‌ها را با محیط‌ها آسان می‌کند (۱۰). بنابراین، به‌کارگیری این تکنیک برای تعیین کمیت برهمکنش ژنوتیپ در محیط گسترده است.

وجود تنش‌های محیطی همچون گرما، سرما و خشکی و خسارت‌های زیاد آنها در تولید محصول گندم دوروم (*Triticum turgidum* L.)، سبب روی‌آوری پژوهشگران به بررسی واکنش ژنوتیپ‌ها به محیط‌های گوناگون و ارزیابی عملکرد دانه و پایداری آن به عنوان معیار مهمی در گزینش و معرفی رقم شده است (۳۶). ارقام دارای عملکرد بالاتر در محیط‌های تنش (پر محصول) و توانایی حفظ عملکرد در سال‌ها و مکان‌ها (پایدار)، ارقام برتر هستند (۳۴). اثرهای ژنوتیپ، محیط و برهمکنش ژنوتیپ در محیط (Genotype by Environment Interaction, GEI) تعیین‌کننده عملکرد یک ژنوتیپ هستند (۴۳). بنابراین برهمکنش ژنوتیپ در محیط نیاز به بررسی دارد، تا پایدارترین ژنوتیپ در محیط‌های آزمایشی شناسایی شده و در صورت نبود چنین ژنوتیپی با عملکرد بهینه، شایسته‌ترین ژنوتیپ برای هر کدام از محیط‌ها معرفی شوند.

ژنوتیپ در محیط را توجیه می‌کردند، بای پلات‌هایی برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار کشیدند و دو ژنوتیپ پایدار را شناسایی کردند. کریمی‌زاده و همکاران (۱۴) در پژوهشی برای بررسی پایداری ۲۰ ژنوتیپ گندم دوروم در پنج مکان و چهار سال زراعی، از روش تجزیه بای پلات بر روی ۲۰ محیط (ترکیب سال در مکان) استفاده کردند که در آن دو مؤلفه اصلی اول و دوم به ترتیب ۳۱/۳ و ۲۵/۳ درصد از برهمکنش ژنوتیپ در محیط را توجیه می‌کردند. همچنین محمدی و همکاران (۲۸) با تجزیه بای پلات ۲۰ ژنوتیپ گندم دوروم در ۱۲ محیط (چهار مکان و سه سال)، چهار ژنوتیپ پایدار گندم را شناسایی کردند.

هدف از پژوهش حاضر، استفاده از ابزار GGE بای پلات برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر گندم دوروم در شرایط آب و هوایی مناطق دیم گرمسیری و نیمه گرمسیری کشور است.

مواد و روش‌ها

تعداد ۱۹ ژنوتیپ پیشرفته گندم دوروم گزینش شده از آزمایش‌های پیشرفته مقایسه عملکرد، به همراه رقم شاهد دهدشت به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار و پنج منطقه گچساران، گنبد، مغان، خرم‌آباد و ایلام به مدت سه سال زراعی (۱۳۹۴-۱۳۹۱) و در کرت‌هایی به طول ۷/۰۳ متر و عرض ۱/۰۵ متر بر روی ۶ خط با فاصله ۱۷/۵ سانتی متر و تراکم ۳۰۰ دانه در مترمربع کشت گردیدند. شماره و شجره ژنوتیپ‌ها در جدول ۱ و ویژگی‌های جغرافیایی و همچنین میزان بارش در طول دوره کاشت تا برداشت به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. با توجه به انتخاب ژنوتیپ‌ها بر اساس نتایج آزمایش‌های پیشرفته مقایسه عملکرد، ژنوتیپ‌ها ثابت و سال و مکان تصادفی در نظر گرفته شدند.

در هر سال از زمینی استفاده شد که سال پیش از آن آیش بود. عملیات تهیه زمین شامل شخم، دیسک، تسطیح و فارو به طور معمول انجام شد و ۱۰۰ کیلوگرم فسفات آمونیوم و ۷۵ کیلوگرم اوره، به هنگام آماده‌سازی زمین، به طور یکنواخت با خاک مخلوط گردید. درباره عملیات داشت، برای مبارزه با علف‌های هرز در مرحله پنج برگی یا در ابتدای ساقه رفتن، هنگامی که بردن تراکتور به مزرعه مشکلی پیش نمی‌آورد، سم‌پاشی با علف‌کش‌های ویژه نازک‌برگ‌ها و پهن‌برگ‌ها انجام شد. با توجه به شرایط دیم و همچنین روبرو نشدن با آفات و بیماری‌ها عملیات داشت دیگری انجام نشد.

این تکنیک، اثر اصلی ژنوتیپ (G) و برهمکنش ژنوتیپ در محیط (GE) را با تجزیه مؤلفه‌های اصلی از یکدیگر جدا می‌کند (۴۳). ابزار GGE بای پلات همچنین امکان شناسایی ژنوتیپ‌های دارای عملکرد دانه بالا و پایدار در محیط‌های کلان (۱۶) و یافتن بهترین ژنوتیپ برای هر محیط، پایداری ژنوتیپ و قدرت نمایندگی (Representative) و تمایز (Discriminating) هر محیط را فراهم می‌کند (۳۳). برخی از پژوهشگران از این ابزار برای تجزیه برهمکنش ژنوتیپ در محیط در گندم دوروم نیز استفاده کرده‌اند، به طوری که در پژوهشی پایداری و سازگاری عملکرد دانه ۱۷ ژنوتیپ پیشرفته گندم دوروم به همراه ارقام شاهد (ساجی، زردک و سرداری) در سه سال زراعی با روش‌های GGE بای پلات و AMMI بررسی شد و نتایج نشان داد که GGE بای پلات بسیار کاربردی بود (۳۲). همچنین محمدی و همکاران (۲۷) با ارزیابی ۲۳ ژنوتیپ گندم دوروم، ابراز داشتند که روش GGE بای پلات نسبت به روش رگرسیون به دلیل ارائه اطلاعات بیشتر ابزار مناسب‌تری برای مطالعه و تفسیر برهمکنش‌های ژنوتیپ در محیط است. در پژوهشی دیگر، قائدرحمی و همکاران (۱۱) با ارزیابی ۲۰ ژنوتیپ گندم دوروم، در یک منطقه و چهار سال زراعی با روش بای پلات AMMI، ژنوتیپ‌های پایدار را شناسایی کردند. بدری و همکاران (۶) با بررسی ۱۶ ژنوتیپ گندم دوروم در دو شرایط دیم و آبیاری تکمیلی در سه سال زراعی، تجزیه پایداری برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر را با رسم بای پلات‌هایی بر اساس شش محیط (سه سال زراعی در دو شرایط آبیاری) انجام دادند و ژنوتیپ‌های برتر را شناساندند. در تحقیقی دیگر، نجفی میرک و همکاران (۲۹) برای ارزیابی تجزیه پایداری ژنوتیپ‌های گندم دوروم و یک رقم گندم نان به عنوان شاهد، از روش GGE بای پلات بهره گرفتند. در تحقیقی دیگر، محمدی و همکاران (۲۶) با ارزیابی ۲۰ ژنوتیپ گندم دوروم در سه مکان، دو سال زراعی و دو شرایط دیم و آبیاری تکمیلی، بای پلات‌هایی رسم کردند که در آن ترکیب مکان، سال زراعی و شرایط آبیاری (۱۲ محیط) را به عنوان محیط در نظر گرفتند. در پژوهشی دیگر، اباته و همکاران (۱) با ارزیابی ۱۳ ژنوتیپ گندم دوروم در چهار مکان و دو سال زراعی، بای پلات‌هایی را برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار کشیدند که در آن ترکیب سال در مکان به عنوان محیط در نظر گرفته شده بود و سه ژنوتیپ را به عنوان ژنوتیپ‌های پایدار شناساندند. در تحقیقی دیگر، سینگ و همکاران (۳۵)، با ارزیابی ۵۰ ژنوتیپ گندم دوروم در نه محیط در حالی که دو مؤلفه اصلی اول به ترتیب ۲۷/۹ و ۱۸/۷ درصد از برهمکنش

جدول ۱- شماره و شجره ژنوتیپ‌های بررسی شده

کد ژنوتیپ	شجره
۱	دهدشت
۲	AINZEN_1/3/MINIMUS_6/PLATA_16//IMMERCDSS99B00313S-0M-0Y-47Y-0M-0Y-2M-0Y
۳	SORA/2*PLATA_12//SOMAT_3/3/STORLOM/4/BICHENA/AKAKI_7 CDSS02Y01279T-0TOPB-0Y-0M-29Y-0Y
۴	CHEN_1/TEZ/3/GUIL//CIT71/CII/4/SORA/PLATA_12/5/STOT//ALTAR 84/ALD/10/PLATA_10/6/ MQUE/4/USDA573//QFN/ AA _7/3/ ALBA -D/5/AVO/HUI/7/PLATA_13/8/THKNEE_11 /9/CHEN /ALTAR 84/3/ HUI/POC//BUB/RUFO/4/FNFOOT CDSS 02B00024S-0Y-0M-3Y-4M-04Y-0B
۵	SOMAT_4/SILVER_1//POLARIS/5/NETTA_4/DUKEM_12//RASCON_19/3/SORA/2* PLATA_12/4/GREEN_18/FOCHA_1//AIRON_1CDSS04Y01246T-0TOPB-18Y-0M-06Y-1M-1Y-0B
۶	SOOTY_9/RASCON_37//TILO_1/LOTUS_4/9/USDA595/3/D67.3/RABI//CRA/4/ALO/5/HUI/YAV_1 /6/ARDENTE/7/HUI/YAV79/8/POD_9CDSS02B00380S-0M-3Y-06Y-3M-1Y-0B
۷	Ter-1//Mrf1/Stj2ICD99-0866-C-0AP-5AP-AP-7AP-AP
۸	Ammar-8ICD94-0918-C-12AP-0AP-6AP-0AP-2AP-0AP
۹	Icajihan2ICD01-0251-T-4AP-TR-2AP-0AP
۱۰	Geromtel-1/Icasyr-1ICD04-1101-TA-0AP-3AP-0AP
۱۱	Arislahn-8//Bidra1/MikiICD03-0318-TA-3AP-0AP-4AP-0AP
۱۲	Ouasloukos-1/5/Azn1/4/BEZAIZ-SHF//SD-19539/Waha/3/ GdriCD03-0342-TA-1AP-0AP-6AP-0AP
۱۳	Icasyr-1/3/Gcn//Stj/Mrb3ICD02-1016-C-6AP-0TR-1AP-0AP-1AP-0AP
۱۴	Geruftel-2ICD95-1302-C-3AP-0AP-1AP-0AP-5AP-AP-6AP-0AP
۱۵	CHEN_1/TEZ/3/GUIL//CIT71/CII/4/SORA/PLATA_12/5/STOT//ALTAR84/ALD/9/USDA 595/3/D67.3/RABI//CRA/4/ALO/5/ HUI/YAV_1 /6/ ARDENTE/7/HUI/YAV79/8/POD_9CDSS02 B00022S-0Y-0M-16Y-3M-04Y-0B
۱۶	ARTICO/AJAIA_3//HUALITA/10/PLATA_10/6/MQUE/4/USDA573//QFN/AA_7/3/ALBA-D/5/AVO /HUI/7/PLATA_13/8/ THKNEE_11 /9/CHEN/ALT AR84/3/HUI/POC//BUB/RUFO/4/ FNFOOT //11/ CNDO/PRIMADUR //HA 1-OU_17/3/SNITAN CDSS04Y00724T-0TOPB-11Y-0M-06Y-2M-1Y-0B
۱۷	Seri 34/2010-11Aghrass1/3/Mrf1//Mrb16/Ru/
۱۸	Seri 34/2010-11Icasyr1/3/Bcr/Sbl5//T.urartu/
۱۹	Seri 33/2009-10Mck2/Tilo2//Bcrch1/Kund1149/
۲۰	Seri 33/2009-10Icarasha1/

