



SBSI



انجمن علوم زراعت و اصلاح نباتات ایران

Evaluation of yield stability and resistance to rhizomania and rhizoctonia root rot in new sugar beet hybrids

Mahdi Hassani^{1*}, Ali Saremirad¹, Heydar Azizi², Hamed Mansouri³, Mastaneh Sharifi⁴, Parviz Fasahat¹ Peyman Norouzi¹, Javad Rezaei⁵

(Received: 12 Oct. 2025 ; Accepted: 13 Dec. 2025)

How to cite this article:

Hassani M, Saremirad A, Azizi H, Mansouri H, Sharifi M, Fasahat P, Norouzi P, Rezaei J. Evaluation of yield stability and resistance to rhizomania and rhizoctonia root rot in new sugar beet hybrids. *Journal of Sugar Beet*. 2025; (41)1. 29-48. (In Persian with English abstract). DOI: 10.22092/jsb.2025.371008.1398.

Extended Abstract

Introduction

Sugar beet (*Beta vulgaris* L.) stands as a pivotal cornerstone in the global agro-industrial sector, serving as one of the primary sources of sucrose and bioethanol production. Despite significant agronomic advancements, the sustainability of sugar beet cultivation is incessantly compromised by biotic stressors, particularly soil-borne pathogens which can cause precipitous declines in root yield and sugar content. Among these, Rhizomania, caused by the *Beet necrotic yellow vein virus* (BNYVV) and transmitted by the vector *Polomyxa betae*, and Rhizoctonia root rot, caused by the fungal pathogen *Rhizoctonia solani*, represent two of the most devastating diseases worldwide. The simultaneous occurrence of these pathogens in major production regions necessitates the development of dual-purpose cultivars that exhibit not only high yield potential but also robust genetic resistance. Furthermore, given the diverse pedoclimatic conditions of sugar beet growing regions, the genotype-environment interaction (GEI) plays a critical role in phenotypic expression. Consequently, relying solely on yield potential is insufficient; identifying stable genotypes that maintain performance across varying environmental gradients is imperative. This study was conceptualized to evaluate the yield stability and pathological response of newly developed sugar beet hybrids—derived from the introgression of foreign

germplasm with locally adapted domestic pollinators—against the dual threats of Rhizomania and Rhizoctonia root rot.

Materials and Methods

The genetic material for this investigation comprised 32 novel hybrids generated through a mating design. These hybrids were synthesized by crossing two single crosses (as female parents with established resistance backgrounds) with 16 diverse pollinator lines (as male parents). To provide a benchmark for performance, four commercial cultivars were included as checks. The agronomic evaluation was conducted through multi-environment trials across four distinct agro-ecological zones in Iran, Mashhad, Shiraz, Miandoab, and Hamedan. These locations were selected to represent a wide range of environmental conditions and natural disease pressures. The field experiments utilized a randomized complete block design with four replications at each site. Agronomic traits, specifically root yield (RY), sugar content (SC), and white sugar yield (WSY), were quantified. Parallel to the field trials, a rigorous pathological assessment for resistance to Rhizoctonia root rot was conducted under controlled microplot conditions to minimize environmental error and ensure uniform infection pressure. This experiment involved artificial inoculation of the soil with the highly virulent *Rhizoctonia solani* isolate *Rh133*, grown on corn grain medium. The resistance to Rhizomania was evaluated under natural infection conditions in infested

1. Sugar Beet Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

*Corresponding author: m.hasani@areeo.ac.ir

2. Sugar Beet Research Department, West Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Urmia, Iran

3. Sugar Beet Research Department, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education center, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Hamedan, Iran.

4. Sugar Beet Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

5. Sugar Beet Research Department, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education center, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Mashhad, Iran



fields, capitalizing on the presence of BNYVV. Statistical analyses included a combined analysis of variance to assess the main effects of genotype, environment, and their interaction. Stability analysis was performed to identify genotypes with minimal variance across environments, ensuring that selected hybrids possess both high performance and dynamic stability.

Results and Discussion

The quantitative genetic analysis revealed that the main effects of genotype and environment, as well as the GEI, were highly significant ($P \leq 0.01$) for both RY and WSY. The significance of the GEI indicates that the relative ranking of the hybrids varied across the four tested locations, underscoring the necessity of stability indices for genotype selection. In the first set of experiments, stability and mean performance analysis highlighted hybrids 15, 7, 14, and 13 as the superior genotypes. These hybrids demonstrated a synergistic combination of high WSY and low interaction variance, suggesting their suitability for a broad range of environmental conditions. In the second experimental set, hybrids 14, 6, 12, and 11 emerged as the top-performing candidates, exhibiting exceptional agronomic traits superior to the trial means and competitive with the commercial checks. Regarding pathological traits, the screening for Rhizomania resistance indicated a high efficacy of the resistance genes present in the parental lines. Almost all experimental hybrids displayed high levels of resistance, scoring between 1 and 3 on the standard disease severity scale (where 1 indicates no symptoms and 9 indicates plant death). This suggests that the genetic background of the single crosses successfully conferred BNYVV resistance to the progeny. The evaluation of resistance to *Rhizoctonia solani* revealed significant genetic variability among the hybrids. In the first experiment, hybrids 12 and 9 recorded disease severity indices of 3.95 and 4.59, respectively. In the second experiment, hybrids 5, 3, and 1 demonstrated promising tolerance levels with indices of 4.56, 4.69, and 4.75, respectively. These scores are particularly significant given the virulence of the *Rh133* isolate used in the artificial inoculation.

Conclusion

The significance of the GEI reaffirms that breeding for specific adaptation or wide stability is crucial for maximizing genetic gain in sugar beet. The identification of hybrids such as 14 and 12, which appeared in top rankings for either yield stability or disease resistance, offers promising genetic resources for future breeding programs. Crucially, the study successfully identified genotypes that possess dual resistance (or high tolerance) to both Rhizomania and Rhizoctonia, addressing a major gap in current disease management strategies. The hybrids identified with moderate resistance to Rhizoctonia, combined with their high Rhizomania resistance and competitive yield, represent viable alternatives to current commercial

cultivars, potentially reducing the reliance on chemical fungicides and enhancing the economic stability of farmers in infested regions. In conclusion, this research has led to the isolation of superior sugar beet hybrids that harmonize yield potential, phenotypic stability, and biotic stress resistance. These genotypes are recommended for release or further pre-commercial trials in regions prone to Rhizomania and Rhizoctonia root rot complexes.

Keywords: Genotype-environment interaction, Microplot, Soil-borne diseases, Susceptibility.

References

- Taleghani D, Hosseinpour M, Nemati R, Saremirad A. Study of the possibility of winter sowing of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) early cultivars in Moghan region, Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences*. 2023b; 24(4): 319–334. Doi:<https://doi.org/10.22092/ijcs.2023.360341.1348>
- Resende MDV. Software Selegen-REML/BLUP: a useful tool for plant breeding. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*. 2016; 16(4): 330–339. Doi:<https://doi.org/10.1590/1984-70332016v16n4a49>
- Sun B, Li S, Pi Z, Wu Z, Wang R. Assessment of genetic diversity and population structure of exotic sugar beet (*Beta vulgaris* L.) varieties using three molecular markers. *Plants*. 2024; 13(7): 965. Doi:<https://doi.org/10.3390/plants13070965>

ارزیابی پایداری عملکرد و مقاومت به بیماری‌های ریزومانی و پوسیدگی ریزوکتونیایی ریشه در

هیبریدهای جدید چغندرقد

مهدی حسنی^{۱*}، علی صارمی‌راد^۱، حیدر عزیزی^۲، حامد منصوری^۳، مستانه شریفی^۴، پرویز فصاحت^۵، پیمان نوروزی^۵، جواد رضایی^۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۲۲

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.22092/jsb.2025.371008.1398

م. حسنی، ع. صارمی‌راد، ح. عزیزی، ح. منصوری، م. شریفی، پ. فصاحت، پ. نوروزی و ج. رضایی، ۱۴۰۴. ارزیابی پایداری عملکرد و مقاومت به بیماری‌های ریزومانی و پوسیدگی ریزوکتونیایی ریشه در هیبریدهای جدید چغندرقد. چغندرقد ۴۱ (۱): ۲۹-۴۸

چکیده

چغندرقد به عنوان یکی از منابع اصلی تأمین شکر، همواره با تهدید بیماری‌های خاک‌زاد نظیر ریزومانی و پوسیدگی ریزوکتونیایی ریشه مواجه است که پایداری تولید را به خطر می‌اندازند. شناسایی ارقام مقاوم با عملکرد پایدار در مناطق آلوده، موثرترین راهکار مدیریت این چالش است. مطالعه حاضر با هدف ارزیابی پایداری عملکرد و واکنش هیبریدهای جدید حاصل از سینگل کراس‌های خارجی و گرده افشان‌های داخلی نسبت به این دو بیماری صورت گرفت. در این رابطه، ۳۲ هیبرید حاصل از تلاقی دو سینگل کراس خارجی با ۱۶ لاین گرده‌افشان، به همراه چهار رقم شاهد مورد ارزیابی قرار گرفتند. هیبریدها در قالب دو آزمایش مجزا در چهار منطقه (مشهد، شیراز، میاندوآب و همدان) بر اساس طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار کشت شدند. مقاومت به بیماری پوسیدگی ریشه نیز در یک آزمایش جداگانه در شرایط کنترل‌شده میکروپلات با مایه‌زنی مصنوعی جدایه بیمارگر *Rhizoctonia solani* (Rh133) بررسی شد. نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که برهم‌کنش ژنوتیپ-محیط برای عملکرد ریشه و شکر سفید در هر دو آزمایش در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. بر اساس نتایج، هیبریدهای ۱۵، ۷، ۱۴ و ۱۳ در آزمایش اول و هیبریدهای ۱۴، ۶، ۱۲ و ۱۱ در آزمایش دوم به عنوان هیبریدهای مناسب شناسایی شدند. نتایج ارزیابی مقاومت به بیماری ریزومانی، حاکی از آن بود که تقریباً تمام هیبریدهای آزمایشی دارای سطح بالایی از مقاومت (نمره ۱ تا ۳) بودند. حال آن‌که، ارزیابی مقاومت به پوسیدگی ریشه نشان داد که در آزمایش اول هیبریدهای ۱۲ و ۹ به ترتیب با شاخص ۳/۹۵ و ۴/۵۹ و در آزمایش دوم هیبریدهای ۵، ۳ و ۱ با شاخص ۴/۵۶، ۴/۶۹ و ۴/۷۵ توانستند سطح مقاومت مناسبی (نیمه‌مقاوم) را از خود به نمایش بگذارند. در مجموع، این مطالعه با موفقیت به شناسایی هیبریدهای جدید و برتری منجر شد که از نظر عملکرد با بهترین شاهدهای تجاری قابل رقابت بودند.

واژه‌های کلیدی: بیماری‌های خاک‌زاد، برهم‌کنش ژنوتیپ-محیط، حساسیت، میکروپلات.

*- این مقاله برگرفته از طرح تحقیقاتی به شماره مصوب ۰۱۳-۶۳-۰۲۰۵-۰۰۱-۰۱۰۴۹ است.

۱. استادیار مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

*- نویسنده مسئول: m.hasani@areeo.ac.ir

۲. استادیار بخش تحقیقات چغندرقد، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران

۳. استادیار بخش تحقیقات چغندرقد، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران.

۴. استادیار بخش تحقیقات چغندرقد، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران.

۵. دانشیار مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.



۶. بخش تحقیقات چغندرقد، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران.

