

**АГРАРЕН УНИВЕРСИТЕТ - ПЛОВДИВ**  
**АГРОНОМИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ**  
**КАТЕДРА РАСТЕНИЕВЪДСТВО**

**Георги Стоянов Райков**

**Ефективна методология за идентификация на  
високопродуктивни и стабилни генотипи зимна пшеница  
чрез комбиниране на традиционни и иновативни  
статистически подходи**

# **АВТОРЕФЕРАТ**

**на дисертация**

**Научни ръководители:**

**Проф. д-р Ваня Делибалтова**

**Проф. д-р Николай Ценов**

**Пловдив, 2026 г.**



Дисертационният труд е рецензиран и внесен за защита на заседание на Катедрения съвет на катедра „Растениевъдство“, Факултет по Агрономство при Аграрен университет – Пловдив.

Данни за дисертацията:

- Обем – 166 страници
- Брой фигури – 8
- Брой таблици – 30
- Брой използвани източници – 195
- Брой публикации на докторанта – 2

Защитата ще се състои на .....2026 г. от ..... часа в зала ..... на Агрономическия факултет, на открито заседание на научното жури в състав:

Материалите, свързани със защитата, са достъпни на интернет страницата на Аграрен университет – Пловдив: [www.au-plovdiv.bg](http://www.au-plovdiv.bg), както и в библиотеката на Аграрен университет – Пловдив, ул. „Менделеев“ №12.

# Съдържание

<b>I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИЯТА</b> .....	5
<b>I.1. Актуалност на темата</b> .....	5
I.1.1. Значение на зимната пшеница в глобален и регионален контекст .....	5
I.1.2. Климатични ограничения и генетичен прогрес .....	6
I.1.3. Ролята на взаимодействието генотип × среда (GEI) и стабилността на добива ...	7
I.1.4. Необходимост от интегрирани методологии .....	8
<b>I.2. Цел, задачи и работни хипотези на изследването</b> .....	9
<b>I.3. Материал и методи</b> .....	10
I.3.1. Генотипи и експериментален дизайн .....	10
I.3.2. Изследвани признаци .....	12
I.3.3. Статистически методи и модели .....	13
<b>I.4. Почвено-климатична характеристика</b> .....	15
<b>II. РЕЗУЛТАТИ И ОБСЪЖДАНЕ</b> .....	18
<b>II.1. Дискриптивна статистика</b> .....	18
<b>II.2. Оценка на влиянието на средата, генотипа и тяхното взаимодействие върху добива и неговите елементи</b> .....	20
<b>II.3. Анализ на взаимовръзките между признаците и ефекта им върху продуктивността</b> .....	21
<b>II.4. Клъстерен анализ</b> .....	25
<b>II.5. Оценка на стабилността и продуктивността на генотипите</b> .....	28
<b>II.5.1. Сравнителна оценка на индексите на добив и стабилност</b> .....	34
<b>II.6. Многопризнакови селекционни индекси</b> .....	35
<b>III. ИЗВОДИ</b> .....	40
<b>IV. ПРИНОСИ</b> .....	42
<b>IV.1. Научно-теоретични приноси</b> .....	42
<b>IV.2. Научно-приложни приноси</b> .....	42
<b>V. ПУБЛИКАЦИИ, СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД</b> .....	43

# I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИЯТА

## I.1. Актуалност на темата

### I.1.1. Значение на зимната пшеница в глобален и регионален контекст

Зимната пшеница (*Triticum aestivum* L.) е една от най-значимите земеделски култури в световен мащаб и играе ключова роля за продоволствената сигурност на човечеството. Тя осигурява приблизително 20% от общия калориен прием и съществен дял от растителните протеини в глобалната диета, което я превръща в стратегическа култура за устойчивото развитие на аграрния сектор (FAO, 2017). Очакваното нарастване на световното население и увеличаването на търсенето на храни поставят пред производителите необходимост от устойчиво повишаване на добивите в променливи природни ресурси.

В глобален контекст темповете на генетичен прогрес при пшеницата през последните десетилетия се оценяват като недостатъчни за компенсирание на климатичните рискове и за задоволяване на бъдещото търсене. Анализи на дългосрочни данни показват, че в много региони годишното увеличение на добива е под 1%, което е значително по-ниско в сравнение с други основни култури (Ray et al., 2013; Fischer et al., 2014). Това забавяне се дължи както на биологичните особености на пшеницата като самоопрашваща се култура, така и на нарастващата честота на екстремни климатични явления. Повишаването на температурите, засушаването и неравномерното разпределение на валежите неблагоприятно засягат цъфтежа и наливането на зърното, което води до висока междугодишна вариабилност на добива (Asseng et al., 2015; Jagadish et al., 2021).

Значението на зимната пшеница е особено изразено в Европа, където тя е основен компонент на сеитбооборотите и водеща култура по отношение на заетите площи и икономическата стойност. В регионален аспект, включително в Югоизточна Европа и България, пшеницата има ключово значение за стабилността на земеделските стопанства и за националната продоволствена сигурност. България се характеризира с умерено-континентален климат, при които зимната пшеница традиционно заема водещо място в растениевъдството. В същото време производството ѝ е силно повлияно от климатичната вариабилност, включително чести засушавания през пролетно-летния период, високи температури по време на репродуктивните фази и значителни различия между годините по отношение на валежния режим (Asseng et al., 2015; Uhr et al., 2023).

При тези условия ролята на средата като доминиращ фактор във формирането на добива значително нараства, а взаимодействието генотип × среда се превръща в определящ елемент за подреждането и оценката на сортовете. Множество изследвания показват, че именно GEI е причина сортове с висок добивен потенциал в една година или среда да проявяват нестабилно или слабо представяне в други условия (Annicchiarico, 2002; Crossa et al., 2021). Това налага стабилността на добива да се разглежда като критерий, равностоен по значимост на средната продуктивност, особено в региони с висока климатична вариабилност, каквато е характерна за България.

В този контекст актуалността на настоящото изследване се определя от необходимостта за надеждна идентификация на високопродуктивни и стабилни

генотипи зимна пшеница при контрастни условия на средата. Интегрирането на традиционни подходи за оценка със съвременни статистически и многомерни методи за анализ на взаимодействието генотип × среда създава възможност за по-прецизна оценка на селекционния потенциал и за формулиране на устойчиви селекционни стратегии. Така зимната пшеница се утвърждава не само като ключова култура за продоволствената сигурност, но и като моделна система за разработване и прилагане на ефективни методологии за оценка на продуктивността и стабилността в условията на нарастваща климатична променливост.

### I.1.2. Климатични ограничения и генетичен прогрес

Климатичните промени през последните десетилетия се утвърждават като един от основните лимитиращи фактори за устойчивото производство на зимна пшеница в световен и регионален мащаб. Нарастващата честота и интензивност на екстремни климатични събития, включително продължителни периоди на засушаване, високи температури и резки температурни колебания, оказват съществено влияние върху физиологичните процеси и крайната продуктивност на културата.

В глобален аспект редица изследвания показват, че отрицателното въздействие на повишаващите се температури вече частично компенсира постигнатия генетичен прогрес при пшеницата. Анализите на дългосрочни експериментални и производствени данни сочат, че за всеки 1 °C повишение на средната температура потенциалният добив от пшеница може да се понижи с 5–7%, в зависимост от региона и агротехническите условия (Asseng et al., 2015; Zhao et al., 2017). Тези загуби поставят под съмнение способността на съществуващите сортове да поддържат стабилно високо ниво на продуктивност в условията на променящ се климат.

На този фон генетичният прогрес при зимната пшеница, постигнат чрез класическата селекция, се оценява като относително бавен. В много региони годишното увеличение на добива, дължащо се на селекционни подобрения, остава под 1%, което е недостатъчно за компенсиране на климатичния натиск и деградацията на ресурсите (Ray et al., 2013; Fischer et al., 2014). Това се обяснява както с комплексната генетична природа на добива като признак, така и с ограниченията на селекционните стратегии, фокусирани предимно върху средната продуктивност при оптимални условия.