جدول ۲- ویژگی‌های جغرافیایی مناطق اجرای آزمایش

مکان	متوسط بارندگی سالیانه (میلی متر)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)
گچساران	۴۵۰	۳۰°، ۱۷'	۵۰°، ۵۰'	۷۱۰
گنبد	۵۵۰	۳۷°، ۱۶'	۵۵°، ۱۲'	۴۵
مغان	۳۱۲	۴۷°، ۸۸'	۳۹°، ۳۹'	۱۰۰
خرم‌آباد	۴۴۵	۳۳°، ۲۹'	۴۸°، ۱۸'	۱۱۴۷
ایلام	۳۵۰	۳۳°، ۴۷'	۴۶°، ۳۶'	۹۷۵

جدول ۳- میزان بارندگی سالانه مناطق اجرای آزمایش در طول فصل زراعی در سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۴

مکان	۱۳۹۱-۹۲	فصل زراعی ۱۳۹۲-۹۳	۱۳۹۳-۹۴
گچساران	۴۰۸/۵	۵۰۳/۷	۳۵۱/۶
گنبد	۵۵۷/۲	۵۳۴/۸	۲۷۹/۴
مغان	۳۴۸/۴	۲۴۷/۹	۳۳۵/۰
خرم‌آباد	۲۹۴/۳	۳۶۳/۶	۳۲۶/۳
ایلام	۱۹۷/۶	۳۹۶/۱	۳۲۵/۸

Table 3. Annual rainfall of test areas during the cropping season in 2012-2015

ارزیابی ژنوتیپ‌ها در محیط‌های گوناگون را برای شناسایی سازگاری عمومی و خصوصی نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد که در برهمکنش معنی‌دار ژنوتیپ $\times$ سال $\times$ مکان، افزون بر تفاوت ژنتیکی بین ژنوتیپ‌ها، واکنش‌های متفاوت آنها به عوامل جغرافیایی و اقلیمی هم موثر بوده است. برهمکنش معنی‌دار ژنوتیپ $\times$ سال $\times$ مکان همچنین نشانه‌ای از تنوع ژنتیکی ژنوتیپ‌های مورد بررسی، مکان‌های آزمایشی و سال‌ها است، پس امکان بهره‌گیری از تجزیه پایداری وجود دارد و می‌توان ژنوتیپ‌های سازگار به نواحی ویژه و یا کل محیط‌ها را شناسایی کرد. با مقایسه داده‌های بارندگی و متوسط درجه حرارت در زمان آزمایش و داده‌های درازمدت، به نظر می‌رسد که بیشترین میزان کاهش عملکرد ناشی از کاهش بارندگی و افزایش درجه حرارت و به عبارتی عوامل ناشی از تغییرات تصادفی سال باشد. این نتیجه در برهمکنش معنی‌دار ژنوتیپ $\times$ سال نیز دیده می‌شود. قاندرحمی و همکاران (۱۱)، بدری و همکاران (۶) و محمدی و همکاران (۲۳) نیز اثرات معنی‌دار ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ $\times$ سال $\times$ مکان را در گندم دوروم گزارش کردند و بر اساس وجود چنین برهمکنش معنی‌داری اقدام به تجزیه پایداری ژنوتیپ‌ها و شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار با روش‌های مختلف از جمله تجزیه بای پلات کردند.

تعیین سهم مؤلفه‌ها در برهمکنش ژنوتیپ در محیط و نمودارهای گرمایی و موزائیکی

با توجه به معنی‌دار بودن برهمکنش ژنوتیپ در محیط، آزمون اسکریت انجام شد که نتایج آن نشان داد چهار مؤلفه اصلی اول هرکدام تقریباً سهم قابل توجهی در توجیه GEI داشتند (شکل ۱-الف)، به‌طوری‌که مؤلفه اصلی اول و دوم به ترتیب ۲۲/۷۰٪ و ۱۸/۷۱٪ از تغییرات را توجیه می‌کردند.

در هنگام وجود برهمکنش معنی‌دار ژنوتیپ در محیط، انتخاب و توصیه یک رقم برای همه محیط‌های مورد بررسی باید با احتیاط انجام شود و تلاش گردد که ژنوتیپی انتخاب شود که با وجود داشتن عملکرد بالا، نوسان عملکرد کمتری از محیطی به محیط دیگر داشته باشد، یا به بیانی دیگر پایدار باشد. بنابراین با آنکه تجزیه واریانس اطلاعات بسیار مهمی فراهم می‌آورد، توانایی توجیه پایداری ژنوتیپ‌ها و الگوی واکنش آن‌ها به محیط‌های مختلف را ندارد و از این رو نیاز به ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌ها با بهره‌گیری از روش‌های گوناگون همچون تجزیه گرافیکی برهمکنش ژنوتیپ در محیط به روش GGE biplot است که در آن اثر محیط لحاظ نمی‌شود (۴۰).

پس از آزمون یکنواختی واریانس خطاهای آزمایشی با آزمون بارتلت و تجزیه واریانس مرکب با استفاده از بسته Agricolae (۲۲) در نرم‌افزار R، پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها با روش بای پلات GGE انجام شد. همچنین آزمون اسکریت (Screet test) برای شناساندن مناسب‌ترین تعداد مؤلفه‌های توجیه‌کننده برهمکنش ژنوتیپ در محیط و نمودارهای گرمایی و موزائیکی به ترتیب برای نشان دادن میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف و ارزیابی سهم ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ در محیط در مجموع مربعات کل به کار برده شد.

تجزیه داده‌ها با استفاده از بسته‌های GGEbiplotGUI (۷)، برای تجزیه GGE بای پلات و کشیدن نمودارهای مربوطه و gge (۳۷)، برای کشیدن نمودارهای اسکریت، گرمایی و موزائیکی، در نرم‌افزار R انجام شد.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس

تجزیه واریانس جداگانه برای هر یک از محیط‌ها (ترکیب سال و مکان) گویای معنی‌دار بودن اثر ژنوتیپ در همه محیط‌ها و در نتیجه تنوع در بین ژنوتیپ‌ها از نظر عملکرد دانه بود (جدول ۴). آزمون یکنواختی واریانس خطاهای آزمایشی با آزمون بارتلت ($\chi^2=15.3$, P-value=0.38)، نشانگر یکنواختی واریانس‌ها بود و بنابراین بدون حذف داده‌های هیچ‌کدام از محیط‌ها، تجزیه مرکب انجام شد. تجزیه واریانس مرکب داده‌ها معنی‌دار بودن اثر ژنوتیپ، سال و مکان و برهمکنش سال $\times$ مکان، سال $\times$ ژنوتیپ و ژنوتیپ $\times$ سال $\times$ مکان را بر عملکرد دانه نشان داد (جدول ۵).

اثر معنی‌دار ژنوتیپ بیانگر تنوع ژنتیکی بین ژنوتیپ‌ها است. تفاوت بین سال‌ها می‌تواند ناشی از یکسان نبودن عوامل جوی همچون میزان بارندگی، پراکنش آن در سال‌ها و توزیع متوازن بارندگی ماهیانه در دوره‌های مختلف رشدی گیاه، حداقل و حداکثر درجه حرارت هوا و خاک، مقدار پوشش برفی در مناطق و... باشد. اثر معنی‌دار مکان نیز می‌تواند به دلیل عواملی همچون خواص فیزیکی و شیمیایی خاک مناطق، طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا و... باشد. اثر متقابل معنی‌دار ژنوتیپ $\times$ سال ناشی از آن است که ژنوتیپ‌ها در سال‌های مختلف واکنش‌های متفاوتی داشته‌اند. اثر معنی‌دار برهمکنش ژنوتیپ $\times$ سال $\times$ مکان نشان‌دهنده اختلاف بین عملکرد ژنوتیپ‌ها از محیطی به محیط دیگر و وجود نوسان در عملکرد دانه است که نیاز به

جدول ۴- تجزیه واریانس ساده عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گندم دوروم در هر کدام از محیط‌ها

Table 4. Analysis of variance on grain yield for durum wheat genotypes in any of envionmets

منابع تغییرات	درجه آزادی	محیط ۱	محیط ۲	محیط ۳	محیط ۴	محیط ۵	محیط ۶	محیط ۷	محیط ۸	محیط ۹	محیط ۱۰	محیط ۱۱	محیط ۱۲	محیط ۱۳	محیط ۱۴	محیط ۱۵
بلوک	۲	۹۱۳۲۲۱ [*]	۷۵۱۶۹ ^{ns}	۱۸۶۹۲۳ ^{ns}	۲۳۷۲۸۲ ^{ns}	۶۷۹۶۰ ^{ns}	۲۰۶۵۶۳ [*]	۳۱۲۴۶ ^{ns}	۱۸۰۱۶۰ ^{ns}	۵۰۰۲۶۰ [*]	۱۵۸۹۰۷ ^{ns}	۱۴۲۹۴۰ ^{ns}	۲۹۵۰۵ ^{ns}	۳۷۱۱۷۳ ^{ns}	۳۱۲۶۸ ^{ns}	۴۲۸۱۰۰ [*]
ژنوتیپ	۱۹	۸۹۰۷۱۳ ^{**}	۱۸۹۴۳۱ ^{**}	۲۲۴۸۰۲۰ ^{**}	۲۶۵۲۶۳ ^{**}	۱۱۱۹۷۵ [*]	۱۱۷۴۴۶ [*]	۵۶۳۹۰ ^{**}	۱۸۷۷۱۸ [*]	۴۵۴۸۸۱ ^{**}	۱۴۰۴۷۶ [*]	۱۵۰۲۰۳ [*]	۱۷۴۶۴۳ ^{**}	۲۶۳۲۲۴ [*]	۱۹۱۶۳ [*]	۲۴۴۹۹۵ [*]
خطای آزمایشی	۳۸	۱۸۴۴۸۹	۲۵۷۸۷	۱۱۲۴۰۱	۱۰۷۱۷۴	۵۸۶۸۷	۵۹۰۱۸	۱۱۵۵۳	۸۱۲۶۳	۱۳۶۶۸۳	۷۱۱۶۳	۷۷۲۶۵	۱۷۰۵۵	۱۳۲۴۲۰	۸۸۴۷	۱۴۲۶۰۵
CV	۱۲/۶۴	۸/۲۳	۶/۳۱	۶/۸۲	۵/۷۶	۱۰/۷۵	۸/۲۲	۸/۹۵	۱۰/۳۹	۷/۹۴	۵/۶۳	۳/۵۱	۱۰/۳۷	۸/۱۰	۱۵/۶۴	

ns، * و **: به ترتیب معنی‌دار نیست و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد

جدول ۵- تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گندم دوروم

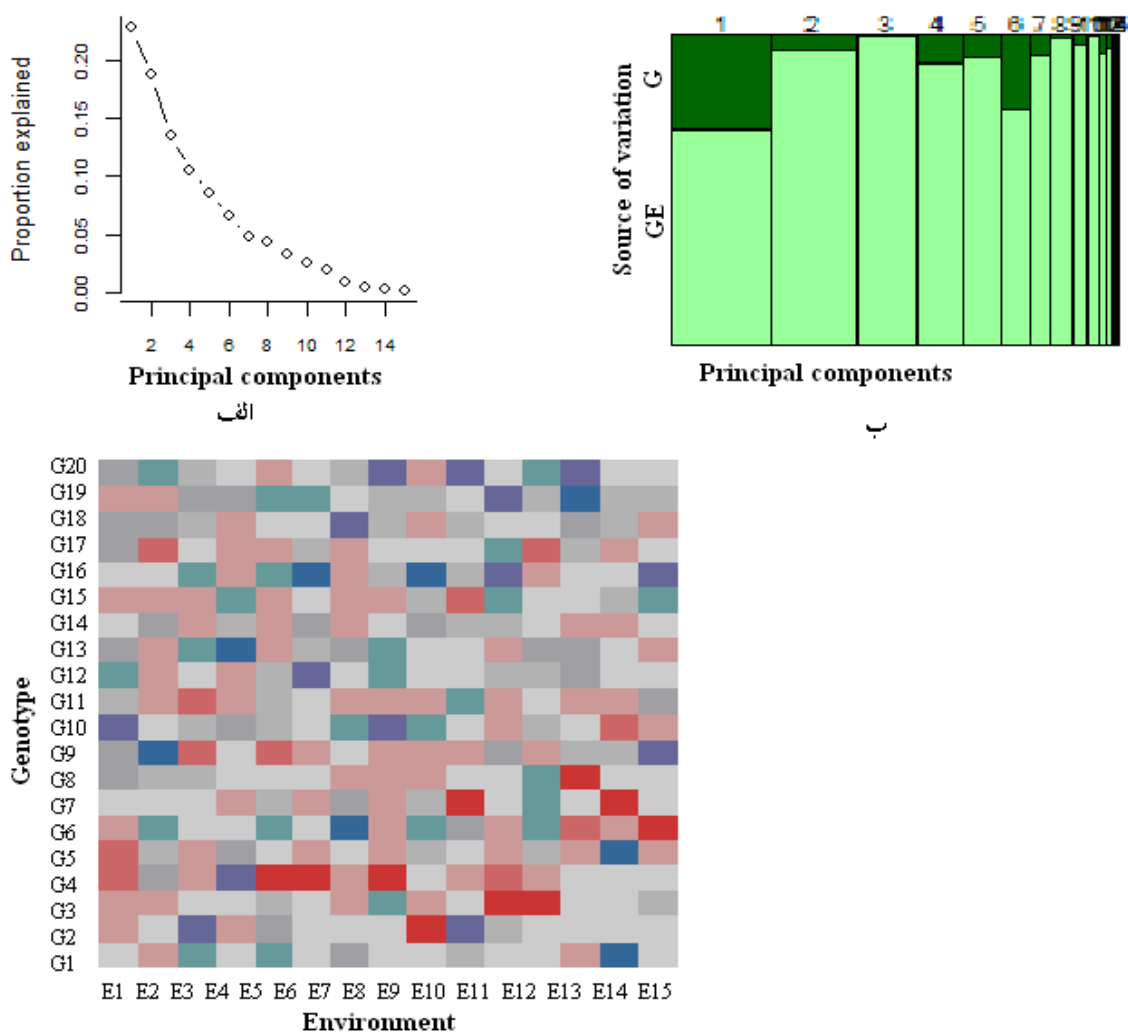
Table 5. Combined analysis of variance on grain yield for durum wheat genotypes

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
سال	۲	۶۹۵۸۱۳۳۷ [*]
مکان	۴	۹۹۲۳۶۰۷۶ ^{**}
سال × مکان	۸	۱۷۷۶۵۶۷۳ ^{**}
خطای محیط	۳۰	۹۵۷۰۰۴
ژنوتیپ	۱۹	۷۱۹۰۷۶ ^{**}
ژنوتیپ × سال	۳۸	۴۶۳۶۲۷ ^{**}
ژنوتیپ × مکان	۷۶	۹۸۹۱۳ ^{ns}
ژنوتیپ × سال × مکان	۱۵۲	۲۶۷۸۷۲ ^{**}
خطای آزمایشی	۵۷۰	۱۹۶۵۴۶
ضریب تغییرات		۱۳/۷

ns، * و **: به ترتیب معنی‌دار نیست و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد

این فاصله تأثیر می‌گذارد. قدرمطلق این همبستگی از جذر $SSG1/SSG$ بدست می‌آید که در اینجا برابر با $0/77$ است، در حالی که برای جذر $SSGE1/SSGE$ برابر با $0/42$ است. در مجموع مربعات محور مؤلفه دوم، سهم اثر GE نسبت به اثر G بسیار بیشتر است، به‌طوری‌که سهم مجموع مربعات ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ در محیط به ترتیب 5 و 95 است و تقریباً می‌توان گفت که بیشتر تغییرات موجود در مؤلفه دوم ناشی از برهمکنش ژنوتیپ در محیط است. در مؤلفه اصلی سوم سهم اثر ژنوتیپ باز کاهش می‌یابد، اما در مؤلفه اصلی چهارم تا ششم سهم اثر ژنوتیپ رو به فزونی می‌گذارد، به‌طوری‌که در مؤلفه اصلی ششم سهم G و GE به ترتیب برابر با 24 و 76% است، اما سهم این مؤلفه در TSS ناچیز ($6/67\%$) است. بنابراین در مجموع، با توجه به سهم دو مؤلفه اصلی اول در TSS و سهم نسبتاً بالای اثر ژنوتیپ در مؤلفه اصلی اول و سهم بسیار بالای برهمکنش ژنوتیپ در محیط در مؤلفه اصلی دوم، می‌توان از GGE بای‌پلات برای تفسیر اثرهای اصلی ژنوتیپ (G) و برهمکنش ژنوتیپ در محیط (GE) بهره گرفت و ارزیابی ژنوتیپ‌ها در محور نخست بای‌پلات می‌تواند اطلاعاتی درباره عملکرد و در محور دوم درباره پایداری را فراهم آورد. البته اگر سهم دو مؤلفه اصلی اول در TSS بیشتر از این مقدار ($41/42\%$) می‌بود، نتایج از اطمینان بیشتری برخوردار بودند. همچنین در صورت بیشتر بودن سهم اثر ژنوتیپ در مؤلفه اصلی اول، ارزیابی اثر اصلی ژنوتیپ اعتبار بیشتری داشت. همانند نتایج این پژوهش، علی‌پور و همکاران (۵) با به‌کارگیری نمودار موزائیکی سهم اثر ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ در محیط را در تنوع ژنوتیپ‌های گندم بررسی کردند و نشان دادند که در مؤلفه اصلی اول سهم اثر ژنوتیپ بیشتر بود، حال آنکه در مؤلفه‌های بعدی برهمکنش ژنوتیپ در محیط سهم بیشتری در مجموع مربعات کل داشتند.

پیش از انجام چنین تجزیه‌هایی نیاز به بررسی سهم اثر ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ در محیط در مجموع مربعات کل (TSS) است. در این راستا، لافونت و همکاران (۲۱) چگونگی تقسیم مجموع مربعات کل به مجموع مربعات ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ در محیط را در یک نمودار موزائیکی با یک جدول دو طرفه نشان دادند که در آن، مجموع مربعات کل به مجموع مربعات ژنوتیپ (SSG) و مجموع مربعات برهمکنش ژنوتیپ در محیط (GGE) می‌شکند (شکل ۱-ب). در این نمودار که مساحت مربع، 100% مجموع مربعات کل است، نواحی با رنگ تیره تنوع کل ناشی از اثرات ژنوتیپی را نشان می‌دهد که برابر با $11/54\%$ است. همچنین مناطق با رنگ روشن نشان‌دهنده تنوع ناشی از برهمکنش ژنوتیپ در محیط است که $88/46\%$ درصد از کل تغییرات را در برمی‌گیرد. ستون‌های نمودار موزائیکی محورهای مؤلفه اصلی را نشان می‌دهد، به‌گونه‌ای که ستون اول $22/70\%$ از کل مساحت مربع را در برمی‌گیرد که سهم اولین مؤلفه اصلی در مجموع مربعات کل است. ستون (مؤلفه اصلی) دوم $18/71\%$ از TSS را در بر گرفته است. این دو مؤلفه اصلی (برای ساختن بای‌پلات در شکل‌های بعدی) با هم، $41/42\%$ از $(25/08+20/67)$ از TSS ، $66/67\%$ ($7/44+59/21$) از مجموع مربعات ژنوتیپ (SSG) و $38/11\%$ ($17/94+20/18$) از مجموع مربعات برهمکنش ژنوتیپ در محیط ($SSGE$) را تشکیل می‌دهند. ردیف‌های نمودار موزائیکی (در داخل هر ستون)، آن ستون را به ناحیه ناشی از SSG و ناشی از $SSGE$ ، هر محور مؤلفه تقسیم می‌کند. بر این اساس سهم SSG و $SSGE$ به ترتیب 30 و 70 درصد از مجموع مربعات محور مؤلفه اصلی اول را تشکیل می‌دهد. بنابراین فاصله بین نقاط ژنوتیپ‌ها تا محور اول (ستون عمودی نقطه ژنوتیپ تا محور مؤلفه اصلی اول) را نمی‌توان فقط همبسته با میانگین ژنوتیپ‌ها دانست و برهمکنش ژنوتیپ در محیط نیز بر روی



شکل ۱- پیش-تجزیه‌های برهمکنش ژنوتیپ در محیط (GEI) ۲۰ ژنوتیپ گندم در ۱۵ محیط. الف. ریشه مشخصه ماتریس GEI؛ ب. نمودار موزائیکی مؤلفه‌های اصلی GEI؛ ج. نمودار گرمایی پراکنش ژنوتیپ‌ها در محیط‌ها

Figure 1. Pre-analysis of genotype environment interaction (GEI) for grain yield of 20 durum wheat genotypes in 15 environments. A, Eigenvalues of the GEI matrix. B, Mosaic plot of GEI principal components. C, Heatmap plot of GEI.