مقدمه

چغندر قند (*Beta vulgaris* L.) پس از نیشکر (*Saccharum officinarum*) دومین منبع بزرگ تولید شکر در جهان است و به‌عنوان یک گیاه راهبردی، نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی و صنعتی ایفا می‌کند. با این حال، تولید پایدار این محصول همواره با چالش بیماری‌های خاک‌زاد مواجه است که در میان آن‌ها، ریزومانیا و پوسیدگی ریزوکتونیایی ریشه به دلیل گستردگی و شدت خسارت، از اهمیت ویژه‌ای در سراسر جهان برخوردارند (Hassani et al. 2023; Rajabi et al. 2023).

بیماری ریزومانیا که عامل آن ویروس زردی نکروتیک رگ‌برگ چغندر قند (*Beet Necrotic Yellow Vein Virus, BNYYV*) و ناقل آن قارچ خاک‌زی (*Polymyxa betae*) است، یکی از مخرب‌ترین بیماری‌های چغندر قند در مقیاس جهانی محسوب می‌شود (Galein et al. 2018; McGrann et al. 2009). کنترل این بیماری عمدتاً بر پایه مقاومت ژنتیکی است که برای دهه‌ها متکی بر ژن تک‌جایگاه و غالب *Rz1* (منبع Holly) بوده است (Lewellen et al. 1987). علائم این بیماری شامل کاهش شدید رشد و تکثیر انبوه ریشه‌های جانبی (ریشه‌ریشی شدن) است که منجر به افت شدید عملکرد ریشه، کاهش عیار قند و پایین آمدن کیفیت استحصال شکر در کارخانه می‌شود (Rezaei 2007).

در کنار ریزومانیا، بیماری پوسیدگی ریشه ناشی از قارچ خاک‌زاد *Rhizoctonia solani* Kühn، تهدیدی جدی دیگر برای مزارع چغندر قند به شمار می‌آید. برخلاف مقاومت به ریزومانیا، مقاومت به این بیماری دارای ساختار ژنتیکی پیچیده‌تری است؛ این مقاومت یک صفت کمی با وراثت پلی‌ژنیک است که توسط چندین جایگاه ژنی با اثرات کوچک (Quantitative Trait Loci, QTLs) کنترل می‌شود (Hecker and Ruppel 1975; Wigg et al. 2023). این ماهیت چندژنی، فرآیند گزینش برای مقاومت را دشوارتر می‌سازد. پوسیدگی خشک و تیره در ناحیه طوقه و ریشه اصلی از علائم بارز این بیماری است که می‌تواند منجر به مرگ بوته و کاهش شدید عملکرد شود.

با توجه به ماهیت خاک‌زاد بودن عوامل بیماری‌زا، راهکارهای مدیریتی رایج اغلب کارایی محدودی دارند. کنترل شیمیایی با چالش‌هایی نظیر هزینه‌های بالا، خطر ایجاد مقاومت در جمعیت بیمارگر و نگرانی‌های زیست‌محیطی همراه است. در چنین شرایطی، مقاومت ژنتیکی به‌عنوان پایدارترین و مؤثرترین روش، سنگ بنای مدیریت پایدار این بیماری‌ها محسوب می‌شود (Buhre et al. 2009). معرفی و کشت ارقام مقاوم، اساس مدیریت موفق این بیماری‌ها در دهه‌های اخیر بوده است. با وجود این، فشار انتخاب مداوم ناشی از کشت گسترده ارقام مقاوم به ریزومانیا، منجر به ظهور سویه‌های جدید و بیماری‌زای ویروس شده است که قادر به شکستن مقاومت ژن رایج *Rz1* هستند (Galein et al. 2018). این پدیده که اغلب به دلیل جهش در پروتئین P25 ویروس (عامل بیماری‌زایی) رخ می‌دهد، پایداری مقاومت را به چالش کشیده و ضرورت جستجوی مداوم برای منابع مقاومت جدید و متنوع، مانند ژن *Rz2*، را دوچندان می‌کند (Benjes et al. 2024).

سینگل کراس‌های خارجی به دلیل برخورداری از پشتوانه ژنتیکی متنوع و پتانسیل حمل ژن‌های مقاومت جدید می‌توانند منابع ارزشمندی برای برنامه‌های به‌نژادی باشند (Sun et al. 2024). از این‌رو شناسایی و ارزیابی هیبریدهای حاصل از این منابع، گامی اساسی در جهت تضمین پایداری تولید چغندر قند در مناطق آلوده است. علاوه بر این، عملکرد ژنوتیپ‌ها اغلب در محیط‌های مختلف به دلیل برهم‌کنش ژنوتیپ-محیط متغیر است. این پدیده، گزینش ژنوتیپ‌های برتر با عملکرد بالا و پایدار را دشوار می‌سازد. برای تجزیه دقیق این برهم‌کنش، استفاده از روش‌های آماری پیشرفته مانند مدل‌های خطی مخلوط (Linear Mixed Models, LMM) (Hilmarsson et al. 2021; Piepho et al. 2008; Piepho 1994; Yue et al. 2022) و شاخص‌های پایداری مبتنی بر آن مانند میانگین وزنی قدرمطلق امتیازهای حاصل از بهترین پیش‌بینی‌های ناریب خطی (Weighted Average of Absolute Scores from the Best Linear Unbiased Predictions, WAASB) ضروری است (Olivoto et al. 2019). موفقیت شاخص WAASB در

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی

در این پژوهش، مجموعاً ۳۲ هیبرید آزمایشی جدید و چهار رقم شاهد مورد ارزیابی قرار گرفتند. هیبریدهای آزمایشی حاصل تلاقی دو سینگل کراس جدید خارجی (به‌عنوان والد مادری) با ۱۶ لاین گرده‌افشان مقاوم به بیماری‌های ریزومانیا و پوسیدگی ریزوکتونیایی ریشه (به‌عنوان والد پدری) بودند که در برنامه به‌نژادی مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند تولید شده بودند. لازم به ذکر است که تفکیک این دو آزمایش بر اساس والد مادری صورت گرفت؛ بدین‌صورت که هیبریدهای آزمایش اول حاصل تلاقی یک سینگل کراس (F-21121) با ۱۶ لاین گرده‌افشان و هیبریدهای آزمایش دوم حاصل تلاقی سینگل کراس دیگر (F-21122) با همان ۱۶ لاین گرده‌افشان بودند. به منظور مقایسه عملکرد و سطح مقاومت هیبریدهای جدید، چهار رقم شاهد مقاوم شامل دنا به‌عنوان شاهد داخلی مقاوم به ریزومانیا و پوسیدگی ریزوکتونیایی ریشه و BTS1930، RHC، FD16B3013 و Modex به‌عنوان شاهد های خارجی مقاوم به ریزومانیا و پوسیدگی ریزوکتونیایی ریشه نیز در آزمایش استفاده شدند.

شناسایی ژنوتیپ‌های برتر در محصولات زراعی متعددی از جمله گندم (*Triticum aestivum*) (Verma and Singh 2020)، سویا (*Glycine max*) (Abdelghany et al. 2021)، عدس (*Lens culinaris*) (Sellami et al. 2021)، برنج (*Oryza sativa*) (Sharifi et al. 2020)، ذرت (*Zea mays*) (Yue et al. 2022) و اخیراً در چغندر قند (Sadeghzadeh et al. 2022; Taleghani et al. 2023c) کاربرد گسترده و سودمندی آن را در برنامه‌های اصلاحی تأیید می‌کند. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی هیبریدهای جدید چغندر قندی که از تلاقی بین سینگل کراس‌های خارجی و گرده‌افشان‌های داخلی تهیه شدند، انجام شد. در این مطالعه، هیبریدهای حاصل از این منابع از نظر مقاومت به بیماری‌های ریزومانیا و پوسیدگی ریزوکتونیایی ریشه و همچنین صفات مهم زراعی نظیر عملکرد ریشه، درصد قند ناخالص، ضریب استحصال شکر و عملکرد شکر سفید در شرایط مزرعه آلوده مورد ارزیابی قرار گرفتند تا هیبریدهای برتر شناسایی شوند.

جدول ۱ کد و شجره هیبریدهای چغندر قند مورد ارزیابی در این پژوهش

Table 1 Codes and pedigrees of the sugar beet hybrids evaluated in this study

آزمایش اول		آزمایش دوم	
First experiment		Second experiment	
هیبرید	شجره	هیبرید	شجره
Hybrid	Pedigree	Hybrid	Pedigree
1	F – 21121 × S1 – 970017	1	F – 21122 × S1 – 970017
2	F – 21121 × S1 – 970020	2	F – 21122 × S1 – 970020
3	F – 21121 × S1 – 970024	3	F – 21122 × S1 – 970024
4	F – 21121 × S1 – 970062	4	F – 21122 × S1 – 970062
5	F – 21121 × S1 – 970065	5	F – 21122 × S1 – 970065
6	F – 21121 × S1 – 970074	6	F – 21122 × S1 – 970074
7	F – 21121 × S1 – 970080	7	F – 21122 × S1 – 970080
8	F – 21121 × S1 – 970092	8	F – 21122 × S1 – 970092
9	F – 21121 × S1 – 970099	9	F – 21122 × S1 – 970099
10	F – 21121 × S1 – 970121	10	F – 21122 × S1 – 970121
11	F – 21121 × S1 – 960104	11	F – 21122 × S1 – 960104
12	F – 21121 × S1 – 960132	12	F – 21122 × S1 – 960132
13	F – 21121 × S1 – 960146	13	F – 21122 × S1 – 960146
14	F – 21121 × S1 – 960147	14	F – 21122 × S1 – 960147
15	F – 21121 × S1 – 960163	15	F – 21122 × S1 – 960163
16	F – 21121 × SB 49	16	F – 21122 × SB 49
17	Dena	17	Dena
18	BTS1930 RHC	18	BTS1930 RHC
19	FD16B3013	19	FD16B3013
20	Modex	20	Modex

آزمایش‌های مزرعه‌ای و ارزیابی صفات

این آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در چهار ایستگاه تحقیقات کشاورزی (مشهد، شیراز، میاندوآب و همدان) اجرا گردید. این ایستگاه‌ها به دلیل سابقه تأیید شده آلودگی طبیعی به عوامل بیماری‌زای ریزومانیا در سال‌های قبل برای مطالعه انتخاب شدند. هیبریدهای حاصل از تلاقی هر سینگل کراس با ۱۶ لاین گرده‌افشان به همراه چهار رقم شاهد آزمایشی (مجموعاً ۲۰ هیبرید) به صورت دو آزمایش جداگانه در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار اجرا شدند. هر کرت آزمایشی شامل سه ردیف به طول هشت متر و با فاصله بین ردیف ۵۰ سانتی‌متر بود. فاصله بوته‌ها روی ردیف پس از عملیات تنک، ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

در انتهای فصل رشد، پس از برداشت، ویژگی‌های کیفی ریشه در آزمایشگاه کنترل کیفی ستاد مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند اندازه‌گیری شد. نمونه‌های خمیر ریشه با استفاده از دستگاه بتالایزر (Betalyser) برای اندازه‌گیری صفاتی شامل درصد قند ناخالص، نیتروژن آمینه، سدیم و پتاسیم مورد تجزیه قرار گرفتند (Kunz et al. 2002). در نهایت، عملکرد شکر سفید و ضریب استحصال شکر محاسبه شد (Cooke and Scott 1993).