В условията на България, климатичните ограничения се проявяват особено ясно чрез силно изразена междугодишна вариабилност на метеорологичните условия. Честите пролетни и раннолетни засушавания, съчетани с високи температури, водят до нестабилно реализиране на добивния потенциал дори при сортове с доказано висока продуктивност. Това обуславя ситуация, при която селекционният напредък, измерен в контролирани или благоприятни условия, не се трансформира директно в стабилни добиви в производствената практика.

В този контекст все по-ясно се очертава необходимостта от преосмисляне на критериите за генетичен прогрес при зимната пшеница. Съвременните селекционни цели следва да надхвърлят стремежа към максимален добив при оптимални условия и да включват показатели за адаптивност и стабилност в широк спектър от среди. Множество автори подчертават, че бъдещият генетичен прогрес при пшеницата ще зависи в значителна степен от способността на селекционните

програми да идентифицират генотипи с балансирано съчетание между продуктивност и устойчивост на климатичен стрес (Annicchiarico, 2002; Crossa et al., 2021).

Следователно, климатичните ограничения не само редуцират текущото ниво на добивите, но и ограничават ефективността на класическия селекционен подход. Това налага интегриране на усъвършенствани аналитични методи за оценка на генотипите, които да позволят по-прецизно разграничаване на реалния генетичен прогрес от вариацията, обусловена от средата. Именно тази необходимост определя научната и практическата значимост на изследванията, насочени към анализ на взаимодействието генотип × среда и към идентификация на стабилни и адаптивни генотипи зимна пшеница.

### I.1.3. Ролята на взаимодействието генотип × среда (GEI) и стабилността на добива

Взаимодействието генотип × среда (**Genotype × Environment Interaction, GEI**) представлява фундаментален биологичен и статистически феномен, който определя начина, по който различните генотипи реагират на промените в условията на средата. При зимната пшеница GEI има особено съществено значение поради широкия ѝ ареал на отглеждане и силната чувствителност на културата към климатични и агроекологични фактори. Наличието на значимо GEI означава, че относителното подреждане на генотипите по добив не е константно между различни години или среди, което усложнява процеса на оценка и препоръчване на сортове за практиката (Crossa, 1990; Yan & Kang, 2003).

В класическата селекционна практика оценката на сортовете често се основава на средни стойности на добива, получени в ограничен брой среди. При наличие на силно изразено GEI този подход може да бъде подвеждащ, тъй като високата средна продуктивност може да бъде резултат от добро представяне в ограничен брой благоприятни среди, компенсиращо слабо представяне при стресови условия. Множество изследвания показват, че при пшеницата делът на вариацията, обяснявана от GEI, често е сравним или дори надвишава този на генотипния ефект, особено при многофакторни многоекологични изпитвания (Zobel et al., 1988; Crossa et al., 2017). Това подчертава необходимостта GEI да бъде не само установявано, но и количествено определено и анализирано.

Стабилността на добива се разглежда като интегрален показател, отразяващ способността на даден генотип да поддържа относително постоянно ниво на продуктивност в широк диапазон от среди. В литературата съществуват различни концепции за стабилност, включително биологична стабилност, свързана с минимална вариация на добива, и агрономическа стабилност, при която се търси оптимално съчетание между висока средна продуктивност и предсказуемо поведение при променливи условия (Becker & Léon, 1988; Annicchiarico, 2002). При условията на засилваща се климатична вариабилност агрономическата стабилност е придобила водещо значение, тъй като селекционната стойност на генотипите се определя не само от потенциала им при оптимални условия, но и от способността им да ограничават загубите при стрес.

За региони с ясно изразени климатични колебания, какъвто е случаят с България, стабилността на добива се превръща в ключов селекционен и

производствен критерий. Честите промени в температурния и валежния режим водят до силна междугодишна вариабилност на условията, при която генотипи с високи средни добиви могат да се окажат икономически рискови поради нестабилно представяне. В този контекст анализът на GEI предоставя възможност за идентифициране на генотипи с широка адаптивност, както и на такива със специфична адаптация към определени типове среди. Това е от съществено значение за оптимизиране на сортовата структура и за повишаване на устойчивостта на производството (Yan et al., 2007; Crossa et al., 2021).

Развитието на съвременни статистически подходи значително разширява възможностите за изследване на GEI и стабилността на добива. Методи като AMMI, REML/BLUP и различни индекси за стабилност позволяват едновременното разглеждане на продуктивността и адаптивността на генотипите, като осигуряват по-дълбоко разбиране на структурата на взаимодействието генотип × среда. Тези подходи създават предпоставки за по-обективна оценка и за формулиране на надеждни препоръки за практиката.

Следователно, ролята на GEI и стабилността на в добива е централна за съвременните изследвания при зимната пшеница. Анализът тези фактори не само повишава ефективността на селекционния процес, но и допринася за разработването на устойчиви стратегии за производство, насочени към минимизиране на риска и към по-пълно реализиране на генетичния потенциал на културата при разнообразни и променящи се условия на средата.

Следователно, ролята на GEI и предизвиканата породени от него в променливостта на добива е важен аспект за полските изследвания при зимната пшеница. Анализът на свързаните с него закономерности дава реални възможности за правилно райониране на всеки сорт в производството.

#### I.1.4. Необходимост от интегрирани методологии

Нарастващата сложност на комбинацията от факторите, определящи продуктивността и стабилността на зимната пшеница, налага прилагането на аналитични подходи, които надхвърлят възможностите на единичните класически методи за оценка. При условия на силно изразено взаимодействие генотип × среда, висока климатична вариабилност и многоизмерна природа на добива като признак, използването на изолирани статистически критерии често води до частични или противоречиви интерпретации. Това обуславя необходимостта от проучване на интегрирани методологии, които съчетават различни аналитични подходи с цел по-пълно и обективно характеризирание на генотипите.

Традиционните методи за анализ, като дисперсионния анализ и линейните регресионни модели, осигуряват базова информация за значимостта и относителния принос на основните източници на вариация. Те позволяват количествено разграничаване на ефектите на генотипа, средата и тяхното взаимодействие, но имат ограничен капацитет за интерпретация на сложната структура на GEI и за визуализиране на адаптивността на отделните генотипи (Zobel et al., 1988; Piepho et al., 2008). В условията на изпитвания с много локации тези

ограничения се проявяват особено ясно, тъй като резултатите често са трудно приложими директно в селекционната и производствената практика.

Развитието на многомерни методи за анализ на GEI, като AMMI и свързаните с него биплот подходи, значително разширява възможностите за интерпретация на експерименталните данни. Чрез комбиниране на адитивните ефекти и главните компоненти на взаимодействието тези методи позволяват идентифициране на стабилни генотипи, разграничаване на специфична и широка адаптация и по-ясно разбиране на поведението на генотипите в различни среди (Cossa et al., 2017; Gauch, 2013). Въпреки това, AMMI анализът сам по себе си не предоставя директни прогнози за представянето на генотипите и не отчита пълноценно йерархичната структура на експерименталните данни.

В този контекст смесените линейни модели и подходите, базирани на REML/BLUP, се утвърждават като ключов елемент на съвременните интегрирани методологии. Те позволяват едновременно моделиране на фиксирани и случайни ефекти, предоставят по-надеждни оценки на генотипния ефект и дават възможност за предсказване на представянето на генотипите в различни среди (Piepho et al., 2008; Smith et al., 2005). В комбинация с класическите и многомерните подходи тези модели създават стабилна статистическа основа за оценка.

Допълнителен аргумент в полза на интегрираните методологии е многофакторната природа на добива, който се формира като резултат от сложни взаимодействия между множество елементи на продуктивността. Едномерната оценка на генотипите по един признак, дори когато той е основен като добива, не отразява пълноценно тяхната селекционна стойност. В този смисъл многопризнаковите индекси и методи за комплексна оценка предоставят възможност за едновременно отчитане на продуктивност, стабилност и структурни характеристики на добива, като по този начин се приближават по-точно до реалните селекционни цели (Annicchiarico, 2002; Olivoto et al., 2020).

