

Индекси за оценка на стабилността на пшеницата при взаимодействие генотип x среда

Николай Ценов^{1*}, Тодор Губатов¹, Иван Янчев²

¹Селекция и технология на пшеницата, Селекционна Компания Агроном, Добрич 9300, България

²Катедра „Растениевъдство”, факултет по „Агрономство”, Аграрен Университет, Пловдив 4000, България

*E-mail: nick.tsenov@gmail.com

Резюме

Постановка и цел: Обект на изследването са група от 24 сорта зимна обикновена пшеница, които са включени в многофакторен полски опит (MET), състоящ се от пет пункта на отглеждане през четиригодишен тестов период. Анализирани са начинът на подреждане (ранг) на сортовете по тяхната стабилност в условията на силно взаимодействие генотип x среда (GEI), според различни статистически параметри за това. Целта е да се направи сравнение на ефективността на различни типове статистически параметри и индекси за определяне на стабилността на генотипа в комбинация с неговия добив.

Методи: Сравнението между параметрите за стабилност е осъществено чрез използване на рутинно препоръчвани за подобни случаи статистически анализи, като: корелационен, принципен компонентен и клъстерен анализи. Чрез тях изследваните параметри са групирани на три основни групи, според тяхната взаимовръзка с добива. По този начин се показва каква степен от комбинацията между величината и стабилността на добива, всеки един от параметрите би могъл да оцени коректно, ако се приложи самостоятелно или в съчетание с други подобни.

Ключови резултати: Анализираният тук полският опит се характеризира със силно изразено „кръс-тосано” взаимодействие генотип x среда (GEI). То предизвиква огромна по мащаб промяна на добива, равняваща се на около 80% от цялото вариране. Генотипът, като фактор в изследването, предизвиква едва около 5% от варирането, но във взаимодействие с условията този дял достига почти до 1/5 от цялото вариране. Пунктовете на изследване са подбрани случайно, но се оказват добра предпоставка за оценка на добива, защото въздействието, което оказват върху него, е различно по величина и посока. Тази промяната във всеки един от тях може да бъде предвидена с вероятност над 0,75%, с изключение на пункт Пловдив ($H^2=0,42$). Между популярните и слабо познатите параметри не съществува принципна разлика в начина на подреждане на сортовете според поставената цел.

Изводи: Съществените различия между ефектите на пунктовете са предпоставка за излъчване на сортове със специфична стабилност, която е важна за правилното им райониране. Индексите P_i , Y_{Si} , KR , $S^{(3)}$, $S^{(6)}$, GAI , I , RI и $WAASBY$ самостоятелно или в комбинация помежду са достатъчно информативни за определяне на сортове с най-оптимална комбинация между добив и стабилност. Голяма част от слабо познатите индекси Di , Ii , SF , $R2$, PA , са напълно приложими с уговорката да се използват няколко от тях, а не самостоятелно. Липсата на корелация с добива е причина всеки от тях да подрежда сортове по уникален за него начин. Комбинираното им използване с други би увеличило коректността на информацията за комбинацията добив +стабилност, която всеки сорт притежава. Обективна оценка на сорта, от която и да е група, е препоръчително да се прави чрез статистически програми, които имат възможности за оценка особеностите на GEI.

Ключови думи: пшеница; генотип x среда; стабилност; параметрични и непараметрични методи на стабилност

Съкращения: АММИ - Допълнителни основни ефекти и многопластово взаимодействие, GEI- взаимодействие на генотипа с условията, PCA - Анализ на основни (главни) компоненти, PC1.2... i - Основен компонент 1... 2... i

Indices for assessing the stability of wheat under the genotype x environment interaction

Nikolay Tsenov^{1*}, Todor Gubatov¹, Ivan Yanchev²

¹Department of Wheat Breeding and Technology, Agronom Breeding Company, 9300 Dobrich, Bulgaria

²Department of Plant Science, Faculty of Agronomy, Agricultural University, 4000 Plovdiv, Bulgaria

*E-mail: nick.tsenov@gmail.com

Citation

Tsenov, N., Gubatov, T. & Yanchev, I. (2022). Indices for assessing the adaptation of wheat in the genotype x environment interaction. *Rasteniєvadni nauki* 59(2) 16-34 (Bg).

Abstract

Objects and purpose: The object of the study is a group of 24 varieties of winter common wheat, which are included in a multifactorial field experiment (MET), consisting of five growing locations during a four-year test period. The way of ranking (rank) of the varieties according to their stability under the conditions of strong genotype x environment interaction (GEI) is analysed, according to different statistical parameters. The aim is to compare the effectiveness of different types of statistical parameters and indices to determine the stability of the genotype in combination with its yield.

Methods: The comparison between the stability parameters was made using routinely recommended statistical analyzes for such cases, such as: correlation, principal component and cluster analyzes. Through them, the studied parameters are grouped, according to their relationship with yield, into three main groups. In this way, information is collected showing the extent to which the combination of magnitude and stability of yield, each of the parameters could be assessed correctly if applied alone or in combination with others like it. **Key results:** The field trail analysed here is characterized by a strong “cross-over” interaction of genotype by environments (GEI). It causes a huge change in yield, amounting to about 80% of the total variation. Genotype, as a factor in the study, causes only about 5% of the variation, but in interaction with the environment this share reaches almost 1/5 of the total variation. The study locations were selected randomly but proved to be a good prerequisite for estimating yield, because the impact they have on it is different in size and direction. This change in each of them can be predicted with a probability of more than 0.75%, with the exception of Plovdiv location ($H^2=0.42$). There is no fundamental difference between the popular and the little-known parameters in the way the varieties are arranged according to the set goal.

Conclusions: Significant differences between the effects of the locations are a prerequisite for the establishment of varieties with specific stability, which is important for their proper zoning. The indices P_i , YS_i , KR , $S(3)$, $S(6)$, GAI , I , R and $WAASBY$ alone or in combination with each other are sufficiently informative to determine the varieties with the most optimal combination between yield and stability. Many of the little-known indices Di , Ii , SF , $R2$, PA are fully applicable with the proviso that several of them be used, rather than alone. The lack of correlation with the yield is a reason for each of them to arrange varieties in a unique way. Their combined use with others would increase the accuracy of the information about the combination of yield + stability that each variety has. Objective evaluation of the variety from any group is recommended to be done through statistical programs that could assess the characteristics of GEI.

Key words: wheat; genotype x environment; stability; parametric and nonparametric stability statistics

Abbreviations: AMMI - Additive Main Effects and Multiplicative Interaction, GEI - Genotype by Environment Interaction, PCA - Principal Component Analysis, PC1.2... i - Principal Component 1... 2... i

ВЪВЕДЕНИЕ

Като съставна част от цялото вариране на генотипа при промяна на условията взаимодейст-

вието генотип x среда (GEI) намалява степента на повторяемост на резултатите (наследяемостта). С други думи колкото е по-силно GEI, толкова селекцията има по-слаб успех. Желанието

за задълбочен анализ на GEI предизвиква необходимост от разработка на подходи, методи и индекси наречени „анализ на стабилността“, чиито концепции предхождат дори анализа на вариантите (ANOVA) от даден полски опит (Moore, 1921). GEI възниква тогава, когато нормата на реакция на различните сортове не е успоредна на тази на групата, което предизвиква тяхното разминаване или пресичане при еднаква промяна на условията, било от пункта, било от сезона (van Eeuwijk et al., 2016). Термините „стабилност“ или „фенотипна стабилност“ обикновено се използват за обозначаване на промяната във фенотипната изява на признака, докато самият „генотип“ като такъв, остава относително стабилен (Becker & Leon, 1988). Изследването на тази фенотипна по природа стабилност е важно за всяка селекционна програма, където ефектите на GEI трябва да бъдат проучени и използвани (Kang, 2020).

Създадените параметри за оценка на стабилността се основават на нейни два аспекта, които са познати като „статична“ и „динамична“ концепции за стабилност. Според „статичната“ концепция за стабилен се счита сортът (фенотип), чийто добив не се влияе съществено от условията на околната среда (Becker, 1981). Промяна на добива при промяна на условията, близка до нула се нарича още „биологична“ стабилност на сорта. „Динамичната“ концепция определя за стабилни тези от сортовете, които има минимално отклонение от предвидимата реакция, след промяна на условията на среда. Последната се анализира посредством регресионен анализ, чиято линия отразява точно нейното средно ниво в резултат на промяна в условията (Eberhart & Russell, 1966; Annicchiarico, 2002). От тук произтича и възможността за оценка на сортове от дадена група, понеже реакция им към всяка промяна на условията е различна и уникална за всеки един от тях (van Eeuwijk et al., 2016). Тази концепция е напълно аналогична на агрономическата концепция за стабилност (Becker & Leon, 1988). Параметрите, свързани с нея са предпочитани за прилагане от селекционерите, за да определят високодобивните сортове в конкретните си полски експерименти (MET). Трябва веднага да се отбележи, че няма единно мнение относно принадлежността на даден параметър към някоя от двете концепции. В много изследвания някои от тях се причисляват към „динамичната“ концепция пора-

ди естеството на корелация с добива (Flores et al., 1998; Cheshkova et al., 2020). В други проучвания същите тези параметри са ефективни спрямо „статичната“ концепция за оценка. Определянето дали даден параметър е приложим, във връзка с която и да е от двете концепции, зависи от естеството на данните, от пунктовете за изпитване, от естеството на взаимодействието генотип * среда и няма логика да се приема за даденост (Pour-Aboughadareh et al., 2022). За пример може да послужи публикуваната информация относно често срещаният и актуален параметър за оценка през последните години (ASV)-AMMI Stability Value (Purchase et al., 2000). Приложимостта му за оценка се основава на корелацията му с добива, която е в много широки граници: от силно положителна до силно отрицателна (Gomez-Becerra et al., 2006; Khalili & Pour-Aboughadareh, 2016; Cheshkova et al., 2020). Към коя от двете съществуващи концепции се отнася този параметър е обект на проверка преди поредния анализ на стабилността.

Напоследък с голяма доза увереност се налага становището да бъдат използвани параметри, чиято приложимост би могла да бъде причислена едновременно към „статичната“, и/или към „динамичната“ концепция за оценка (Pacheco et al., 2015; Vaezi et al., 2019; Cheshkova et al., 2020). Публикуваната по темата информацията, дори в изследвания от авторитетни списания, за ефективността на който и да е параметър не бива да се приема за напълно меродавна. Точно обратното, приложимостта на всеки параметър или индекс трябва да бъде анализирана, преди да се пристъпи към оценка на стабилността на сортовете от всеки конкретен полски опит (Fasahat et al., 2015; Cheshkova et al., 2020).