ارزیابی مقاومت به بیماری‌ها

ارزیابی مقاومت به بیماری ریزومانیا در دو ایستگاه تحقیقاتی شیراز و مشهد که دارای سابقه آلودگی طبیعی به ویروس BNYVV بودند، انجام شد. در زمان برداشت، شدت بیماری برای هر کرت آزمایشی بر اساس علائم ریشه و مطابق با روش لوترباچر و همکاران (Luterbacher et al. 2005) در مقیاس یک تا نه ارزیابی گردید. در این مقیاس نمره ۱ برای گیاهان با ریشه‌های سالم (فاقد ریشه‌ریشی یا تغییر رنگ)، نمره ۳ برای ریشه‌ریشی محدود و تغییر رنگ جزئی، نمره ۵ برای ریشه‌ریشی متوسط و تغییر رنگ مشخص، نمره ۷ برای ریشه‌ریشی شدید همراه با نکروز و نمره ۹ برای گیاهان مرده با ریشه‌های کاملاً

نکروزه ثبت شد. نمرات زوج (۲، ۴، ۶ و ۸) به گیاهانی که علائمی حد واسط دو نمره فرد داشتند، اختصاص یافت. مقاومت به پوسیدگی ریزوکتونیایی ریشه در یک آزمایش جداگانه در شرایط کنترل‌شده میکروپلات و با مایه‌زنی مصنوعی با جدایه Rh133 قارچ *Rhizoctonia solani* در ایستگاه تحقیقاتی همدان انجام شد. ارزیابی شدت بیماری پس از رسیدن رقم شاهد حساس به حداکثر آلودگی، بر روی ۱۰ بوته از هر کرت و بر اساس روش باتنر و همکاران (Büttner et al. 2004) در مقیاس ۱ تا ۹ صورت گرفت. در این مقیاس، نمره ۱ برای گیاهان با ریشه‌های سالم، نمره ۲ برای ۱ درصد سطح ریشه دارای زخم، نمره ۳ برای ۱ تا ۵ درصد سطح ریشه دارای زخم، نمره ۴ برای ۵ تا ۱۰ درصد سطح ریشه دارای زخم، نمره ۵ برای ۱۰ تا ۲۵ درصد سطح ریشه دارای زخم، نمره ۶ برای ۲۵ تا ۵۰ درصد سطح ریشه دارای زخم، نمره ۷ برای ۵۰ تا ۷۵ درصد سطح ریشه دارای زخم، نمره ۸ برای بیش از ۷۵ درصد سطح ریشه دارای زخم و نمره ۹ برای گیاهان با ریشه کاملاً پوسیده ثبت گردید. پس از اتمام یادداشت‌برداری‌های مربوط به شدت بیماری بر اساس مقیاس ۱ تا ۹، شاخص بیماری مربوط به هر هیبرید آزمایشی با استفاده از رابطه ۱ در محیط Excel برآورد شد (Büttner et al. 2004):

$$DI = \frac{\sum NR_i \times S_i}{TN} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این روابط، DI شاخص بیماری، NR تعداد ریشه در مقیاس ۱ام، S_i مقیاس ۱ام و TN مجموع تعداد ریشه می‌باشد.

تجزیه و تحلیل آماری

پس از بررسی یکنواختی واریانس خطاهای آزمایشی با آزمون بارتلت، تجزیه پایداری هیبریدهای آزمایشی بر اساس مدل اثرات اصلی جمع‌پذیر و برهم‌کنش ضرب‌پذیر (Additive Main Effects and Multiplicative Interaction, AMMI) صفات عملکرد ریشه، درصد قند ناخالص، ضریب استحصال شکر و عملکرد شکر سفید با استفاده از رابطه ۲ صورت پذیرفت:

$$Y_{ger} = \mu + \alpha_g + \beta_e + \sum_n \lambda_n \alpha_{gn} \gamma_{en} + \rho_{ge} + \varepsilon_{ge} \quad \text{ابطاه ۲}$$

در این رابطه، Y_{ger} عملکرد ژنوتیپ گام در محیط π م در تکرار π ام است، μ میانگین کل آزمایش، α_g و β_e ه ترتیب اثرات اصلی ژنوتیپ و محیط، λ_n مقدار ویژه برای محور مؤلفه اصلی π ام، α_{gn} برادر ویژه ژنوتیپ برای محور گام از π مؤلفه اصلی برهم کنش، γ_{en} برادر ویژه محیط برای محور π ام از n مؤلفه اصلی برهم کنش، ρ_{ge} مقدار باقی مانده ε_{ge} مربوط به خطا است (Gauch 1992). با انجام تجزیه واریانس AMMI با استفاده از نرم افزار R، مقادیر مؤلفه‌های اصلی برای هر هیبرید و محیط به دست آمد.

برای تجزیه داده‌ها مدل خطی مخلوط نیز با در نظر گرفتن اثرات ژنوتیپی به صورت تصادفی مورد استفاده قرار گرفت. اجزای واریانس به روش حداکثر درست‌نمایی محدودشده (Restricted Maximum Likelihood, REML) (Dempster 1977) استفاده از مدل حداکثر درست‌نمایی محدودشده، محدودیت تجزیه واریانس به روش کمترین مربعات را برای داده‌های نامتعادل و همچنین نامتجانس برطرف می‌کند (Holland 2006) و از طرف دیگر، چنین مدلی برای به دست آوردن اجزای واریانس و برآورد مقادیر ژنتیکی و اجزای واریانس کارایی بهتری دارد لذا این روش به دلیل در نظر گرفتن مقادیر ژنوتیپی (نه مقادیر فنوتیپی) دقت بهتری در روند برنامه‌های به‌نژادی خواهد داشت و اجازه انتخاب بهترین ژنوتیپ‌ها را فراهم می‌کند (Resende 2016). بررسی معنی‌داری اثرات تصادفی (ژنوتیپ و برهم‌کنش ژنوتیپ-محیط) با آزمون نسبت درست‌نمایی (Likelihood Ratio Test, LRT) مورد مطالعه قرار گرفت. بهترین پیش‌بینی نااریب خطی (Best Linear Unbiased Prediction, BLUP) هر یک از ژنوتیپ‌ها به صورت مجموع میانگین کلیه محیط و اثر ژنوتیپی پیش‌بینی شد. شاخص WAASB طبق رابطه ۳ بر اساس تجزیه ارزش فردی اثرات برهم‌کنش ژنوتیپ-محیط با استفاده از ماتریس

$$WAASB_i = \frac{\sum_{k=1}^P |IPCA_{ik} \times EP_k|}{\sum_{k=1}^P EP_k} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$WAASBY_i = \frac{\left\{ W_Y \times \left[\frac{GY_i}{GY_{max}} \right] \times 100 \right\} + \left[W_S \times \left(100 - \frac{WAASB_i}{WAASB_{min}} \right) \right]}{W_v + W_r} \quad \text{إضافة ٤}$$

در رابطه $WAASB_i$ ،^۳ میانگین وزنی قدر مطلق امتیازات ژنوتیپ $IPCA_{ik}$ ،^۴ قدر مطلق امتیاز ژنوتیپ lam در مؤلفه برهم‌کنش EP_k و مقادیر واریانس توجیه‌شده توسط مؤلفه برهم‌کنش lam است. در رابطه $WAASBY_i$ ،^۴ شاخص گزینش هم‌زمانی میانگین عملکرد و پایداری ژنوتیپ lam ، W_Y وزن داده شده به عملکرد، GY_i میانگین عملکرد ژنوتیپ lam ، GY_{max} بیشترین میانگین عملکرد، W_S وزن داده شده به شاخص $WAASB_i$ ، $WAASB$ شاخص $WAASB$ ژنوتیپ lam $WAASB_{min}$ کمترین مقدار شاخص $WAASB$ محاسبه شده در میان ژنوتیپ‌ها است.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس و برهم کنش ژنوتیپ-محیط

به منظور ارزیابی دقیق واکنش هیبریدها در محیط‌های مختلف، ابتدا تجانس واریانس خطاهای آزمایشی با آزمون بارتلت بررسی و پس از تأیید یکنواختی آن، تجزیه واریانس مرکب انجام شد. نتایج تجزیه واریانس برای آزمایش اول نشان داد که عملکرد ریشه و عملکرد شکر سفید به طور معنی‌داری تحت تأثیر هر سه منبع تغییر محیط، ژنوتیپ و برهم‌کنش ژنوتیپ-محیط قرار داشتند. در مقابل، برای صفات درصد قند ناخالص و ضریب استحصال شکر، تنها اثرات اصلی محیط و ژنوتیپ معنی‌دار بودند (جدول ۲). در آزمایش دوم، نتایج حاکی از آن بود که هر سه عامل محیط، ژنوتیپ و برهم‌کنش آن‌ها بر هر چهار صفت عملکرد ریشه، درصد قند

مصطفوی و صارمی‌راد (Mostafavi and Saremirad 2021) نیز گزارش کردند که بخش عمده‌ای از برهم‌کنش ژنوتیپ-محیط توسط یک یا دو مؤلفه اصلی اول توجیه می‌شود. در مقابل، در برخی مطالعات دیگر (Omrani et al. 2019; Sadeghzadeh Hemayati et al. 2022)، تعداد بیشتری از مؤلفه‌های اصلی برای تبیین کامل برهم‌کنش، معنی‌دار بوده‌اند. این واقعیت که در مطالعه حاضر نیز برای توجیه کامل برهم‌کنش ژنوتیپ-محیط به‌ویژه برای صفت عملکرد شکر سفید، بیش از یک مؤلفه اصلی معنی‌دار بود، ماهیت پیچیده این برهم‌کنش را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، این برهم‌کنش از یک الگوی ساده پیروی نمی‌کند و هیبریدها برهم‌کنش‌های متقاطع (Crossover Interactions) قابل توجهی در محیط‌های مختلف از خود نشان داده‌اند. اکتفا به تفسیر گرافیکی مدل AMMI که عمدتاً بر پایه دو مؤلفه اول است، می‌تواند به نتایج گمراه‌کننده منجر شود. از این‌رو، تصمیم گرفته شد تا برای ارزیابی دقیق‌تر و پیش‌بینی پایدار عملکرد ژنوتیپ‌ها، از قدرت تفکیک‌کنندگی مدل AMMI و دقت بالای پیش‌بینی مقادیر اصلاحی مدل BLUP به‌صورت ترکیبی استفاده شود.

نتایج حاصل از آزمون نسبت درست‌نمایی، یافته‌های مدل AMMI را در خصوص معنی‌داری اثرات تأیید نمود (جدول‌های ۲ و ۳). در گام بعد از مدل BLUP برای برآورد اجزای واریانس ژنتیکی و غیرژنتیکی استفاده شد تا سهم نسبی هر یک از منابع تغییر در بروز تنوع فنوتیپی مشخص گردد. مهم‌ترین نتیجه در این تجزیه، سهم غالب واریانس محیطی در هر دو آزمایش و برای تمام صفات مورد بررسی بود. این نتیجه نشان می‌دهد که تفاوت‌های محیطی بین چهار ایستگاه آزمایشی تأثیر اصلی را بر تغییرات کلی عملکرد داشته است.

ناخالص، ضریب استحصال شکر و عملکرد شکر سفید اثرات کاملاً معنی‌داری داشتند (جدول ۳). وجود برهم‌کنش معنی‌دار ژنوتیپ-محیط برای صفات عملکرد ریشه و شکر سفید نشان می‌دهد که پتانسیل ژنتیکی هیبریدها در محیط‌های مختلف به شکل متفاوتی بروز کرده است. این تغییر در رتبه‌بندی که در بسیاری از تحقیقات به‌نژادی چغندرقد نیز گزارش شده است (Hassani et al. 2024a; Sadeghzadeh Hemayati et al. 2024; Saremirad and Taleghani 2022; Taleghani et al. 2023d)، بیانگر ماهیت چندژنی صفات عملکردی است.