Следователно аргументираната необходимост от интегрирани методологии произтича от стремежа към по-висока точност, надеждност и приложимост на резултатите. Комбинирането на традиционни статистически подходи, многомерни методи и съвременни модели за предсказване позволява по-пълно разкриване на генетичния потенциал на зимната пшеница. Това създава предпоставки за ефективна селекция на генотипи, които съчетават висока продуктивност със стабилно поведение в условията на нарастваща климатична променливост.

## **I.2. Цел, задачи и работни хипотези на изследването**

Целта на настоящото изследване е да се установи възможността за комбинирано прилагане на традиционни и иновативни статистически подходи за комплексна оценка на сортове зимна пшеница при едновременно определяне на продуктивността, стабилността и адаптивността при контрастни условия на отглеждане.

### **Конкретни задачи:**

1. Да се анализира влиянието на взаимодействието генотип × среда върху добива и стабилността на зимната пшеница.
2. Да се проучат връзките между основните компоненти на продуктивността и крайния добив.

3. Да се приложат многомерни статистически методи за групиране на генотипите въз основа на добив и структурни признаци.
4. Да се оцени стабилността на продуктивността на образците чрез интегрирани показатели, които ги съчетават.
5. Да се приложат многопризнакови подходи за групиране и класификация на изследваните генотипи с цел формулиране на препоръки за селекционната практика.

### **Работни хипотези**

1. Взаимодействието между генотип и среда оказва съществено влияние върху добива на зимна пшеница, като определя стабилността и приспособимостта на отделните сортове.

2. Връзките между основните признаци на продуктивността и добива се променят по сила и посока в зависимост от комбинираното въздействие на факторите на средата и тяхното взаимодействие с генотипа.

3. Групирането на генотипите чрез многомерен анализ разкрива реални различия във фенотипния и генетичния потенциал и подпомага обогатяването на тяхната характеристика.

4. Сортовете зимна пшеница могат да бъдат оценени надеждно, с комбинирани индекси и/или модели за продуктивност и стабилност.

5. Интегрирането на многопризнакови индекси (MGIDI, MTSI, WAASBY) и съпоставянето им чрез консенсусни подходи предоставя по-прецизна и възпроизводима оценка на генотипите.

## **I.3. Материал и методи**

### **I.3.1. Генотипи и експериментален дизайн**

Настоящото изследване се основава на 118 генотипа зимна пшеница (*Triticum aestivum* L.), Те са избрани с намерение да се проучи широка генетична база, обхващаща разнообразие от агрономически, физиологични и адаптационни характеристики, свързани с техния селекционен произход. В набора са включени както местни български сортове, създадени в националните селекционни институти, така и чуждестранни образци, предоставени от водещи научни и частни селекционни центрове в Европа, Азия и Северна Америка. Големият им брой бе сериозно предизвикателство за детайлно разкриване на техните продуктивни възможности и особености в променливи условия на средата. Включването им в селекция тук би могло да стане ключов елемент за допълнително ефективно обогатяване на родната генетика в процеса на трайно и съществено увеличаване нейния продуктивния потенциал.

**Таблица 1.** Произход на изследваните образци.

Регион/Страна	Изследователски/Селекционен център	Брой
България	Добруджански земеделски институт – Генерал Тошево; Институт по растителни генетични ресурси – Садово; Институт по земеделие и семезнание „Образцов чифлик“ – Русе	32
Сърбия	РКВ Белград; Институт Нови Сад	10
Румъния	Фундуля – Национален аграрно-изследователски институт	9
Русия	НИИСХ – Краснодар	13
Украйна	Институт по селекция – Мироновка; Одески СХИ	10
Молдова	НИИСХ – Белце	8
Франция	Limagrain, Boreal (частни компании)	7
Унгария	Agrárkutató Intézet – Martonvásár; Gabonakutató – Cегед	13
Чехия	SELGEN	4
Словакия	Slovak Agricultural Research	1
Австрия	Pioneer	2
САЩ	Colorado State Univ.; Washington State Univ.; Univ. of Nebraska – Lincoln; Kansas State Univ.	9

В таблица 1 е представено разпределението на изследваните генотипи по страна на произход и селекционен център. Българските сортове (32 на брой) включват както утвърдени стандарти като Аглика, Пряспа, Енола, Садово 1 и Победа, така и нови сортове– Йоана, Гизда, Славен и др. Те бяха използвани както като стандартни образци, така и за проследяване на селекционния напредък в условията на Североизточна България. Чуждестранните генотипи произхождат от водещи институти и компании с доказано висок принос в съвременната селекция на пшеница. Сред тях са: РКВ, Сърбия (РКВ Rodika, РКВ Vizelka, РКВ Kristina); Фундуля, Румъния (Litera, Otilia, Glosa); Краснодар и Мироновка, Русия и Украйна (Нота, Гром, Юнона, Есаул); Martonvásár и Cегед, Унгария (GK Csillag, Mv Kikelet, GK Vitorlas); Limagrain, Франция (Azimut, Midas, Arach); както и университети от САЩ (Wahoo, Cougar, Wesley). Много от тези сортове са селектирани за толерантност към абиотични и биотични стресови фактори, което позволява обективна оценка на адаптивността им в условията на Североизточна България.

Полевите експерименти са проведени в опитното поле на Добруджанския земеделски институт – гр. Генерал Тошево, в рамките на три последователни вегетационни години (2012–2013, 2013–2014 и 2014–2015). Всяка година е разглеждана като самостоятелна среда, което позволява анализ на междугодишната климатична вариабилност и нейната роля за проявлението на взаимодействието генотип × среда. Избраните години се отличават с ясно изразени различия в температурния и валежния режим, което формира естествен експериментален градиент: от относително благоприятни до изразено стресови условия.

Експерименталният дизайн е реализиран по схема на случайни блокове с три повторения (Randomized Complete Block Design – RCBD), широко използвана в полските опити поради способността ѝ да намалява пространствената вариация и

да осигурява надеждна статистическа сравнимост между генотипите. Всяка експериментална парцела е с площ 7.5 m<sup>2</sup>, като сеитбата е извършвана в оптималния агротехнически срок и в рамките на един ден за всички генотипи през съответната година. Сеитбената норма е 550 кълняеми семена m<sup>-2</sup>, при междуредово разстояние 10.5 cm.

Торенето е уеднаквено за всички варианти и включва предсеитбено внасяне на фосфор и калий, както и поетапно азотно подхранване – основно предсеитбено и две подхранвания през вегетацията във фази братене и вретенене по скалата на Zadoks. Растителната защита срещу житни и широколистни плевели е осъществявана чрез хербицидни третирания в препоръчителните фази на развитие на културата. Всички агротехнически операции и растителнозащитни мероприятия са извършвани едновременно за всички генотипи, без индивидуални корекции.

Еднаквите условия на отглеждане, съчетани с широкия генетичен обхват и многоекологичния характер на експеримента, осигуряват надеждна експериментална основа за анализ на продуктивността, стабилността и адаптивността на изследваните генотипи. Това позволява обективна оценка на техните реакции към климатичната вариабилност и създава предпоставки за формулиране на научно обосновани селекционни и практико-приложни изводи.

### 1.3.2. Изследвани признаци

За всичките 118 генотипа зимна пшеница е извършена агрономическа оценка на основните елементи на добива във всяко повторение и за всяка от трите години на изследването. По този начин е формирана база данни, позволяваща прилагане на статистическите анализи, съответстващи на целта и работните хипотези на изследването. Измерванията са проведени съгласно стандартната методика за полски агрономически опити (Gomez & Gomez, 1984), като фенологичните фази са определяни по скалата на Zadoks et al. (1974). Анализът обхваща четири основни признака, пряко или косвено свързани с формирането на добива зърно.

**Броят на продуктивните братя (NPT)** представя броя на класоносните стъбла на единица площ и е индикатор за продуктивната братимост. Определянето е извършено чрез преброяване на класоносните стъбла в рамките на квадрат 50 × 50 cm във фаза пълна зрелост, като резултатите са преизчислени на m<sup>2</sup>. Този признак е тясно свързан с гъстотата на посева и има пряко значение за формирането на добива.