Критерий за пряко сравнение между методите е тяхната взаимовръзка с добива, или корелациите между тях. Счита се, че колкото по-силна е корелацията с добива, толкова степента на стабилност е по-ниска и обратно при липса на корелация, двете биха могли да бъдат оценявани независимо една от друга (Flores et al. 1998; Cheshkova et al., 2020; Tsenov et al., 2022). При наличие на отрицателна корелация с добива, тези методи биха могли да бъдат използвани за излъчване на сортове, притежаващи висока степен на стабилност (обща стабилност), но с относително по-ниска продуктивност.

Голям брой изследвания описват различен набор от методи, чрез които се прави обективна оценка на стабилността (Kang, 2020; Reckling et al., 2021; Pour-Aboughadareh et al., 2022). Всеки един от тези методи се изчислява по определен статистически модел. Това е причина информацията, която се получава относно поведението (промяната) на генотипа да е различна, спрямо всеки друг, чиято оценка се основава на друг модел или подход. Ето защо редица автори призовават за прилагане на група параметри, в комплект едновременно с цел увеличаване на обективността на оценката на стабилността (Flores et al., 1998, Verma et al., 2017; Balcha, 2020, Mohammadi et al., 2021).

Използването на комплект (набор) от методи за оценка на стабилността се налага защото всеки параметър отразява различна степен на комбинация между добив и стабилност. Корелациите между добива и параметрите е начинът за групирането им по отношение на това каква част от тази сложна комбинация могат да оценят самостоятелно или в комбинация (Flores et al., 1998; Mohammadi et al., 2016). Прилагането на който и да е от цялото разнообразие от методи и индекси трябва да се прави след като предварително се уточни величината на компромис между добив и стабилност, която трябва да притежава „идеалния“ сорт (Fasahat et al., 2015; Cheshkova et al., 2020). Вече има разработки, в които съотношението между коефициентите на тежест на добива и стабилността в комплексната оценка могат да бъдат променени в хода на анализа (Olivoto et al., 2019).

Основният фокус при сравнение на статистически параметри в преобладаващата част от изследванията е върху тяхната способност да разделят сортовете от дадена група, според тяхната степен на стабилност. Относително спорадични са изследванията (Fasahat et al., 2015; Cheshkova et al., 2020; Tsenov et al., 2022), в които се прави критична оценка на разлики между параметри, която да насочва вниманието към определен набор, според поставената специфичната цел при анализа.

Изследванията у нас по темата са едва няколко на брой (Tsenov & Atanasova, 2015; Tsenov, & Gubatov, 2018; Dyulgerova & Dyulgerov, 2019; Gubatov & Delibaltova, 2020; Uhr et al., 2021). Тези, които са свързани с анализ на параметри

на стабилността, имат за цел единствено излъчване на сортове с различна стабилност, но не и за сравнение на приложимостта на различни методи (Dyulgerova & Dyulgerov, 2019; Desheva & Deshev, 2021; Uhr et al., 2021). Практика е в изследванията у нас да се използват силно ограничен брой параметри, предимно свързаните пряко с регресионния анализ или сходни на него подходи (Georgieva & Kirchev, 2020; Vulchinkov et al., 2020; Stoyanov & Baychev, 2021). В най-новите изследвания по темата са описани около четиридесет (40) различни параметри за оценка на стабилността, както и голяма част от съществуващите статистически програми за техния анализ (Pour-Aboughadareh et al., 2022). Съществуват още около 25 индекси, които са слабо познати и използвани, но са потенциален инструмент за едновременна оценка на величината и стабилността на добива (Mohammadi & Amri, 2008; Farshadfar et al., 2011; Zali et al., 2012; Cheshkova et al., 2020). При съвременното ниво на информация за статистическите методи и софтуер за тях, анализът на стабилността на сортове само с няколко параметъра, поставя под съмнение колко обективна е извлечаната от тях информация. Наличието на бърз и удобен за работа софтуер, чрез който се прави пълен анализ дори директно (on line), е сериозна гаранция за повишаване на прецизността с която се маркират ценните сортове.

Целта на изследването е да се сравни пригодността на различни статистически показатели и параметри за определяне на стабилността на генотипа. Задачите, които произтичат от поставената цел са в няколко аспекта: 1) Да се направи групиране на параметрите, според тяхната връзка с добива зърно и принадлежност спрямо двете концепции на стабилност, 2) да се изследва дали съществуват различия в оценката между не-параметрични параметри и не параметрични индекси, 3) да се направи обективна оценка на информацията за приложимостта на всеки параметър, изчислен с помощта на няколко статистически пакети.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИ

Постановка на опита

Във многофакторен полски опит са изследвани 24 сорта зимна обикновена пшеница, в пет

пункта на страната, през четири последователни години 2009-2012 (Таблица 1). Данните от него са използвани за изучаване на всички аспекти на взаимодействието генотип x среда, както и приложението на някои статистически подходи за оценка на промяната на добива и свързаните с него количествени признаци на изследваните сортове (Gubatov, 2020).

Всеки полски опит е заложен в трикратно повторение с големина на опитната парцела от 10 m². Агротехниката през вегетацията е абсолютно еднаква за всички сортове, във всеки един пункт през все един от сезоните на изследване.

Статистически анализи

В това изследване събраната база данни от този опит служи като основа за проучване на набор от статистически методи, които са се утвърдили, като параметри за оценка на стабилността на генотипа. Голяма част от тях са индекси, които представляват опит да се комбинира в една рангова оценка информацията за добив и стабилност едновременно, което е „мечта“ на селекцията.

Стабилността на сортовете от групата е анализирана чрез общо 48 различни параметъра или индекси, описани подробно в редица изследвания или обзори (Mohammadi & Amri, 2008; Farshadfar et al., 2011; Zali et al., 2012; Cheshkova et al., 2020; Kang, 2020), (Таблица 2). Тяхното из-

числяване е осъществено с помощта на няколко статистически компютърни програми, които са специализирани точно за такъв тип анализи: **GEA-R** (Pacheco et al., 2015) (група А), **PBSTAT 3.1** (Suwarno et al., 2008) (група В), **Stabilitysoft** (Pour-Aboughadareh et al., 2019), (група С) и **META-R** (Alvarado et al., 2020). Към тях са добавени още 6 индекса, за чиято приложимост съобщават Cheshkova et al. (2020) и част от които не са анализирани от използваните три софтуерни програми (група D). Наборът от параметри за анализ е обогатен с още деветнадесет (19) индекси, които са изучавани и препоръчвани чрез публикации, свързани с темата (групи Е, F) (Mohammadi & Amri, 2008; Farshadfar et al., 2011; Zali et al., 2012; Pour-Aboughadareh et al., 2022).

Приложимостта на всички параметрите от трите статистически пакета вече е проучена (Tsenov et al., 2022). От набора на всеки статистически пакет за анализ са подбрани само не-параметричните методи за оценка. По своята същност част от добавените индекси са не-параметрични параметри (групи D и E), друга са параметрични (група F). Принципната разлика между двете групи е тази, че в не-параметричните параметри (индекси) класирането на сорта е в резултат единствено на неговото подреждане (ранг) по добив спрямо останалите във всеки пункт. Определен по този начин рангът е зависим от варирането в подреждането в споменати-

Таблица 1. Обща информация за нивата на основните фактори - пункт (А), Година на тестване (В) и генотип (С) в многофакторен полски опит (MET)

Table 1. General information on the levels of the main factors - Location (A), Year of testing (B) and Genotype (C) in multi environmental field trails (MET)

Пункт (А)/ Location (A)	Координати/ Coordinates		Надморска височина/ Altitude	Година/ Years (B)	Генотип/ Genotypes (C)
	N	E			
Паскалево, Добрич/ Paskalevo, Dobrich	43°38'47"	27°48'40"	248	2009	Сортове Varieties 22
Тръстеник, Русе/ Trastenik, Rousse	43°37'40"	25°51'37"	170	2010	Стандарти Checks 2
Стралджа, Ямбол/ Straldja, Yambol	42°35'25"	26°39'06"	150	2011	Всичко Total 24
Царевец, В. Търново/ Tsarevets, V. Tarnovo	43°36'30"	25°30'02"	110	2012	
Пловдив, Аграрен университет/ Plovdiv, AU, Experimental field,	42°08'13"	24°48'22"	155		

Таблица 2. Информация за всички параметри и индекси за анализ на стабилността по групи спрямо софтуера и оригиналните публикации за тях

Table 2. Information on all parameters and indices for analysis of stability by groups in relation to the software and the original publications about them

Група/ Group	Обозначение/ Designation of parameters	Статистическо наименование/ Statistical name	Стабилност ако,/ Stability if:	Публикация първоизточник/ Original Reference
A	Pi *	“Superiority measure (index)”	②	<i>Pacheco et al., (2015)</i>
A	Si(1), Si(2)	“Huhn’s non-parametric statistics”	②	
B	KR	“Kang’s rank-sum index”	②	<i>Suwarno et al., (2008)</i>
B	NPi(1), NPi(2), NPi(3), NPi(4)	Thennarasu’s nonparametric stability parameters	②	
B	Si(1), Si(2), Si(3), Si(6)	“Huhn’s non-parametric statistics”	②	
B	TOP	Fox’s TOP	③	
C	AR	“Average Rang”	②	<i>Pour-Aboughadareh et al., (2019)</i>
C	NP(1); NP(2); NP(3); NP(4)	Thennarasu’s nonparametric stability parameters	②	
C	S⁽¹⁾; S⁽²⁾; S⁽³⁾; S⁽⁶⁾	Huehn’s nonparametric stability parameters	②	
C	Ys_i	Kang’s yield and stability index	③	
D	Ai	“Coefficient of multiplicatively”	①	<i>Cheshkova et al., (2020)</i>
D	EV	“Environmental variance of genotypes”	②	
D	CAC	“Specific adaptive ability”	③	
D	H1	“Weighted homeostacity index”	③	
D	HOM	“Coefficient of homeostaticity”	③	
D	UST	“Steadiness of stability index”	③	
E	Di	“Desirability index”	③	<i>Hernandez et al., (1993)</i>
E	Ii	“Yield reliability index”	③	<i>Kataoka, (1963)</i>
E	SI	“Sustainability index”	③	<i>Babarmanzoor et al., (2009)</i>
E	I	“Stability index”	③	<i>Bajpai & Prabhakaran, (2000)</i>
E	GAI	“Geometric Adaptability Index”	③	<i>Mohammadi & Amri, (2008)</i>
E	SF	“Stability Factor”	③	<i>Lewis, (1954)</i>
E	R1, R2	“Range Parameters”	③	<i>Langer, (1979)</i>
E	PA	“Percent of Adaptability”	③	<i>St-Pierre et al., (1967)</i>
E	GSI	“Genotype Selection Index”	②	<i>Zali et al., (2012)</i>
F	ASV	“AMMI Stability Value”	②	<i>Zali et al., (2012)</i>
F	MASV	“Modified AMMI Stability Value”	②	
F	EV_p, EV_F	“Averages of the squared eigenvector values”	②	
F	SIPC₁, SIPC_F	“Sums of the absolute value of the IPC scores”	②	
F	D1, D2	“Distance of IPCAs point with origin in space”	②	
F	WAASBY	“Weighted Average of Absolute Scores index”	②	