به‌منظور درک عمیق‌تر ماهیت برهم‌کنش مشاهده‌شده، مجموع مربعات برهم‌کنش ژنوتیپ-محیط با استفاده از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی در مدل AMMI شکسته شد. در آزمایش اول، برای صفت عملکرد ریشه، تنها اولین مؤلفه اصلی معنی‌دار بود و به‌تنهایی ۵۰/۸۰ درصد از کل تغییرات برهم‌کنش ژنوتیپ-محیط را تبیین نمود. برای عملکرد شکر سفید، دو مؤلفه اصلی اول و دوم معنی‌دار بودند و مجموعاً ۸۵/۶۰ درصد از تغییرات برهم‌کنش را توجیه کردند که سهم مؤلفه‌های اول و دوم به ترتیب ۴۵/۶۰ و ۳۹/۹۰ درصد بود (جدول ۲). در آزمایش دوم، نتایج برای هر چهار صفت عملکرد ریشه، درصد قند ناخالص، ضریب استحصال شکر و عملکرد شکر سفید الگوی مشابهی را نشان داد؛ به‌طوری که در تمامی صفات، تنها اولین مؤلفه اصلی معنی‌دار گردید. این مؤلفه به‌تنهایی توانست ۵۸/۸۰ درصد از تغییرات برهم‌کنش ژنوتیپ-محیط برای عملکرد ریشه، ۶۸/۷۰ درصد برای درصد قند ناخالص، ۷۰/۷۰ برای ضریب استحصال شکر و ۶۴/۹۰ درصد برای عملکرد شکر سفید را توجیه نماید (جدول ۳).

نتایج این مطالعه با یافته‌های (Hassani et al. 2024a; Sadeghzadeh Hemayati et al. 2024; Saremirad and Taleghani 2022; Taleghani et al. 2023d)، پیشین (Mirzaei et al. 2023; Rajabi et al. 2023; Taleghani et al. 2023a)، در چغندرقد هم‌خوانی دارد، هرچند سهم و تعداد مؤلفه‌های معنی‌دار بسته به مجموعه ژنوتیپ‌ها و محیط‌های مورد ارزیابی متفاوت است. فتحی و همکاران (Fathi et al. 2018) و

جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس (مدل AMMI) و برآورد اجزای واریانس (مدل BLUP) برای صفات عملکرد ریشه، درصد قند، عملکرد شکر سفید و ضریب استحصال قند در هیبریدهای چغندر قند (آزمایش اول)
Table 2 Analysis of variance (AMMI model) and estimation of variance components (BLUP model) for root yield, sugar percentage, white sugar yield and extraction coefficient of sugar in sugar beet hybrids (first experiment)

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی df	عملکرد ریشه Root yield			درصد قند Sugar content			ضریب استحصال شکر Extraction coefficient of sugar			عملکرد شکر سفید White sugar yield		
		MS	%	Cum. (%)	MS	%	Cum. (%)	MS	%	Cum. (%)	MS	%	Cum. (%)
محیط Environment	3	87452.44**	-	-	106.19**	-	-	1435.89**	-	-	1303.75**	-	-
تکرار (محیط) Replication (Environment)	12	916.85	-	-	8.90	-	-	125.64	-	-	35.26	-	-
ژنوتیپ Genotype	19	580.58**	-	-	5.07**	-	-	32.75**	-	-	13.90**	-	-
ژنوتیپ × محیط Genotype × Environment	57	198.52**	-	-	1.80 ^{ns}	-	-	14.79 ^{ns}	-	-	5.80**	-	-
مؤلفه اول PC1	21	273.58**	50.80	50.80	2.04 ^{ns}	41.80	41.80	24.87 ^{ns}	62.00	62.00	7.18**	45.60	45.60
مؤلفه دوم PC2	19	168.06 ^{ns}	28.20	79.00	1.85 ^{ns}	34.30	76.10	13.57 ^{ns}	30.60	92.60	6.95**	39.90	85.60
مؤلفه سوم PC3	17	139.85 ^{ns}	21.00	100	1.44 ^{ns}	23.90	100	3.68 ^{ns}	7.40	100	2.80 ^{ns}	14.40	100
باقیمانده Residuals	228	117.99	-	-	1.44	-	-	11.46	-	-	3.25	-	-
آزمون حداکثر درست‌نمایی Likelihood ratio test													
محیط Environment		118.00**	72.83	100	1.44**	83.04	100	11.46**	85.43	100	3.25**	73.96	100
ژنوتیپ Genotype		23.88**	14.74	14.74	0.20**	11.77	11.77	1.12*	8.37	8.37	0.51*	11.53	11.53
ژنوتیپ × محیط Genotype × Environment		20.13**	12.43	27.17	0.09 ^{ns}	5.19	16.96	0.83 ^{ns}	6.20	14.57	0.64**	14.51	26.04

** : معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد؛ * : معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد؛ ns : غیر معنی‌دار؛ Cum : تجمعی.

** : 1% probability level of significance; * : 5% probability level of significance; ns: non-significant; Cum: Cumulative.

جدول ۳ نتایج تجزیه واریانس (مدل AMMI) و برآورد اجزای واریانس (مدل BLUP) برای صفات عملکرد ریشه، درصد قند، عملکرد شکر سفید و ضریب استحصال قند در هیبریدهای چغندر قند (آزمایش دوم)
Table 3 Analysis of variance (AMMI model) and estimation of variance components (BLUP model) for root yield, sugar percentage, white sugar yield and extraction coefficient of sugar in sugar beet hybrids (second experiment)

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی df	عملکرد ریشه Root yield			درصد قند Sugar content			ضریب استحصال شکر Extraction coefficient of sugar			عملکرد شکر سفید White sugar yield		
		MS	%	Cum. (%)	MS	%	Cum. (%)	MS	%	Cum. (%)	MS	%	Cum. (%)
محیط Environment	3	26276.78**	-	-	229.50**	-	-	2614.28**	-	-	571.16**	-	-
تکرار (محیط) Replication (Environment)	12	857.66	-	-	3.10	-	-	23.68	-	-	19.48	-	-
ژنوتیپ Genotype	19	629.29**	-	-	7.93**	-	-	96.98**	-	-	15.04**	-	-
ژنوتیپ × محیط Genotype × Environment	57	224.57**	-	-	2.72*	-	-	31.89*	-	-	6.50**	-	-
مؤلفه اول PC1	21	358.56**	58.80	58.80	5.07**	68.70	68.70	61.18**	70.70	70.70	11.44**	64.90	64.90
مؤلفه دوم PC2	19	174.55 ^{ns}	25.90	84.70	1.57 ^{ns}	19.30	88.10	24.07 ^{ns}	25.20	95.80	4.09 ^{ns}	21.00	85.80
مؤلفه سوم PC3	17	114.97 ^{ns}	15.30	100	1.09 ^{ns}	11.90	100.00	4.44 ^{ns}	4.20	100	3.08 ^{ns}	14.20	100
باقیمانده Residuals	228	127.56	-	-	1.78	-	-	21.19	-	-	3.45	-	-
آزمون حداکثر درست‌نمایی Likelihood ratio test													
محیط Environment		127.60**	72.03	100	1.78**	76.09	100	21.19**	75.85	100	3.45**	72.74	100
ژنوتیپ Genotype		25.29**	14.28	14.28	0.32**	13.92	13.92	4.07**	14.57	14.57	0.53*	11.25	11.25
ژنوتیپ × محیط Genotype × Environment		24.25**	13.69	27.97	0.23*	9.99	23.91	2.67*	9.58	24.15	0.76**	16.01	27.26

** : معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد؛ * : معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد؛ ns : غیر معنی‌دار؛ Cum : تجمعی.

** : 1% probability level of significance; * : 5% probability level of significance; ns : non-significant; Cum : Cumulative.

این نتیجه با برخی مطالعات پیشین در چغندر قند هم‌راستا است (Taleghani et al. 2022). سهم بالای واریانس محیطی به معنای کاهش وراثت‌پذیری عمومی برای صفات در این مجموعه از آزمایش‌ها است. این موضوع کارایی گزینش مستقیم بر اساس فنوتیپ را کاهش می‌دهد و اهمیت استفاده از روش‌های آماری پیشرفته مانند BLUP را که قادر به تفکیک دقیق‌تر اثرات ژنتیکی از اثرات محیطی هستند، دوچندان می‌کند.

پس از واریانس محیطی، واریانس ژنوتیپی برای صفات عملکرد ریشه، درصد قند ناخالص و ضریب استحصال شکر در رتبه دوم و واریانس برهم‌کنش ژنوتیپ-محیط در رتبه سوم قرار گرفت. با این حال، این الگو برای صفت عملکرد شکر سفید معکوس بود و سهم واریانس برهم‌کنش ژنوتیپ-محیط از واریانس ژنوتیپی پیشی گرفت. این امر نشان می‌دهد که صفت عملکرد شکر سفید حساسیت بیشتری به تغییرات محیطی داشته و پایداری آن در بین هیبریدها متفاوت‌تر از تفاوت‌های ذاتی عملکردی آن‌ها بوده است. همان‌طور که در نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) مشاهده شد، برهم‌کنش ژنوتیپ-محیط برای صفات درصد قند ناخالص و ضریب استحصال شکر در آزمایش اول معنی‌دار نبود. این امر بیانگر پایداری نسبی واکنش هیبریدها برای این صفات کیفی در گستره محیط‌های مورد ارزیابی است، بنابراین، مقایسه میانگین کلی هیبریدها (جدول ۴) معیار قابل اعتمادی برای شناسایی بهترین‌ها از نظر پتانسیل ژنتیکی کیفیت است. نتایج مقایسه میانگین (جدول ۴) نشان داد که اختلافی میان هیبریدها از نظر درصد قند ناخالص وجود دارد. در این میان، رقم شاهد Modex با میانگین ۱۹/۴۹ درصد، بالاترین درصد قند را به خود اختصاص داد و از نظر آماری برتری معنی‌داری نسبت به سایر هیبریدها نشان داد. پس از آن، هیبریدهای شماره ۱۵ (۱۸/۸۲ درصد)، ۵ (۱۸/۷۱ درصد) و رقم شاهد FD16B3013 (۱۸/۶۷ درصد) در مراتب بعدی قرار گرفتند. در مقابل، رقم شاهد دنا با میانگین ۱۶/۸۶ درصد، کمترین میزان درصد قند را تولید کرد. افزایش درصد قند جزو اهداف اصلی در برنامه‌های به‌نژادی چغندر قند است، زیرا به‌طور مستقیم بر پتانسیل تولید شکر در واحد سطح

تأثیر می‌گذارد. دستیابی به هیبریدهایی با عیار قند بالا، به‌ویژه در پایه‌های ژنتیکی جدید، یک موفقیت مهم در جهت بهبود بهره‌وری محسوب می‌شود لذا این فرآیند شناسایی و گزینش هیبریدهای برتر بر اساس صفات مهم، هسته اصلی برنامه‌های به‌نژادی است، همان‌طور که حسنی و همکاران (Hassani et al. 2024b) نیز در پژوهش خود با هدف گزینش ژنوتیپ‌های برتر چغندر قند بر این موضوع تأکید کردند.

