

"Research Paper"

Identification of Stable and Drought-Tolerant Soybean Cultivars using AMMI and GGE Biplot Analysis

Morteza Messhenas¹, Hamid Najafi zarini², Valiollah Rameei³ and Gholamali Ranjbar⁴

1- Ph.D. student in Genetics and Plant Breeding, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources

2- Associate Professor, Department of Plant Breeding, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran, (Corresponding author: h.najafi@sanru.ac.ir)

3- Associate Professor of Research and Education Center of Agriculture and Natural Resources of Mazandaran Province, Organization of Research, Education and Promotion of Agriculture

4- Associate Professor, Department of Genetics and Plant Breeding, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Received: 10 December, 2022 Accepted: 18 April, 2023

Extended Abstract

Introduction and Objective: The soybean genotype's stability and high performance are essential factors for long-term development and food security. That the occurrence of various stresses, including drought stress, can cause high losses in the production and supply of this product. This factor has caused the wide attention of researchers to evaluate the stable and tolerant genotypes to drought stress in different environments to introduce the best variety.

Materials and Methods: This research investigated the interaction effects of $G \times E$ on yield stability in 12 soybean genotypes in four different northern Iran environments. This experiment was conducted as a randomized complete block design with three replications in each environment. During several harvests, yield component traits such as plant height, number of pods, number of seeds per pod, the weight of 1000 seeds, biological yield, harvest index, seed yield, oil percentage, oil yield, and seed protein content were evaluated in 1400 and 1401. Stability tests for multivariate stability parameters were performed based on AMMI and GGE biplot analysis.

Results: Among the investigated cultivars, the Sari variety had the highest yield in all three studied regions, and the Hill variety had the lowest yield among the cultivars. The variety Sari in the two environments of Karakhil and Kapik and the varieties Tapur and SBA2 were more compatible with the Bai-Kola region than the rest of the varieties. Sari, Tapur, Caspian, and SBA3 cultivars were in this range. And Telar, Nekader, SBA2, and SBA4 cultivars are in the field of TOL and SSI indices, these cultivars were also identified as drought-sensitive cultivars.

Conclusion: In addition to yield stability in the two regions, the Sari variety was tolerant to drought stress and had a higher yield than the rest of the studied varieties. This variety has drought-tolerance genes and is the best parent for transferring these genes. Based on the results of cluster analysis, Hill and SBA6 cultivars had the furthest distance from SBA2. The best parents to improve the generation are crossed to create a diverse population to produce superior cultivars or genotypes.

Keywords: Biplot, Composite Analysis, Tolerance Index, Stability Analysis



"مقاله پژوهشی"

شناسایی ارقام پایدار و متحمل به تنش خشکی گیاه سویا با استفاده از تجزیه و تحلیل GGE biplot و AMMI

مرتضی مس‌شناس^۱، حمید نجفی زربینی^۲، ولی‌الله رامنه^۳ و غلامعلی رنجبر^۴

۱- دانشجوی دکتری رشته ژنتیک و بهنجاری گیاهی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
 ۲- دانشیار گروه ژنتیک و بهنجاری گیاهی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، (نویسنده مسؤل: najaf316@gmail.com)

۳- دانشیار مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

۴- دانشیار گروه ژنتیک و بهنجاری گیاهی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱/۲۹

صفحه: ۱۹۵ تا ۲۰۵

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: پایداری و عملکرد بالا ژنوتیپ سویا عامل مهمی برای توسعه بلند مدت و امنیت غذایی است. بروز تنش‌های مختلف از جمله تنش خشکی می‌تواند خسارات بالایی را در تولید و تأمین این محصول ایجاد نماید. این عامل موجب توجه گسترده محققان به ارزیابی ژنوتیپ‌های پایدار و متحمل به تنش خشکی در محیط‌های مختلف جهت معرفی بهترین رقم شده است.

مواد و روش‌ها: اثرات متقابل $G \times E$ و ثبات عملکرد در ۱۲ ژنوتیپ سویا در چهار محیط مختلف شمال ایران در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. این آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در هر محیط انجام شد. طی برداشت‌های متعدد، صفات اجزای عملکرد مانند ارتفاع گیاه، تعداد غلاف، تعداد دانه در غلاف، وزن هزار دانه، عملکرد بیولوژیکی، شاخص برداشت، عملکرد دانه، درصد روغن، عملکرد روغن و میزان پروتئین دانه در سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمون‌های پایداری برای پارامترهای پایداری چند متغیره بر اساس تحلیل AMMI و GGE biplot انجام شد.

یافته‌ها: در بین ارقام مورد بررسی رقم ساری از بیشترین عملکرد در هر سه منطقه مورد بررسی برخوردار بود و رقم هیل کمترین مقدار عملکرد را در بین ارقام به خود اختصاص داد. رقم ساری در دو محیط قراخیل و کاپیک و ارقام تپور و SBA2 به منطقه با بایع کلا نسبت به بقیه ارقام سازگاری بیشتری داشتند. ارقام ساری، تپور، کاسپین و SBA3 در این محدوده (با بایع کلا) واقع شدند. و ارقام تار، نکادر، SBA2 و SBA4 در محدوده دو شاخص TOL و SSI قرار گرفتند این ارقام نیز به‌عنوان ارقام حساس به خشکی شناسایی شدند.

نتیجه‌گیری: رقم ساری علاوه بر پایداری عملکرد در دو منطقه به تنش خشکی نیز متحمل بود و نسبت به بقیه ارقام مورد مطالعه عملکرد بالاتری داشت. این رقم دارای ژن‌های تحمل خشکی و بهترین والد برای انتقال این ژن‌ها می‌باشد. بر اساس نتایج تجزیه خوشه‌ای ارقام هیل و SBA6 دورترین فاصله را با SBA2 داشتند. بهترین والدین برای بهبود نسل در تلاقی برای ایجاد جمعیت متنوع در پی تولید ارقام با ژنوتیپ‌هایی برتر هستند.

واژه‌های کلیدی: بای‌پلات، تجزیه پایداری، تجزیه مرکب، شاخص تحمل

مقدمه

حساسیت دوره نوری، سطح کشت هر رقم سویا به محدوده بسیار کوچکی از عرض‌های جغرافیایی محدود شده تا بالاترین عملکرد را تولید کند (Prado et al, 2001). با این وجود، سویا در سراسر جهان در سطح وسیعی از عرض‌های جغرافیایی (۵۰ درجه شمالی تا ۳۵ درجه جنوبی) رشد می‌کند (Wilcox et al, 2001). بنابراین، شناسایی بهترین و پایدارترین گونه‌های سویا در دسترس، که بهترین عملکرد را در عرض‌های جغرافیایی مختلف تعیین می‌کنند، مهم است (Chaudhary et al, 2012; Raza et al, 2019). از سال ۱۳۸۵ سطح زیر کشت و عملکرد محصول سویا به به عنوان منبع تولید روغن، روند رو به رشدی را در ایران آغاز نمود. از نظر پراکنش جغرافیایی دو استان مازندران و گیلان بالاترین میزان تولید این محصول را به خود اختصاص دادند. شایان ذکر است، در میزان بهره‌وری کشت این محصول عوامل زیادی دخیل هستند که تنش‌های زیستی و محیطی از مهم‌ترین آن‌ها به‌شمار می‌روند، که تنش خشکی به‌عنوان بارزترین تنش محیطی منجر به کاهش عملکرد گیاه سویا به خصوص در مناطق کم‌برخوردار از آب می‌باشد (Agheai et al, 2017). پاسخ گیاهان به تنش خشکی به عوامل متعددی مانند مرحله نمو، شدت و مدت تنش و ژنتیک رقم بستگی دارد (Beltrano et al, 2008). در واقع حساسیت برخی گیاهان به کمبود آب و پایین آمدن عملکرد ناشی از این تنش