**Броят на зърната в клас (NGS)** е определян като среден брой зърна от минимум 10 класа, избрани на случаен принцип от всяка парцела. Признакът отразява плодовитостта на класа и е силно зависим от условията по време на цъфтеж. Той има доказана положителна връзка с добива, но често се влияе от взаимодействието с други елементи на продуктивността, включително NPT (Reynolds et al., 2007).

**Броят на зърната на квадратен метър (NGM)** представлява интегриран показател, изразяващ общия брой зърна, формирани на единица площ. Той е резултат от взаимодействието между броя на продуктивните братя и броя на зърната в класа и е широко признат като водещ признак, определящ нивото на добива при пшеницата (Sadras & Lawson, 2011; Slafer et al., 2014; Fischer, 2008).

**Масата на 1000 зърна (TGW, g)** е измервана чрез претегляне на три проби от по 1000 зърна от всяка парцела. Този признак характеризира едрината на зърното и е свързан с процесите на наливане до пълна зрелост. Въпреки че TGW е сравнително стабилна сортова характеристика, при някои генотипи се наблюдава компенсаторен ефект спрямо другите добивни компоненти, като често е в отрицателна корелация с NGM поради конкуренция за ресурси (Fischer & Rebetzke, 2018).

**Добивът от зърно (GY, t ha<sup>-1</sup>)** е разглеждан като резултатен признак, отразяващ комплексното взаимодействие между всички елементи на продуктивността и условията на средата. Варирането на добива между генотипите и годините е резултат от специфичния сезонен баланс между NPT, NGS, NGM и TGW, което обуславя централната роля на този признак в селекционните и адаптационни изследвания.

### I.3.3. Статистически методи и модели

В изследването е приложена интегрирана статистическа рамка, съчетаваща традиционни и съвременни подходи за анализ на добива, елементите на продуктивността и взаимодействието генотип × среда (GEI), с цел надеждна многомерна и прогностично обоснована оценка на 118 генотипа, изпитани в три климатично контрастни години. В началния етап е проведена описателна статистика за признаците NPT, NGS, NGM, TGW и GY по генотипи, което позволява оценка на вариабилността, разпределението и наличие на отклоняващи се стойности и представлява стандартна стъпка при подготовка на агрономически данни за многофакторни анализи (Gomez & Gomez, 1984; Montgomery, 2017). Данните са подложени на структурирана предварителна обработка чрез проверка за липсващи стойности и аномалии и стандартизиране на признаците, като за детекция на отклоняващи се стойности е използвана класическата логика на тестовете за приблизителна нормалност (Grubbs, 1969).

Анализите са реализирани в среда R (R Core Team, 2025) с комбинация от специализирани пакети: “*metan*” за индекси на стабилност и многопризнакови индекси (Olivoto & Lúcio, 2020), “*lme4*” за линейни смесени модели и REML оценяване (Bates et al., 2015), “*lavaan*” за структурно-уравнително моделиране (Rosseel, 2012), както и базови процедури за клъстеризация и визуализация. Приложението на алгоритми за многомерна оценка и машинно обучение следва

общите принципи на съвременната статистическа и прогностична методология (James et al., 2021).

За анализ на GEI е използван AMMI модел, който комбинира ANOVA и PCA, като чрез ANOVA се отделят адитивните ефекти на генотип и среда, а чрез PCA се структурира мултипликативната част на взаимодействието и се извличат IPCA компоненти за интерпретация и биплот визуализация (Gauch, 2013; Hongyu et al., 2014). Паралелно PCA е приложен и при анализа на екологични ковариати за идентифициране на основни агрометеорологични градиенти (Jolliffe & Cadima, 2016). В допълнение са използвани линейни смесени модели (LMM), оценени чрез REML, които позволяват едновременно моделиране на фиксирани и случайни ефекти и дават обективни оценки на дисперсионните компоненти, включително при небалансирани данни (Patterson & Thompson, 1971; Piepho & Möhring, 2007; Bates et al., 2015). В рамките на LMM генотипът е третиран като случаен ефект за получаване на BLUP оценки и за извеждане на ключови генетични параметри, включително относителен принос на GEI (Smith et al., 2005; Piepho et al., 2008; Cullis et al., 2006).

За изясняване на причинно-следствените зависимости между признаците и добива е приложен структурно-уравнителен модел (*SEM*), реализиран чрез "*lavaan*", като са оценени директните и индиректните ефекти на TGW, NGM, NGS и NPT върху GY, при едновременно отчитане на междупризнаковите връзки и на междусредовата вариация (Jöreskog, 1970; Rosseel, 2012). Оценката на моделите е подпомогната от информационни критерии (AIC, BIC) (Akaike, 1974), в съответствие с утвърдените принципи за избор между конкуриращи се модели (Burnham & Anderson, 2004).

За допълнителна прогностична оценка на значимостта на признаците е използван алгоритъмът "*Random Forests*", който позволява улавяне на нелинейни зависимости и устойчиво подреждане на предикторите дори при наличие на колинеарност, като значимостта е оценявана чрез показатели от типа MDA и MDI (Breiman, 2001; Liaw & Wiener, 2002; Grömping, 2009; Nicodemus, 2011). Стабилността и адаптивността на генотипите са оценени чрез набор от утвърдени индекси, включително *YSI*, *Pi*, *Kang's Stability Index*, както и съвременните *WAASB* и *WAASBY*, базирани на BLUP и AMMI компоненти, които позволяват балансирана оценка на продуктивност и стабилност (Bousslama & Schapaugh, 1984; Lin & Binns, 1988; Kang, 1993; Olivoto et al., 2019; Olivoto & Nardino, 2021). Сходството и допълването между индексите е анализирано чрез корелация на Спийрман за рангови променливи (Spearman, 1904; Zar, 1972).

За многомерна класификация на генотипите е приложена *k-means* клъстеризация върху Z-стандартизирани стойности на ключови признаци, като оптималният брой клъстери е определен чрез критерии за вътрешноклъстерна вариация и коефициента на силуэта (Hartigan & Wong, 1979; Kassambara, 2017).

Многопризнаковата селекция е подпомогната чрез индексите *MTSI* и *MGIDI*, които редуцират размерността чрез факторен анализ и оценяват близостта на генотипите до идеотип с оптимални стойности по включените признаци (Rocha et al., 2018; Olivoto et al., 2019; Olivoto & Nardino, 2021). Накрая, за интегриране на резултатите от различни индекси и намаляване на метод-зависимостта е използван *Robust Rank Aggregation* (RRA), чрез който е изведена консенсусна класация на генотипи с устойчиво предимство независимо от прилагания индекс (Kolde et al., 2012).

## **I.4. Почвено-климатична характеристика**

### **Почвена характеристика на района**

Почвено-географските условия на района на Добруджанския земеделски институт – гр. Генерал Тошево формират специфична среда, съчетаваща високо природно плодородие с определени климатични и агротехнически ограничения. Землището е разположено в централната част на Добруджанското плато върху мощни лъсови наслаги, при равнинен до леко хълмист релеф и надморска височина около 230–240 m. Тези условия обуславят развитието на черноземни почви, които представляват един от най-ценните агрономични ресурси в България.

Съгласно класификационната система FAO–UNESCO черноземите в района се определят като *Luvic Phaeozem*, а по актуалната Референтна база за почвени ресурси (WRB) – като *Haplic Chernozem* и *Vertic Chernozem*, което отразява различните методологични подходи при тяхното класификационно определяне (Filcheva et al., 2018). И в двете системи се подчертават дълбокият хумусен хоризонт, високото естествено плодородие и доминиращата роля на лъоса като почвообразуващ материал. Българските изследвания потвърждават, че Добруджа е най-характерната зона за развитие на този почвен тип и че неговите агрономични предимства са стратегически фактор за производството на зимна пшеница (Nankova & Yankov, 2015; Nankov et al., 2014).