رقم شاهد Modex با ۸۵/۶۲ درصد بالاترین راندمان استحصال شکر را به ثبت رساند. پس از آن، هیبرید شماره ۹ نیز با ضریب استحصال ۸۵/۰۱ درصد عملکرد بسیار مطلوبی از خود نشان داد و در زمره بهترین‌ها جای گرفت. از سوی دیگر، ضریب استحصال پایین در رقم شاهد دنا (۷۸/۹۹ درصد) مؤید کیفیت پایین ریشه و تجمع بالای ناخالصی‌ها در آن است که می‌تواند منجر به کاهش بازدهی در فرآیند تولید شکر شود. این نتایج نشان می‌دهد که هیبریدهای مورد استفاده در این تحقیق، دارای تنوع مناسبی برای گزینش هم‌زمان جهت بهبود عیار قند و کاهش ناخالصی‌ها هستند. این یافته با نتایج طالقانی و همکاران (Taleghani et al. 2023b) که در آن نیز ارقام خاصی توانستند عملکرد شکر سفید بالاتری را به دلیل خصوصیات کمی و کیفی برتر تولید کنند، هم‌خوانی دارد. به‌منظور ارائه یک ارزیابی جامع از عملکرد هیبریدها در گستره محیط‌های آزمایشی و با توجه به وجود برهم‌کنش معنی‌دار ژنوتیپ-محیط، از شاخص پایداری WAASB استفاده گردید. بر اساس این شاخص هیبریدهای با مقادیر WAASB صفر یا نزدیک به صفر به‌عنوان پایدارترین هیبریدها در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین از نظر عملکرد ریشه در آزمایش اول (شکل ۱A) هیبریدهای ۱۱، ۲، ۱۶، ۷، ۱۲، ۳، ۱۳، ۵، ۱، ۱۵، ۸ و ۱۴ و ارقام شاهد FD16B3013، دنا و Modex و در آزمایش دوم (شکل ۱B) هیبریدهای ۳، ۶، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۵، ۱۳، ۱، ۴، ۱۱ و ۲ و ارقام شاهد دنا و Modex دارای برهم‌کنش ژنوتیپ-محیط پایین و پایداری بالایی بودند اما ژنوتیپ ایده‌آل، ژنوتیپی است که مقدار WAASB صفر یا نزدیک به صفر و مقدار ارزش عملکرد بالاتر از میانگین کل داشته باشد.

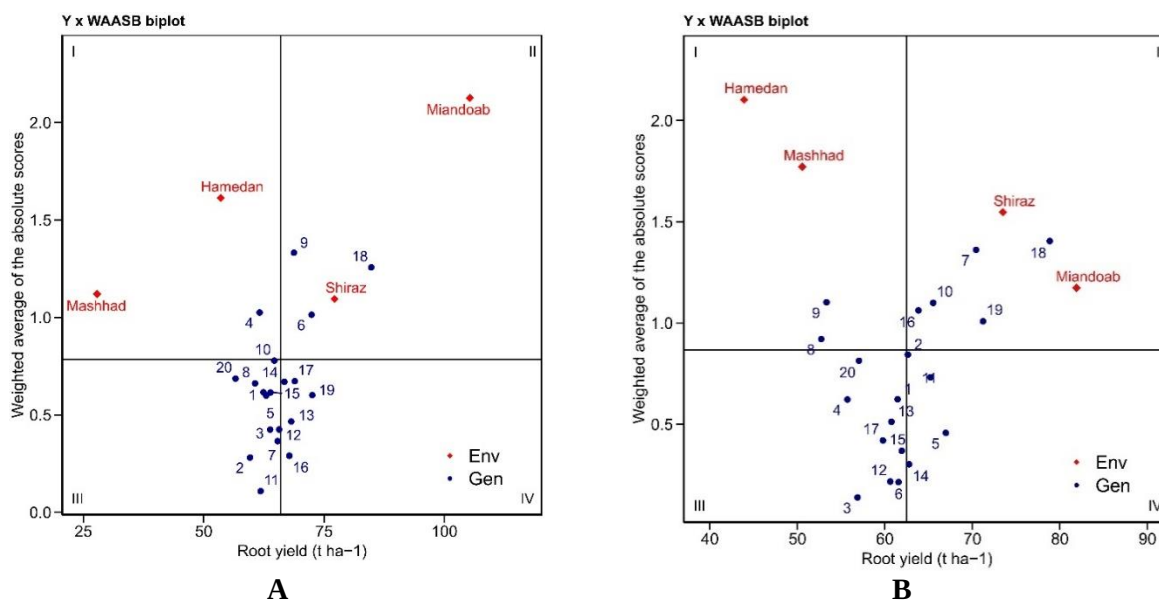
جدول ۴ مقایسه میانگین درصد قند و ضریب استحصال شکر برای هیبریدهای آزمایش اول (میانگین چهار مکان)

Table 4 Mean comparison of sugar content and extraction coefficient of sugar for the hybrids in the first experiment (averaged over four locations)

هیبرید	درصد قند	ضریب استحصال شکر (درصد)
Hybrid	Sugar content (%)	Extraction coefficient of sugar (%)
1	18.56	83.58
2	18.34	83.51
3	17.68	82.73
4	18.60	84.27
5	18.71	84.14
6	18.11	82.50
7	18.32	83.58
8	18.25	82.68
9	18.64	85.01
10	17.74	82.53
11	17.50	81.58
12	17.97	82.77
13	17.87	82.12
14	18.42	83.99
15	18.82	84.03
16	18.21	82.25
Dena	16.86	78.99
BTS1930 RHC	18.28	82.17
FD16B3013	18.67	84.26
Modex	19.49	85.62
LSD 5%	0.84	2.36
LSD 1%	1.10	3.11

۳، ۴، ۱۳، ۱، ۴، ۱۱، ۲، ۱۰ و ۵ و ارقام شاهد دنا و Modex کمترین برهم‌کنش ژنوتیپ- محیط و بیشترین پایداری را داشتند. در میان هیبریدهای مذکور در آزمایش اول شش هیبرید ۷، ۱۵، ۱۴، ۱۶، ۶ و ۵ در آزمایش دوم، هیبریدهای ۱۴، ۶، ۱۱، ۲ و ۵ به همراه رقم شاهد Modex علاوه بر پایداری مناسب، عملکردی بیش از میانگین کل به ثبت رساندند. تلفیق این نتایج، یک نتیجه کلیدی را نمایان می‌کند: هیبریدهای شماره ۶ و ۵ تنها هیبریدهایی هستند که در هر دو گروه هیبریدهای آزمایشی اول و دوم در جمع بهترین‌ها از نظر عملکرد شکر سفید پایدار قرار دارند. از آنجایی که والد پدری دو هیبرید ۶ و ۵ در آزمایش اول و آزمایش دوم مشابه است و تنها تفاوت هیبرید ۵ آزمایش اول با دوم و همچنین هیبرید ۶ آزمایش اول با دوم در والد مادری آن‌ها است می‌توان چنین استنباط کرد که احتمالاً این برتری تکرارشونده ناشی از والد پدری آن‌ها است. این فرآیند گزینش هدفمند که هدف اصلی مطالعاتی مانند مطالعه حسنی و همکاران (Hassani et al. 2024b) نیز است با موفقیت به شناسایی این هیبریدهای برتر منجر شد که پتانسیل بالایی برای افزایش تولید پایدار شکر دارند.

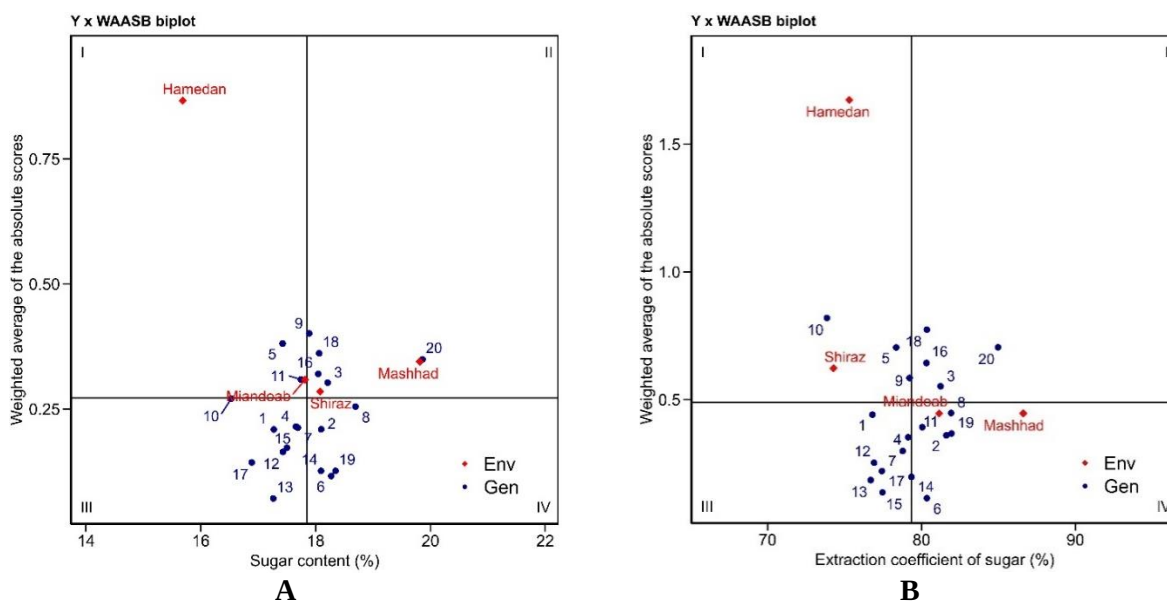
در آزمایش اول هیبریدهای ۱۶ و ۱۳ و در آزمایش دوم هیبریدهای ۱۴، ۵ و ۱۱ علاوه بر پایداری ارزش عملکردی بیشتر از میانگین کل داشتند لذا به‌عنوان هیبریدهای پایدار با ارزش عملکرد مطلوب شناخته شدند. برای درصد قند که در آزمایش دوم، برهم‌کنش ژنوتیپ- محیط معنی‌داری داشت (شکل ۲A)، هیبریدهای ۱۳، ۶، ۱۴، ۱۲، ۱۵، ۱، ۴، ۷، ۲ و ۸ و ارقام شاهد FD16B3013 و دنا از برهم‌کنش ژنوتیپ- محیط پایین و پایداری بالایی برخوردار بودند اما در میان آن‌ها هیبریدهای ۶، ۱۴، ۲ و ۸ و رقم شاهد FD16B3013 درصد قند بالاتر از میانگین کل داشتند. لذا به‌عنوان هیبریدهای مناسب شناخته شدند. هیبریدهای ۶، ۱۵، ۱۳، ۱۴، ۱۲، ۷، ۴، ۲، ۱۱، ۱ و ۸ و ارقام شاهد دنا و FD16B3013 از نظر ضریب استحصال شکر (شکل ۲B) پایدار بودند اما در این میان، هیبریدهای ۶، ۱۴، ۲، ۱۱ و ۸ به همراه رقم شاهد FD16B3013 ضریب استحصال شکر بیشتر از میانگین کل و پایداری مناسبی نشان دادند. نتایج عملکرد شکر سفید در هر دو آزمایش (شکل ۳A و ۳B) مهم‌ترین نتایج را برای گزینش نهایی فراهم می‌کند. در آزمایش اول، هیبریدهای ۷، ۱۵، ۲، ۱۳، ۱۰، ۱۱، ۱۴، ۱، ۱۶، ۸، ۱۲، ۳ و ۶ و ۵ و رقم شاهد Modex و در آزمایش دوم هیبریدهای ۱۲، ۱۴، ۱۵،



شکل ۱ تجزیه بای پلات WAASB برای ارزیابی همزمان عملکرد ریشه و پایداری هیبریدهای چغندر قند در آزمایش اول (A) و آزمایش دوم (B).