در حال حاضر سویا به‌عنوان یکی از محصولات زراعی پیشرو به دلیل منبع بادوام پروتئین گیاهی و روغن شناخته شده است و این ویژگی‌ها آن را به یک منبع با ارزش برای غذای سالم تبدیل نموده است (Wilcox et al, 2001). دانه سویا به عنوان حبوبات غذایی با بیشترین میزان پروتئین (۴۰٪) شناخته می‌شود و از نظر میزان روغن (۲۰٪) پس از بادام زمینی در رتبه دوم قرار دارد. در مقایسه با سایر پروتئین‌های گیاهی، پروتئین سویا دارای تعادل اسید آمینه فوق‌العاده است زیرا حاوی سطوح کافی از اسیدهای آمینه لازم برای رشد و ترمیم بافت‌ها برای بدن است (Wolf et al, 1975). علاوه بر این، سویا ۲۸ درصد از تولید دانه‌های روغنی جهان را برای روغن خوراکی تأمین می‌کند (Kim et al, 2015). روغن سویا از ۱۲٪ اسید چرب پالمیتیک، ۴٪ اسید چرب استئاریک، ۲۳٪ اسید چرب اولئیک، ۵۳٪ اسید چرب لینولئیک و ۸٪ اسید چرب لینولنیک تشکیل شده است (Berma et al, 2004). در واقع عملکرد سویا یک صفت کمی پیچیده است که توسط ژن‌های زیادی کنترل می‌شود و توسط برهمکنش‌های متعدد بین ژن‌ها و محیط تعیین می‌شود (Zobel et al, 1988). صفت عملکرد به شدت تحت‌تأثیر شرایط محیطی به‌ویژه طول روز در عرض‌های جغرافیایی مختلف قرار می‌گیرد (Sudaric et al, 2020). به‌دلیل

ارزیابی اثرات تنش خشکی بر عملکرد در سال زراعی ۱۳۹۱ در شرایط تنش خشکی و آبیاری معمول مورد بررسی قرار گرفت، نتایج آن‌ها مبتنی بر تجزیه بای‌پلات نشان داد که ارقام ورامین و بختگان دارای بیشترین میزان عملکرد بودند که رقم ورامین به‌عنوان رقم ایده‌آل در پژوهش مطرح شد. در پژوهش دیگری امین‌پناه و همکاران (Amin panah et al, 2018) به بررسی ارزیابی ارقام برنج جهت مشخص نمودن میزان مقاومت به تنش خشکی و صفات موثر در عملکرد دانه پرداختند. نتایج پژوهش این محققان حاکی از آن بود که شاخص‌های تحمل به تنش، متوسط بهره‌وری، میانگین هندسی تولید، عملکرد و میانگین هارمونیک بهترین شاخص‌ها در شناسایی ارقام در شرایط تنش بودند. به همین طریق در تحقیقات جعفری نظرابادی و همکاران (Jafari Nazarabadi, 2022) که در شهرهای تهران، کرمانشاه و گرگان در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی برای دو سال زراعی ۹۶-۱۳۹۷ و ۹۷-۱۳۹۸ در سه تکرار انجام گرفت، به بررسی عملکرد پایداری در هفت لاین تلاقی برگشتی پیشرفته گندم نان جهت ارزیابی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط و پایداری عملکرد پرداختند. نتایج نشان داد که برای اثر محیط و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط در سطح معنی‌داری یک درصد نتایج تجزیه واریانس اختلاف معنی‌داری را نشان می‌دهد. همچنین بر اساس نتایج GGE Biplot لاین L4 با دارا بودن بالاترین میزان عملکرد به عنوان لاین ایده‌آل و پایدار برای کشت در محیط‌های مورد بررسی معرفی گردید. طبق پژوهش‌های گریونیوتیس و همکاران که مطالعه خود را با هدف بررسی پایداری عملکرد علوفه ارقام ماشک معمولی بر اساس شاخص پایداری، در محیط‌های مختلف انجام دادند و از شش رقم یونانی ماشک معمولی در چهار محیط به مدت دو سال استفاده نمودند. کشت با استفاده از دو سیستم کشت معمولی و کم نهاده انجام شد. مقایسه بین سیستم‌های کشاورزی معمولی و کم نهاده معمولاً تفاوت‌های جزئی را نشان داد. تجزیه و تحلیل AMMI و GGE بای‌پلات عملکرد پایداری واریته‌ها را با توجه به صفات تحت آزمایش به تصویر کشید. آن‌ها اذعان داشتند که رقم زیفیروس پایدارترین و پرمحصول‌ترین رقم نسبت به بقیه بود. در طی پژوهش‌هایی که ژانگ و همکاران (Zhang et al, 2022) انجام دادند به ارزیابی GEI برای عملکرد دانه در ارقام ارزن دم روباهی رشد یافته در شمال غربی چین و شناسایی ژنوتیپ‌های امیدوارکننده و محیط‌های تولید بذر پرداختند که از ۱۲ ژنوتیپ در هشت محیط استفاده کردند. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از AMMI و GGE Biplot استفاده شد. نتایج تجزیه و تحلیل‌ها AMMI محققان نشان داد که ارقام DT29، FH9، YG35 و ZZG21 پایدارتر بودند و برای GGE Biplot نیز همین ۴ رقم را به‌عنوان بهترین عملکرد برای نزدیک‌ترین رقم به رقم ایده‌آل نشان دادند. همچنین کومار و همکاران (Kumar et al, 2022) در تحقیق خود به بررسی پایداری عملکرد ژنوتیپ‌های سورگوم دانه‌ای از طریق

باعث شده که محققان به ارزیابی ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش خشکی بپردازند تا بتوانند صفات و ویژگی‌های موثر گیاهان را به تحمل کم آبی بیشتر کنند (Wang et al, 2018). ویژگی‌های دانه سویا مانند پروتئین و روغن تحت تأثیر متغیرهای محیطی و ژنتیکی و همچنین برهمکنش آن‌ها قرار می‌گیرد (Purchase, 1997). نکته مهم این است که هنگام انتخاب ارقام برای برنامه‌های اصلاحی، برهمکنش ژنوتیپ-محیط (GEI) تاثیرگذار است و باید مورد ارزیابی قرار گیرد (Prado et al, 2001). در نتیجه، برای حفظ روندهای مثبت و متعادل کردن مجدد منابع غذایی سویا در آینده، تحقیقات بسیاری برای توسعه گونه‌های سویای اصلاح‌شده و بسیار پایدار مورد نیاز است که مطابق با استانداردهای غذایی مورد نیاز در سراسر جهان باشد (Voss et al, Sudaric et al, 2020). این امر ارزیابی ارقام برای سازگاری و پایداری را به یک جزء حیاتی در اصلاح نباتات تبدیل می‌کند.