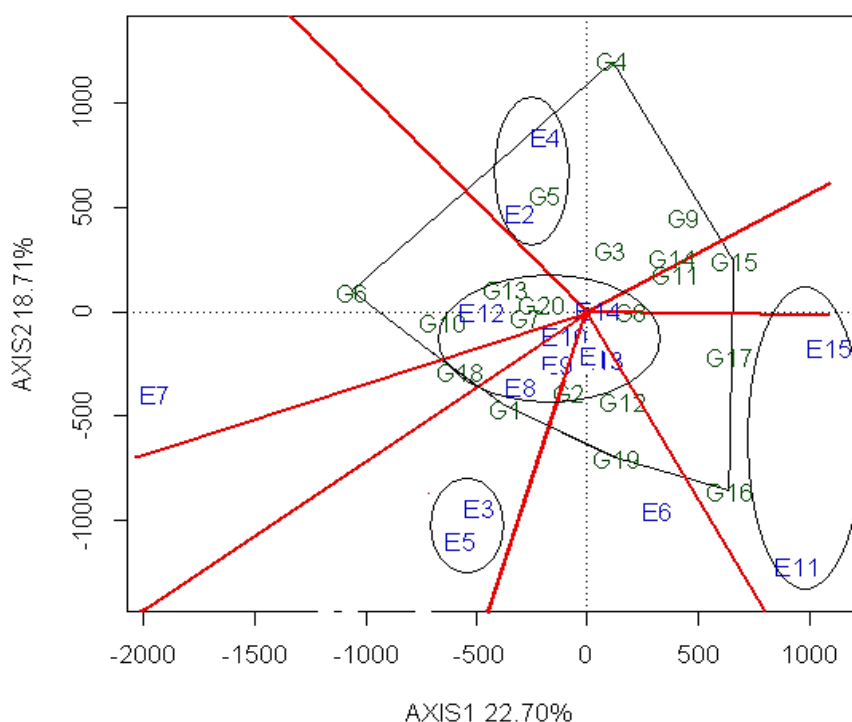
مختلف درون یک محیط بیانگر تنوع درون محیطی است. بررسی میانگین ژنوتیپ‌ها در هر یک از محیط‌ها نشان داد که نه تنها ژنوتیپ‌های مورد مطالعه از نظر عملکرد دانه در یک محیط متفاوت هستند، بلکه میانگین آنها از محیطی به محیط دیگر نیز متفاوت بود. آقائی سربرزه و همکاران (۲)، جهرمی (۱۳)، کایا و تورکوز (۱۱) و آکورا (۴) نیز در ارزیابی ژنوتیپ‌های گندم دوروم تفاوت عملکرد ژنوتیپ‌ها را از محیطی به محیط دیگر مشاهده کردند و با توجه به وجود چنین تنوعی از تجزیه پایداری برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار استفاده کردند. این نتیجه نشان می‌دهد که گزینش ژنوتیپ‌ها فقط بر اساس عملکرد دانه در یک مکان نمی‌تواند دقیق و عملی باشد و باید ژنوتیپ‌ها در سال‌ها و مکان‌های مختلف ارزیابی گردد، تا سازگاری و پایداری آنها تعیین شود (۸).

افزون بر نمودارهای بای‌پلات برای تفسیر اثر اصلی ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ در محیط، نمودار گرمایی نیز برای ارزیابی موقعیت هر کدام از ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف به کار گرفته شد. در این نمودار، اگر ژنوتیپی در تمام محیط‌ها عملکرد یکنواختی داشته باشد، نمودی از پایداری آن است که بر این اساس ژنوتیپ‌های ۱۲، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ تقریباً از پایداری نسبی در محیط‌ها برخوردار بودند و همچنین ژنوتیپ‌های ۱۶، ۱۹ و ۲۰ دارای عملکرد بالا در بسیاری از محیط‌ها بودند (شکل ۱-ج). به نظر می‌رسد که بهره‌گیری از نمودارهای مختلفی از جمله این نمودار در کنار نمودار بای‌پلات می‌تواند هر کدام سؤالاتی را پاسخ دهند که با نمودار دیگر پاسخ به آن پرسش‌ها مشکل‌تر یا غیرممکن است. در این نمودار عملکرد یک ژنوتیپ در محیط‌های مختلف نمودی از تنوع بین محیط‌ها و عملکرد ژنوتیپ‌های

تجزیه GGE بای پلات

بای پلات GGE نشان داد که دو مؤلفه اصلی اول به ترتیب ۲۲/۷۰ و ۱۸/۷۱ درصد از کل تغییرات را توجیه می‌کرد. همانند تحقیق حاضر که با وجود توجیه حدود ۴۲ درصدی برهمکنش ژنوتیپ در محیط به وسیله دو مؤلفه اصلی اول از تجزیه بای پلات برای ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌ها بهره گرفته شده است، کریمی‌زاده و همکاران (۱۵)، نجفی میرک و همکاران (۲۰)، سینک و همکاران (۳۵) و کریمی‌زاده و همکاران (۱۴) در گندم دوروم و اسماعیل‌زاده مقدم و همکاران (۹) در گندم نان نیز با وجود سهم کمتر از ۵۰ درصد دو مؤلفه اصلی اول در برهمکنش ژنوتیپ در محیط، از تجزیه بای پلات استفاده کردند و ژنوتیپ‌های پایدار را شناسایی کردند. همچنین با توجه به نتایج نمودار موزائیکی که سهم نسبتاً بالایی اثر ژنوتیپ در مؤلفه اصلی اول و سهم بسیار

بالای برهمکنش ژنوتیپ در محیط در مؤلفه اصلی دوم را نشان می‌داد، می‌توان از GGE بای پلات، برای تفسیر اثرهای اصلی ژنوتیپ (G) و برهمکنش ژنوتیپ در محیط (GE) بهره گرفت، به طوری که محور نخست این نمودارهای بای پلات اطلاعاتی درباره عملکرد و محور دوم درباره پایداری ژنوتیپ‌ها را فراهم می‌آورند (۲۱). تجزیه داده‌های آزمایش با روش GGE بای پلات برای نشان دادن دو عامل اصلی ژنوتیپ (G) و برهمکنش ژنوتیپ $\times$ محیط (G $\times$ E) در ارزیابی رقم استفاده می‌شود (۴۲). نمای چند ضلعی بای پلات (شکل ۲) بهترین راه برای تجسم برهمکنش‌های بین ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها است (۴۰) و یکی از جالب‌ترین ویژگی‌های GGE است که به صورت گرافیکی مفاهیم اساسی از جمله سازگاری ویژه یک ژنوتیپ و تفکیک محیط‌های کلان (Mega-environment) را نشان می‌دهد (۳۱).



شکل ۲- نمای چند ضلعی GGE بای پلات بر اساس داده‌های عملکرد دانه ۲۰ ژنوتیپ گندم دوروم آزمایش شده در ۱۵ محیط. AXIS1 و AXIS2 به ترتیب مؤلفه اصلی اول و دوم هستند؛ شماره ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها به ترتیب همانند جدول‌های ۱ و ۲ است.

Figure 2. Polygon view of the GGE biplot based on grain yield data of 20 durum wheat genotypes tested in 15 environments. AXIS1 and AXIS2 are first and second principal components, respectively. The code of genotypes and environments are similar to Table 1 and Table 2, respectively.

بخش است (۴۰). یکی از جنبه‌های مهم نمای چندضلعی بای پلات، گروه‌بندی محیط‌ها و پیشنهاد ژنوتیپ‌های سازگار هر محیط است.

دلیل استفاده از ترکیب سال $\times$ مکان به عنوان محیط و کشیدن نمودارهای بای پلات بر روی ۱۵ محیط (ترکیب سه سال زراعی و پنج مکان) این است که از آنجایی که در کشت دیم، شرایط یک مکان از سالی به سال دیگر با توجه به وضعیت آب و هوایی خیلی متفاوت است همچون کشت آبی نیست که اختلاف درون یک مکان در سال‌های مختلف وجود

یک چندضلعی با پیوستن ژنوتیپ‌های رأسی با خطوط مستقیم ایجاد می‌شود، به گونه‌ای که تمام ژنوتیپ‌های دیگر در داخل چندضلعی جای گیرند (۴۰). در این نمای بای پلات، ژنوتیپ‌های هر بخش، از بقیه ژنوتیپ‌ها با دو خط عمود جدا می‌شوند و خطوط عمود بر ضلع‌های چندضلعی، بای پلات را به بخش‌های تقسیم می‌کنند. ژنوتیپ‌های رأسی با بیشترین فاصله از مبدأ بای پلات، بهترین یا ضعیف‌ترین در برخی یا تمام محیط‌ها هستند، به طوری که ژنوتیپ رأسی برای هر بخش بهترین و با بالاترین ژنوتیپ برای محیط‌های داخل آن

محیط‌های ۱۱ و ۱۵ سازگاری داشتند. در بخش پنجم که ژنوتپ ۱۹ در رأس آن و ژنوتپ‌های ۲ و ۱۲ درون آن قرار داشتند، محیط‌های ۶ و ۱۳ مناسب‌ترین محیط‌ها برای این ژنوتپ‌ها بودند. ژنوتپ ۱ (رقم دهم) که در رأس بخش ششم چندضلعی جای گرفته بود، به بسیاری از محیط‌ها از جمله ۱۴، ۸، ۱۰، ۹، ۳ و ۵ سازگار بود که این نشان از دقت و درستی معرفی این رقم به‌عنوان یک گونه سازگار است. در بخش آخر ژنوتپ ۱۸ در رأس آن جای داشت و هیچ‌کدام از ژنوتپ‌ها و محیط‌ها درون بخش مربوطه واقع نبودند. در مجموع نمای چندضلعی بای‌پلات نشان داد که ژنوتپ‌های ۸، ۷، ۲۰ و ۱۳ با توجه به نزدیک بودن به مبدأ بای‌پلات، ژنوتپ‌هایی با پایداری عمومی بالا به محیط‌های آزمایشی بودند و همچنین ژنوتپ‌های ۱۸، ۱۵ و ۱۱ سازگار به هیچ‌کدام از محیط‌های دیگر نبودند، حال آنکه سایر ژنوتپ‌ها سازگاری به برخی از محیط‌ها داشتند (شکل ۲). همان‌گونه که گفته شد از دیگر کاربردهای این نمای بای‌پلات، شناسایی محیط‌های کلان یا ابر-محیط‌ها است که بر این اساس می‌توان چهار محیط کلان را شناسایی کرد. نخستین ابر-محیط E2 و E4؛ ابر-محیط دوم E11 و E15؛ ابر-محیط سوم E3 و E5؛ و ابر-محیط چهارم E1، E8، E9، E10، E12، E13 و E14 را در بر می‌گیرد. دو محیط E6 و E7 در هیچ‌کدام از این محیط‌های کلان نمی‌گنجند. تفاوت عملکرد ژنوتپ‌ها در هر کدام از گروه‌های محیطی نشان‌دهنده برهمکنش از نوع تغییر در رتبه است (۴۱). همچنین جای گرفتن برخی از محیط‌ها در گروه‌های مشابه نشان می‌دهد که رتبه ژنوتپ‌ها در محیط‌های یک گروه خاص تغییرات زیادی نداشت که نشان‌دهنده برهمکنشی است که در آن رتبه ژنوتپ‌ها تغییر نمی‌کند. در تطابق با یافته حاضر، پژوهشگران دیگری نیز با استفاده از روش بای‌پلات، ژنوتپ‌های پایدار گندم دوروم را شناسایی کردند (۳۲، ۲۷، ۲۵).