ارقام شاهد، ۱۷: دنا، ۱۸: BTS1930 RHC، ۱۹: FD16B3013 و ۲۰: Modex

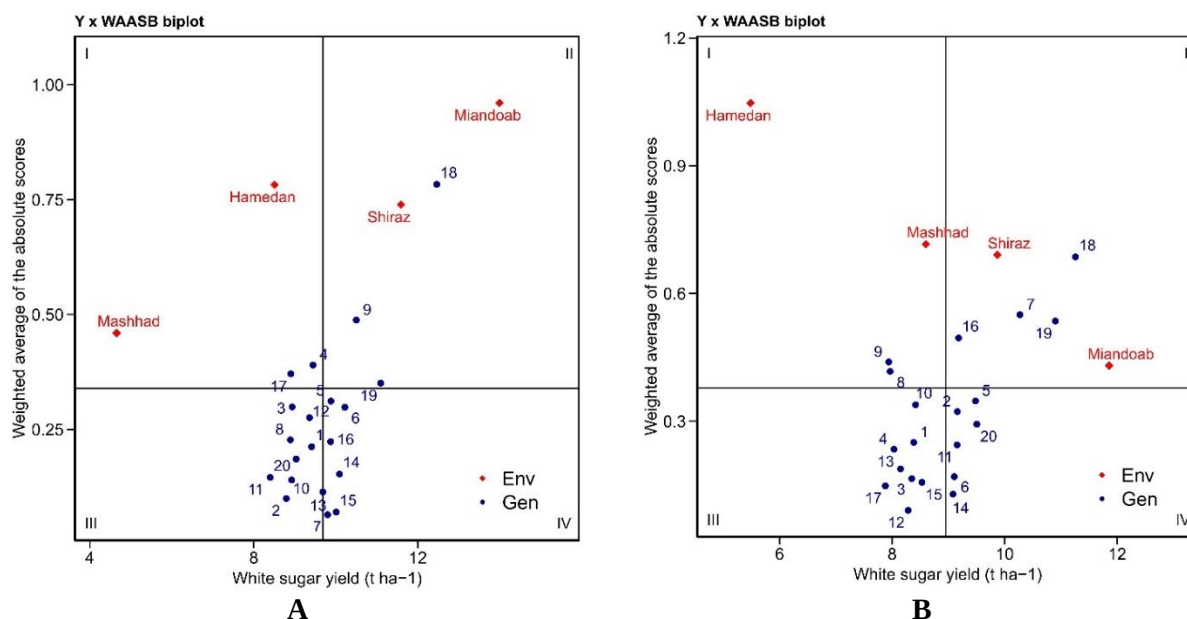
Fig 1 WAASB biplot for the simultaneous evaluation of root yield and stability of sugar beet hybrids in the first (A) and second (B) experiments. Check varieties, 17: Dena, 18: BTS1930 RHC, 19: FD16B3013, and 20: Modex



شکل ۲ تجزیه بای پلات WAASB برای ارزیابی همزمان درصد قند ناخالص و پایداری (A) و ضریب استحصال شکر و پایداری (B) هیبریدهای

چغندر قند در آزمایش دوم. ارقام شاهد، ۱۷: دنا، ۱۸: BTS1930 RHC، ۱۹: FD16B3013 و ۲۰: Modex

Fig 2 WAASB biplot for the simultaneous evaluation of performance and stability of sugar content (A) and extraction coefficient of sugar (B) in sugar beet hybrids in the second experiment. Check varieties, 17: Dena, 18: BTS1930 RHC, 19: FD16B3013, and 20: Modex



شکل ۳ تجزیه بای پلات WAASB برای ارزیابی هم‌زمان عملکرد شکر سفید و پایداری هیبریدهای چغندر قند در آزمایش اول (A) و آزمایش دوم (B). ارقام شاهد، ۱۷: دنا، ۱۸: BTS1930 RHC، ۱۹: FD16B3013 و ۲۰: Modex.

Fig 3 WAASB biplot for the simultaneous evaluation of white sugar yield and stability of sugar beet hybrids in the first (A) and second (B) experiments. Check varieties, 17: Dena, 18: BTS1930 RHC, 19: FD16B3013, and 20: Modex.

عملکرد و پایداری آن‌ها نیز ضعیف بود.

رتبه‌بندی هیبریدهای آزمایش دوم بر اساس شاخص WAASBY برای عملکرد ریشه (شکل ۴B)، الگوی مشابهی از تفکیک هیبریدها را نشان داد. در این آزمایش، هیبرید شماره ۵ با کسب بالاترین امتیاز به‌عنوان مطلوب‌ترین هیبرید معرفی شد و پس از آن هیبریدهای شماره ۶، ۱۴ و ۱۲ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. این چهار هیبرید که همگی عملکردی بالاتر از میانگین داشتند بهترین میزان تولید ریشه و پایداری را نشان دادند. در مقابل، هیبریدهای شماره ۹ و ۸ با قرارگیری در پایین‌ترین رتبه‌ها و داشتن عملکردی کمتر از میانگین، به‌عنوان ضعیف‌ترین هیبریدها برای این صفت شناسایی شدند.

ارزیابی صفت درصد قند ناخالص در آزمایش دوم که در آن برهم‌کنش ژنوتیپ-محیط معنی‌دار بود، با استفاده از شاخص WAASBY انجام شد (شکل ۵A). نتایج این رتبه‌بندی، هیبرید شماره ۶ را با کسب بالاترین امتیاز به‌عنوان بهترین هیبرید معرفی کرد. پس از آن، هیبریدهای ۱۴ و ۱۳ و رقم‌های شاهد FD16B3013 و Modex در مراتب بعدی واقع شدند. این هیبریدها همگی دارای عملکردی بالاتر از میانگین بودند و بهترین

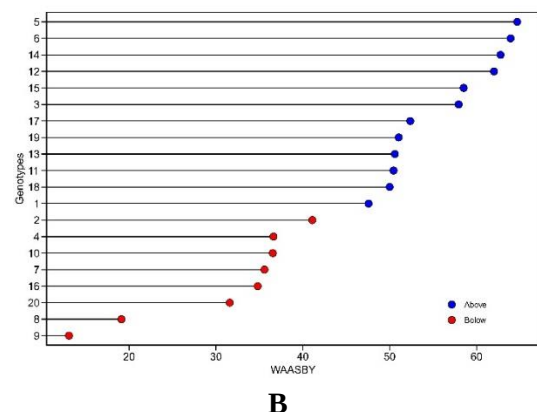
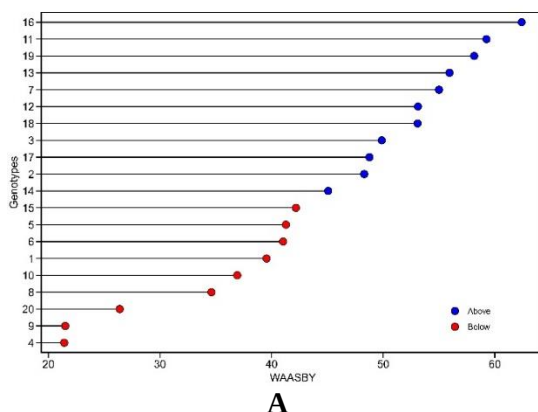
شاخص WAASBY که بر اساس مقادیر پیش‌بینی‌شده مدل BLUP استوار است، برای رتبه‌بندی نهایی هیبریدها استفاده گردید. نتایج رتبه‌بندی هیبریدها بر اساس شاخص WAASBY برای عملکرد ریشه در آزمایش اول در شکل ۴A ارائه شده است. بر اساس این شاخص، هیبرید شماره ۱۶ با کسب بالاترین امتیاز، به‌عنوان مطلوب‌ترین هیبرید برای این صفت شناخته شد. پس از آن، هیبریدهای شماره ۱۱، ۱۳ و ۷ به همراه رقم شاهد FD16B3013 در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند و بهترین توازن میان عملکرد بالا و پایداری را به نمایش گذاشتند. یک مشاهده مهم در این شکل آن است که تمامی هیبریدهای برتر دارای دایره‌های آبی‌رنگ هستند که نشان می‌دهد لازمه کسب رتبه بالا در این شاخص، داشتن عملکرد بالاتر از میانگین است. این امر تأیید می‌کند که شاخص WAASBY صرفاً هیبریدهای پایدار اما کم محصول را انتخاب نمی‌کند بلکه به دنبال گزینش هیبریدهای با پتانسیل مناسب است. در مقابل، هیبریدهای شماره ۴ و ۹ با قرارگیری در انتهای این رتبه‌بندی، به‌عنوان نامطلوب‌ترین گزینه‌ها برای صفت عملکرد ریشه در این مجموعه شناسایی شدند. این هیبریدها نه تنها عملکردی پایین‌تر از میانگین داشتند بلکه ترکیب

رتبه‌بندی هیبریدها بر اساس شاخص WAASBY برای این صفت (شکل ۴A)، تصویر واضحی از بهترین مواد ژنتیکی ارائه می‌دهد. بر اساس این ارزیابی، هیبرید شماره ۱۵ با کسب بالاترین امتیاز، به‌عنوان مطلوب‌ترین هیبرید در این آزمایش شناسایی شد. پس از آن، هیبریدهای شماره ۷، ۱۴ و ۱۳ به همراه رقم شاهد FD16B3013 در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند و بهترین توازن از نظر عملکرد شکر سفید بالا و پایداری در محیط‌های مختلف را نشان دادند.

تجزیه WAASBY برای عملکرد شکر سفید در آزمایش دوم (شکل ۴B)، هیبرید شماره ۱۴ را به‌عنوان مناسب‌ترین هیبرید شناسایی کرد. پس از آن، هیبریدهای ۶، ۱۲ و ۱۱ و رقم‌های شاهد FD16B3013 و Modex به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. این پنج هیبرید که همگی عملکردی بالاتر از میانگین داشتند، هیبریدهای برتر این آزمایش را تشکیل دادند. برتری این هیبریدها کاملاً قابل انتظار بود.

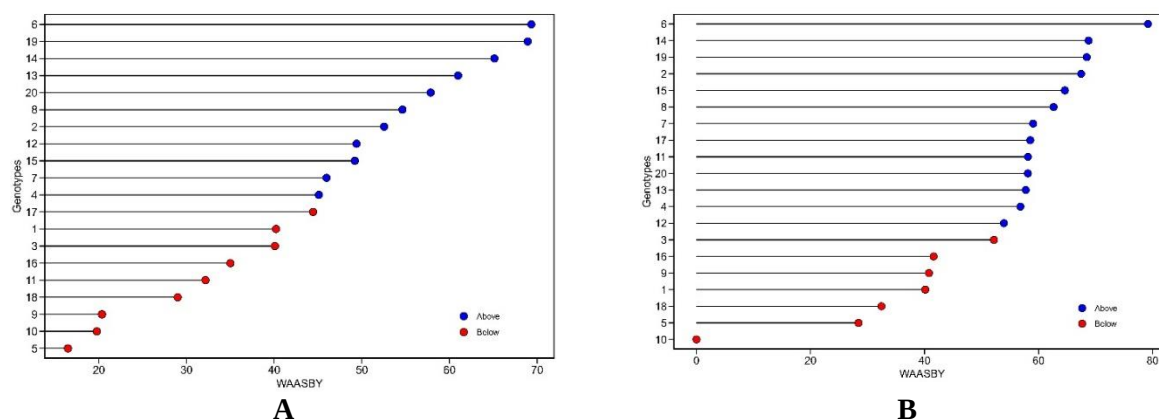
توازن میان عیار قند بالا و پایداری در محیط‌های مختلف را به نمایش گذاشتند. در انتهای دیگر شکل، هیبریدهای شماره ۵، ۱۰ و ۹ با کسب کمترین امتیاز و داشتن عملکردی پایین‌تر از میانگین، به‌عنوان ضعیف‌ترین گزینه‌ها برای این صفت مهم کیفی شناسایی شدند. نتایج رتبه‌بندی هیبریدها بر اساس شاخص WAASBY برای ضریب استحصال شکر در آزمایش دوم (شکل ۴B)، هیبرید شماره ۶ را به‌عنوان بهترین و مطلوب‌ترین هیبرید شناسایی کرد. پس از آن، هیبریدهای ۱۴ و ۲ و رقم شاهد FD16B3013 در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. این هیبریدها که همگی عملکردی بالاتر از میانگین داشتند، نشان‌دهنده پتانسیل ژنتیکی بالایی برای تولید ریشه‌هایی با ناخالصی پایین و بازدهی بالا در فرآیند استحصال شکر هستند. در مقابل، هیبرید شماره ۱۰ با کسب کمترین امتیاز، نامطلوب‌ترین عملکرد را برای این صفت کیفی مهم از خود نشان داد.