مطالعات پایداری و سازگاری برای شناسایی ژنوتیپ‌های بسیار پایدار و سازگار در محیط‌های متنوع ضروری است. روشی که به طور گسترده برای تخمین پایداری استفاده می‌شود، تجزیه و تحلیل AMMI و GGE Biplot است. مدل AMMI آنالیز واریانس ژنوتیپ‌ها و اثرات اصلی محیط را با تجزیه و تحلیل اجزای اصلی GEI در یک رویکرد واحد ترکیب می‌کند (Gauch et al, 1997). با این حال، روش GGE Biplot همیشه در اکثر موارد به بهترین مدل‌های AMMI نزدیک است که اخیراً برای استفاده از برخی از عملکردها به طور مشترک توسعه یافته است (Haghpahan et al, 2020). مقادیر پایین‌تر AMMI نشان‌دهنده پایداری بیشتر ژنوتیپ‌ها است (Fabio et al, 2017). GGE Biplot به‌صورت بصری روابط بین ژنوتیپ‌ها، محیط‌های آزمایش، و برهمکنش‌های ژنوتیپ به محیط را بررسی می‌کند، که روشی مؤثر برای توصیه ژنوتیپ‌های خاص در محیط‌های بزرگ، ارزیابی میانگین عملکرد و پایداری ژنوتیپ‌ها و تجزیه و تحلیل قدرت محیط‌های هدف برای تشخیص ژنوتیپ‌ها می‌باشد (Tiwari, 2019). زمانی که ژنوتیپ‌ها در طیف وسیعی از محیط‌ها مورد آزمایش قرار می‌گیرند، جایی که اثر متقابل بین ژنوتیپ و محیط نقش مهمی ایفا می‌کند و همچنین زمانی که تعداد زیادی از هیبریدها در محیط ارزیابی می‌شوند GGE Biplot مورد استفاده قرار می‌گیرد (Wardofa et al, 2019). در واقع تجزیه و تحلیل GGE biplot مبتنی بر تجزیه به مولفه‌های اصلی است (Ding et al, 2007). مطالعات زیادی در رابطه با AMMI^۱ (Yu et al, 2008) و GGE Biplot^۲ (Haghpahan et al, 2020) در مناطق مختلف جهت بررسی اثرات متقابل $G \times E$ بر عملکرد محصول و سایر صفات زراعی با چندین روش مدل‌سازی آماری در ارتباط با تنش‌ها انجام شده است که در ادامه به برخی از این مطالعات پراخته شده است (Haghpahan et al, 2020). بر این اساس مطالعه‌ای توسط کمالی و همکاران (Jafari Nazarabadi, 2022) در مزرعه تحقیقاتی مرکز آموزش فنی و حرفه‌ای شهرستان نهبندان جهت دستیابی به بهترین رقم پنبه و

1- Additive main effect and multiplicative interaction

2- The main effect of genotype on G×E interaction summation

سال (۱۴۰۱-۱۴۰۰) مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. ۱۲ ژنوتیپ سویا شامل ۶ رقم امید بخش داخلی و شش رقم تجاری بر اساس تفاوت در عملکرد در شرایط آبیاری و تحت تنش، شامل قطع آبیاری از زمان پنجاه درصد گلدهی بررسی شدند. هر واحد آزمایشی شامل چهار ردیف چهار متری بود که فاصله گیاهان از هم، ۱۵ سانتی‌متر و فاصله بین ردیف‌های کاشت ۴۰ سانتی‌متر بودند. عملیات کاشت در خرداد ماه (۱۴۰۰) صورت گرفت. همه گیاهان به خوبی آبیاری شدند و تا زمان اعمال تنش، آبیاری یکنواخت دریافت کردند. در دوره رشد رویشی گیاه، مراقبت‌های زراعی مانند کوددهی، تنک کردن، وجین علف‌های هرز و مبارزه با آفات به طور مداوم کنترل شدند. پس از برداشت، ارتفاع گیاه، تعداد غلاف، تعداد دانه در غلاف، وزن هزار دانه، عملکرد بیولوژیکی، شاخص برداشت، عملکرد دانه، درصد روغن، عملکرد روغن و میزان پروتئین دانه برای هر ژنوتیپ در هر تیمار تنش خشکی و شاهد اندازه‌گیری شد به‌طوری که از هر کرت آزمایشی ۱۰ بوته به‌طور تصادفی انتخاب و میانگین این صفات در آن‌ها تعیین گردید. برای تعیین وزن هزار دانه نیز، سه نمونه صد دانه‌ای از محصول هر کرت به وسیله دستگاه بذر شمار، شمارش و سپس توزین گشت. عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی پس از رسیدن فیزیولوژیک در هر تیمار با حذف دو خط کناری و ۰/۵ متر از ابتدا و انتهای هر کرت بر حسب کیلوگرم در هکتار برای هر کرت ثبت شد. که پس از جمع‌آوری داده‌های آزمایشی، آزمون همگنی واریانس و آزمون نرمال بودن داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد، و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) محاسبه گردید.

آنالیز AMMI و GGE Biplot به منظور شناسایی ژنوتیپ‌های پرمحصول و بهترین سازگار برای رهاسازی در مناطق گرم و معتدل ایران پرداختند. که هفت لاین سورگوم دانه امیدبخش (KGS15، KGS19، KGS23، KGS25، KGS27، KGS32، KGS36) به همراه سه رقم تجاری (Kimiya, Payam, and Sepideh) را در هفت منطقه ایران (کرج، اصفهان، گرگان، بیرجند، شیراز، زابل و همدان) در فصل زراعی ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ بررسی کردند. آن‌ها در تجزیه و تحلیل AMMI نشان دادند که ژنوتیپ‌های G3، G6 و G7 دارای کمترین میزان پایداری است. تجزیه GGE Biplot نیز نشان داد که ژنوتیپ G6 دارای بالاترین عملکرد دانه در اکثر محیط‌ها بود، در حالی که ژنوتیپ G1 به طور خاص با استان همدان سازگار است. این مطالعه همچنین نشان داد که روش بای پلات GGE نسبت به روش AMMI در تجزیه ژنوتیپ به محیط و شناسایی ژنوتیپ‌های برتر مؤثرتر بود.

بهبود بهره‌وری محصول در شرایط تنش به ژنوتیپ‌هایی با تحمل تنش خوب و پایداری عملکرد نیاز دارد. بدین ترتیب شناسایی بهترین و پایدارترین گونه‌های سویا در دسترس، که بهترین عملکرد را در عرض‌های جغرافیایی مختلف و در شرایط تنش دارا باشد، بسیار حائز اهمیت است. بنابراین، یافته‌های این مطالعه بینش‌هایی را برای کاشت و پرورش منطقه‌ای سویا در آینده ارائه می‌دهد. هدف اصلی مطالعه حاضر بررسی پایداری عملکرد ارقام سویا بر اساس شاخص‌های پایداری، به هدف بررسی رفتار واریته‌های رایج سویا در محیط‌های مختلف و در نهایت مشخص نمودن بهترین رقم متحمل به خشکی بود.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در سه منطقه، نکا (بایع کلا)، قراخیل و محمود آباد (کاپیک) در شمال کشور و در استان مازندران برای دو

جدول ۱- ارقام سویا مورد استفاده در این پژوهش

ارقام تجاری Commercial cultivars	شماره Number	ارقام امید بخش داخلی Domestic promising cultivars	شماره Number
تپور Tapor	1	SBA1	1
ساری Sari	2	SBA2	2
کاسپین Caspian	3	SBA3	3
نکادر Nekador	4	SBA4	4
تلار Telar	5	SBA5	5
هیل Hill	6	SBA6	6

که vge بازدهی محیط محور است و $Yge - \beta e$ بازده اسمی در مطالعات مربوط به AMMI است (۱۶).