*A- от софтуерен пакет, from software package GEA-R, B- от софтуерен пакет, from software package PBSTAT, C- от софтуерен пакет, from software package Stabilitysoft, D- според публикацията на, according to (Cheshkova et al., 2020), E – няколко различни индекси, several different indexes; F- базирани на модела АММИ параметри за стабилност, AMMI based stability statistics, * - всички параметри са с оригиналните си обозначения в софтуера на английски език, the parameters have their original designations in the software in English, ①-стойности Близки до 1, values close to 1, ②-Ниска стойност, small value, ③-Висока стойност, high value*

те условия. При този подход е възможно няколко сорта да имат еднакъв ранг.

Параметричният тип параметри имат стойности, които се получават в резултат на статистически обосновани подходи в алгоритъма за тяхното изчисляване. Рангова оценка при тях сортът получава след като стойностите на даден параметър се сравнят с тези на всички останали, поради което броя на ранговете обикновено е равен на броя на изследваните сортове. Подреждането на ранговете при различните параметри може да бъде във възходящ или в низходящ порядък, според информацията която дават за сорта. Това е причината тази особеност да бъде отбелязана в предпоследната колона на Таблица 2.

Стойностите и ранговете оценки на последните две групи индекси са изчислени с помощта на макроси в **XIStat 2014**, точно според описанието на оригиналните им литературни първоизточници (група E), част от които са описани и анализирани в няколко публикации (Mohammadi & Amri, 2008; Farshadfar et al., 2011; Zali et al., 2012; Pour-Aboughadareh et al., 2022) (Таблица 2).

Сформираната група от параметри е анализирана като общ набор. Критерий за сравнение между параметрите и тяхната ефективност спрямо поставената цел, е величината на корелацията и нейната посока, която те показват с добива зърно (рангова корелация по Spearman). Взаимовръзките между ранговете на параметрите на стабилност е установена по няколко статистически анализа: 1) чрез изчисляване на корелациите между добива зърно и техните рангове (с

помощта на статистическа програми SPSS, 19), 2) чрез принципен компонентен анализ (Albert, 2004) на основа на рангова корелация между добива и техните рангове и 3) чрез клъстерен анализ по статистическия модел за групиране на Ward (1963), на основата на несходство на ранговете. Изводите за приложимостта всеки отделен параметър са направени след пряко съпоставяне на информацията от трите вида статистически подхода.

РЕЗУЛТАТИ

Факторите (пункт, година и сорт), които са проучвани в този опит, предизвикват всеки самостоятелно достатъчно силно вариране, за да бъде доказано с най-висока степен на статистическа достоверност (Таблица 3). Комбинираният ефект между „пункт x година” и „пункт x генотип” също предизвикват доказано влияние върху общото вариране в опита. Взаимодействието между пункта и генотипа (A x C) е значително по-слабо в сравнение с това на пункта с годината (A x B). Относително най-слаб е ефектът, който предизвиква комбинирането и на трите фактора (A x B x C), но е също доказан ($p=0,0489$), което е доказателство за наличието на силно взаимодействие генотип x среда при добива зърно.

Характерът на взаимодействието генотип x среда (GEI) е анализиран чрез модела AMMI в комбинация с регресионен анализ на пунктовете (SREG), които са достъпни в статистическата програма GEA-R (таблица 4). В този екс-

Таблица 3. Анализ на дисперсията за добива зърно, причинена от основните фактори на опита
Table 3. Analysis of the variance for grain yield caused by the main factors of experiment

Източник на вариране/ Source of variation	Df	Среден квадрат/ Mean Square	Фактор F/ F-Ratio	Достоверност/ p-value
A: Пункт/ Location	4	276.904	1127.19	0.0000
B: Година/ Year	3	97.5548	397.11	0.0000
C: Генотип/ Genotype	23	0.979727	3.99	0.0000
A x B	12	45.4865	185.16	0.0000
A x C	92	0.289798	2.18	0.0156
B x C	69	0.61926	2.52	0.0000
A x B x C	276	0.24566	2,03	0,0489

перимент има установени достоверни пет (5) принципни компонента на вариране на добива (PC1 - PC5), с максимално ниво на статистическа достоверност ($p < 0.001$). Най-голям дял във варирането имат условията на средата (81,37 %), следвани от комбинираният ефект на GEI (13,32 %) и в най-слабо степен добивът се променя от сорта (5,31 %). Ефектът върху варирането на GEI, изразен чрез стойностите на PC показват най-висок дял на PC1, който намалява прогресивно с увеличаване на поредността на PC до

PC5. Това е напълно нормално за този тип на статистически анализ (АММИ). Първият PC1 компонент показва тази част от варирането, която може да се нарече “линейна”. Това означава, че промяната на условията на средата предизвиква адекватна промяна в сортовете по отделно и като група. Този тип на реакция (вариране) на сорта се нарича “количествено” GEI. Всички следващи по ред PC показват “нелинейно” вариране. Това представлява онази част от сортовете в групата, при които варирането не е адекватно

Таблица 4. Комбиниран анализ на вариансите чрез регресия на местонахождението (SREG=GGE) с програма GEA-R

Table 4. Combined analysis of variances by Site regression (SREG=GGE) with the GEA-R software

Source	DF	Percent*	Percenac**	Prob F***
A: Условия/ Environment	4	81,37	81,37	0.0000
B: Генотип/ Genotype	23	5,31	86,68	0.0000
A x B	92	13,32	100,00	0.0000
PC1	26	48,27	48,27	0.0000
PC2	24	21,29	69,56	0.0000
PC3	22	14,10	83,66	0.0000
PC4	20	9,51	93,17	0,0000
PC5	18	6,83	100,00	0,0000
Остатъчно/ Residuals	360			

* **Percent**- дял от цялото вариране, percent of the total variability explain, ****Percenac**- дял от цялото вариране с натрупване, percent of the total variability explain accumulative, *** **Prob F**- стойност на достоверността на анализа, value of significance of the test ($p < 0.001$)

Таблица 5. Основни статистически параметри по пунктове чрез метода на най-добрата линейна безпристрастна прогноза (BLUP) с помощта на програма META-R

Table 5. Basic statistical parameters by location using the method of the best linear unbiased prediction (BLUP) using the META-R software

Пункт/ Location	GY	Vg	Ve	CV %	H ² (%)
Добрич, (с.Паскалево)/ Dobrich, (Paskalevo)	9.44	0.252	0.149	4.08	0.87
Русе, (с.Тръстеник) / Rousse, (Trastenik)	6.78	0.083	0.101	4.68	0.77
Ямбол (гр. Стралджа)/ Yambol, (Straldja)	7.32	0.141	0.093	4.16	0.86
В. Търново, (с. Царевец)/ V.Tarnovo, (Tsarevets)	5.77	0.138	0.109	5.70	0.84
Пловдив, Аграрен университет/ Plovdiv, AU, Experimental field,	4.03	0.034	0.186	10.70	0.42
Комбинирано/ Combined	6.68	0.020	0.130	5.35	0.37

(GY) Добив зърно, Grain Yield, t/ha; (Vg) вариране на генотипа, genotypic variation; (Ve) вариране на условията, variation of conditions; (Vp) варирана на фенотипа, phenotypic variation; (CV %)-коефициент на вариране, coefficient of variation, %; (H²) коефициент на наследяване, coefficient of heritability, %

(нелинейно) на същата промяна на условията на средата. Когато този дял е висок на фона на цялото вариране се наблюдава т. н. “кръстосан “качествен” тип взаимодействие генотип среда (crossover, quantitative type of GEI) (Baker, 1988).

Установяването на типа на взаимодействие се прави дори с помощта на специални статистически тестове за това (Kroon & Laan, 1981). Прилагане на подобен тест тук не се налага. Причината се крие в стойностите на PC1 (48,27) (линейното) стойностите на на другите четири компонента (нелинейно), когато ги сравним. Излиза, че линейната част на варирането е 48,27%, (PC1), а нелинейната част съставлява 51,73% (21,29+14,10+9,51+6,83), за компонентите (PC2+PC3+PC5+PC 5), респективно. От това по-силно доказателство може да бъде умишлено направен подобен тест, който в случая е напълно излишен. По принцип теста на Kroon & Laan, (1981) е необходим, тогава когато се анализират данни от полски опити, в които липсва фактор пункт за сметка на продължителен период от години на изследване (Mohammadi et al., 2016). Според наложилото се мнение, GEI съществува, след като в различни условия (пункт) сортовете променят своя ранг (Singh et al., 1999; Kang, 2020). Точно тази промяна на подреждане на сортовете е дилемата, която параметрите за стабилност се очаква самостоятелно (за предпочитане) или в комбинация, да решат за да оценят който и да е сорт (Таблица 6).