### **Климатична характеристика на района**

Климатът в района на Добруджанския земеделски институт – Генерал Тошево представлява ключов фактор за развитието, продуктивността и стабилността на зимната пшеница. Районът се намира в североизточната част на България и попада в умерено-континенталната климатична подобласт, характеризираща се с ясно изразени сезонни температурни амплитуди, ограничена влагозапасеност и висока слънчева радиация. Вътрешната част на Добруджанското плато е с преобладаващо континентален климатичен характер, като влиянието на Черноморския басейн е слабо изразено и ограничено главно до крайбрежните зони (NIMH, 2020; Copernicus Climate Service, 2023).

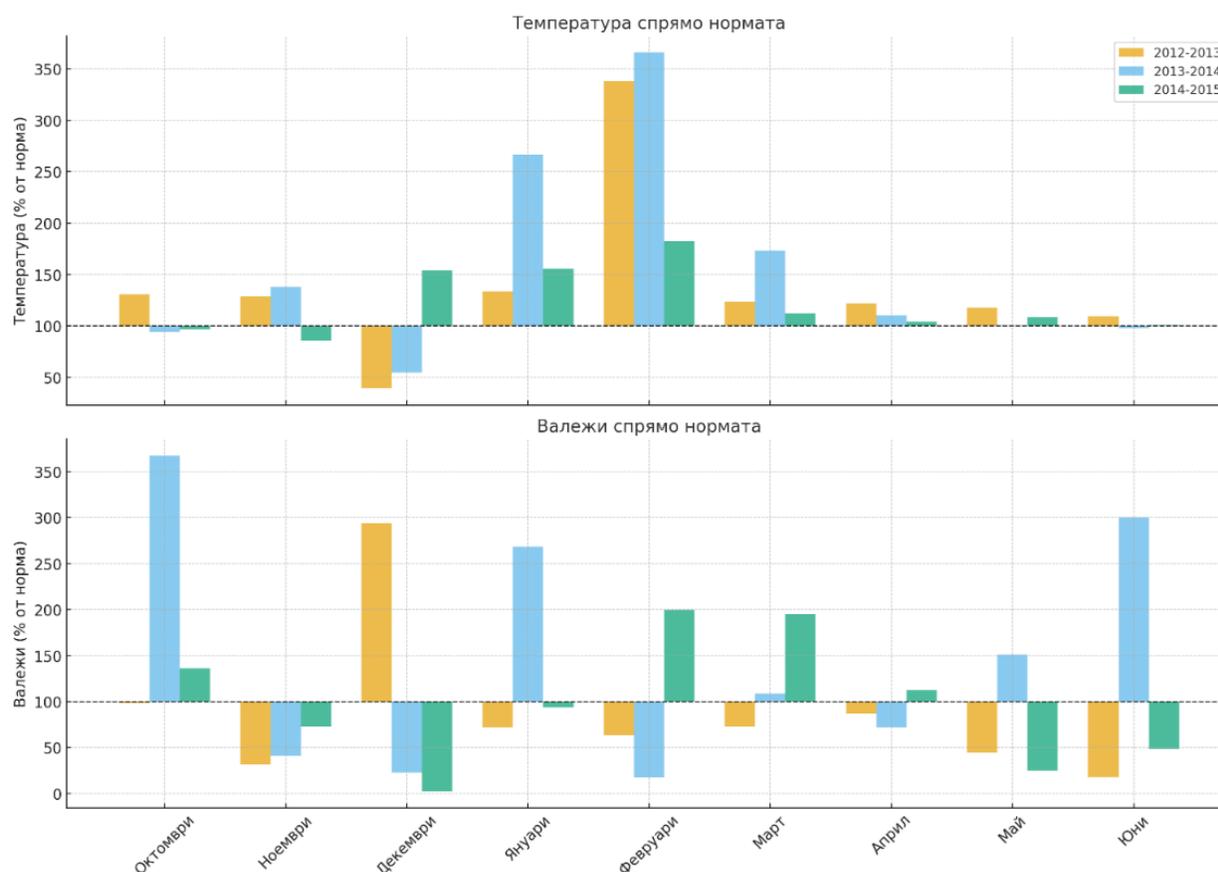
Средногодишната температура в района е около 11°C, съгласно климатичната норма на НИМХ (1991–2020) и международните климатични бази данни (World Bank

Climate Data, 2022). Средните минимални температури през януари варират около 0°C, докато през юли достигат 20.8–21.0°C. Летният температурен максимум съвпада с фазата на наливане на зърното, при която температури над физиологичния оптимум могат да ускорят стареенето на растенията и да редуцират масата на зърното. Устойчивостта на зимната пшеница към ниски температури зависи в значителна степен от степента на есенно закаляване и наличието на снежна покривка, като безснежните зими повишават риска от измръзване и повреди върху посевите (Nankova & Atanasov, 2024).

Валежният режим в района е един от основните лимитиращи фактори за продуктивността. Средногодишната сума на валежите е 500–550 mm, като по-важно значение има тяхното сезонно разпределение. Пролетните валежи (110–130 mm) обикновено осигуряват условия за братене и начало на вретене, но често се оказват недостатъчни за оптимално развитие на културата. Летните валежи (150–170 mm) се характеризират с висока вариабилност и неравномерно разпределение, като дефицитът на влага през периода април–юни е основна причина за рязко намаляване на добива, независимо от нивото на торене (Atanasov & Nankova, 2023). Септември традиционно е най-сухият месец, което влияе върху влагозапасяването преди сеитба.

### **Агрометеорологични условия по време на вегетацията на зимната пшеница**

Агрометеорологичните условия през трите години на изследването оказваха съществено влияние върху развитието и продуктивността на анализираниите генотипи зимна пшеница. Вегетациите 2012–2013, 2013–2014 и 2014–2015 се отличават с ясно изразени отклонения в температурния и валежния режим спрямо климатичната норма, като формираха естествен градиент от благоприятни до силно стресови условия. Процентните отклонения на основните метеорологични елементи спрямо многогодишната норма са представени на Фигура 1.



**Фигура 1.** Метеорологични елементи

Температурните аномалии са отчетливи най-вече през зимните месеци, когато и през трите години се регистрират стойности над климатичната норма. Повишените зимни температури имат двойствен ефект върху зимната пшеница, като от една страна намаляват риска от измръзване, а от друга нарушават процесите на закаляване и яровизация, критични за нормалното преминаване към репродуктивните фази (Wu et al., 2017). Необичайно топлите зимни и раннопролетни периоди ускоряват метаболитните процеси и скъсяват времето за натрупване на биомаса, което може да доведе до понижение на добива (Xu et al., 2024). Глобални оценки потвърждават, че повишение на средните температури с 1°C води до значимо редуциране на добива от пшеница, особено в региони с изразено климатично затопляне като Югоизточна Европа (Zhang et al., 2022).

Годината 2012–2013 се характеризира с относително благоприятен климатичен профил. Въпреки повишените температури, минималните стойности са достатъчно ниски за нормално протичане на яровизацията. Валежите през декември достигат 293.9% от нормата, което осигурява добър влагозапас в почвата и стимулира пълноценно братене. Комбинацията от умерени температури и

адекватна почвена влага в периода изкласяване–наливане създава условия за формиране на висок брой зърна на единица площ и стабилно наливане, което се отразява в най-високия среден добив за периода – 9.07 t ha<sup>-1</sup> (Atanasov & Nankova, 2023).

Вегетацията 2013–2014 се откроява като най-неблагоприятна. Още в началото на сезона валежите значително надвишават нормата (октомври – 367%), а през зимата се комбинират с аномално високи температури, достигащи до 365% над нормата през февруари. Тази комбинация от прекомерна влага и топлинен стрес води до удължен вегетативен растеж, повишен риск от полягане и засилена чувствителност към болести. Подобни ефекти са описани и в международни анализи, които показват, че високата влажност, съчетана с наднормени температури, ограничава фотосинтезата и редуцира броя на плодоносните цветчета (Asseng et al., 2015). Прекомерните валежи по време на наливането допълнително ограничават натрупването на асимилати и водят до силно намаляване на масата на зърното (Semenov & Stratonovitch, 2013). В резултат добивът през тази година е най-нисък – 5.50 t ha<sup>-1</sup>.