برهمکنش $G \times E$ در مدل AMMI با هدف شناسایی تلاقی‌های سویا که با شرایط مختلف آبیاری سازگاری بهتری دارند، تجزیه و تحلیل شد (Zobel *et al*, 1988). Purchase (1997) فرمولی را برای محاسبه مقدار پایداری امی (ASV) به شرح زیر پیشنهاد کرد:

$$ASV = \sqrt{\left[\frac{SSIPCA1}{SSIPCA2} \right] (IPCA1SCORE)^2 + (IPCA1SCORE2)^2} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

که $SSIPCA1/SSIPCA2$ وزنی است که با تقسیم $IPCA1$ بر $IPCA2$ به مقدار $IPCA1$ داده می‌شود. و نمرات $IPCA1$ و $IPCA2$ نمرات ژنوتیپی در مدل AMMI هستند.

مفهوم Biplot، اولین بار توسط Gabriel (1971)، (Gabriel, 1971) و مفهوم GGE توسط Yan و همکاران (2000) (Yan, 2001) برای تجزیه و تحلیل بصری داده‌های آزمایشی عملکرد چندمحیطی (MEYTs) استفاده شد. این روش از یک Biplot برای نشان دادن فاکتورهای G و E استفاده می‌کند که در ارزیابی ژنوتیپ مهم هستند و همچنین منبع اختلاف در تجزیه و تحلیل GEI داده‌های MEYTs هستند (Yan *et al*, 2000). جهت تعیین سازگاری و پایداری عملکرد از روش‌های تجزیه AMMI و GGE Biplot از نرم‌افزار Genstat، تجزیه مولفه‌ها و رسم بای‌پلات از نرم‌افزار Minitab و تجزیه کلاستر و ترسیم دندروگرام حاصل از نرم‌افزار Infostat استفاده شد.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس مرکب داده‌های حاصل از سه مکان در دو سال آزمایش انجام شد. آزمون یکنواختی واریانس خطاهای آزمایشات نیز انجام شد که بیانگر معنی‌دار نبودن واریانس خطا در آزمایش‌های چندگانه بود (جدول ۲).

ارزیابی شاخص‌های تحمل به خشکی با استفاده از فرمول‌های (۱-۹) محاسبه می‌گردد (۵).

$$\begin{aligned} SI &= (\bar{Y}_s / \bar{Y}_p) & \text{رابطه ۱} \\ SSI &= (1 - Y_{si} / Y_{pi}) / SI & \text{رابطه ۲} \\ STI &= (Y_p \times Y_s) / (\bar{Y}_p)^2 & \text{رابطه ۳} \\ TOL &= Y_p - Y_s & \text{رابطه ۴} \\ MP &= (Y_p + Y_s) / 2 & \text{رابطه ۵} \\ GMP &= \sqrt{(Y_p \times Y_s)} & \text{رابطه ۶} \\ YI &= Y_s / \bar{Y}_s & \text{رابطه ۷} \\ YSI &= Y_s / Y_p & \text{رابطه ۸} \\ YR &= [(Y_p - Y_s) / Y_p] \times 100 & \text{رابطه ۹} \end{aligned}$$

که $\bar{Y}_s$ و $\bar{Y}_p$ ، Y_s ، Y_p به ترتیب عملکرد (کیلوگرم دانه در هکتار) ژنوتیپ در شرایط مطلوب، عملکرد (کیلوگرم دانه در هکتار) ژنوتیپ در شرایط تنش، متوسط عملکرد (کیلوگرم دانه در هکتار) در شرایط مطلوب و متوسط عملکرد (کیلوگرم دانه در هکتار) در شرایط تنش است.

مدل AMMI برای بررسی تعامل ژنوتیپ $\times$ محیط استفاده شد. معادله مدل AMMI به صورت زیر می‌باشد:

$$Y_{ijk} = \mu + \sigma_i + \beta_j + \sum \lambda_k \gamma_{ik} + \rho_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که Y_{ijk} میانگین ژنوتیپ i ام در محیط j ام در هر تکرار بود، μ میانگین کل، α_i انحراف از میانگین ژنوتیپ G ، β_j اثر اصلی محیط j ام (شرایط بدون تنش و تنش)، E انحراف از میانگین، λ_k مقدار منفرد محور N برای IPC بود. γ_{ik} مقدار بردار ویژه ژنوتیپ G برای محور N در IPC، δ_{jk} مقدار بردار ویژه محیط E برای محور N در IPC، ρ_{ij} باقیمانده و ε_{ijk} خطا بود.

مدل GGE نیز به صورت رابطه (۱۲) ارائه می‌گردد:

$$Yge - \beta e - \mu = vge = \sum \lambda_n \gamma_{gn} \delta_{en} + pge \quad \text{رابطه ۱۱}$$

جدول ۲- تجزیه واریانس عملکرد ژنوتیپ‌های سویا برای دو سال و سه مکان اجرای آزمایش

Table 2. Analysis of variance of soybean genotypes yield for two years and three locations

میانگین مربعات Mean of squares	درجه آزادی Degrees of freedom	منابع تغییر Sources of variation
783882.68 ^{n.s.}	2	بلوک Block
3981616.33 ^{**}	1	سال Year
8934767.18 ^{**}	2	مکان Location
612951.32 ^{n.s.}	2	مکان * سال Year * Location
272306.7 ^{n.s.}	12	بلوک * مکان * سال Year * Location * Block
5914874.91 ^{**}	11	رقم Cultivar
839468.86 ^{**}	22	رقم * مکان Location * Digit
158810.55 ^{n.s.}	11	رقم * سال year * number
295575.74 ^{n.s.}	22	رقم * مکان * سال Year * Location * Cultivar
280417.29	132	خطا Error
59.13	-	C.V