Промяната на всеки сорт според условията на пункта в този опит са най-важни. Това в случая е много полезно за райониране на сорта, което е в крайна сметка целта на всяко подобно изследване. Възможно ли тя да се измери (предвиди) без оглед случващото се вариране, породено от годините на изпитване. Отговор на този съществен въпрос дават данните от Таблица 5. На фона на твърде различното ниво на добив в пунктовете се наблюдава сходно вариране в рамките на 4-6%, с изключение на пункт Пловдив ($CV=10,7\%$). Коефициентът на наследяване (H^2) е използван като критерий за измерване на степента на повторемост на данните. При всеки отделен пункт неговите стойности надвишават 0,75%. Това означава, че вероятността да се реализира добив с величина, близка до тази от предходната година, е много висока. Тези закономерности са изключително важни, защото

добивът на групата сортове в даден пункт може да бъде предвиден с риск от грешка под 20% ($H^2=0,77- 0,87$). Изключение от това твърдение е отново пункт Пловдив, при който тази вероятност е под 0,50% ($H^2=0,42$). От друга страна, промяната в добива между пунктовете като цяло е много непредсказуема ($H^2=0,37$). Този факт без да бъде допълнително обсъждан и подлаган на проверка, показва съществени различия между условията на пунктовете, което се отразява неминуемо и върху добива. Следователно, този случайно подбран набор от пунктове дава богата информация за поведението на сорта, на фона на уникално GEI, която бе в основата на цяла разработка (Gubatov, 2020). В следствие се превърна в предпоставка данните в това изследване да бъдат анализирани по този начин.

Разликите между данните за добива при различните пунктове е представена пространствено на Фигура 1. Въпреки, че векторите на три от пунктовете са разположени в близост един до друг (Фигура 1A), добивите от тях се променят по различен начин (Фигура 1B). Тази промяната на добива по посока и величина, изразено чрез принципните компоненти на вариране, има различна конфигурация за всеки пункт по отделно. Например при Добрич и Тръстеник, чиито вектори са най-близко, стойностите на PC3, PC4 и PC5 са много различни и показват значително по-силен дял на нелинейна промяна на добива в Тръстеник, в сравнение с Добрич. Между Ямбол и Тръстеник, разликите между принципните компоненти (PC) са още по-големи, въпреки че са разположени близко и би трябвало да има известно припокриване на данни за отделните сортове.

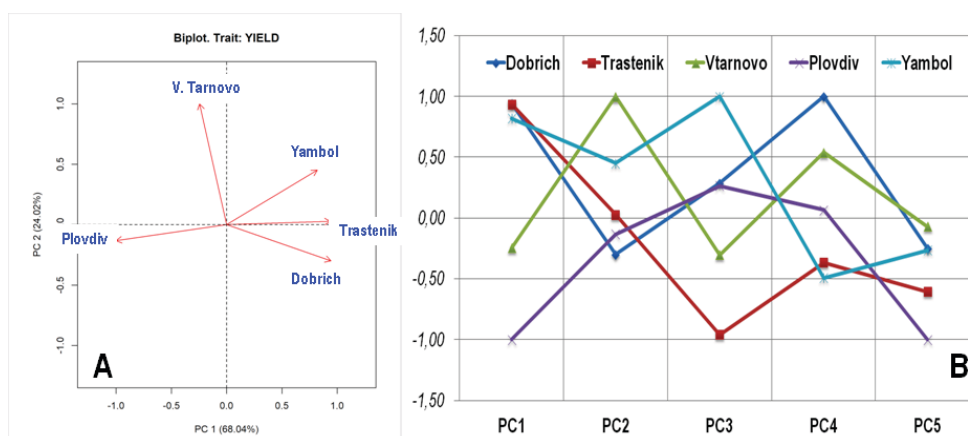
Наборът от изследвани сортове в този опит е сформирани между най-продуктивните. Поставен в отделни комбинации от условия, всеки един от тях се променя по различен начин при тяхната промяна от сезон в сезон (Таблица 6). Тази промяна при всеки сорт е уникална по посока и величина. Дори при елементарен преглед на данните се установяват големи промени в ранга на отделни сортове, в отделните пунктове. Например драстична е промяна на ранг от 1 до 16 (сорт № 1, в Тръстеник и Добрич), ранг от 4 до 23 (при сорт № 10 в пунктовете Ямбол и Пловдив) или ранг от 3-22 (сорт № 20, в Пловдив и Тръстеник). При това положение наистина

Таблица 6. Величина и Ранг* на добива зърно (t/ha) на всеки от изследваните сортове

Table 6. Value and rank* of Grain yield (t/ha) of each of the cultivars

Генотип/ Genotype	Добрич/ Dobrich	Гръстеник/ Trastenik	В. Търново/ V. Tarnovo	Ямбол/ Yanbol	Пловдив/ Plovdiv	Средно/ Mean
1	9,24 (16)*	8,06 (1)	7,16 (4)	6,09 (6)	3,95 (13)	6,91 (3)
2	9,11 (18)	6,56 (24)	6,42 (22)	7,92 (23)	3,86 (17)	6,17 (24)
3	9,13 (17)	7,34 (11)	6,81 (10)	5,61 (18)	3,86 (18)	6,55 (18)
4	9,25 (15)	7,25 (15)	6,77 (12)	6,18 (3)	4,08 (9)	6,71 (11)
5	9,53 (10)	7,25 (14)	6,43 (21)	4,74 (24)	4,33 (4)	6,46 (21)
6	9,92 (5)	7,38 (9)	6,81 (11)	5,92 (9)	4,21 (6)	6,85 (4)
7	9,51 (11)	6,96 (21)	6,56 (16)	5,87 (11)	4,62 (2)	6,71 (13)
8	8,62 (23)	7,13 (18)	6,55 (17)	5,61 (19)	3,74 (22)	6,33 (23)
9	10,24 (3)	7,29 (13)	7,01 (8)	5,42 (21)	4,08 (11)	6,81 (5)
10	10,13 (4)	7,21 (16)	6,63 (15)	6,15 (4)	3,65 (23)	6,75 (7)
11	9,87 (6)	7,18 (17)	6,24 (24)	5,92 (10)	3,89 (16)	6,62 (17)
12	8,78 (22)	6,64 (23)	6,52 (19)	5,65 (17)	4,63 (1)	6,44 (22)
13	8,51 (24)	7,06 (19)	7,13 (5)	5,67 (16)	4,33 (5)	6,54 (19)
14	9,39 (13)	7,47 (8)	6,76 (13)	5,74 (14)	4,16 (7)	6,69 (12)
15	9,61 (9)	7,36 (10)	6,98 (9)	5,68 (15)	3,91 (15)	6,71 (10)
16	9,41 (12)	7,03 (20)	7,27 (2)	6,12 (5)	3,83 (21)	6,73 (9)
17	8,96 (20)	7,34 (12)	7,11 (7)	6,08 (7)	3,92 (14)	6,68 (14)
18	9,36 (14)	7,6 (5)	7,36 (1)	5,85 (12)	3,84 (19)	6,81 (6)
19	9,73 (7)	7,57 (7)	6,54 (18)	6,03 (8)	3,52 (24)	6,68 (15)
20	9,11 (19)	6,71 (22)	7,12 (6)	5,75 (13)	4,48 (3)	6,63 (16)
21	8,87 (21)	7,74 (4)	6,64 (14)	5,29 (22)	4,06 (10)	6,52 (20)
22	9,65 (8)	8,05 (3)	6,46 (20)	5,59 (20)	3,98 (12)	6,75 (8)
23	10,44 (2)	7,58 (6)	6,33 (23)	6,37 (2)	3,84 (20)	6,91 (2)
24	10,45 (1)	8,06 (2)	7,23 (3)	6,41 (1)	4,11 (8)	7,25 (1)
Mean, t/ha	9,45	7,33	6,78	5,78	4,03	6,67
LSD 0.05	0,45	0,36	0,37	0,39	0,51	0,19
CV (%)	4,08	4,16	4,68	5,70	10,70	5,35

* - числото в скобите е рангът на добива на сорта, the number in brackets is the yield rank of a variety, (Mean)- средно за пункта, Mean for location; (LSD 0.05) – най-малка съществена разлика, Least Significant Difference; CV (%) - коефициент на вариране, coefficient of variation



Фигура 1. Пространствено представяне на добива на зърно според: А - кръстосаното взаимодействие на сорта x пункта и В - според стойности на установените принципно компоненти на вариране

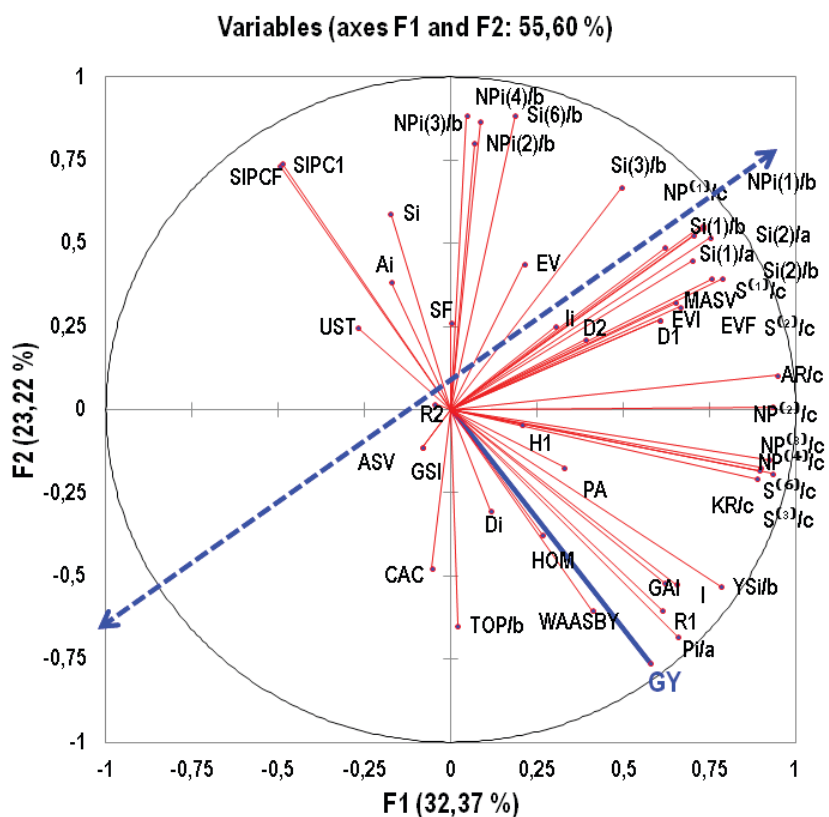
Figure 1. Spatial representation of Grain yield according to: A - the crossover interaction of genotypes by location and B - according to the values of the established principal components of variation

на е невъзможно без помощта на статистиката (статистически параметри, индекси), сортовете да бъдат подредени, според техния добив и стабилност. Когато се оценява комбинация между двете категории, нещата стават още по-сложни и заплетени. Колкото повече сортове си променят ранга в различни пунктове, толкова по-трудно е да се направи коректна оценка на всеки сорт спрямо другия или спрямо групата.