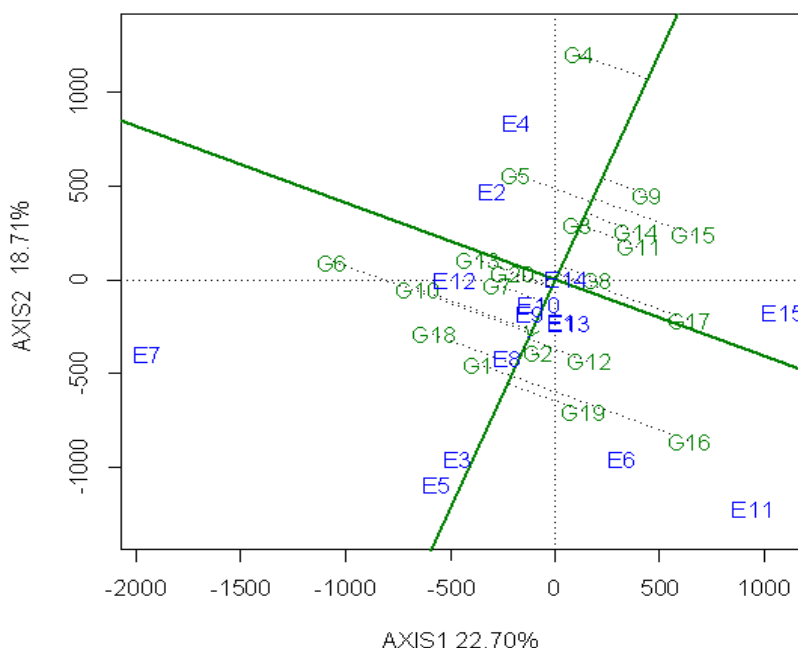
میانگین عملکرد دانه و پایداری ژنوتپ‌ها با محور تستر متوسط (average tester coordinate, ATC) یا محور محیط متوسط (average environment coordinates, AEC) در یک بای‌پلات ژنوتپ محور ارزیابی می‌شود. خطی که از مبدأ بای‌پلات و میانگین محیط (میانگین نمرات PC1 و PC2 محیط‌ها) عبور می‌کند، محور ATC نامیده می‌شود. بُعد قائم ATC، که از مبدأ بای‌پلات می‌گذرد و عمود بر بُعد افقی ATC است، برهمکنش ژنوتپ در محیط (GEI) را تقریب می‌زند و شاخصی از تنوع یا ناپایداری ژنوتپ‌ها است. بُعد افقی ATC، نشان‌دهنده اثر اصلی ژنوتپ (G) است. با توجه به این نمای بای‌پلات، مطالعه همزمان اثر ژنوتپ (G) و برهمکنش ژنوتپ با محیط (G×E) امکان‌پذیر است. شکل ۳ تجسم نشانه‌های هر ژنوتپ بر روی محور تستر متوسط را نشان می‌دهد و تقریبی از رتبه عملکرد ژنوتپ‌ها را به دست می‌دهد. بر پایه این نمای بای‌پلات، رتبه ژنوتپ‌ها بر اساس میانگین عملکرد دانه به صورت $19 < 16 < 11 < 18 < 2 < 12 < 10 < 6 < 7 < 20 < 13 < 17 < 8 < 3 < 11$ و $14 < 5 < 15 < 9 < 4$ بود. این نتیجه تا حدود زیادی مطابق با

نداشته باشد و سال‌ها در یک مکان گاهی اوقات زاویه باز دارند، کشیدن بای‌پلات یک منطقه بر پایه میانگین سال‌های مختلف باعث می‌شود که تفاوت در یک مکان برای چندین سال چشمگیر باشد، به همین دلیل بهتر است تا هر مکان را در هر سال یک محیط فرض کرد. از طرفی در برخی از ایستگاه‌ها همچون گچساران یک سال کاشت و سال بعد آیش انجام می‌شود، حال آنکه در منطقه‌ای چون گنبد به دلیل رطوبت و بارندگی بالا زمین آیش گذارده نمی‌شود، به این دلیل هم نتایج می‌تواند در ایستگاه‌های مختلف در سال‌های مختلف متفاوت باشد. یعنی در ایستگاه‌های با تناوب آیش، زمین کاشته شده در یک سال می‌تواند متفاوت از زمین سال پیشین خود باشد (۱۴). همچنین در این راستا اظهار شده است که از آنجا محیط‌های آزمایشی (ترکیب مکان - سال) در محیط‌های کلان مختلف می‌توانند همبستگی منفی با یکدیگر داشته باشند، باید ارقام مختلف به‌طور خاص برای هر محیط بزرگ پیشنهاد و توصیه شوند. همچنین دو مکان در یک محیط کلان یکسان ممکن است در هر سال همبستگی نزدیکی با هم نداشته نباشند، حتی اگر آنها ژنوتپ‌ها را به‌طور مشابه در طی سال‌ها رتبه‌بندی کنند. مجموع تغییرات سالانه برای یک مکان در یک محیط بزرگ نشان‌دهنده G×E غیر قابل تکرار است و نیاز به آزمایش‌های چند مکان و چند ساله را نشان می‌دهد (۲۸). بنابراین با توجه به توجیه‌های بالا و معنی‌دار شدن برهمکنش ژنوتپ × سال و ژنوتپ × سال × مکان به نظر می‌رسد که نادیده انگاشتن این برهمکنش و ترسیم بای‌پلات بر اساس میانگین سال‌ها در هر مکان خالی از اشکال نباشد. همانند پژوهش حاضر که ترکیب سال × مکان به‌عنوان محیط انگاشته شد، صادق‌زاده و همکاران (۳۲)، قائدرحمتی و همکاران (۱۱)، جعفری و فرشادفر (۱۲) و بدری و همکاران (۶) در پژوهش‌های خود برای ارزیابی ژنوتپ‌های گندم در یک مکان، سال را به‌عنوان محیط و محمدی و همکاران (۲۶)، اباته و همکاران (۱)، کریمی‌زاده و همکاران (۱۴) و محمدی و همکاران (۲۸)، ترکیب سال × مکان را به‌عنوان محیط در نظر گرفتند و با کشیدن بای‌پلات‌هایی تجزیه پایداری را برای شناسایی ژنوتپ‌های پایدار انجام دادند.

نمای چندضلعی بای‌پلات به‌گونه‌ای به هفت ناحیه تقسیم شد که ژنوتپ‌های ۶، ۴، ۱۵، ۱۶، ۱۹، ۱۸ و ۱ در رأس آن بودند که بیشترین فاصله را از مبدأ بای‌پلات داشتند. از بین این‌ها، ژنوتپ‌های ۴ و ۱۵ دارای عملکرد پایین‌تر از متوسط و بقیه دارای عملکرد بالاتر از متوسط بودند. در ناحیه اول، محیط‌های ۷ و ۱۲ با ژنوتپ رأسی ۶ و ژنوتپ‌های ۷، ۱۰، ۱۳، ۱۸ و ۲۰ قرار داشتند. بنابراین، این ژنوتپ‌ها نسبت به سایر ژنوتپ‌ها به محیط‌های ۷، ۱۲ و ۱۴ سازگار بودند. در بخش دوم با ژنوتپ ۴ در رأس و ژنوتپ‌های ۳، ۵، ۹ و ۱۴ درون آن، دو محیط ۲ و ۴ قرار داشتند. در بخش سوم که ژنوتپ ۱۵ در رأس آن و ژنوتپ ۱۱ درون آن جای داشت، هیچ محیطی واقع نبود که نشان از سازگار نبودن این ژنوتپ‌ها به هیچ‌کدام از محیط‌های مورد مطالعه دارد. ژنوتپ ۱۶ در رأس بخش چهارم و ژنوتپ‌های ۸ و ۱۷ درون آن به

ژنوتیپ‌ها به محور ATC نشان داد که ژنوتیپ‌های ۶ و ۱۶ دارای بیشترین فاصله به ترتیب در بالا و پایین این محور بودند و نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها متغیرتر و ناپایدارتر بودند. ژنوتیپ‌های نزدیک به محور ATC، شامل ژنوتیپ‌های ۲، ۷، ۱ و ۲۰ علاوه بر پایدار بودن نسبت به بقیه ژنوتیپ‌ها، دارای عملکرد بالاتر از متوسط کل بودند (شکل ۳). نمای ATC نشان داد که ژنوتیپ‌های ۲ و ۱ علاوه بر عملکرد بالای دانه، نسبت به محیط آزمایشی نیز پایدارتر بودند و می‌توانند به عنوان ژنوتیپ پایدار در نظر گرفته شوند. ژنوتیپ‌های ۳، ۸ و ۹، با پایداری بالا و عملکرد دانه کم، مطلوب نبودند.

رتبه ژنوتیپ‌ها از نظر عملکرد است که در آن بیشترین و کمترین میزان عملکرد دانه به ترتیب در ژنوتیپ‌های ۱۹ (۳۲۶۲ کیلوگرم در هکتار) و ۴ (۲۶۴۳ کیلوگرم در هکتار) بدست آمد. در این رتبه‌بندی ژنوتیپ‌های تا شماره ۲۰ دارای عملکردی بیشتر از متوسط و از ژنوتیپ‌های ۱۷ دارای عملکردی کمتر از متوسط بودند. رقم شاهد (دهدشت) دارای عملکرد دانه بالاتر از متوسط بود. هرچه ژنوتیپ‌ها از این خط ATC فاصله بیشتری داشته باشند، بیانگر آن است که در برهمکنش ژنوتیپ در محیط نقش بیشتری داشته‌اند و از پایداری کمتری برخوردار هستند. بر این اساس، فاصله نسبی



شکل ۳- نمایش میانگین مختصات تستر (ATC) از بای پلات GGE بر اساس داده‌های عملکرد دانه ۲۰ ژنوتیپ گندم دوروم آزمایش شده در ۱۵ محیط. AXIS1 و AXIS2 به ترتیب مؤلفه اصلی اول و دوم هستند؛ شماره ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها به ترتیب همانند جدول‌های ۱ و ۲ است.
Figure 3. Average tester coordinate (ATC) view of the GGE biplot based on grain yield data of 10 rice genotypes for grain yield in nine environments. AXIS 1 and AXIS 2 are first and second principal components, respectively. The code of genotypes and environments are similar to Table 1 and Table 2, respectively.