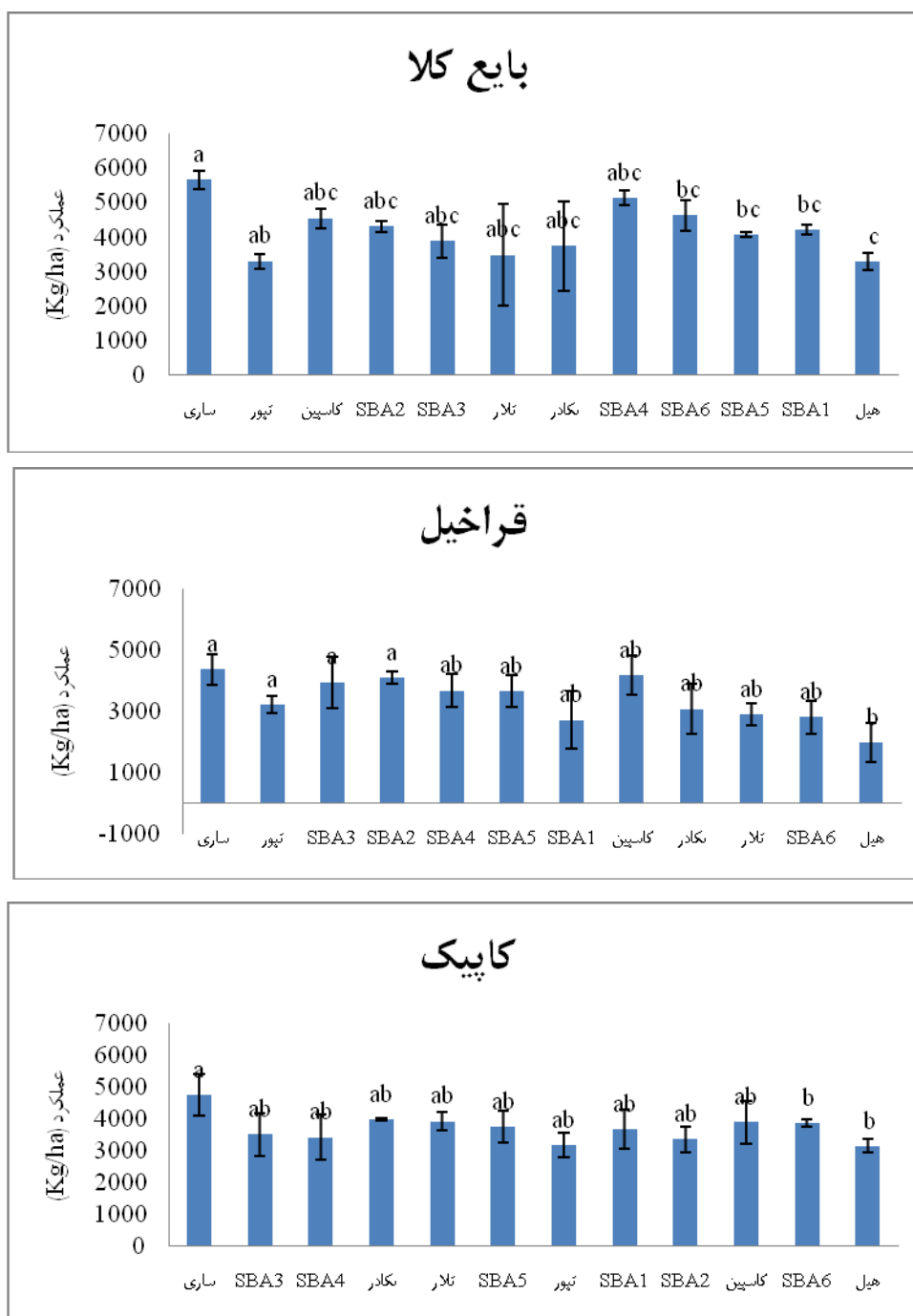
n.s, * و **: به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح پنج درصد و یک درصد

n.s, * and **: non-significance and significance at the level of five percent and one percent, respectively

- 1- Stress index
- 2- Stress sensitivity index
- 3- Stress tolerance index
- 4- Tolerance
- 5- Average performance
- 6- Geometric mean (harmonic) performance
- 7- Performance index
- 8- performance stability index
- 9- performance degradation index

هر سه منطقه مورد بررسی برخوردار بود و رقم هیل کمترین مقدار عملکرد را در بین ارقام به خود اختصاص داد (شکل ۱). با این وجود تفاوت عملکرد دانه برای ارقام سویا در مناطق مختلف مورد بررسی نشان داد ارزیابی عملکرد ارقام در یک سال و یک مکان کافی نیست و باید ارقام در طی چند سال و چند مکان مورد ارزیابی قرار گیرند و میزان پایداری و سازگاری آنها نیز برآورد و مورد ارزیابی قرار گیرد.

با توجه به نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) اثر متقابل رقم و مکان در سطح یک درصد معنی‌دار گردید. اثرات ساده سال، مکان و رقم نیز در سطح یک درصد معنی‌دار شدند. رقم‌ها در سال‌های مختلف رفتار متفاوتی نداشتند، اما در مکان‌های مختلف واکنش متفاوتی از خود نشان دادند. همچنین تنوع قابل توجهی نیز درون جمعیت مورد مطالعه مشاهده شد. در بین ارقام مورد بررسی رقم ساری از بیشترین عملکرد در



شکل ۱- مقایسه میانگین عملکرد ارقام مختلف سویا در سه منطقه بایع کلا، قراخیل و کاپیک
Figure 1. Comparison of the average yield of different soybean cultivars in the three regions of Bai-Kola, Gharakhil and Kapik

زیادی از تغییرات هستند یک بای‌پلات ترسیم کرد، همچنین یک چندضلعی با استفاده از ارقامی که در دورترین نقطه از مرکز بای‌پلات قرار دارند، ایجاد می‌شود. با استفاده از این چندضلعی می‌توان بهترین ارقام برای هر یک از مکان‌ها را شناسایی نمود (شکل ۲). به‌وسیله خطوط عمودی، بای‌پلات به بخش‌هایی تقسیم می‌شود. ارقام واقع در هر بخش یا مکان، مناسب آن مکان می‌باشند و بهترین رقم از بین ارقام موجود، رقمی است که دورتر از همه قرار دارد. سه محیط مورد مطالعه در یک گروه قرار گرفتند و ارقام ساری، کاسپین، هیل و SBA5 بیشترین فاصله از سایر ارقام را داشتند. ارقام ساری، تیپور و SBA2 با محیط‌ها (بایع‌کلا، قراخیل و کاپیک) در یک ناحیه قرار گرفتند که احتمالاً در هر سه محیط عملکرد نسبتاً پایدار و سازگاری عمومی در مناطق مختلف (مورد مطالعه) دارند. به‌طور دقیق‌تر رقم ساری در دو محیط قراخیل و کاپیک و ارقام تیپور و SBA2 به منطقه بایع‌کلا سازگاری بیشتری نسبت به بقیه ارقام داشتند.

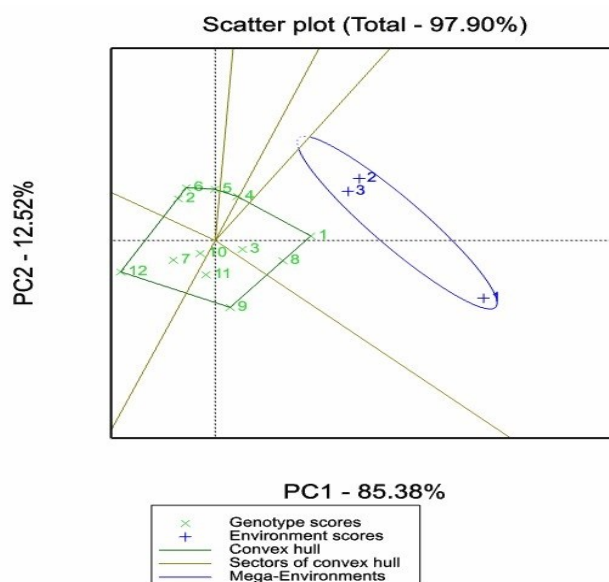
تجزیه مرکب، اطلاعاتی در مورد وجود یا عدم وجود اثر متقابل ژنوتیپ و محیط می‌دهد. از این‌رو، برای شناسایی ارقام پایدارتر، تجزیه پایداری می‌تواند مفید باشد. در چنین شرایطی انتخاب تنها بر اساس صفت عملکرد کافی نیست و برای حصول عملکرد مطلوب دانه نیاز به ژنوتیپ‌هایی است که سازگاری وسیعی را با محیط‌های مختلف داشته باشند. از این‌رو، باید اقدام به بررسی سازگاری ژنوتیپ‌ها و پایداری عملکرد آنها در محیط‌های مختلف نمود. با توجه به وجود اثر متقابل معنی‌دار بین ژنوتیپ و محیط باید رقمی انتخاب شود که با وجود تولید محصول زیاد، نوسان عملکرد کمتری داشته باشد و به عبارتی دیگر از پایداری عملکرد بیشتری برخوردار باشد (Mohammadi *et al*, 2015). بنابراین تجزیه پایداری ارقام با استفاده از آماره‌های موردنظر انجام شد.