نتایج نهایی برای هیبریدهای آزمایش اول بر روی صفت عملکرد شکر سفید، به‌عنوان مهم‌ترین شاخص اقتصادی، متمرکز شد.



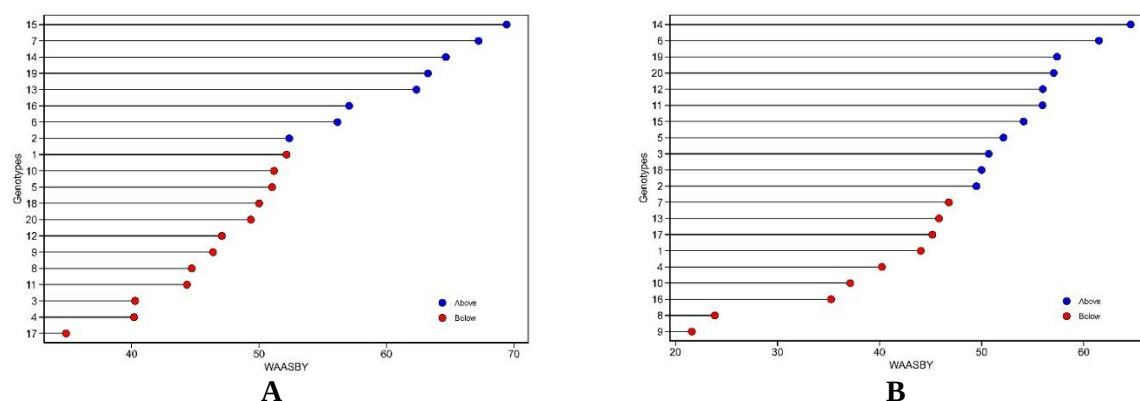
شکل ۴ رتبه‌بندی و گزینش هیبریدهای چغندر قند بر اساس شاخص WAASBY برای صفت عملکرد ریشه در آزمایش اول (A) و آزمایش دوم (B). ارقام شاهد، ۱۷: دنا، ۱۸: BTS1930 RHC، ۱۹: FD16B3013 و ۲۰: Modex

Fig 4 Ranking and selection of sugar beet hybrids for root yield based on the WAASBY index in the first (A) and second (B) experiments. Check varieties, 17: Dena, 18: BTS1930 RHC, 19: FD16B3013, and 20: Modex



شکل ۵ رتبه‌بندی و گزینش هیبریدهای چغندر قند بر اساس شاخص WAASBY برای صفت درصد قند ناخالص (A) و ضریب استحصال شکر (B) در آزمایش دوم. ارقام شاهد، ۱۷: دنا، ۱۸: BTS1930 RHC، ۱۹: FD16B3013 و ۲۰: Modex

Fig 5 Ranking and selection of sugar beet hybrids for sugar content (A) and extraction coefficient of sugar (B) based on the WAASBY index in the second experiment. Check varieties, 17: Dena, 18: BTS1930 RHC, 19: FD16B3013, and 20: Modex



شکل ۶ رتبه‌بندی و گزینش هیبریدهای چغندر قند بر اساس شاخص WAASBY برای صفت عملکرد شکر سفید در آزمایش اول (A) و آزمایش دوم (B). ارقام شاهد، ۱۷: دنا، ۱۸: BTS1930 RHC، ۱۹: FD16B3013 و ۲۰: Modex

Fig 6 Ranking and selection of sugar beet genotypes for white sugar yield based on the WAASBY index in the first (A) and second (B) experiments. Check varieties, 17: Dena, 18: BTS1930 RHC, 19: FD16B3013, and 20: Modex

برای این هیبریدها در هر دو ایستگاه تحقیقات کشاورزی شیراز و مشهد و هر دو آزمایش اول و دوم، عمدتاً در محدوده مقاوم (R) قرار دارند که نشان‌دهنده‌ی کارایی بالایی والدین به‌کار رفته به‌عنوان منبع ژنتیکی مقاومت به ریزومانیا است. در مقابل، واکنش شاهد حساس (هیبرید ۲۱) در تمامی شرایط، وجود فشار بیماری کافی در مزارع آزمایشی را اثبات می‌کند.

در خصوص مقاومت به پوسیدگی ریشه، تنوع ژنتیکی قابل توجهی میان هیبریدها مشاهده شد. شاخص بیماری ریزوکتونیا در آزمایش اول، دامنه‌ای از ۳/۹۵ (هیبرید ۱۲) تا ۸/۶۳ (هیبرید ۱۱) را در بر گرفت که نشان‌دهنده‌ی وجود تنوع بالا برای صفت مقاومت در هیبریدهای مورد مطالعه و کارایی روش غربالگری

ارزیابی مقاومت به بیماری‌های ریزومانیا و پوسیدگی ریزوکتونیایی ریشه

مقاومت ژنتیکی به بیماری‌های خاک‌زاد، ضامن اصلی پایداری تولید در شرایط مزرعه است. نتایج ارائه شده در جدول ۵، واکنش هیبریدهای چغندر قند را به دو بیماری خاک‌زاد ریزومانیا و پوسیدگی ریزوکتونیایی ریشه در دو آزمایش مستقل نشان می‌دهد. بررسی این داده‌ها که بر اساس تنوع پاسخ هیبریدها به شدت بیماری استوار است امکان شناسایی کاندیداهای برتر با مقاومت دوگانه را فراهم می‌آورد. در ارزیابی مقاومت به بیماری ریزومانیا، نتایج حاکی از آن بود که تقریباً تمام هیبریدهای آزمایشی دارای سطح بالایی از مقاومت هستند. نمرات ثبت شده

سطح مقاومت را از خود نشان دادند. عملکرد شاهد حساس (هیبرید ۲۱) که نمرات بالایی در هر دو آزمایش کسب کرد، نشان‌دهنده فشار بیماری کافی و اعتبار نتایج است.

است. در این آزمایش، هیبریدهای ۱۲ و ۹ و ارقام شاهد FD16B3113 و BTS1930 RHC به عنوان مقاوم‌ترین هیبریدها بودند. در آزمایش دوم نیز هیبریدهای ۵، ۳ و ۱ ارقام شاهد Modex، FD16B3013 و BTS1930 RHC بهترین

جدول ۵ واکنش هیبریدهای چغندر قند به بیماری‌های ریزومانیا و پوسیدگی ریزوکتونیایی ریشه در دو آزمایش مستقل
Table 5 Reaction of sugar beet hybrids to rhizomania and rhizoctonia root rot in two independent experiments

هیبرید Hybrid	آزمایش اول First experiment			آزمایش دوم Second experiment		
	شاخص بیماری ریزوکتونیا Rhizoctonia disease index	نمره ریزومانیا در شیراز Rhizomania score in Shiraz	نمره ریزومانیا در مشهد Rhizomania score in Mashhad	شاخص بیماری ریزوکتونیا Rhizoctonia disease index	نمره ریزومانیا در شیراز Rhizomania score in Shiraz	نمره ریزومانیا در مشهد Rhizomania score in Mashhad
1	5.82	3 (R)	3 (R)	4.75	3 (R)	3 (R)
2	6.79	3 (R)	3 (R)	6.45	3 (R)	3 (R)
3	5.57	3 (R)	4 (MR)	4.69	3 (R)	2 (R)
4	5.74	2 (R)	3 (R)	6.05	2 (R)	2 (R)
5	5.37	2 (R)	3 (R)	4.56	2 (R)	2 (R)
6	6.71	2 (R)	3 (R)	8.50	2 (R)	2 (R)
7	5.00	2 (R)	3 (R)	7.48	2 (R)	2 (R)
8	6.06	3 (R)	3 (R)	5.28	3 (R)	2 (R)
9	4.59	2 (R)	3 (R)	5.50	2 (R)	3 (R)
10	5.52	2 (R)	3 (R)	7.04	2 (R)	2 (R)
11	8.63	2 (R)	4 (MR)	7.87	3 (R)	2 (R)
12	3.95	2 (R)	3 (R)	6.39	3 (R)	2 (R)
13	7.63	2 (R)	3 (R)	5.37	3 (R)	2 (R)
14	6.32	2 (R)	3 (R)	6.35	3 (R)	2 (R)
15	8.35	2 (R)	3 (R)	7.17	2 (R)	2 (R)
16	5.45	2 (R)	4 (MR)	7.61	2 (R)	2 (R)
Dena	6.24	2 (R)	3 (R)	6.21	2 (R)	3 (R)
BTS1930 RHC	4.37	1 (R)	2 (R)	4.82	2 (R)	2 (R)
FD16B3013	4.22	1 (R)	2 (R)	4.41	2 (R)	2 (R)
Modex	5.09	2 (R)	3 (R)	4.00	2 (R)	3 (R)
Susceptible check	8.20	5	6	7.36	5	5

R: مقاوم؛ MR: نیمه‌مقاوم.

R: Resistant, MR: Moderately Resistant.

شدند. در این میان، هیبرید ۱۴ تنها هیبریدی بود که در هر دو آزمایش مستقل در جمع برترین‌ها قرار گرفت. این هیبرید علاوه بر عملکرد پایدار شکر سفید، مقاومت کاملی به بیماری ریزومانیا نشان داد و پتانسیل بالایی برای سازگاری گسترده از خود به نمایش گذاشت. در آزمایش اول هیبریدهای ۱۲ و ۹ و در آزمایش دوم هیبریدهای ۵، ۳ و ۱ به دلیل سطح مقاومت مناسب (نیمه‌مقاوم) به پوسیدگی ریشه، به عنوان کاندیدهای ارزشمند شناسایی گردیدند. با وجود نتایج امیدبخش باید توجه داشت که این داده‌ها حاصل یک سال زراعی است، بنابراین هیبریدهای برتر شناسایی شده باید به عنوان کاندیدهای امیدبخش برای ارزیابی‌های تکمیلی چندسال و چندمکان در نظر گرفته شوند. در

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف شناسایی هیبریدهای جدید چغندر قند بر پایه سینگل کراس‌های خارجی با تأکید بر عملکرد پایدار و مقاومت به بیماری‌های ریزومانیا و پوسیدگی ریشه طراحی شد. نتایج برهم‌کنش قابل توجه ژنوتیپ-محیط نشان داد که استفاده از تجزیه‌های پایداری پیشرفته برای گزینش دقیق هیبریدها ضرورت دارد. مهم‌ترین نتیجه این مطالعه، شناسایی چند هیبرید جدید بود که از نظر عملکرد و پایداری، با بهترین ارقام شاهد تجاری رقابت کردند. بر اساس شاخص WAASBY، هیبریدهای ۱۵، ۷، ۱۴ و ۱۳ در آزمایش اول و هیبریدهای ۱۴، ۶، ۱۲ و ۱۱ در آزمایش دوم به عنوان هیبرید مناسب شناسایی

سیاسگزاری

نگارندگان این مقاله، بدین‌وسیله مراتب سپاس و قدردانی خود را از مدیریت محترم و کلیه کارکنان مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقد و ایستگاه‌های تحقیقاتی تابعه، به پاس همکاری‌های صمیمانه و حمایت‌های ارزشمندشان در اجرای این پژوهش، ابراز می‌دارند.