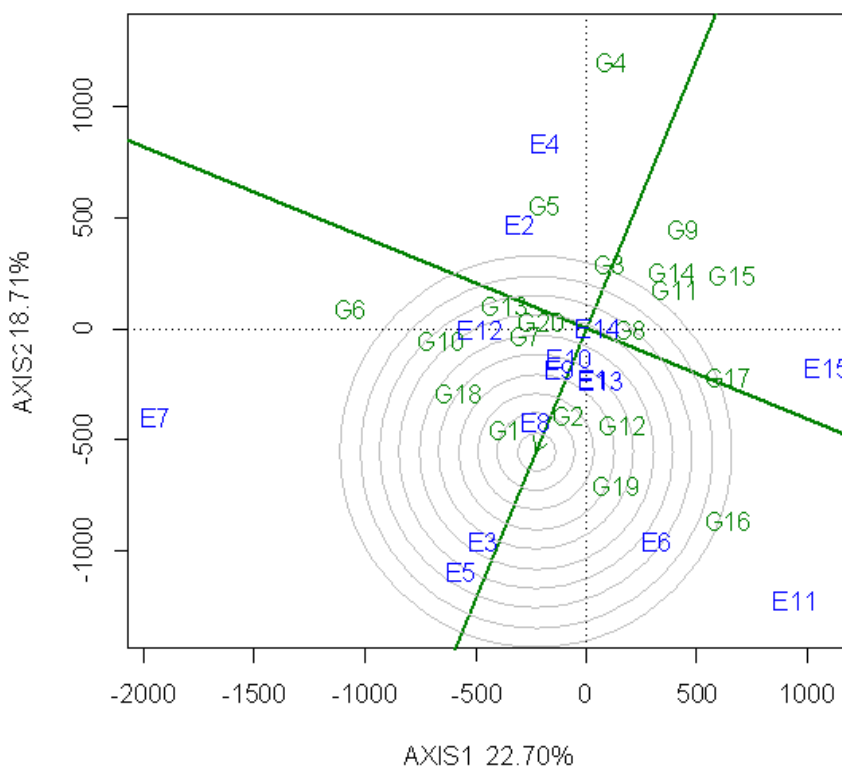
ایده‌آل و هر یک از ژنوتیپ‌ها، می‌توان به عنوان یک معیار از سودمندی ژنوتیپ، برای گزینش ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایدار استفاده شود. هرچقدر فاصله ژنوتیپ‌ها از این ژنوتیپ ایده‌آل بیشتر باشد، از مطلوبیت آن (عملکرد و پایداری) کاسته می‌شود. این نمای بای پلات نشان داد که ژنوتیپ‌های G1 و G2 نزدیک‌ترین ژنوتیپ به ژنوتیپ ایده‌آل و در نتیجه مطلوب‌ترین ژنوتیپ‌ها بودند. ژنوتیپ ایده‌آل در اولین دایره متحدالمرکز در بای پلات قرار دارد و ژنوتیپ مطلوب که به این ژنوتیپ ایده‌آل نزدیک‌تر است، در آزمایش‌های بعدی قابل بررسی است، در حالی که ژنوتیپ نامطلوب که دور از ژنوتیپ ایده‌آل است می‌تواند در چرخه‌های اولیه به نژادی حذف شود (۲۸). ژنوتیپ‌های خارج از آخرین حلقه شامل ژنوتیپ‌های ۶، ۱۱، ۱۴، ۱۵، ۹، ۵ و ۴ نامطلوب‌ترین ژنوتیپ‌ها بودند (شکل ۴).

شکل ۵ نمای برداری GGE بای پلات است که محیط‌ها را از طریق خط‌هایی به مبدأ بای پلات وصل می‌کند و به

ژنوتیپ ایده‌آل که بر پایه دارا بودن بیشترین میانگین عملکرد در محیط‌های مورد مطالعه (با بیشترین طول بر روی بردار میانگین ژنوتیپ‌ها با عملکرد بالا یا خط ATC) و پایداری نسبت به شرایط محیطی (با کمترین نقش در برهمکنش ژنوتیپ در محیط و در نتیجه کمترین فاصله عمودی با خط ATC) شناسانده می‌شود، با یک دایره کوچک در بُعد افقی ATC و پیکان به سوی آن اشاره می‌شود و می‌تواند برای ارزیابی ژنوتیپ‌ها استفاده شود. همان‌گونه که در بخش ارزیابی‌های اولیه ژنوتیپ‌ها دیده شد (نمودار موزائیکی)، محور نخستین مؤلفه اصلی نشان‌گر عملکرد و محور دومین مؤلفه اصلی بیانگر پایداری ژنوتیپ‌ها بود. اگرچه ممکن است یک ژنوتیپ ایده‌آل در واقعیت وجود نداشته باشد، اما می‌تواند به عنوان مرجع برای ارزیابی ژنوتیپ اندازه‌گیری شود (۱۷) و به عنوان معیاری برای گزینش ژنوتیپ استفاده شود (۴۰). بنابراین "پایداری بالا" فقط در صورت همراه بودن با میانگین عملکرد می‌تواند تعریف شود. از فاصله بین ژنوتیپ

کمتری دارد، نسبت به سایر محیط‌ها نمایندگی (Representative) بیشتری دارد. بنابراین، E9، E10، E14، E3، E8 و E5 بیشترین نمایندگی را دارند، درحالی‌که محیط‌های E7، E12، E2، E4، E15، E11 و E6 کمترین نمایندگی را دارند. محیط‌های آزمایشی غیر متمایز (آنهايي که دارای بردارهای بسیار کوتاه هستند) (به‌عنوان مثال E14، E9 و E10) کمتر مفید هستند، زیرا اطلاعات تمایز کمی درباره ژنوتیپ‌ها ارائه می‌دهند (شکل ۵). از دیگر کاربردهای این نمای بای‌پلات بررسی همبستگی بین محیط‌ها و حفظ یا حذف محیط‌ها در آزمایش‌های بعدی است. بر این اساس، محیط‌های E14، E10، E9، E1 و E13 بیشترین همبستگی را با یکدیگر دارند. محیط‌های ۱۲ و ۷ و همچنین ۲ و ۴ نیز دارای همبستگی با یکدیگر هستند (شکل ۵).

درک روابط بین محیط‌ها کمک می‌کند. برخی از بردارهای محیطی خیلی بلند هستند و بنابراین کارایی نسبی ژنوتیپ‌ها در محیط‌ها می‌تواند به درستی برآورد شود. در میان ۱۵ محیط بررسی شده E7 (خرم‌آباد، سال دوم)، E3 (گنبد، سال اول)، E5 (مغان، سال اول)، E4 (ایلام، سال اول)، E15 (مغان، سال سوم)، E11 (گچساران، سال سوم) و E6 (گچساران، سال دوم) بیشترین (دورترین محیط‌ها از مبدأ بای‌پلات) و E14 (ایلام سال سوم)، E10 (مغان سال دوم)، E9 (ایلام سال دوم)، E1 (گچساران، سال اول) و E13 (گنبد، سال سوم) (نزدیکترین محیط به مبدأ بای‌پلات) کمترین توانایی تمایز (Discriminating) بین ژنوتیپ‌ها را داشتند. محیط‌هایی که توانایی تمایز ندارند، اطلاعات کمی درباره ژنوتیپ‌ها ارائه می‌دهند و از این رو نباید به‌عنوان محیط‌های آزمایشی به کار گرفته شوند. محیطی که نسبت به ATC زاویه



شکل ۴- GGE بای‌پلات براساس مقیاس‌بندی متمرکز بر ژنوتیپ برای مقایسه ژنوتیپ‌ها با ژنوتیپ ایده‌آل. AXIS1 و AXIS2 به ترتیب مؤلفه اصلی اول و دوم هستند؛ شماره ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها به ترتیب همانند جدول‌های ۱ و ۲ است.

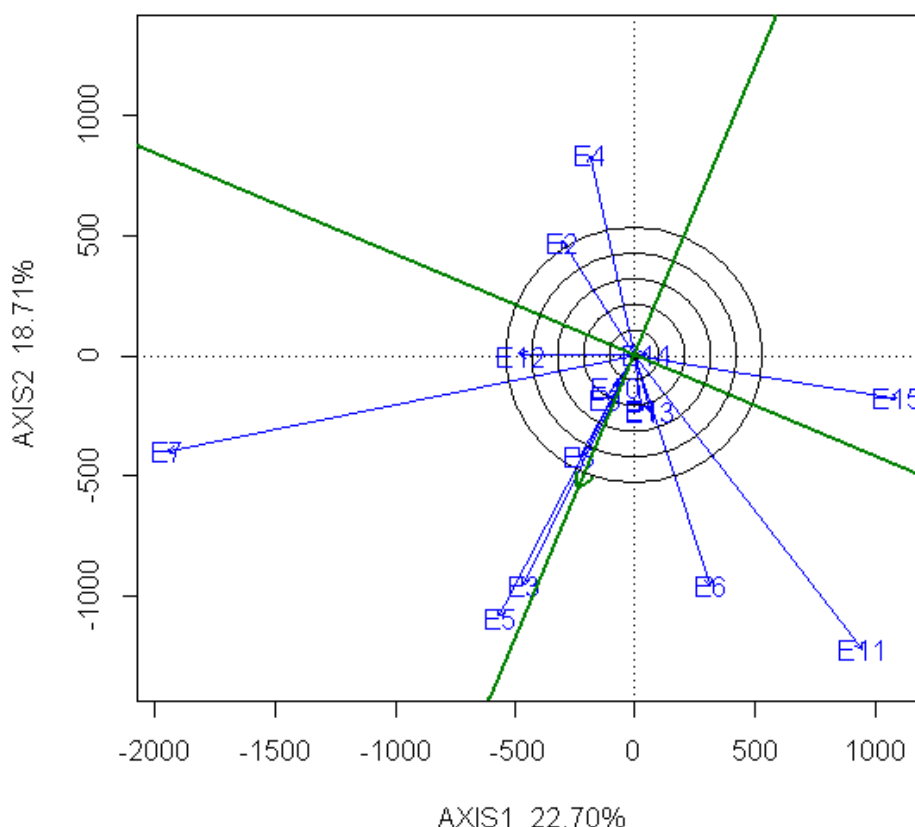
Figure 4. GGE-biplot based on genotype-focused scaling for comparison the genotypes with the ideal genotype. AXIS 1 and AXIS 2 are first and second principal components, respectively. The code of genotypes and environments are similar to Table 1 and Table 2, respectively.

اینکه محیط‌های با زاویه بسته نسبت به خط ATC، به‌خصوص آنهایی که بردارهای بلندتری نیز دارند، علاوه بر نمود عملکرد بالا (نمایندگی)، به خوبی می‌توانند ژنوتیپ‌های پایدار را از ژنوتیپ‌های ناپایدار تمییز دهند. این نمای بای‌پلات نشان داد که محیط‌های با توانایی تمایز و نمایندگی (کوچکترین زاویه) (به‌عنوان مثال، E3 و E5)، محیط‌های مناسبی برای انتخاب ژنوتیپ‌های سازگار هستند. محیط‌های با توانایی تمایز، اما غیر نماینده (به‌عنوان مثال، E4، E7،

نمای برداری GGE بای‌پلات می‌تواند اطلاعات مربوط به واریانس درون محیط را نیز ارائه دهند، به‌طوری‌که طول بردارهای محیط (در یک بای‌پلات محیط محور) تقریباً متناسب با انحراف استاندارد ژنوتیپ‌ها در هر محیط است (۲۰)، در حالی که برای یک بای‌پلات متمرکز بر ژنوتیپ، تقریباً تنوع را در میان محیط‌ها نشان می‌دهد (۴۰). طول بردارهای محیط متناسب با انحراف استاندارد در محیط‌های مربوطه و معیار توانایی تمایز محیط‌ها است (۴۱). توضیح

سال اول) می‌توان مطلوب نبودن میزان بارندگی و پراکنش ماهانه بارندگی را گفت، به‌طوری‌که در دوره ظهور خوشه که حساس‌ترین مرحله نیاز آبی گندم می‌باشد میزان بارندگی افت شدیدی پیدا کرده بود. این دیدگاه از بای پلات همچنین محیط‌های اضافه را مشخص می‌کند. اگر برخی از محیط‌ها با یکدیگر همبستگی مثبت دارند، اطلاعات مربوط به ژنوتیپ‌های بدست آمده از این محیط‌ها مشابه خواهند بود. اگر این شباهت در طول سال‌ها قابل تکرار باشد، این محیط‌ها اضافه هستند و یک محیط واحد کفایت می‌کند. به‌دست آوردن اطلاعات یکسان یا بهتر با استفاده از محیط آزمایش کمتر، باعث کاهش هزینه و افزایش بازده اصلاحی می‌شود و پیشنهاد شده است که کاهش مکان‌ها سبب کاهش هزینه آزمایش می‌شود (۳۹).