باتوجه به جدول (۴) مولفه اول معنی‌دار شده است. از طرفی در شکل ۲ مشخص است. مولفه اول و دوم به‌ترتیب ۸۵/۳۸ و ۱۲/۵۲ درصد از تغییرات را تبیین می‌کنند (شکل ۲). بدین ترتیب می‌توان با استفاده از این دو مولفه که گویای بخش

جدول ۴- تجزیه واریانس مرکب بر اساس مدل AMMI برای عملکرد دانه سویا در سه مکان

Table 4. Analysis of variance based on the AMMI model for soybean yield in three locations

F_prob	F	میانگین مربعات Mean of squares	درجه آزادی Degrees of freedom	منابع تغییر Sources Change
0.000	19.75	5914875	11	رقم Cultivar
0.000	20.2	8934767	2	مکان Location
0.000	2.8	839469	22	اثرات متقابل Interaction effects
0.000	4.62	1383466	12	IPCA1
0.79264	0.62	186673	10	IPCA2
		299480	174	خطا Error

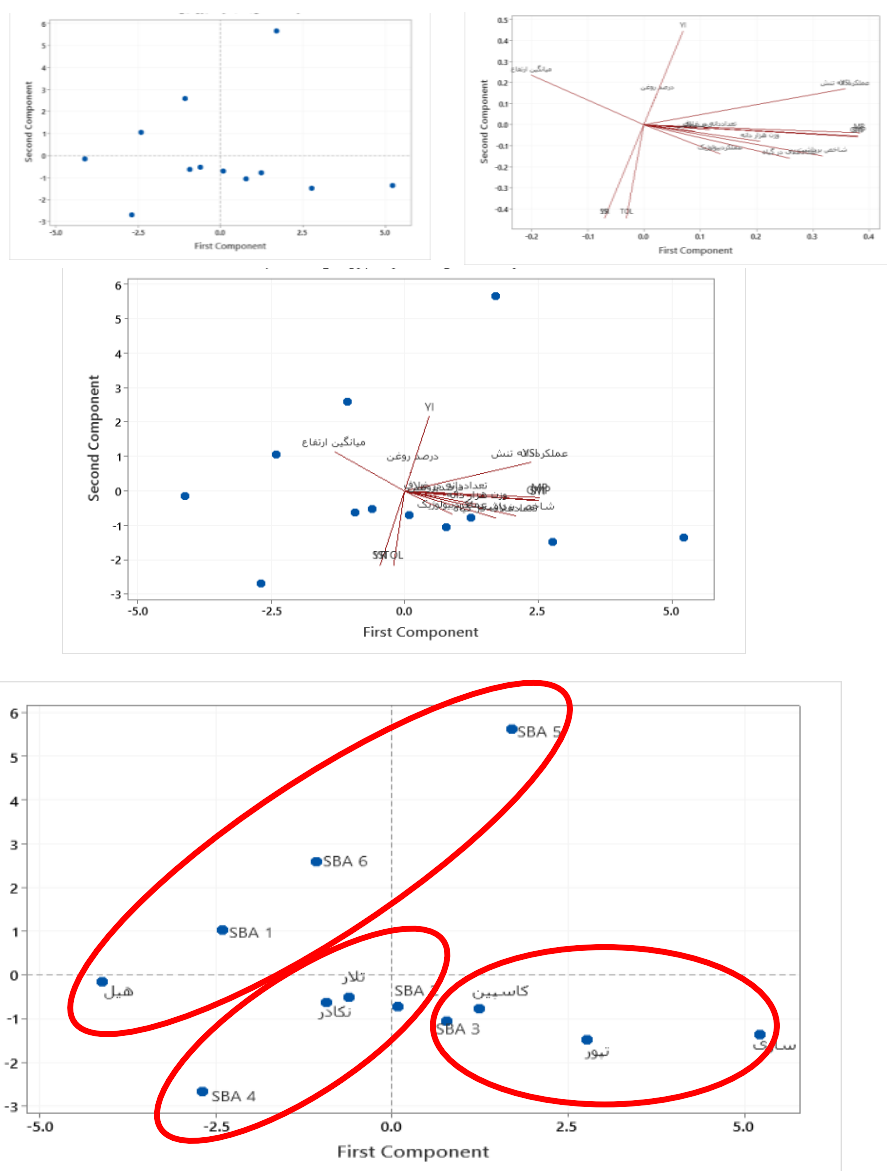


شکل ۲- نمای چندضلعی GGE بای‌پلات بر اساس داده‌های عملکرد دانه ۱۲ رقم سویا در ۳ محیط

Figure 2. Polygon view of the GGE biplot of seed yield data of 12 soybean cultivars in 3 environments

SBA2 به منطقه بایع‌کلا سازگاری بیشتری نسبت به بقیه ارقام داشتند. کاشت ارقام اصلاح‌شده پرمحصول نقش مؤثری در توسعه و افزایش تولید سویا دارد، بطوریکه تولید واریته‌های هیبرید پرمحصول موجب شده که این گیاه در تمام کشورها به‌عنوان یک محصول دانه روغنی مورد توجه قرار گیرد. در نتیجه برای تهیه جمعیت‌های اصلاحی اولیه و تهیه هیبریدها، انتخاب والدین مناسبی که به اندازه کافی از نظر ژنتیکی با هم فاصله داشته باشند و از طرفی به تنش خشکی متحمل باشند، از اهمیت بالایی برخوردار است.

ارقام واقع در هر بخش یا مکان، مناسب آن مکان می‌باشند و بهترین رقم از بین ارقام موجود، رقمی است که دورتر از همه قرار دارد. سه محیط مورد مطالعه در یک گروه قرار گرفتند و ارقام ساری، کاسپین، هیل و SBA5 بیشترین فاصله از سایر ارقام را داشتند. ارقام ساری، تیپور و SBA2 با محیط‌ها (بایع‌کلا، قراخیل و کاپیک) در یک ناحیه قرار گرفتند که احتمالاً در هر سه محیط عملکرد نسبتاً پایدار و سازگاری عمومی در مناطق مختلف (مورد مطالعه) دارند. به‌طور دقیق‌تر رقم ساری در دو محیط قراخیل و کاپیک و ارقام تیپور و



شکل ۳- ترسیم گرافیکی بای‌پلات براساس مولفه اول و دوم برای ارقام سویا در شرایط تنش خشکی
Figure 3. Bi-plot graphic drawing of the first and second components for soybean cultivars under drought stress conditions

صفت عملکرد که یک صفت کمی با وراثت‌پذیری پایین است از برخی صفات مورفولوژی و شاخص‌های تحمل برای بهبود و افزایش کیفیت گروه‌بندی و شناسایی ارقام متحمل به تنش خشکی استفاده شد. اکثر صفات مورفولوژی به‌خصوص