След анализ с PCA векторите на параметрите и добива образуват конфигурация в пространството, чрез която се разкриват техните взаимовръзки (Фигура 2). Всеки вектор на параметър, сключващ ъгъл под 60° с този на добива (в двете посоки), означава, че неговия параметър има положителна корелация с него. При ъгли на разположение със стойности между $61-120^\circ$, корелация между тях е с недоказани стойности, т. е. корелация липсва. Всяко увеличение на ъгъла между векторите от над 120° е указание за отрицателни стойности на корелацията, чиято най-

ниска стойност ($-0,99$) достига при 180° . Две са основните групи на разположение на векторите: 1) параметри, чиито корелации с добива са положителни или липсва корелация (под синята прекъсната линия) и 2) параметри, имащи отрицателна корелация с добива зърно. По-многобройна е първата група. Тя е три пъти по-многобройна (36) от втората група, която наброява едва 13 (27%). Втората група включва най-малък брой параметри, както следва: SIPC1, SIPCf, UST, Ai, Si, SF, NPi(2)/b, NPi(3)/b, NPi(4)/b, Si(3)/b Si(6)/b, EV, R2, като от тях извън статистическите пакети са 7 (тези без обозначение *). Тези параметри могат да бъдат прилагани в случаи, когато целта е определяне на сортове с висока стабилност (обща стабилност), която трудно се съчетава с висока продуктивност.

Според разположението си спрямо добива, параметрите в първа група може да бъдат разделени на две подгрупи. Към първата подгрупа принадлежат тези, чийто ъгъл е най-остър: Pi/a,



Фигура 2. Векторна графика на параметрите за стабилност чрез принципен компонентен анализ
Figure 2. Vector graph of stability parameters through principal component analysis

WAASBY, HOM, R1, GAI, I, Di, YSi/b, TOP/b, PA, HI, CAC, KR/c, S⁽³⁾/c, S⁽⁶⁾/c. Всички параметри от тази група са непараметрични методи (индекси), от които 9 не са включени в използвания софтуер (тези без обозначение */). Всеки един от тези параметри може да бъде използван самостоятелно за оценка на комбинация между високи стойности на добив и стабилност над средната за цялата група. Всички останали параметри (30 на брой) попадат във втора подгрупа на първа група. Между тях са 9 параметъра, които не присъстват в използвания софтуер: GSI, ASV, MASV, D1, D2, EV_I, EV_F, Ii. Останалите от групата са предимно непараметричните модели с обозначение S [(S(1), S(2), S(3)S(4), от трите софтуера и S⁽³⁾/c S⁽⁶⁾/c], и непараметричните модели, от групата на NP [NP(1)/b NP⁽¹⁾/c, NP⁽²⁾/c NP⁽³⁾/c NP⁽⁴⁾/c]. Липсата на доказана корелация между ранговете на тези параметри с този на добива ги прави приложими, когато целта е максимален компромис между добив и стабилност. Такова е становището в изследване на ечемик от Vaezi et al. (2022), които анализират параметри от група E (Таблица 2).

Зависимостите между параметрите и добива са представени на Таблица 7. Според стойностите на корелацията, която имат с добива зърно, те са групирани в три групи, условно обозначени като GY-STAB, GY+STAB, STAB-GY, по предложение на Flores et al., (1998). При наличие на доказана висока положителна корелация параметърът дава информация предимно за величината на добива и стабилност под средната (GY-STAB, означава добив „без“ стабилност). Параметрите при които корелацията има стойности (+) или (-), но не е достоверна, маркират сортове с най-добра компромисна комбинация между добив и стабилност (GY+STAB, означава добив „плюс“ стабилност). В третата група са параметри, чиито рангове проявяват доказана отрицателна корелация с добива (STAB-GY, стабилност „без“ добив) и маркират сортове с много висока стабилност, но добив под средния за групата. Трите групи от параметри в Таблица 7 отговарят напълно на двете концепции за стабилност. Оценката на първата група параметри се свързва напълно „динамичната“ концепция, третата група се свързва със „статичната“ концепция, а втората група дава оценка, която би могла да бъде свързана и с двете концепции,

едновременно. Следователно, според приетото разбиране по този проблем, втората група параметри би трябвало да бъдат най-предпочитани за оценка. Единствено при тях оценка на генотипа по добив е независима от оценката му за стабилност. По този начин от дадена група се извличат най-ценните сортове, чиято стабилност значително над средната за групата е комбинирана с висок добив.

По същество групирането на параметрите, което тук е фиксирано спрямо корелацията в стойности, е напълно аналогично на пространственото им представяне на Фигура 2, което по същество е принципно, а не конкретно. Достоверността на стойностите на корелациите тук е гаранция за точно и обективно групиране на параметрите, според техните конкретни възможности за оценка на комбинацията добив-стабилност.

Първата група параметри са най-желани от изследователите, защото определят тези сортове, които имат високи добиви в съчетание на стабилност, която е близо до средното ниво на изследваната група. Предимство на тази група параметри е, че всеки от тях може да оцени сорта самостоятелно. Това е особено валидно за параметрите: *Pi/a, HOM, R1, GAI, I, Di, YSi/b, TOP/b, PA, HI, CAC, KR/c*, които са типични примери за класически индекси. Непараметричните методи, изчислени предимно с пакета Stabilitysoft (*c): *KR/c, AR/c, S⁽³⁾/c, S⁽⁶⁾/c, NP⁽²⁾/c, NP⁽³⁾/c, NP⁽⁴⁾/c*, попадат в първа група, също. В предхождащо изследване бе установено, че параметрите от групата на NP [NPi(2)/b, NPi(3)/b, NPi(4)/b], и [NP⁽³⁾/c NP⁽⁴⁾/c [NP⁽²⁾/c NP⁽³⁾/c NP⁽⁴⁾/c], показват коренно противоположна корелация спрямо добива (Tsenov et al., 2022). Тази разлика вероятно се дължи на използвания софтуер и това трябва да се отчита в случай, че тези групи от параметри се използват за оценка.

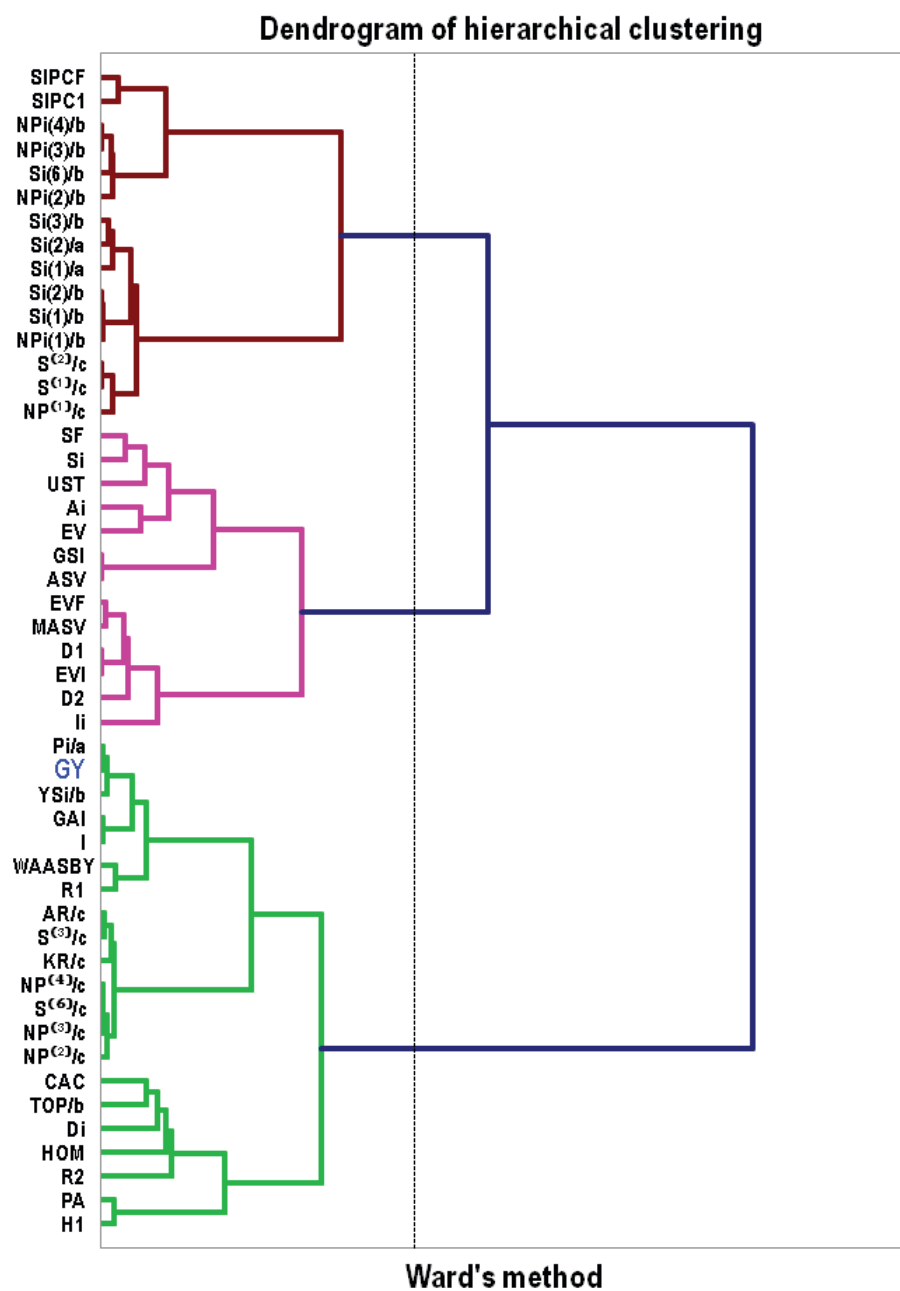
Взаимовръзките между ранговете на участващите в изследването параметри са установени чрез директно сравнение на тяхното несходство (Lin, 1982). Методът, който е приложен (Ward, 1963) отразява връзка между ранговете, която статистически се определя огледално на корелационния анализ, чрез несходство (Фигура 3). Това означава, че когато са в един клъстер между ранговите оценки съществува връзка, независимо от съществуващите различия между