E15، E11 و E6) برای گزینش ژنوتیپ‌های خاص با توجه به تقسیم محیط‌های هدف به محیط‌های کلان قابل استفاده هستند. بنابراین محیط ۳ (گنبد سال اول) هم محیطی پایدار و هم دارای بیشترین میزان عملکرد دانه در مقایسه با دیگر محیط‌ها بود. پراکنش مناسب بارندگی در طول فصل زراعی به‌خصوص در مراحل خوشه‌دهی (اواخر اسفند تا اواخر فروردین) و پرشدن دانه گندم (اواخر فروردین تا اواسط اردیبهشت) در این محیط سبب شد که سال خوبی برای ارزیابی لاین‌ها باشد و کمترین تنش خشکی در فصل رشد گیاه اتفاق بیفتد، هر چند میزان کل بارندگی نسبت به سال قبل کاهش ناچیزی نشان داده بود. از نظر دمایی، نیز سال زراعی ۹۲-۱۳۹۱ سال در این منطقه سال معتدل بود. از دلایل کاهش متوسط عملکرد دانه در محیط ۱ (گچساران

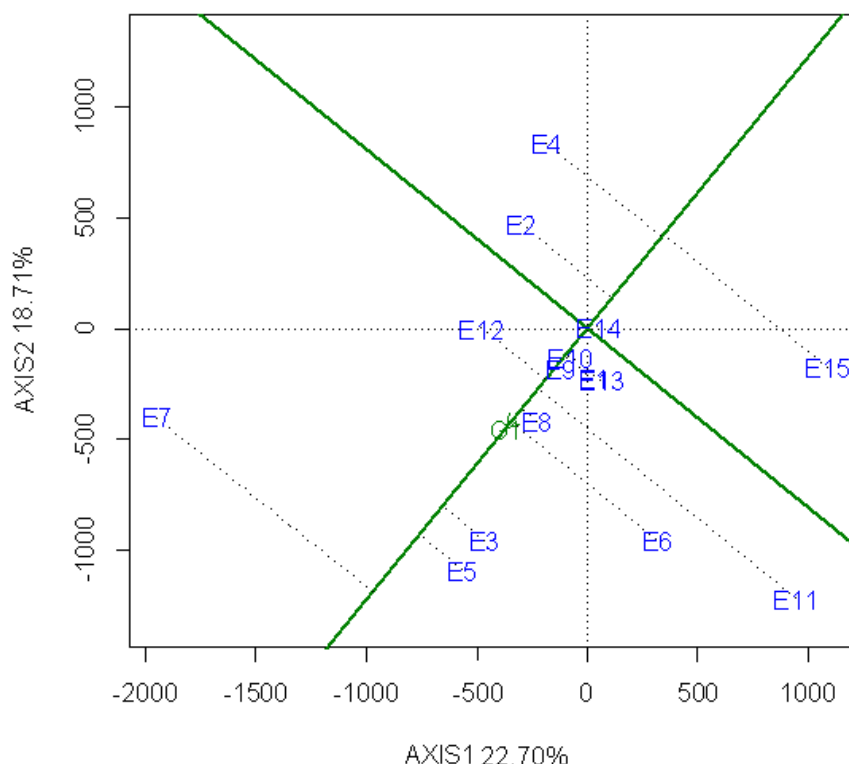


شکل ۵- نمای برداری GGE بای پلات که روابط بین محیط‌های آزمایش را نشان می‌دهد. AXIS1 و AXIS2 به ترتیب مؤلفه اصلی اول و دوم هستند؛ شماره ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها به ترتیب همانند جدول‌های ۱ و ۲ است.

Figure 5. The vector view of the GGE biplot that shows the interrelationships among the test environments. AXIS1 and AXIS2 are first and second principal components, respectively. The code of genotypes and environments are similar to Table 1 and Table 2, respectively.

ژنوتیپ در بای پلات همانند ATC محور متوسط است و عملکرد نسبی این رقم را در محیط‌های مختلف نشان می‌دهد که گویای آن است که این ژنوتیپ به محیط‌های ۷، ۵، ۳، ۸، ۱۱، ۲، ۹، ۱۰ و ۱۳ سازگار است و در محیط هفتم بیشترین عملکرد و در محیط‌های چهارم و پانزدهم کمترین عملکرد دانه را داشت (شکل ۶).

برای نشان دادن چگونگی تجسم سازگاری نسبی یک ژنوتیپ خاص در محیط‌های مختلف، که برای به‌نژادگران و کشاورزان مطلوب است، یک خط از نشانه ژنوتیپ در محور مختصات و مبدأ بای پلات کشیده می‌شود که به‌عنوان محور ژنوتیپ نامیده می‌شود (۴۰). محور ATC بای پلات برای ژنوتیپ شاهد ۱ (رقم دهم) با توجه به موقعیت این



شکل ۶- مقایسه عملکرد رقم G1 در محیط‌های مختلف. AXIS1 و AXIS2 به ترتیب مؤلفه اصلی اول و دوم هستند؛ شماره ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها به ترتیب همانند جدول‌های ۱ و ۲ است.

Figure 6. Comparison of the performance of cultivar G1 in different environments. AXIS1 and AXIS2 are first and second principal components, respectively. The code of genotypes and environments are similar to Tables 1 and Table 2, respectively.

نزدیک به محور ATC، شامل ژنوتیپ‌های ۲، ۷، ۱ و ۲۰ علاوه بر پایدار بودن نسبت به بقیه ژنوتیپ‌ها، دارای عملکرد بالاتر از متوسط کل بودند. نمای بای‌پلات ژنوتیپ ایده‌آل نشان داد که ژنوتیپ‌های ۱ و ۲ نزدیک‌ترین ژنوتیپ به ژنوتیپ ایده‌آل و در نتیجه مطلوب‌ترین آن‌ها بودند. نمای برداری GGE بای‌پلات نشان داد که محیط‌های با توانایی تمایز و نمایندگی (کوچکترین زاویه) (E3 و E5)، محیط‌های مناسبی برای انتخاب ژنوتیپ‌های سازگار بودند. محیط‌های با توانایی تمایز، اما غیر نماینده (E7، E4، E15، E6 و E11) برای گزینش ژنوتیپ‌های خاص با توجه به تقسیم محیط‌های هدف به محیط‌های کلان قابل استفاده هستند. نمای محور ژنوتیپ برای رقم شاهد دهمشت (ژنوتیپ ۱) نشان داد که این ژنوتیپ به ۷۵٪ از محیط‌های آزمایشی سازگار بود. به نظر می‌رسد که بهره‌گیری از نمودارهای مختلفی هرکدام می‌توانند پرسش‌های ویژه‌ای را پاسخ گویند که با نمودار دیگر مشکل یا غیرممکن است. در مجموع، ژنوتیپ‌های ۷، ۸، ۲۰ و ۱۳ با نماهای مختلف بای‌پلات، علاوه بر پایداری از عملکرد بالاتری نیز برخوردار بودند. توضیح اینکه ژنوتیپ ۲۰ بر اساس کمترین مقدار معیار پارامتری تک‌متغیره ضریب تغییرات و میانگین عملکرد بالاتر از میانگین عملکرد کل، به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ بود.

آزمون اسکریت نشان داد که چهار مؤلفه اصلی اول سهم قابل توجهی در توجیه GEI داشتند، به‌طوری که مؤلفه اصلی اول و دوم به ترتیب ۲۲/۷۰٪ و ۱۸/۷۱٪ از تغییرات را توجیه می‌کردند. نمودار موزائیکی با شکستن مجموع مربعات کل به اجزای آن نشان داد که ۱۱/۵۴٪ از تنوع کل ناشی از اثر ژنوتیپ و ۸۸/۴۶٪ ناشی از برهمکنش ژنوتیپ در محیط است. با ارزیابی ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف با نمودار گرمایی نیز نشان داده شد که ژنوتیپ‌های ۱۲، ۱۸، ۱۹، ۷ و ۲۰ تقریباً از پایداری نسبی در محیط‌ها برخوردار بودند و همچنین ژنوتیپ‌های ۱۶، ۱۹ و ۲۰ دارای عملکرد بالا در بسیاری از محیط‌ها بودند. نمای چندضلعی بای‌پلات نشان داد که ژنوتیپ‌های ۸، ۷، ۲۰ و ۱۳ با توجه به نزدیک بودن به مبدأ بای‌پلات، ژنوتیپ‌هایی با پایداری عمومی بالا به محیط‌های آزمایشی بودند و همچنین ژنوتیپ‌های ۱۸، ۱۵ و ۱۱ سازگار به هیچ‌کدام از محیط‌های دیگر نبودند، حال آنکه سایر ژنوتیپ‌ها سازگاری به برخی از محیط‌ها داشتند. مطالعه همزمان اثر ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ در محیط با نمای محور تستر متوسط بای‌پلات نشان داد که بیشترین و کمترین میزان عملکرد دانه به ترتیب در ژنوتیپ‌های ۱۹ (۳۲۶۲ کیلوگرم در هکتار) و ۴ (۲۶۴۳ کیلوگرم در هکتار) بدست آمد. همچنین این نمای بای‌پلات نشان داد که ژنوتیپ‌های