Климатичният профил през 2014–2015 представя междинен вариант на стресови условия. В началото на вегетацията валежите са силно под нормата (73% за ноември и 2.5% за декември), което води до значително редуцирана братимост и ограничен потенциал за формиране на висок брой продуктивни братя (Nankova & Atanasov, 2024). По-високите валежи през февруари и март (199% и 195%) частично компенсират ранния воден дефицит, но съчетанието с повишени температури ускорява развитието и скъсява периода за формиране на репродуктивните структури. В резултат се реализират междинни стойности на добива – 7.20 t ha<sup>-1</sup>.

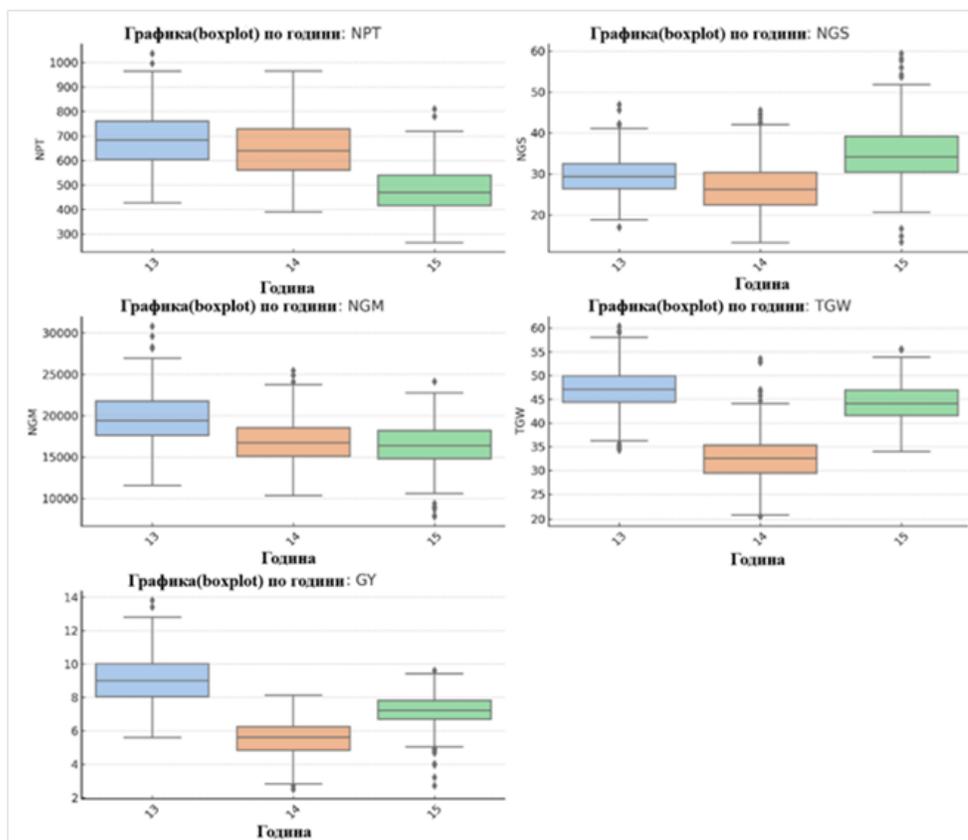
Анализът на трите години ясно показва, че температурните и валежните отклонения определят както темпото на фенологичното развитие, така и формирането на добивните компоненти. Повишените зимни температури влияят върху степента на закаляване, докато влаговият режим в ранните фази е ключов за формирането на броя на продуктивните братя, а условията по време на наливането на зърното са ключови за масата на зърното, един от най-чувствителните компоненти при климатичен стрес (Asseng et al., 2015; Zhang et al., 2022).

## **II. РЕЗУЛТАТИ И ОБСЪЖДАНЕ**

### **II.1. Дискриптивна статистика**

Първият етап на анализ включва описателна статистика и boxplot диаграми (Фигура 2), които визуализират изменчивостта на агрономическите признаци (NPT, NGS, NGM, TGW, GY) през трите изследвани сезона (2013–2015). Този подход е

широко използван за първична оценка на GEI взаимодействия, тъй като комбинира визуална и количествена интерпретация (Hongyu et al., 2014; Olivoto et al., 2019).



**Фигура 2.** Boxplot диаграми на варирането на агрономическите признаци (NPT, NGS, NGM, TGW, GY) по години (2013–2015)

През **2013 г.** се наблюдават най-високи стойности на GY, TGW и NGM при ниска вариация – показател за благоприятни условия и пълно проявление на генетичния потенциал (Стоянов & Байчев, 2021).

През **2014 г.** медианата на GY и TGW спада значително, а диапазонът на вариация се разширява, което отразява неблагоприятни климатични условия и големи различия в адаптивността (Sadras & Lawson, 2011; Dragov et al., 2024).

През **2015 г.** се отчита частично възстановяване, при което средните стойности на добива и масата на зърното се доближават до средното ниво за опита, но при по-широк диапазон на вариране, особено по отношение на NPT и NGS, което показва по-силно влияние на средата върху реакцията на отделните генотипи (Peltonen-Sainio et al., 2007).

**Таблица 2.** Описателна статистика на признаците по години и вариационен коефициент (CV)

Сезон	NPT (бр.)	NGS (бр.)	NGM (зърна m <sup>-2</sup> )	TGW (g 1000 зърна <sup>-1</sup> )	GY (t ha <sup>-1</sup> )
2012 –2013	691.22 (16.0%)	29.54 (16.4%)	19 731 (15.7%)	47.11 (9.6%)	<b>9.07 (16.1%)</b>

Сезон	NPT (бр.)	NGS (бр.)	NGM (зърна m <sup>-2</sup> )	TGW (g 1000 зърна <sup>-1</sup> )	GY (t ha <sup>-1</sup> )
<b>2013–2014</b>	648.83 (18.0%)	26.74 (22.0%)	16 883 (15.8%)	32.69 (15.5%)	<b>5.50 (18.8%)</b>
<b>2014–2015</b>	476.88 (18.6%)	35.22 (20.0%)	16 398 (15.7%)	44.23 (9.0%)	<b>7.21 (13.7%)</b>
<b>Средно за 3 г.</b>	605.64 (17.5%)	30.50 (19.5%)	17 671 (15.7%)	41.34 (11.3%)	<b>7.26 (16.2%)</b>

Таблица 2 представя средните стойности (Mean) и относителната изменчивост (CV) на основните агрономически признаци за трите изследвани сезона. Данните ясно показват сезонна динамика и различна степен на стабилност между признаците.

През 2012–2013 г. се наблюдават най-високи стойности на GY (9.07 t·ha<sup>-1</sup>), NGM (19 731 зърна m<sup>-2</sup>) и TGW (47.11 g) при ниска изменчивост (CV под 10% за TGW), като признак за благоприятни климатични условия и пълно проявление на генетичния потенциал.

През 2013–2014 г. добивът спада до 5.50 t·ha<sup>-1</sup>, а TGW – до 32.69 g, съпроводени с нарастване на вариацията (CV до 22% за NGS и 18.8% за GY). Това отразява по-силното влияние на неблагоприятните фактори и различията в адаптивността на генотипите.

През 2014–2015 г. се отчита частично възстановяване на GY (7.21 t·ha<sup>-1</sup>) и TGW (44.23 g), докато NPT и NGS показват най-висока чувствителност (CV над 18%), което е показател за силно изразено взаимодействие с условията на средата.

В обобщение, NGM и TGW се открояват като най-стабилни показатели, докато NPT и NGS варират по-силно, отразявайки реакцията на генотипите към климатичните колебания, като закономерност, която потвърждава компенсаторната връзка между броя и масата на зърната (Sadras & Lawson, 2011).