Таблица 7. Рангови корелации по Sperman (ρ , rho) между добива и индексите за стабилност по групи, според концепцията на Flores et al. (1998)

Table 7. Sperman rank correlations (rho) between yield and stability indices by groups, according to the concept of Flores et al. (1998)

GY-STAB **	rho	Probability	GY+STAB **	rho	Probability	STAB-GY **	rho	Probability
Pi/a*	0,97	0,0000	Di ***	0,31	0,1347	SIPC ₁	-0,85	0,0000
YSi/b	0,92	0,0000	HOM	0,31	0,1358	SIPC _F	-0,87	0,0000
I	0,79	0,0000	PA	0,28	0,1797	NPi(2)/b	-0,57	0,0042
R1	0,77	0,0000	H1	0,19	0,3700	NPi(3)/b	-0,67	0,0004
GAI	0,76	0,0000	EV ₁	0,18	0,3994	NPi(4)/b	-0,64	0,0010
KR/c	0,71	0,0001	EV _F	0,15	0,4928	Si(6)/b	-0,58	0,0037
S ⁽³⁾ /c	0,53	0,0087	D1	0,18	0,3994	Si	-0,46	0,0264
S ⁽⁶⁾ /c	0,67	0,0004	D2	0,12	0,5709	UST	-0,37	0,0800
NP ⁽²⁾ /c	0,62	0,0016	MASV	0,13	0,5461			
NP ⁽³⁾ /c	0,66	0,0006	ASV	0,11	0,5934			
NP ⁽⁴⁾ /c	0,65	0,0008	GSI	0,11	0,5934			
WAASBY	0,57	0,0039	Si(1)/a	0,01	0,9481			
TOP/b	0,57	0,0046	Si(1)/b	0,06	0,7755			
AR/c	0,46	0,0259	S ⁽¹⁾ /c	0,09	0,6803			
CAC	0,33	0,1136	Si(2)/a	0,06	0,7726			
			Si(2)/b	0,03	0,8980			
			S ⁽²⁾ /c	0,12	0,5737			
			Si(3)/b	-0,25	0,2335			
			NPi(1)/b	0,03	0,9007			
			NP ⁽¹⁾ /c	-0,07	0,7621			
			Ii	0,01	0,9611			
			R2	-0,04	0,8500			
			SF	-0,11	0,6205			
			EV	-0,18	0,3982			
			Ai	-0,25	0,2458			

* - Буквата след наклонената черта в обозначението на всеки параметър показва софтуера, в който е включен, както следва, The letter after the slash in the designation of each parameter indicates the software in which it is included, as follows: (A-GEA-R, B-PBSTAT, C-STABILITYSOFT), ** - групиране на параметрите според тяхната корелация с добив според подхода на grouping of parameters according to their correlation with yield according to the approach of Flores et al., (1998): ***- всички параметри са с оригиналните си обозначения в софтуера на английски език, the parameters have their original designations in the software in English, GY - STAB – strong positive relationship with yield с положителна корелация с добива, GY + STAB - without any correlation with yield, без корелация с добива, STAB-GY - with negative correlation with yield, с отрицателна корелация с добива; Pi/a- Superiority index, YSi/b- Kang's yield and stability index, I-Stability index, R1- First Range Parameters, GAI- Geometric Adaptability Index, KR/c- Kang's rank-sum index, S⁽³⁾/c- Huehn's stability parameter-3, S⁽⁶⁾/c- Huehn's stability parameter-6, NP⁽²⁾/c- Thennarasu's stability parameter-2, NP⁽³⁾/c- Thennarasu's stability parameter-3, NP⁽⁴⁾/c- Thennarasu's stability parameter-4, WAASBY- Weighted Average of Absolute Scores index, TOP/b- Fox's TOP rank, AR/c- Average Rang, CAC- Specific adaptive ability, Di- Desirability index, HOM- Coefficient of homeostaticity, PA- Percent of Adaptability, H1- Weighted homeostaticity index, EVI, EVF- Averages of the squared eigenvector values, D1, D2- Distance of IPCAs point with origin in space, MASV- Modified AMMI Stability Value, ASV-AMMI Stability Value, GSI- Genotype Selection Index, Si(1)/a, Si(1)/b, S⁽¹⁾/c- Huhn's non-parametric statistics-1, Si(2)/a, Si(2)/b, S⁽²⁾/c- Huhn's non-parametric statistics-2, Si(3)/b Huhn's non-parametric statistics-3, NPi(1)/b, NP⁽¹⁾/c- Thennarasu's nonparametric stability parameter-1, Ii- Yield reliability index, R2- Second Range Parameters, SF- Stability Factor, EV- Environmental variance of genotypes, Ai- Coefficient of multiplicatively, SIPC1, SIPC_F- Sums of the absolute value of the IPC scores, NPi(2)/b, NPi(3)/b, NPi(4)/b- Thennarasu's nonparametric stability parameter-2,3,4, Si(6)/b- Huhn's non-parametric statistics-6, Si- Sustainability index, UST- Steadiness of stability index]



Фигура 3. Клъстерен анализ на параметрите на стабилност по метода на Ward (XLSTAT 2014)
Figure 3. Cluster analysis of yield and stability parameters by Ward's method (XLSTAT 2014)

тях. Този анализ е направен с цел да се потвърди по два диаметрално противоположни подхода групирането на параметрите, според тяхното отношение към ранга на добива.

В клъстера на добива зърно (GY) се различават три подклъстера: *първи*: (Pi/a), (YSi/b), (GAI), (I), (R1), (WAASBY), *втори*: (AR/c), (S⁽³⁾/c), (S⁽⁶⁾/c), (KR/c), (NP⁽²⁾/c), (NP⁽³⁾/c), (NP⁽⁴⁾/c) и *тре-*

ти: (CAC), (PA), (HI), (HOM), (R1), (Di), (TOP/b), (R2).

Във втория клъстер има два подклъстера: *първи*: (SF), (Si), (UST), (Ai), (EV), (GSI), (ASV), *втори*: (MASV), (EV_p), (EV_r), (D1), (D2), (Ii).

В третия клъстер също има две основни групи: *първа*: (SIPC_r), (SIPC_p), (NPi(2)/b), (NPi(3)/b), (NPi(4)/b), (Si(6)/b), *втора*: (Si(1)/a), (Si(1)/b),

$(S^{(1)}/c)$, $Si(2)/a$, $(Si(2)/b)$, $(S^{(2)}/c)$, $(Si(3)/b)$, $(NPi(1)/b)$, $(NP^{(1)}/c)$.

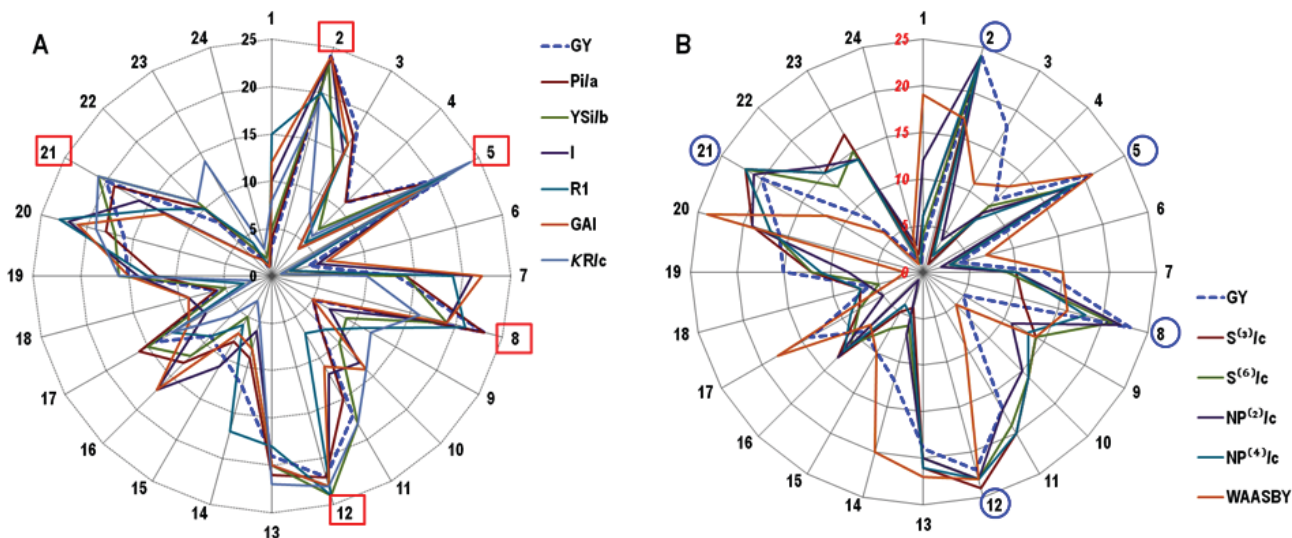
Групирането на параметрите в клъстери (групи) е аналогично на пространственото разположение на векторите им на Фигура 2. С много леки разминавания и двата анализа групират големия брой параметри в групи, чийто състав си прилича принципно. Това е достатъчна причина да се приеме, че анализите разделят параметрите на няколко принципни групи. Клъстерният и PCA предоставят информация за параметрите, която е пространствено поднесена (Фигури 2 и 3) и следователно е принципна. Тъй като наборът от параметри в отделните групи се прекрива в 90% от конкретни параметри, може да се приеме, че информацията е и конкретна. Уточняването на принципните групи от параметри и техният конкретен набор във всяка една от тях, е направено в Таблица 7. Тези данни са приети за меродавни при обсъждане на резултатите.

Илюстрация на приложимостта на параметри от първа група е показана на Фигура 4. Тя има за цел не толкова да идентифицира ценните сортове, колкото да покаже дали различни

комбинации от параметри предоставят сходна или различна информация за тях.

В първата част на фигурата (Фигура 4А) са избрани, параметрите с най-висока корелация с добива, които са не параметричен тип. Според рангове на всички параметри, сортовете: 2, 5, 8, 12 и 21 са най-ценните от цялата група. Те са високопродуктивни и същевременно с достатъчно високо ниво на стабилност. Във втората група (Фигура 4В) са поставени не-параметричните параметри (изчислени с помощта на *Stabilitysoft*), заедно с един от най-новите параметри WAASBY. Общото между тях е положителната корелация с добива, но малко по-слаба в сравнение с първата група. На фигурата ясно се открояват сортовете с най-добра комбинация добив+стабилност (2, 5, 8, 12 и 21), както и тези – с най-неблагоприятно за селекцията съчетание (6, 9, 15, 18 и 24).