منابع

1. Abate, F., F. Mekbib and Y. Dessalegn. 2015. GGE Biplot analysis of multi-environment yield trials of durum wheat (*Triticum turgidum* Desf.) genotypes in north western Ethiopia. *American Journal of Experimental Agriculture*, 8(2): 120-129.
2. Aghaee-Sarbarzeh, M., M. Dastfal, H. Farzadi, A. Andarzian, A. Shahbazzpour Shahbazi, M. Bahari and H. Rostami. 2012. Evaluation of durum wheat genotypes for yield and yield stability in warm and dry areas of Iran. *Seed and Plant Improvement Journal*, 28-1(2): 315-325 (In Persian).
3. Aghaei, S., M. Nasr-Esfahani and E. Tohidi-Nejad. 2016. Assessment of quality traits of some advanced lines of durum wheat at Isfahan. *Journal of Crop Breeding*, 8(19): 1-16 (In Persian).
4. Akcura, M., Y. Kaya, S. Taner and R. Ayranici. 2006. Parametric stability analysis for grain yield of durum wheat. *Plant, Soil and Environment*, 52: 254-261.
5. Alipour, H., H. Abdi, Y. Rahimi and M.R. Bihamta. 2019. Investigating grain yield and yield stability of wheat cultivars introduced in Iran over the last half century. *Cereal Research*, 9(2): 157-167 (In Persian).
6. Badri, H., R. Mohammadi and A. Atminan. 2020. Study on Adaptability and Grain Yield Stability of Durum Wheat Genotypes. *Journal of Crop Breeding*, 12(33):119-126 (In Persian).
7. Bernal, E.F. and P.G. Villardon. 2016. GGEbiplotGUI: Interactive GGE Biplots in R. <https://cran.r-project.org/web/packages/GGEbiplotGUI/index.html>.
8. Eberhart, S.A. and W.A. Russel. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science* 6: 36-40.
9. Esmaeilzadeh Moghaddam, M., S. Tahmasebi, G.A. Lotf Ali Ayeneh, H. Akbari Moghadam, K. Mahmoudi, M. Sayyahfar, S.M. Tabib Ghaffari and H. Zali. 2018. Yield stability evaluation of bread wheat promising lines using multivariate methods. *Cereal Research*, 8(3): 333-344 (In Persian).
10. Gauch, H.G. and R.W. Zobel 1996. AMMI analysis of yield trials. PP. 85-122. In: M. S. Kang and H. G. Gauch Jr (Eds.), *Genotype by Environment Interaction*, CRC Press, Boca Raton, New York.
11. Ghaedrahmati, M., T. Hossein Pour and A. Ahmadi. 2017. Study of Grain Yield Stability of Durum Wheat Genotypes using AMMI. *Journal of Crop Breeding*, 9: 67-75 (In Persian).
12. Jafari, T. and E. Farshadfar. 2018. Stability analysis of bread wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) by GGE biplot. *Cereal Research*, 8(2): 1-13 (In Persian).
13. Jahromi, M.A., M. Khodarahmi, A.R. Mohammadi and A. Mohammadi. 2011. Stability analysis for grain yield of promising durum wheat genotypes in southern warm and dry agro-climatic zone of Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 13: 565-579 (In Persian).
14. Karimizadeh, R., A. Asghari, R. Chinipardaz, O. Sofalian and A. Ghaffari. 2016. Application of GGE biplot analysis to evaluate grain yield stability of rainfed spring durum wheat genotypes and test locations by climatic factors in Iran. *Crop Breeding Journal*, 4(1): 41-49.
15. Karimizadeh, R., M. Mohammadi, M.M. Sheikh, V. Bavi, T. Hosseinpour, H. Khanzadeh, H. Ghojogh and M. Armioun. 2011. Application of multi-variate methods in determining grain yield stability of durum wheat genotypes in semi-warm dry land areas of Iran. *Modern Genetics Journal*, 6: 33-48 (In Persian).
16. Karimizadeh, R., M. Mohammadi, N. Sabaghni, A.A. Mahmoodi, B. Roustami and F. Seyyedi. 2013. GGE biplot analysis of yield stability in multi-environment trials of lentil genotypes under rainfed condition. *Not Sci Biol* 5:256-262.
17. Kaya, Y. and M. Turkoz. 2016. Evaluation of genotype by environment interaction for grain yield in durum wheat using non-parametric stability statistics. *Turkish Journal of Field Crops*, 21(1): 51-59.
18. Kaya, Y., M. Akcura and S. Taner. 2006. GGE-biplot analysis of Multi-Environment yield trials in bread wheat. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 30: 325-337.
19. Kearsey, M.J. and H.S. Pooni. 1996. *The genetical analysis of quantitative traits*. Chapman and Hall, London.
20. Kroonenberg, P.M. 1995. *Introduction to biplots for GE tables*. Department of Mathematics, Research Report 51. Australia: Univ. of Queensland. 22 p.

21. Laffont, J.L., M. Hanafi and K. Wright. 2007. Numerical and graphical measures to facilitate the interpretation of GGE biplots. *Crop Science* 47: 990-996. doi:10.2135/cropsci2006.08.0549.
22. Mendiburu, F. 2019. Agricolae tutorial. <http://tarwi.lamolina.edu.pe/~fmendiburu>.
23. Mohammadi, M., R. Karimizadeh, T. Hosseinpour, H. Ghojogh, K. Shahbazi and P. Sharifi. 2017. Use of parametric and non-parametric methods for genotype $\times$ environment interaction analysis in bread wheat genotypes. *Plant Genetic Researches*, 4(2): 75-88 (In Persian).
24. Mohammadi, R., A. Abdullahi, R. Haghparast, M. Aghaee and M. Rostaii. 2007. Nonparametric methods for evaluating of winter wheat genotypes in multi-environment trials. *World Journal of Agricultural Sciences*, 3(2): 137-242.
25. Mohammadi, R., M. Armion, B. Sadeghzadeh, S. Golkari, Gh. Khalilzadeh, H. Ahmadi, Gh. Abedi-Asl and M. Eskandari. 2016. Assessment of grain yield s tability and adaptability of rainfed durum wheat breeding lines. *Applied Field Crops Research*, 29(4): 25-42 (In Persian).
26. Mohammadi, R., M. Armion, D. Sadeghzadeh, A. Amri and M. Nachit. 2011. Analysis of Genotype-by-Environment Interaction for Agronomic Traits of Durum Wheat in Iran. *Plant Production Science*, 14(1): 15-21.
27. Mohammadi, R., M. Armion, E. Zadhassan and M. Eskandari. 2014. Analysis of genotype $\times$ environment interaction for grain yield in rainfed durum wheat. *Iranian Journal of Dryland Agriculture*, 1(4): 1-16 (In Persian).
28. Mohammadi, R., R. Haghparast, A. Amri and S. Ceccarelli. 2010. Yield stability of rainfed durum wheat and GGE biplot analysis of multi-environment trials. *Crop and Pasture Science*, 61: 92-101.
29. Najafi Mirak, T., M. Dastfal, B. Andarzian, H. Farzadi, M. Bahari and H. Zali. 2019. Evaluation of durum wheat cultivars and promising lines for yield and yield stability in warm and dry areas using AMMI model and GGE biplot. *Journal of Crop Breeding*, 10(28): 1-12 (In Persian).
30. Najafi Mirak, T., M. Dastfal, B. Andarzian, H. Farzadi, M. Bahari and H. Zali. 2018. Assessment of non-parametric methods in selection of stable genotypes of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum). *Iranian Journal of Crop Sciences*, 19(2): 126-138 (In Persian).
31. Rakshit, S., K.N. Ganapathy, S.S. Gomashe, A. Rathore, R.B. Ghorade, M.V.G. Kumar, K. Ganesmurthy, S.K. Jain, M.Y. Kamtar, J.S. Sachan, S.S. Ambekar, B.R. Ranwa, DG. Kanawade, M. Balusamy, D. Kadam, A. Sarkar, V.A. Tonapi, J.V. Patil. 2012 GGE biplot analysis to evaluate genotype, environment and their interactions in sorghum multi-location data. *Euphytica*, 185: 465-479.
32. Sadeghzadeh, B., R. Mohammadi, H. Ahmadi, G.R. Abedias, M.M. Ahmadi, M. Mohammadfam, N. Bahrami, M.S. Khaledian and A.A. Naserian. 2018. GGE biplot and AMMI application in the study of adaptability and grain yield stability of durum lines under dryland conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 11(2): 241-260 (In Persian).
33. Samonte, S.O.P.B., L.T. Wilson, A.M. McClung and J.C. Medley. 2005. Targeting cultivars onto rice growing environments using AMMI and SREG GGE biplot analysis. *Crop Science*, 45: 2414-2424.
34. Sharifi, P., H. Aminpanah, R. Erfani, A. Mohaddesi and A. Abbasian. 2017. Evaluation of Genotype $\times$ Environment Interaction in Rice Based on AMMI model in Iran. *Rice science*, 24(3): 173-180.
35. Singh, C., A. Gupta, V. Gupta, P. Kumar, R. Sendhil, B.S. Tyagi, G. Singh, R. Chatrath and G.P. Singh. 2019. Genotype $\times$ environment interaction analysis of multi-environment wheat trials in India using AMMI and GGE biplot models. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 19(3): 309-318.
36. Trethowan, R. and M. Reynolds. 2007. Drought resistance: genetic approaches for improving productivity under stress, In: R. M. Trethowan and M. Reynolds, (eds.) *Wheat Production in Stressed Environments*, 289-299. Springer Pub., The Netherlands.
37. Wright, K. and J.L. Laffont. 2018. Package 'gge'. <https://github.com/kwstat/gge/issues>.
38. Yan, W. 2019. LG biplot: a graphical method for mega-environment investigation using existing crop variety trial data. *Scientific Reports*, 9: 7130: 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43683-9>.

39. Yan, W. and I. Rajcan. 2002. Biplot Analysis of Test Sites and Trait Relations of Soybean in Ontario. *Crop Science*, 42(1):11-20. doi: 10.2135/cropsci2002.1100.
40. Yan, W. and M.S. Kang. 2003. GGE biplot analysis: a graphical tool for breeders, Geneticists and Agronomists. 1st Edn, CRC Press LLC., Boca Raton, Florida, pp: 271.
41. Yan, W. and N.A. Tinker. 2006. Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. *Canadian Journal of Plant Science*, 86: 623-645.
42. Yan, W., L.A. Hunt, Q. Sheny and Z. Szlavnics. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Science*, 40: 597-605.
43. Yan, W., M.S. Kang, B. Ma, S. Wood and P.L. Cornelious. 2007. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype by environment data. *Crop Science*, 47: 643-655.

Stability Analysis of Durum Wheat Genotypes by GGE Biplot Method

Rahmatollah Karimizadeh¹, Tahmasb Hosseinpour², Jabar Alt Jafarby³, Kamal Shahbazi Homonlo⁴, Mohammad Armion⁵ and Peyman Sharifi⁶

1- Dryland Agricultural Research Institute, Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Gachsaran, Iran

2- Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Khorramabad, Iran

3- Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Gonbad, Iran

4- Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Moghan, Iran

5- Ilam Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ilam, Iran

6- Associate professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran, (Corresponding author: sharifi@iaurasht.ac.ir)

Received: June 2, 2020 Accepted: August 17, 2020

Abstract

Nineteen durum wheat lines selected from preliminary yield trial along with Dehdasht as a control cultivar, were evaluated in a randomized complete block design with three replications at five regions in Iran including Gachsaran, Gonbad, Khorramabad, Moghan and Ilam during three cropping seasons of 2012-2015. Combined analysis of variance indicated significant effects of year, location, genotype and year $\times$ location, year $\times$ genotype and year $\times$ location $\times$ genotype interactions on durum wheat grain yield. Scree test indicated the first four principal components had high contribution of genotype $\times$ environment interactions (GEI), so that the PC1 and PC2 was explained 22.0% and 18.71% of GEI variation. Mosaic plot revealed that 11.54% of total variation is illustrated by genotype and 88.46% by GEI effects. Heatmap plot was also indicated G16, G19 and G20 had high grain yield in many of environments. The polygon view of biplot indicated G8, G7, G20 and G13 were as stable genotypes to the tested environments according to the closest distance to biplot origin, while G18, G15 and G11 was not adaptable to any of environments. The simultaneous studying of the effects of genotype (G) and genotype-environment interactions (G $\times$ E) by average tester coordinate (ATC) view of biplot illustrated that G2, G7, G1 and G20, in addition to high grain yield, are also more stable to the tested environments than the other genotypes, and can be proposed as stable genotypes. G1 and G2 are placed close to the ideal genotype, are most desirable than the other genotypes. The vector view of GGE biplot indicated discriminating and representative environments (E5 and E3) are good environments for selecting generally adapted genotypes. Consequently, G7, G8, G20 and G13 with strong stability and high grain yield can be used in selection/recommendation process of cultivar.

Keywords: Genetic Divergence, Genotypes $\times$ Environment, Ideal Genotypes, Mosaic Plot, Heatmap Plot