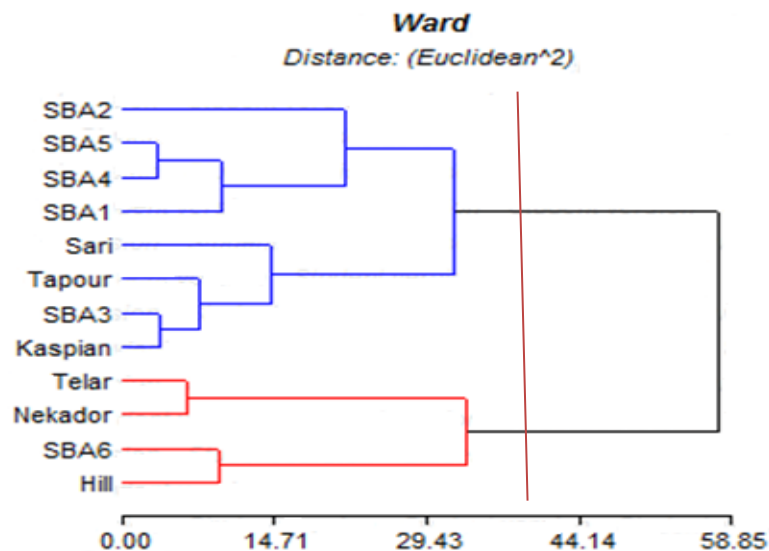
علاوه بر این در برنامه‌های اصلاحی شناسایی والدین پرمحصول و حاوی ژن‌های تحمل خشکی از اهمیت بسزایی برخوردار است. والدینی که علاوه بر سازگاری با منطقه، دارای عملکرد پایدار هم باشند. در این پژوهش ارقام علاوه بر

از هم دور باشند این امر با بررسی فاصله بین ارقام بر اساس صفات مورفولوژیک با استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره از قبیل تجزیه خوشه‌ای میسر می‌شود. نتایج گروه‌بندی ارقام بر اساس صفات مورفولوژی و شاخص‌های تحمل در شرایط تنش خشکی در (شکل ۴) آمده است. بر اساس نتایج تجزیه خوشه‌ای، ارقام مورد مطالعه تحت تنش خشکی در دو گروه قرار گرفتند. به طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که در بین ارقام سویا ایرانی و خارجی تنوع ژنتیکی قابل توجهی برای تحمل به خشکی وجود دارد. تنش خشکی باعث کاهش مقدار اکثر صفات مورد بررسی شد اما میزان کاهش بسته به صفت متفاوت بود. با توجه به نتایج حاصل مشخص شد که ارقام هیل و SBA6 دورترین فاصله را با SBA2 داشتند (شکل ۴). اکثر ارقام حساس به خشکی در یک کلاستر و مابقی کلاستر دیگر قرار گرفتند.

عملکرد و اجزای عملکرد و شاخص‌های تحمل با زاویه کم، کنار هم و در یک سمت از محور مختصات قرار گرفتند. این امر حاکی از همبستگی این صفات با هم است. قابل ذکر است ارقامی که در این بخش از محور مختصات و در نزدیکی بردارهای مذکور قرار گیرند ارقام متحمل به تنش خشکی با عملکرد بالاتر نسبت سایر ارقام مورد مطالعه هستند. همان طور که در (شکل ۳) مشخص است ارقام ساری، تپور، کاسپین و SBA3 در این محدوده واقع شدند و ارقام تلار، نکادر، SBA2 و SBA4 در محدوده دو شاخص SSI و TOL قرار دارند این ارقام نیز به عنوان ارقام حساس به خشکی شناسایی شدند.

نتیجه‌گیری کلی

محققان برای انتخاب بهترین والدین برای بهبود نسل در هر تلاقی در پی ارقام یا ژنوتیپ‌هایی هستند که از جهت ژنتیکی



شکل ۴- دندروگرام حاصل از تجزیه خوشه‌ای ارقام سویا براساس صفات مورفولوژیک در شرایط تنش خشکی
Figure 4. Dendrogram resulting from cluster analysis of soybean cultivars based on morphological traits under drought stress conditions

منابع

- Adaawen, S. (2021). Understanding climate change and drought perceptions, impact and responses in the rural ravannah, West Africa. *Atmosphere*, 12: 594.
- Aghaei, H., N. Babaeian and N. Bagheri. (2017). Correlation and path analysis of morphological and grain yield traits in Iranian rice genotypes under drought stress conditions. *Biological Forum-An International Journal*. 9: 23-27.
- Amin Panah, H., P. Sharifi and A. Abedi. (2018). Evaluation of rice genotypes based on yield and its components under conditions of full irrigation and drought stress and drought tolerance indices by biplot analysis method. *Cereal Research*, 8(2): 169-183 (In Persian).
- Andrade, M.I., A. Naico, J. Ricardo, R. Eyzaguirre, G.S. Makunde, R. Ortiz and W.J. Grüneberg. (2016). Genotype×environment interaction and selection for drought adaptation in sweetpotato (*Ipomoea batatas* [L.] Lam.) in Mozambique. *Euphytica*, 209(1): 261-280.
- Behzadi Z, H. Najafi Zarini, G. Ranjbar, A. Pakdin Parizi. (2022). Investigation of Genetic Diversity and Relationships Among Agronomic Traits of Some Flax Genotypes. *jcb*; 14 (43) :76-83 (In Persian).