## II.2. Оценка на влиянието на средата, генотипа и тяхното взаимодействие върху добива и неговите елементи

Разбирането на относителния принос на генотипа (G), средата (E) и тяхното взаимодействие (GEI) е ключово за селекцията на стабилни сортове пшеница. В условия на климатични колебания взаимодействието GEI често доминира над генетичния ефект, определяйки междугодишните различия в продуктивността (Yan & Kang, 2002; Crossa et al., 2021).

Таблица 3 обобщава резултатите от AMMI анализа, показвайки, че средата (ENV) има водещо значение при TGW (66.3%) и GY (68.6%), докато генетичният принос е по-силен при NGS (27.7%) и NGM (25.4%). Това потвърждава, че условията на отглеждане са основният източник на вариация за добива, докато броят на зърната е по-силно унаследим белег.

Таблица 3. AMMI анализ върху добива и основните му компоненти (TSS%)

Признак	ENV	GEN	GEI
NPT	43.4	18.8	12.8

Признак	ENV	GEN	GEI
NGS	25.8	27.7	16.4
TGW	<b>66.3</b>	6.7	16.7
NGM	21.8	25.4	<b>29.4</b>
GY	<b>68.6</b>	13.2	18.2

Климатичните фактори имат решаваща роля за формирането на добива и неговите компоненти. TGW и GY се влияят най-силно от температурите и валежите в последните етапи на вегетацията (Calderini & Reynolds, 2000), докато NGS и NGM показват по-голяма генетична устойчивост и линейна реакция спрямо средата (Araus et al., 2008).

Особено показателен е случаят с NGM, който съчетава висок генетичен принос и значително взаимодействие GEI – доказателство, че този показател интегрира както потенциала на генотипа, така и неговата адаптация. Подобно, Fischer (2011) определя NGM като основен определящ фактор за добива и надежден прогностичен показател при наличие на силно взаимодействие генотип × среда (GEI).

В заключение, резултатите от AMMI и PCA анализа потвърждават, че климатичните условия доминират над генетичните, но GEI взаимодействието има съществен принос за адаптивността. Това определя NGM като най-информативния индикатор за устойчив добив и основен елемент при следващите етапи на анализа.

### II.3. Анализ на взаимовръзките между признаците и ефекта им върху продуктивността

Анализите чрез SEM, LMM и Random Forests (RF) целят да определят директните и индиректните ефекти върху добива от зърно (GY), чувствителността на генотипите към средата и относителната значимост на изследваните признаци. RF резултатите (Табл. 4) показват, че NGM (брой зърна на m<sup>2</sup>) и TGW (маса на 1000 зърна) са водещите обяснителни фактори за вариацията в добива: високите им MDI и MDA потвърждават роля както за вътрешната структура (Gini), така и за прогностичната точност. Обратно, NPT и NGS имат пренебрежим принос (ниски MDI/MDA), като ефектите им са главно косвени чрез NGM и се компенсират във взаимодействие с TGW. В практичен план това означава, че управлението на NGM и поддържането на задоволително ниво на TGW са най-ефективните лостове за повишаване и стабилизиране на GY (Breiman, 2001).

**Таблица 4.** Подреждане на признаци по важност спрямо добива зърно (Random Forests)

Признак	MDI (Gini)	MDA (perm $\Delta$ RMSE)
NGM	0.4626	0.9105
TGW	0.5322	0.9029
NGS	0.0028	0.0009
NPT	0.0024	0.0002

NGM – брой зърна на квадратен метър; TGW – маса на 1000 зърна; NGS – брой зърна на клас; NPT – брой продуктивни братя; MDI – средно намаляване на нееднородността (Mean Decrease in Impurity (Gini, 1912)); MDA – средно намаляване на точността (Mean Decrease Accuracy), изчислено чрез пермутационен подход;  $\Delta$ RMSE – промяна в корена на средната квадратична грешка.

*Random Forests* – ансамблов алгоритъм за машинно обучение, базиран на множество дървовидни модели за вземане на решения (Breiman, 2001).

Резултатите от смесения линейния модел (LMM), представени в Таблица 5, потвърждават констатациите от Random Forests и показват, че NGM (брой зърна на  $m^2$ ) има най-силно положително влияние върху добива. Коефициентът ( $\beta = 0.0004$ ,  $p < 0.0001$ ) показва, че увеличението с 1000 зърна· $m^{-2}$  повишава добива с около 0.4  $t \cdot ha^{-1}$ , което при реалния диапазон (8000–30 000 зърна· $m^{-2}$ ) обяснява значителна част от вариацията (Slafer et al., 2014).

TGW също има значим ефект ( $\beta = 0.16$ ,  $p < 0.0001$ ), но поради по-тесен диапазон (20–60 g) приносът му е по-ограничен и предимно компенсаторен. За разлика от тях NPT ( $\beta = -0.0005$ ) и NGS ( $\beta = -0.0135$ ) показват отрицателни зависимости с GY, вероятно като резултат от вътрешна компенсация, при която прекомерното братене или твърде голям брой зърна в класа водят до намаляване на масата на зърното и крайния добив (Sadras & Lawson, 2011).

**Таблица 5:** Оценка на ефектите на признаците за продуктивност върху добива (LMM модел)

Признак	коефициент $\beta$	Ст. грешка	t-стойност	p-стойност
NPT	-0.0005	0.0002	-2.32	0.0202
NGS	-0.0135	0.0039	-3.48	0.0005
NGM	0.0004	0.0000	60.14	0.0000
TGW	0.16	0.0017	91.98	0.0000

LMM – смесен линеен модел (*Linear Mixed Model*); средата (ENV) е моделирана като случаен ефект; NPT – брой продуктивни братя; NGS – брой зърна на клас; NGM – брой зърна на квадратен метър; TGW – маса на 1000 зърна;  $\beta$  – фиксиран регресионен коефициент; t – t-статистика; p – ниво на статистическа значимост.

Когато се сравнят резултатите от Random Forests (RF) и линейния смесен модел (LMM), се наблюдава висока степен на съгласуваност при идентифицирането на основните признаци, свързани с добива (GY), но и методологични различия в тяхната интерпретация. И двата модела независимо определят NGM (брой зърна· $m^{-2}$ ) и TGW (маса на 1000 зърна) като основни фактори за формиране на добива, което потвърждава тяхната значимост (Slafer et al., 2014; Jeong et al., 2016). При RF това се доказва чрез високите стойности на MDI и MDA (Breiman, 2001), а при LMM, чрез статистически значимите  $\beta$ -коефициенти (Piepho et al., 2008).

Различията между двата подхода са най-силно изразени при NGS и NPT. RF отчита тези признаци като маловажни за прогнозата, докато LMM показва отрицателен ефект, особено при NGS, който е статистически значим. Това несъответствие се дължи на различната природа на моделите, като RF улавя нелинейни зависимости и взаимодействия, но не предоставя параметрични оценки (Cutler et al., 2007), докато LMM осигурява линейни количествени оценки, контролирайки ефекта на средата (Smith et al., 2005).

В заключение, RF е по-подходящ за подреждане на признаци по важност и оценка на прогностичната точност, докато LMM предоставя статистически интерпретируеми резултати. Комбинираното им прилагане обединява предимствата на двата подхода, като гарантира едновременно надеждна прогноза и обоснована биологична интерпретация – важно условие за ефективна селекция при зимна пшеница (Olivoto & Nardino, 2021).

След определяне на основните признаци с пряк ефект върху добива беше приложен структурно-уравнителен модел (SEM), за да се изследват и косвените влияния на компонентите на продуктивността. Моделът включва NGM и TGW като преки фактори и NPT и NGS като косвени, при GY като зависима променлива.

Резултатите (Таблица 6) показват, че NGM ( $\beta = 0.726$ ) и TGW ( $\beta = 0.719$ ) имат най-силен пряк ефект върху добива, докато NGS ( $\beta = 0.331$ ) и NPT ( $\beta = 0.212$ ) проявяват умерено, но статистически значимо влияние ( $p < 0.001$ ). Установени са и вътрешни връзки между признаците: NPT влияе отрицателно на NGS ( $\beta = -0.684$ ), но положително на NGM ( $\beta = 0.450$ ), което потвърждава компенсаторната динамика между елементите на добива.