Добре проучените и познати параметри, като Pi/a , $YSi/$, KR/c , $S^{(3)}/c$, $S^{(6)}/c$, $NP^{(2)}/c$, $NP^{(4)}/c$ за пореден път тук дават коректна оценка на сортовете, по отношение на техните добив и стабилност (Фигура 4). Картината на подреждане на сортовете чрез по-непознатите на изследова-



Фигура 4. Комбинирана оценка на продуктивността и стабилност на изследваните сортове чрез параметрите с положителна корелация с добива зърно: А- с най-висока корелация ($\rho=0,71-0,97$) и В- с по-ниска положителна корелация ($\rho=0,57-0,70$)

Figure 4. Combined assessment of productivity and stability of the studied varieties through the parameters with positive correlation with grain yield: А- with the highest correlation ($\rho = 0.71-0.97$) and В- with lower positive correlation ($\rho = 0.57-0.70$)

телите параметри (*GAI*), (*I*), (*RI*), (*WAASBY*) е напълно аналогична и маркира същите сортове в две групи: стабилни и продуктивни (2, 5, 8, 12 и 21), и не стабилни с нисък добив зърно (6, 9, 15, 18 и 24). От последните пет параметъра разминавания в оценката спрямо другите има при (*WAASBY*). Според него сортовете 1, 14, 17 и 20 трябва да притежават добро съчетание добив стабилност, но практически това не е така (Фигура 4B). Подредане на сортовете с помощта на който и да е параметър от втора група (Таблица 7), определя сортове с обозначение № 2,5, 8 и 12 (без 21) са високо продуктивни и стабилни. Този анализ не е включен в изследването, тъй като целта е да се сравнят параметрите, а не да се групират сортовете.

ОБСЪЖДАНЕ

Оценката на стабилността на сортовете стои винаги във фокуса на интерес на селекцията. Затова е много важно изследователите да разполагат с инструменти за коректна оценка на поведението на новите сортове в кръг от условия, които ги интересуват. Известни са голям брой параметри и индекси за оценка, които отразяват в различна степен компромисно величината на добива на сорта и неговата стабилност в конкретни условия на средата (Pour-Aboughadareh et al., 2022). Богата обезпеченост от методи може да стане причина за неправилен избор на коректни методи за оценка. Затова е наложително да се пристъпва винаги критично към избора на конкретни методи или параметри за оценка на поведението на сортовете в различни почвено-климатични условия. В това отношение изследванията, които разкриват приликите или разликите между известни и нови параметри за оценка са полезни за селекцията (Reckling et al., 2021). Особено ценни и показателни са тези, в които се изследват данни от многофакторни полски опити, в които има голям брой пунктове на изследване през 3-5 годишен период от време (Mohammadi et al., 2021). Информацията, извлечена подобни опити е значително по обективна, особено при наличие на „кръстосан“ тип на GEI.

Настоящото изследване притежава всички важни характеристики на подобен многофакторен полски опит. Установените закономерности

при оценка на стабилността са важни защото предоставят уникална информация за поведението на група сортове в широк кръг от условия на страната. Изследването преследва целта да се съпостави ефективността на отделни параметри за оценка на стабилността, без да се отчита пряко подредането на изследваните сортове. Последното е илюстрирано с една картина, колкото да се потвърди тезата за приложимостта на група от индекси (Фигура 4).

Степента на предвидимост на резултатите, които се очакват в отделен пункт е висока (Таблица 5). От друга страна различията между избраните в изследването пунктове са съществени (Фигура 1). Това дава основание за правилно райониране на всеки отделен сорт от групата, а наборът от пунктове да бъде подходящ за използване в бъдещи подобни изследвания при житни и други култури.

Част от не-параметрични методи при оценката на сорта, особено най-масово използваните от тях, S(3) S(6) (Nassar & Huhn, 1987). NP(2) NP(3) NP(4) (Thennarasu, 1995) трябва да се прилагат с известна доза скептицизъм. Информацията която се получава от тяхното изчисление при двата софтуера, в които са включени, е коренно противоположна (Mohammadi et al., 2016; Khalili & Pour-Aboughadareh 2016; Tsenov et al., 2022). Всички останали индекси от този тип предоставят оценка за сорта, която тук потвърждава предходни изследвания, без изключение (Mohammadi & Amri, 2008; Mohammadi et al., 2021; Smutná et al., 2021). Стабилността на сорта може спокойно да бъде оценявана и чрез голяма част от изследваните индекси от група E, с изключение на два от тях (Si, UST), чиито отрицателни корелации с добива ги изключват от групата за приложение (Таблица 7). Всички останали могат да бъдат прилагани без съмнение, което потвърждава напълно информацията от (Farshadfar et al., 2011; Zali et al., 2012; Vaezi et al., 2022). Особено информативни за оценка са параметрите (*Pi/a*), (*YSi/b*), (*KR/c*), (*GAI*), (*I*), (*RI*), които безпогрешно насочват към сортовете с най-добро съчетание добив + стабилност, както и към тези, които трябва да се изключат от райониране. Голяма част от параметрите (индекси) са напълно приложими (*Di*, *Ii*, *SF*, *R2*, *PA*), с уговорката да се използват няколко от тях, а не самостоятелно. Основната причина за подобно

твърдение се основава на факта, че когато липсва корелация между добив и даден параметър, оценката на сорта чрез всеки един от тях се разминава от другия в някаква степен. Затова е необходимо оценката да се прави чрез избран набор от параметри, защото е значително по-обективна. Ефективността на цяла група от параметрите (Pi/a), (YSi/b), (KR/c), [$S(1)$], [$S(2)$], (TOP) са достатъчни за коректна оценка на стабилността на сорта в групата. Те са лесно достъпни, защото са включени в налични софтуерни продукти. Информацията за приложение на част от индексите от групи D и E (Таблица 2), съвпада напълно с вече споменатите по-горе, но тяхното изчисляване изисква организиране на специални макроси от формули, което не всеки може да направи. Затова е значително по-удобно да се използват параметри от лесно достъпни статистически програми, както е направено тук.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За да бъде лесна и ефективна оценката на сортовете по добив и стабилност е препоръчително това да се прави чрез статистически програми, в които съществува възможност за оценка на GEI. Само след разкриване на основните характеристики на GEI, в конкретна ситуация, е възможно да се пристъпи към оценка на стабилността. Разкритата конкретна информация помага директно за приемане на конкретна тежест на стабилността в компромисното съчетание с добива. Два от използваните тук статистически пакети имат такива възможности (GEA-RPBSTAT), докато програмата Stabilitysoft прави рангуване на сортовете без предварителен анализ на полския опит за GEI. Научната общност разполага с още няколко софтуера (GGE, IRRISTAT, GenStat) възможностите на които се прекриват с вече споменатите, но са лицензирани (срещу заплащане ежегодно). Pour-Aboughadareh et al., (2022) правят сравнение между възможностите на тези програми за оценка, както и на няколко новосъздадени софтуерни пакети за безплатната платформа **R-core** (Phenabilit, Stability, Agrostab, PBtools, Ammistability, Metan). Следователно оценката на стабилността може да бъде направена прецизно и коректно с помощта на някои от тези

софтуерни продукти по избор, в зависимост от поставената цел в дадено изследване.

ЛИТЕРАТУРА

- Alberts, M. J. A.** (2004). A comparison of statistical methods to describe genotype x environment interaction and yield stability in multi-location maize trials. *PhD Thesis*, pp. 1–100.
- Alvarado, G., Rodríguez, F. M., Pacheco, A., Burgueño, J., Crossa, J., Vargas, M., Pérez-Rodríguez, P., & Lopez-Cruz, M. A.** (2020). META-R: A software to analyze data from multi-environment plant breeding trials. *The Crop Journal*, 8(5), 745–756. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.03.010>
- Annicchiarico, P.** (2002). Defining adaptation strategies and yield-stability targets in breeding programmes. In *Quantitative genetics, genomics and plant breeding* (pp.365–383). <https://doi.org/10.1079/9780851996011.0365>
- Babarmanzoor, A., Tariq, M. S., Ghulam, A., & Muhammad, A.** (2009). Genotype× environment interaction for seed yield in Kabuli Chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes developed through mutation breeding. *Pakistan Journal of Botany*, 41(4), 1883–1890.
- Bajpai, P. K., & Prabhakaran, V. T.** (2000). A new procedure of simultaneous selection for high yielding and stable crop genotypes. *Indian Journal of Genetics & Plant Breeding*, 60(2), 141–146.
- Balcha, A.** (2020). Genotype by environment interaction for grain yield and association among stability parameters in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *American Journal of Plant Sciences*, 11, 1–10. <https://doi.org/10.4236/ajps.2020.111001>
- Becker, H. C., & Leon J.** (1988). Stability analysis in plant breeding. *Plant Breeding*, 101, 1–23. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.1988.tb00261.x>
- Becker, H. C.** (1981). Correlations among some statistical measures of phenotypic stability. *Euphytica*, 30(3), 835–840. <https://doi.org/10.1007/bf00038812>
- Cheshkova, A. F., Stepochkin, P. I., Aleynikov, A. F., Grebennikova, I. G., & Ponomarenko, V. I.** (2020). A comparison of statistical methods for assessing winter wheat grain yield stability. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 24(3), 267–275. <https://doi.org/10.18699/vj20.619>
- Desheva, G., & Deshev, M.** (2021). Evaluation of the stability and adaptability of yield in varieties and breeding lines of common winter wheat. *Rastenievadni nauki*, 58(1) 3–13 (Bg).
- Dyulgerova, B., & Dyulgerov, N.** (2019). Genotype by Environment Interaction for Grain Yield of Barley Mutant Lines. *Agriculture (Pol'nohospodárstvo)*, 65(2), 51–58. <https://doi.org/10.2478/agri-2019-0006>
- Eberhart, S. A., & Russell, W. A.** (1966). Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, 6(1),