- شناسایی ارقام پایدار و متحمل به تنش خشکی گیاه سویا با استفاده از تجزیه و تحلیل AMMI و GGE biplot ۲۰۴
- Beltrano, J. and G.R. Marta. (2008). Improved tolerance of wheat plants (*Triticum aestivum* L.) to drought stress and re-watering by the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus claroideum*: Effect on growth and cell membrane stability. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 20: 29-37.
- Boerma, H.R., J.E. Specht and R.F. Wilson. 2004. Soybeans: Improvement, Production, and Uses, 3rd Edition, ASA, CSSA, and SSSA, Madison, 621-668.
- Chaudhary, K.R. and J. Wu. (2012). Stability analysis for yield and seed quality of soybean (*Glycine max* Merrill) across different environments in Eastern South Dakota. Conference on Applied Statistics in Agriculture.
- Cober, E.R. and M.J. Morrison. (2010). Regulation of seed yield and agronomic characters by photoperiod sensitivity and growth habit genes in soybean. *Theoretical and applied genetics*, 120(5): 1005-1012.
- Ding, M., B. Tier and W. Yan. (2007). Application of GGE biplot analysis to evaluate genotype (G), environment (E) and G x E interaction on *P. radiata*: a case study. *Australasian Forest Genetics Conference Breeding for Wood Quality*, Tasmania, Australia.
- Fabio, E.S., T.A. Volk, R.O. Miller, M.J. Serapiglia, H.G. Gauch, Van Rees and L.B. Mart. (2017). Genotype×environment interaction analysis of North American shrub willow yield trials confirms superior performance of triploid hybrids. *Gcb Bioenergy*, 9(2): 445-459.
- Fischer, F.A. and R. Maurer. (1978). Drought resistance in spring wheat cultivars, I. Grain yield Food Crops to Temperature and Water Stress. Taiwan, 13-18 August. genetic diversity in CIMMYT improved wheat germplasm. *Euphytica*, 149: 289-301.
- Gabriel, K.R. (1971). The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. *Biomet* 58: 453-467.
- Gauch, H.G. and R.W. Zobel. (1997). Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Crop Science*, 37: 311-326.
- Gavuzzi, P., F. Rizza, M. Palumbo, R.G. Campaline, G.L. Ricciaroli and B. Borghi. (1997). Evaluation of field and laboratory predictors of drought and heat tolerance in winter cereals. *Canadian Journal of Plant Science*, 77: 523-531.
- Greveniotis, V., E. Bouloumpasi, S. Zotis, A. Korkovelos, C.G. Ipsilandis. (2021). A Stability Analysis Using AMMI and GGE Biplot Approach on Forage Yield Assessment of Common Vetch in Both Conventional and Low-Input Cultivation Systems. *Agriculture*, 11: 567.
- Haghpanah K, mirfakhraee S, khodadadi M, shamsifar S(۲۰۲۰). Study on Genetic Diversity of some Barley (*Hordeum vulgare* L.) Cultivars using SSR Marker and Physiological Traits Plant Pigments and Proline under Late Cold Stress. *jcb* 2020; 12 (34) :199-209 (In Persian).
- Ilker, E., F.A. Tonk, O. Caylak, M. Tosun and İ. Özmen. (2009). Assessment of Genotype X Environment Interactions for Grain Yield in Maize Hybrids Using AMMI and GGE Biplot Analyses. *Turkish Journal of Field Crops*, 14(2): 123-135.
- Jafari Nazarabadi, T., A.A. Nasrallah Nejad Qomi, A. Kurdanaij and K. Zainlinejad. (2022). Evaluation of genotype × environment interaction and grain yield stability of advanced backcross lines of bread wheat by GGE Biplot method. *Agricultural Plant Breeding Journal*, 14(43): 10-1 (In Persian).
- Kamali, A., B. Fakheri and M. Zabet. (2014). Investigating the effects of drought stress on yield and yield components of cotton using biplot analysis. *Iran Cotton Research*, 3(1): 33-47 (In Persian).
- Kim, H.J., B.K. Ha, K.S. Ha, J.H. Chae, J.H. Park, M.S. Kim, S. Asekova, J.G. Shannon and C.K. Son, J.D. Lee. (2015). Comparison of a high oleic acid soybean line to cultivated cultivars for seed yield, protein and oil concentrations. *Euphytica*, 201: 285-292.
- Kumar, A., A.C. Jnanesha, V.M. Kumar and R.K. Lal. (2022). GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data on essential oil yield in lemongrass (*Cymbopogon flexuosus* (nees ex. Steud) wats.] grown in semi-arid tropical regions of southern India under different agro-climatic conditions. *Biochemical Systematics and Ecology*, 103: 104439.
- Mohammadi, M., P. Sharifi and R. Karimizadeh. (2015). Stability Analysis of Seed Yield of Safflower Genotypes (*Carthamus tinctorius*). *Journal of Crop Breeding*, 104-114 (In Persian).
- Mustamu, Y.A., K. Tjintokohadi, W.J. Grüneberg, A. Karuniawan and D. Ruswandi. (2018). Selection of superior genotype of sweet-potato in Indonesia based on stability and adaptability. *Chilean journal of agricultural research*, 78(4): 461-469.
- Prado, E.E.D., D.M. Hiromoto, V.D.P.C. Godinho, M.M. Utumi and A.R. Ramalho. (2001). Adaptabilidade e estabilidade de cultivares de soja em cinco épocas de plantio no cerrado de Rondônia. *Pesqui. Agropecuária Bras*, 36: 625-635.
- Purchase, J.L. (1997). Parametric analysis to described G x E interaction and yield stability in winter yield. Ph.D Thesis. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Orange Free State, Bloemfontein, South Africa. 4-83.

- Ray, C.L., E.R. Shipe and W.C. Bridges. (2008). Planting date influence on soybean agronomic traits and seed composition in modified fatty acid breeding lines. *Crop Science*, 48: 181-188.
- Raza, A., A. Razzaq, S.S. Mehmood, X. Zou, X. Zhang, Y. Lv and J. Xu. (2019). Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: A review. *Plants*, 8: 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.
- Specht, J.E., B.W. Diers, R.L. Nelson, J.F.F. de Toledo, J.A. Torrión and P. Grassini. (2014). Soybean. Yield gains in major US field crops, 33: 311-355.
- Sudarić, A., M. Matoša Kočar, T. Duvnjak, Z. Zdunić and A. Markulj Kulundžić. (2020). Improving Seed Quality of Soybean Suitable for Growing in Europe. In *Soybean for Human Consumption and Animal Feed*; IntechOpen: London, UK, pp. 416-680.
- Tiwari, J.K. (2019). GGE biplot and AMMI model to evaluate spine gourd (*Momordica dioica* Roxb.) for genotype $\times$ environment interaction and seasonal adaptation. *Electron. Journal Plant Breed*, 10: 264-271. doi: 10.5958/0975- 928x.2019.00031.0
- Voss-Fels, K.P., A. Stahl and L.T.Q. Hickey. (2019). Modern crop breeding for future food security. *BMC Biology*, 17: 1-7.
- Wang, Y.Y., Y.Q. Li, H.Y. Wu, B. Hu, J.J. Zheng, H. Zhai and Z.J. Xia. (2018). Genotyping of soybean cultivars with medium-density array reveals the population structure and QTNs underlying maturity and seed traits. *Frontiers in plant science*, 9: 610.
- Wang, Y., L. Zhang, A. Nafisah, L. Zhu, J. Xu and Z. Li. (2013). Selection efficiencies for improving drought. Salt tolerances and yield using introgression breeding in rice (*Oryza sativa* L.) *The Crop Journal*, 1: 134-142.
- Wardofa, G.A., D. Asnake and H. Mohammed. (2019). GGE biplot analysis of genotype by environment interaction and grain yield stability of bread wheat genotypes in central Ethiopia. *Journal of Plant Breeding and Genetics*, 7(2): 75-85.
- Wilcox, J.R. and R.M. Shibles. (2001). Interrelationships among seed quality attributes in soybean. *Crop science*, 41: 11-14.
- Wolf, W.J., J. Cowan. (1975). *Soybeans as a Food Source*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, ISBN 0878191127.
- Workie, A., Z. Habtamu and D. Yigzaw. (2021). Genotype X environment interaction of maize (*Zea mays* L.) across North Western Ethiopia. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 5(9): 171-181.
- Yan, W. (2001). GGE Biplot-A Windows application for graphical analysis of multi-environment trial data and other types of two-way data. *Agron. Journal*, 93: 1111-1118.
- Yan, W., L.A. Hunt, Q. Sheng and Z. Szlavnic. (2000). Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop science*, 40: 597-605.
- Yu, J., J.B. Holland, M.D. McMullen and E.S. Buckler. (2008). Genetic design and statistical power of nested association mapping in maize. *Genetics*, 178(1): 539-551.
- Zhang, H., Z. Feng, J. Wang, X. Yun, F. Qu, C. Sun and Q. Wang. (2022). Genotype by environment interaction for grain yield in foxtail millet (*Setaria italica*) using AMMI model and GGE Biplot. *Plant Growth Regulation*, 1-12.
- Zobel, R.W., M.J. Wright and H.G. Gauch Jr. (1988). Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy journal*, 80(3): 388-393.