صورت تأیید نتایج در سال‌های آتی این هیبریدها پتانسیل معرفی به‌عنوان ارقام تجاری جدید را داشته و می‌توانند گامی مؤثر در جهت افزایش تولید پایدار چغندرقد در کشور باشند.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

References

منابع مورد استفاده

- Abdelghany AM, Zhang S, Azam M, Shaibu AS, Feng Y, Qi J, Li J, Li Y, Tian Y, Hong H. Exploring the phenotypic stability of soybean seed compositions using multi-trait stability index approach. *Agronomy*. 2021; 11(11): 2200. Doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy11112200>
- Benjes K, Varrelmann M, Liebe S. Control of rhizomania in sugar beet—A success story made possible by resistance breeding. *Plant Pathology*. 2024; 73(9): 2248–2259. Doi: <https://doi.org/10.1111/ppa.14007>
- Buhre C, Kluth C, Bürcky K, Märlander B, Varrelmann M. Integrated control of root and crown rot in sugar beet: combined effects of cultivar, crop rotation, and soil tillage. *Plant Disease*. 2009; 93(2): 155–161. Doi: <https://doi.org/10.1094/PDIS-93-2-0155>
- Büttner G, Pfähler B, Märlander B. Greenhouse and field techniques for testing sugar beet for resistance to *Rhizoctonia* root and crown rot. *Plant Breeding*. 2004; 123(2): 158–166. Doi: <https://doi.org/10.1046/j.1439-0523.2003.00967.x>
- Cooke DA, Scott RK. *The Sugar Beet Crop: Science Into Practice*. Chapman and Hall, London, UK. 1993; pp. 675.
- Dempster AP, Laird NM, Rubin DB. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*. 1977; 39(1): 1–22.
- Fathi M, Ranjbar G, Zangi M, Tabar S, Zarini HN. Analysis of stability and adaptation of cotton genotypes using GGE Biplot method. *Trakia Journal of Sciences*. 2018; 16(1): 51–57. Doi: <https://doi.org/10.15547/tjs.2018.01.009>
- Galein Y, Legrève A, Bragard C. Long term management of rhizomania disease—Insight into the changes of the beet necrotic yellow vein virus RNA-3 observed under resistant and non-resistant sugar beet fields. *Frontiers in Plant Science*. 2018; 9: 326505. Doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00795>
- Gauch HG. *Statistical analysis of regional yield trials: AMMI analysis of factorial designs*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands. 1992; pp. 278.
- Hassani M, Mahmoudi SB, Saremirad A, Taleghani D. Genotype by environment and genotype by yield× trait interactions in sugar beet: analyzing yield stability and determining key traits association. *Scientific Reports*. 2024a; 13: 23111. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-51061-9>
- Hassani M, Mansouri H, Hamze H, Saremirad A. Integrating genetical and chemical control: An approach to *rhizoctonia* root rot disease management. *BioControl in Plant Protection*. 2023; 10(2): 31–45. Doi: <https://doi.org/10.22092/bcpp.2023.362969.341>
- Hassani M, Saremirad A, Mansouri H. Selection of superior sugar beet genotypes using the analysis of quantitative and qualitative traits. *Journal of Crop Breeding*. 2024b; 16(49): 64–76. Doi: <https://doi.org/10.61186/jcb.16.4.64>
- Hecker R, Ruppel E. Inheritance of resistance to *rhizoctonia* root rot in sugar beet. *Crop Science*. 1975; 15(4): 487–490.

- Hilmarsson HS, Rio S, Sánchez JI. Genotype by environment interaction analysis of agronomic spring barley traits in Iceland using AMMI, factorial regression model and linear mixed model. *Agronomy*. 2021; 11(3): 499. Doi:<https://doi.org/10.3390/agronomy11030499>
- Holland JB. Estimating genotypic correlations and their standard errors using multivariate restricted maximum likelihood estimation with SAS Proc MIXED. *Crop Science*. 2006; 46(2): 642–654. Doi:<https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0191>
- Kunz M, Martin D, Puke H. Precision of beet analyses in Germany explained for polarization. *Zucker Industrie*. 2002; 127: 13–21.
- Lewellen R, Skoyen I, Erichsen A. Breeding sugar beet for resistance to rhizomania: Evaluation of host-plant reactions and selection for and inheritance of resistance. In: *Proceedings of the 50th Winter Congress of the International Institute for Sugar Beet Research*; 1987 Feb; Brussels, Belgium. IIRB; 1987; P. 139–156.
- Luterbacher M, Asher M, Beyer W, Mandolino G, Scholten O, Frese L, Biancardi E, Stevanato P, Mechelke W, Slyvchenko O. Sources of resistance to diseases of sugar beet in related Beta germplasm: II. Soil-borne diseases. *Euphytica*. 2005; 141: 49–63. Doi:<https://doi.org/10.1007/s10681-005-5231-y>
- McGrann GR, Grimmer MK, Mutasa-Göttgens ES, Stevens M. Progress towards the understanding and control of sugar beet rhizomania disease. *Molecular Plant Pathology*. 2009; 10(1): 129–141. Doi:<https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2008.00514.x>
- Mirzaei MR, Taleghani D, Sadeghzadeh Hemayati S, Ahmadi M, Soltani J, Babaei B, Azizi H, Bazrafshan M, Saremirad A. Studying the Effect of genotype-environment interaction on the quantitative and qualitative production potential of different sugar beet cultivars (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Crop Breeding*. 2023; 15(45): 38–49. Doi:<https://doi.org/10.61186/jcb.17.1.1>
- Mostafavi K, Saremirad A. Genotype - Environment Interaction Study in Corn Genotypes Using additive main effects and multiplicative interaction method and GGE- biplot Method. *Journal of Crop Production*. 2021; 14(1): 1–12. Doi:<https://doi.org/10.22069/ejcp.2022.17527.2293>
- Olivoto T, Lúcio ADC, da Silva JAG, Sari BG, Diel MI. Mean performance and stability in multi-environment trials II: Selection based on multiple traits. *Agronomy Journal*. 2019; 111(6): 2961–2969. Doi:<https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0221>
- Omran S, Omran A, Afshari M, Saremirad A, Bardehji S, Foroozesh P. Application of additive main effects and multiplicative interaction and biplot graphical analysis multivariate methods to study of genotype-environment interaction on safflower genotypes grain yield. *Journal of Crop Breeding*. 2019; 11(30): 153–163. Doi:<https://doi.org/10.29252/jcb.11.31.153>
- Piepho HP. Best linear unbiased prediction (BLUP) for regional yield trials: a comparison to additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) analysis. *Theoretical and Applied Genetics*. 1994; 89: 647–654.
- Piepho HP, Möhring J, Melchinger A, Büchse A. BLUP for phenotypic selection in plant breeding and variety testing. *Euphytica*. 2008; 161: 209–228. Doi:<https://doi.org/10.1007/s10681-007-9449-8>
- Rajabi A, Ahmadi M, Bazrafshan M, Hassani M, Saremirad A. Evaluation of resistance and determination of stability of different sugar beet (*Beta vulgaris* L.) genotypes in rhizomania-infected conditions. *Food Science and Nutrition*. 2023; 11(3): 1403–1414. Doi:<https://doi.org/10.1002/fsn3.3180>
- Resende MDV. Software Selegen-REML/BLUP: a useful tool for plant breeding. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*. 2016; 16(4): 330–339. Doi:<https://doi.org/10.1590/1984-70332016v16n4a49>
- Rezaei J. Evaluation of resistance of sugar beet commercial cultivars to rhizomania in field conditions. Mashhad (Iran): Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research Center; 2007. Report.

- Sadeghzadeh Hemayati S, Hamdi F, Saremirad A, Hamze H. Genotype by environment interaction and stability analysis for harvest date in sugar beet cultivars. *Scientific Reports*. 2024; 14: 16015. Doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-024-67272-7>
- Sadeghzadeh Hemayati S, Saremirad A, Hosseinpour M, Jalilian A, Ahmadi M, Azizi H, Hamidi H, Hamdi F, Matloubi Aghdam F. Evaluation of white sugar yield stability of some commercially released sugar beet cultivars in Iran from 2011-2020. *Seed and Plant Journal*. 2022; 38(4): 339–364. Doi:<https://doi.org/10.22069/ejcp.2025.22907.2648>
- Saremirad A, Taleghani D. Utilization of univariate parametric and non-parametric methods in the stability analysis of sugar yield in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) hybrids. *Journal of Crop Breeding*. 2022; 14(41): 49–63. Doi:<https://doi.org/10.52547/jcb.14.43.49>
- Sellami MH, Pulvento C, Lavini A. Selection of suitable genotypes of lentil (*Lens culinaris* Medik.) under rainfed conditions in south Italy using multi-trait stability index (MTSI). *Agronomy*. 2021; 11(9): 1807. Doi:<https://doi.org/10.3390/agronomy11091807>
- Sharifi P, Erfani A, Abbasian A, Mohaddesi A. Stability of some of rice genotypes based on WAASB and MTSI indices. *Iranian Journal of Genetics and Plant Breeding (IJGPB)*. 2020; 9(1): 45-56.
- Sun B, Li S, Pi Z, Wu Z, Wang R. Assessment of genetic diversity and population structure of exotic sugar beet (*Beta vulgaris* L.) varieties using three molecular markers. *Plants*. 2024; 13(7): 965. Doi:<https://doi.org/10.3390/plants13212954>
- Taleghani D, Ahmadi M, Hosseinpour M, Hamidi H, Nemati R, Saremirad A. Study of white sugar yield stability of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) cultivars in winter sowing. *Journal of Sugar Beet*. 2023a; 38(2): 185-199. Doi:<https://doi.org/10.22069/ejcp.2023.20425.2521>
- Taleghani D, Hosseinpour M, Nemati R, Saremirad A. Study of the possibility of winter sowing of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) early cultivars in Moghan region, Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences*. 2023b; 24(4): 319–334. Doi:<https://doi.org/20.1001.1.15625540.1401.24.4.1.8>
- Taleghani D, Rajabi A, Saremirad A, Fasahat P. Stability analysis and selection of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) genotypes using AMMI, BLUP, GGE biplot and MTSI. *Scientific Reports*. 2023c; 13: 10019. Doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-023-37217-7>
- Taleghani D, Rajabi A, Saremirad A, Khodadadi S. Genotype- environment interaction analysis and selection of sugar beet stable genotypes in terms of white sugar yield using AMMI model. *Plant Productions*. 2023d; 46(2): 155–169. Doi:<https://doi.org/10.22055/ppd.2023.43177.2089>
- Taleghani D, Saremirad A, Hosseinpour M, Ahmadi M, Hamidi H, Nemati R. Genotype × Environment Interaction Effect on White Sugar Yield of Winter-Sown Short-Season Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) Cultivars. *Seed and Plant Journal*. 2022; 38(1): 53–69. Doi:<https://doi.org/10.22092/spj.2022.360021.1275>
- Verma A, Singh G. Stability index based on weighted average of absolute scores of AMMI and yield of wheat genotypes evaluated under restricted irrigated conditions for peninsular zone. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*. 2020; 13(4): 371–381. Doi:<https://doi.org/10.30954/0974-1712.04.2020.1>
- Wigg KS, Brainard SH, Metz N, Dorn KM, Goldman IL. Novel QTL associated with Rhizoctonia solani Kühn resistance identified in two table beet × sugar beet F2:3 populations using a new table beet reference genome. *Crop Science*. 2023; 63(2): 535–555. Doi: <https://doi.org/10.1002/csc2.20865>
- Yue H, Gauch HG, Wei J, Xie J, Chen S, Peng H, Bu J, Jiang X. Genotype by environment interaction analysis for grain yield and yield components of summer maize hybrids across the huanghuaihai region in China. *Agriculture*. 2022; 12(5): 602. Doi:<https://doi.org/10.3390/agriculture12050602>