- 36– 40. <https://doi.org/10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x>
- Farshadfar, E.** (2008). Incorporation of AMMI stability value and grain yield in a single non-parametric index (GSI) in bread wheat. *Pakistan Journal of Biological Sciences* 11, 1791–1796.
- Farshadfar, E., Mahmodi, N., & Yaghotipoor, A.** (2011). AMMI stability value and simultaneous estimation of yield and yield stability in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Australian Journal of Crop Science*, 5(13), 1837–1844. http://www.cropj.com/farshadfar_5_13_2011_1837_1844.pdf
- Fasahat, P., Rajabi, A., Mahmoudi, S. B., Noghabi, M. A., & Rad, J. M.** (2015). An overview on the use of stability parameters in plant breeding. *Biometrics & Biostatistics International Journal*, 2(5), 1–11. <https://doi.org/10.15406/bbij.2015.02.00043>
- Flores, F., Moreno, M. T., & Cubero, J. I.** (1998). A comparison of univariate and multivariate methods to analyze G x E interaction. *Field Crops Research*, 56(3), 271–286. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00095-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00095-6)
- Georgieva, R. G., & Kirchev, H. K.** (2020). Ecological plasticity and stability of some agronomical performances in triticale varieties (x *Triticosecale* Wittm). *Ecologia Balkanica* 12(1), 93–98.
- Gomez-Becerra, H., Morgounov, A., & Abugaliev, A.** (2006). Evaluation of grain yield stability, reliability and cultivar recommendations in spring wheat (*Triticum aestivum* L) from Kazakhstan and Siberia. *Journal of Central European Agriculture*, 7(4), 649–659.
- Gubatov, T.** (2020). Influence of the environments on grain yield in common wheat varieties, PhD Thesis, Agricultural University, Plovdiv, Bulgaria, pp. 185.
- Gubatov, T. & Delibaltova, V.** (2020). Evaluation of wheat varieties by the stability of grain yield in multi environmental trails. *Bulgarian Journal of Agricultural Sciences*, 26(2), 384–394.
- Hernandez, C. M., Crossa, J. & Castillo, A.** (1993). The area under the function: an index for selecting desirable genotypes. *Theoretical Applied Genetics*, 87, 409–415 <https://doi.org/10.1007/BF00215085>
- Kang, M. S.** (2020). Genotype-environment interaction and stability analyses: an update. In: *Quantitative genetics, genomics and plant breeding* (pp. 140–161). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781789240214.0140>
- Kataoka, S.** (1963). A Stochastic Programming Model. *Econometrica*, 31(1/2), 181. <https://doi.org/10.2307/1910956>
- Khalili, M., & Pour-Aboughadareh, A.** (2016). Parametric and non-parametric measures for evaluating yield stability and adaptability in barley doubled haploid lines. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 18(3), 789–803. <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=538293>
- Kroon, J. D., & Laan, P.** (1981). Distribution-free test procedures in two-way layouts; a concept of rank-interaction. *Statistica Neerlandica*, 35(4), 189–213. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9574.1981.tb00730.x>
- Langer, I., Frey, K. J., & Bailey, T.** (1979). Associations among productivity, production response, and stability indexes in oat varieties. *Euphytica* 28, 17–24. <https://doi.org/10.1007/BF00029168>
- Lewis, L. B.** (1954). Gene-environment interaction. *Heredity*, 8, pp. 333–356.
- Lin, C. S.** (1982). Grouping genotypes by a cluster method directly related to genotype-environment interaction mean square. *Theoretical and Applied Genetics*, 62(3), 277–280. <https://doi.org/10.1007/BF00276251>
- Mohammadi, R., & Amri, A.** (2008). Comparison of parametric and non-parametric methods for selecting stable and adapted durum wheat genotypes in variable environments. *Euphytica*, 159(3), 419–432. <https://doi.org/10.1007/s10681-007-9600-6>
- Mohammadi, R., Farshadfar, E. & Amri, A.** (2016) Comparison of rank-based stability statistics for grain yield in rainfed durum wheat, *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 44(1), 25–40, <https://doi.org/10.1080/01140671.2015.1100126>
- Mohammadi, R., Sadeghzadeh, B., Poursiahbidi, M. M., & Ahmadi, M. M.** (2021). Integrating univariate and multivariate statistical models to investigate genotype x environment interaction in durum wheat. *Annals of Applied Biology* 178(3), 450– 465. <https://doi.org/10.1111/aab.12648>
- Moors, C. A.** (1921). The agronomic placement of varieties. *Journal of American Society of Agronomy*, 13, 337–352
- Nassar, R. & Huhn M.** (1987). Studies on estimation of phenotypic stability: tests of significance for nonparametric measures of phenotypic stability. *Biometrics*, 43, pp. 45–53. <https://doi.org/10.2307/2531947>
- Olivoto, T, Dal’Col, L. A., da Silva, J. A.G., Marchioro, V. S., de Souza, V. Q., & Jost, E.** (2019). Mean performance and stability in multi-environment trials II: Selection Based on Multiple Traits. *Agronomy Journal*, 111(6): 2961–2969, <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0221>
- Pacheco, Á., Vargas, M., Alvarado, G., Rodríguez, F., Crossa, J., & Burgueño, J.** (2015). GEA-R (Genotype x Environment Analysis with R for Windows) Version 4.1, *CIMMYT Research Data & Software Repository Network*, V., 16. <https://hdl.handle.net/11529/10203>
- Pour-Aboughadareh, A., Khalili, M., Pocza, P., & Olivoto, T.** (2022). Stability Indices to Deciphering the Genotype-by-Environment Interaction (GEI) Effect: An Applicable Review for Use in Plant Breeding Programs. *Plants* 11(3): 414. <https://doi.org/10.3390/plants11030414>
- Pour-Aboughadareh, A., Yousefian, M., Moradkhani, H., Pocza, P., & Siddique, K. H. M.** (2019). Stabilitysoft: A new online program to calculate parametric and non-parametric stability statistics for crop traits. *Applications in Plant Sciences*, 7(1), e01211. <https://doi.org/10.1002/aps3.1211>

- Purchase, J. L., Hatting, H., & van Deventer, C. S. (2000).** Genotype × environment interaction of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in South Africa: II. Stability analysis of yield performance. *South African Journal of Plant and Soil*, 17(3), 101–107. <https://doi.org/10.1080/02571862.2000.10634878>
- Reckling, M., Ahrends, H., Chen, T. W., Eugster, W., Hadasch S., Knapp, S., Laidig, F., Linstädter, A., Macholdt, J., Piepho, H-P., Schiffers, K. & Döring, T. F. (2021).** Methods of yield stability analysis in long-term field experiments. A review. *Agronomy & Sustainable Development* 41, 27. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00681-4>
- Singh, M., Ceccarelli, S., & Grando, S. (1999).** Genotype x environment interaction of crossover type: Detecting its presence and estimating the crossover point. *Theoretical and Applied Genetics*, 99(6), 988–995. <https://doi.org/10.1007/s001220051406>
- Smutná, P., Mylonas, I. & Tokatlidis, I.S. (2021).** The use of stability statistics to analyze genotype × environments interaction in rainfed wheat under diverse agroecosystems. *International Journal of Plant Production*, 15, pp. 261–271, <https://doi.org/10.1007/s42106-020-00126-0>
- Stoyanov, H., & Baychev, V. (2021).** Triticale lines combining high productivity with stability and adaptability under contrasting environments. *Rastenievadni nauki*, 58(5) 3-15 (Bg).
- St-Pierre, C. A., Klinck, H. R., & Gauthier, F. M. (1967).** Early generation selection under different environments as it influences adaptation of barley. *Canadian Journal of Plant Science*, 47(5), 507–517. <https://doi.org/10.4141/cjps67-091>
- Suwarno, W. B., Aswidinnoor, S. H. & Syukur, M. (2008).** PBSTAT: a web-based statistical analysis software for participatory plant breeding. *Proceeding 3rd International Conference on Mathematics and Statistics*, pp. 852-858.
- Thennarasu, K. (1995).** On certain non-parametric procedures for studying genotype-environment interactions and yield stability. *PhD thesis*, PJ School, IARI, New Delhi, India.
- Tsenov, N. & Atanasova, D. (2015).** Influence of environments on the amount and stability of grain yield in today's winter wheat cultivars, II. Evaluation of each variety, *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 21(6), 1128-1139.
- Tsenov, N. & Gubatov, T. (2018).** Comparison of basic methods for estimating the size and stability of grain yields in winter wheat, *Bulgarian Journal of Crop Sciences*, 55(6): 9-19.
- Tsenov, N., Gubatov, T. & Yanchev, I. (2022).** Comparison of statistical parameters for estimating the yield and stability of winter common wheat varieties, *Agriculture Science and Technology* 14, *in press*
- Uhr, Zl., Dimitrov, E., & Delchev, G. (2021).** Characteristics of perspective lines common winter wheat. 1. Yield and stability. *Rastenievadni nauki*, 58(4) 3-10 (Bg).
- Vaezi, B., Pour-Aboughadareh, A., Mohammadi, R., Mehraban, A., Hossein-Pour, T., Koohkan, E., ... & Siddique, K. H. (2019).** Integrating different stability models to investigate genotype× environment interactions and identify stable and high-yielding barley genotypes. *Euphytica*, 215(4), 1-18.
- Vaezi, B., Sabgahnia, N., Mehraban, A., & Hatami-Maleki, H. (2022).** Nonparametric analysis of genotype grain yield performance of barley trials based on ranks, *Romanian Agricultural Research*, 39, pp. 1-11.
- van Eeuwijk, F. A., Bustos-Korts, D. V., & Malosetti, M. (2016).** What should students in plant breeding know about the statistical aspects of genotype × environment interactions? *Crop Science*, 56(5), 2119–2140. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.06.0375>
- Verma, A., Kumar, V., Kharab, A., & Singh, G. (2018).** Comparative performance of parametric and non-parametric measures for analyzing G x E interactions of grain yield for dual Purpose Barley genotypes. *Electronic Journal of Plant Breeding*, 9(3), 846. <https://doi.org/10.5958/0975-928x.2018.00105.9>
- Vulchinkov S., Reseshka, L., Vulchinkova, P., Ilchovska, M., Petrovska, N., & Valkova V., (2020).** Stability assessment of maize hybrids by different methods in relation to their zoning, *Perspectives on agricultural science and innovations for sustainable food systems, Jubilee scientific international conference of 75 years of Agricultural University – Plovdiv*, pp. 65-76.
- Ward, J. H. (1963).** Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, 58(301), 236–244. <https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>
- Zali, H., Farshadfar, E., Sabaghpour, S. H., & Karimzadeh, R. (2012).** Evaluation of genotype environment interaction in chickpea using measures of stability from AMMI model. *Annals of Biological Reserch*, 3, 3126–3136.