**Таблица 6:** Стандартизирани SEM коефициенти между всички елементи и добива

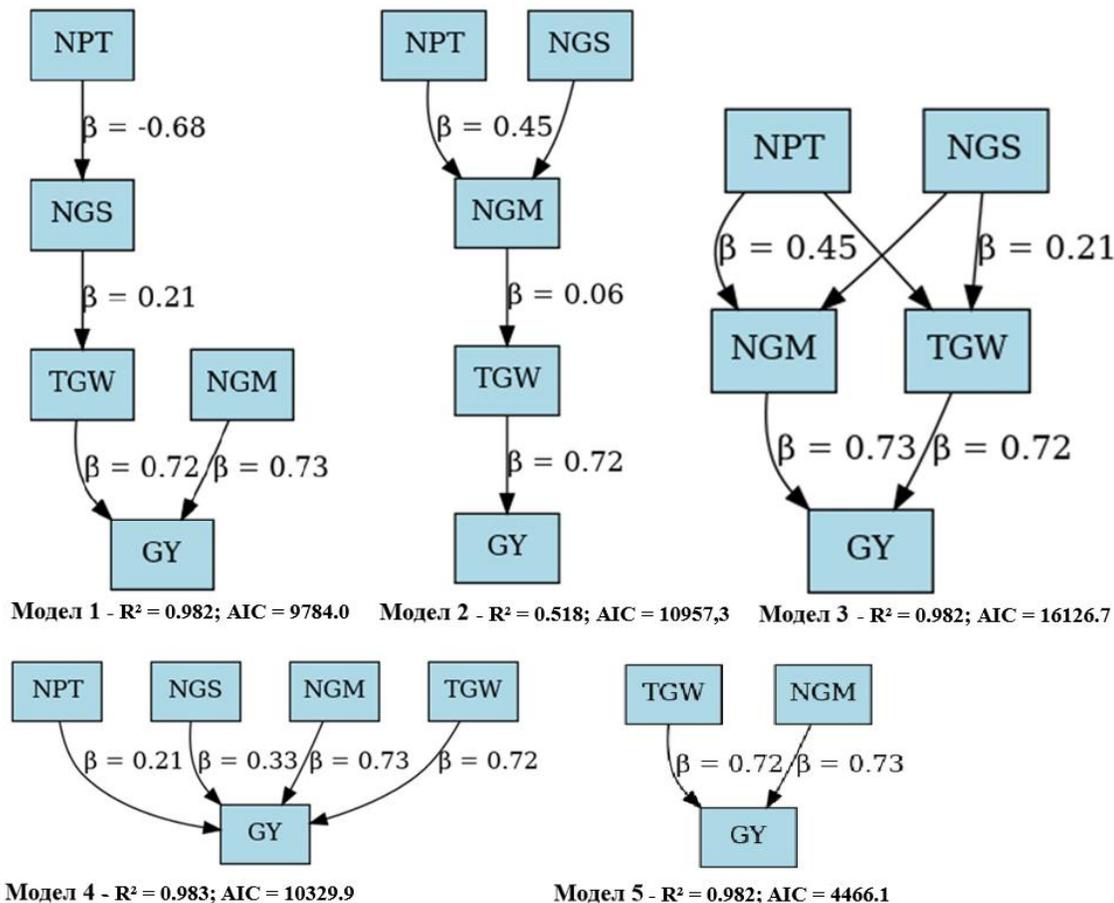
Път	Стандартизиран коефициент ( $\beta$ )	p-стойност
NGM между NPT	0.450	0.0000
NGM между NGS	0.293	0.0000
NGM между TGW	0.063	0.0390
NGM между GY	0.726	0.0000
TGW между NPT	-0.155	0.0000
TGW между NGS	0.213	0.0000
TGW между GY	0.719	0.0000
NPT между GY	0.212	0.0000
NPT между NGS	-0.684	0.0000
NGS между GY	0.331	0.0000

*SEM – структурно-уравнителен модел (Structural Equation Modeling); NGM – брой зърна на квадратен метър; TGW – маса на 1000 зърна; NPT – брой продуктивни братя; NGS – брой зърна на клас; GY – добив от зърно;  $\beta$  – стандартизиран коефициент; p – ниво на статистическа значимост.*

SEM потвърждава изводите от LMM и RF, като показва, че NGM и TGW са централни в структурата на добива, докато NPT и NGS имат второстепенни и компенсаторни ефекти.

От петте тествани модела (Фигура 4) най-ефективен е Модел 5, който включва само NGM и TGW – обяснява 98.2% от вариацията в добива при най-ниска стойност на AIC, което го прави статистически оптимален и биологично интерпретируем вариант за селекционни приложения (Grace, 2006). Изключването на NPT и NGS от структурното уравнение опростява модела, но ограничава биологичната му интерпретация, тъй като елиминира връзките между отделните елементи на продуктивността. По-сложните SEM конфигурации разкриват тези взаимовръзки, като  $R^2$  и AIC отразяват тяхната приложимост. Модел 5, съдържащ само NGM и TGW, е най-икономичен ( $R^2 = 0.982$ , AIC = 9720), но минималистичен по биологичен смисъл.

Модел 4 включва всички признаци като директни детерминанти на добива и показва висока точност ( $R^2 = 0.983$ ), но и по-висок риск от преобучаване (AIC = 10 329). Най-слаб е Модел 2 ( $R^2 = 0.518$ , AIC = 10 957), който няма практическа стойност за селекция.



**Фигура 3.** Структурни уравнителни модели (SEM) за обяснение на добива от зърно (GY)

Фигура 3 представя пет SEM конфигурации за обяснение на добива (GY). Основният фокус е върху Модел 1 и Модел 3, които имат сходна точност ( $R^2 = 0.982$ ), но се различават по структурна сложност. Модел 3 съдържа паралелни и косвени пътища между всички признаци, отразявайки биологичната комплексност, но с по-висок AIC (16 126). Модел 1, напротив, е по-интерпретируем и икономичен (AIC = 9784), като запазва почти същата прогностична сила.

Следователно Модел 1 е подходящ при търсене на яснота и минимализъм, а Модел 3, при нужда от по-пълно структуриране на зависимостите. Подобен подход съответства на практиките в SEM анализа, при които се търси баланс между статистическа точност и биологична достоверност (Grace et al., 2010; Shipley, 2016).

Фокусът на анализа е върху Модел 1 и Модел 3, които имат сходна точност ( $R^2 = 0.982$ ), но се различават по структурна сложност. Модел 3 включва паралелни и косвени връзки между NGM, TGW, NGS и NPT, отразявайки по-пълно биологичната структура на добива, но с по-висок AIC (16 126). Модел 1 е по-икономичен и интерпретируем, като запазва същата прогностична сила при по-ниска сложност (AIC = 9784).

Следователно моделите трябва да се разглеждат като взаимнодопълващи се. Модел 1 е предпочитан за ясна и приложна интерпретация, а Модел 3 когато

акцентът е върху комплексността (Grace et al., 2010; Shipley, 2016). Разликите между моделите бяха проверени чрез Likelihood Ratio Test (LRT), като резултатите (Таблица 7) показват, че Модел 1 и Модел 3 превъзхождат по-простия Модел 5 при ниво на значимост  $p < 0.001$ , докато помежду си не се различават статистически значимо, което потвърждава тяхната еквивалентна структурна адекватност.

**Таблица 7:** Сравнение на SEM модели чрез тест за коефициент на вероятност (LRT)

Сравнение	LR $\chi^2$	df	p-стойност
Модел 1 vs. Модел 5	16.57	2.0	0.0003
Модел 3 vs. Модел 5	16.57	2.0	0.0003
Модел 3 vs. Модел 1	0.0	0.0	-

*SEM – структурно-уравнителен модел; LRT – тест за коефициент на вероятност (Likelihood Ratio Test); LR  $\chi^2$  – стойност на  $\chi^2$  от LRT; df – степени на свобода; p – ниво на статистическа значимост.*

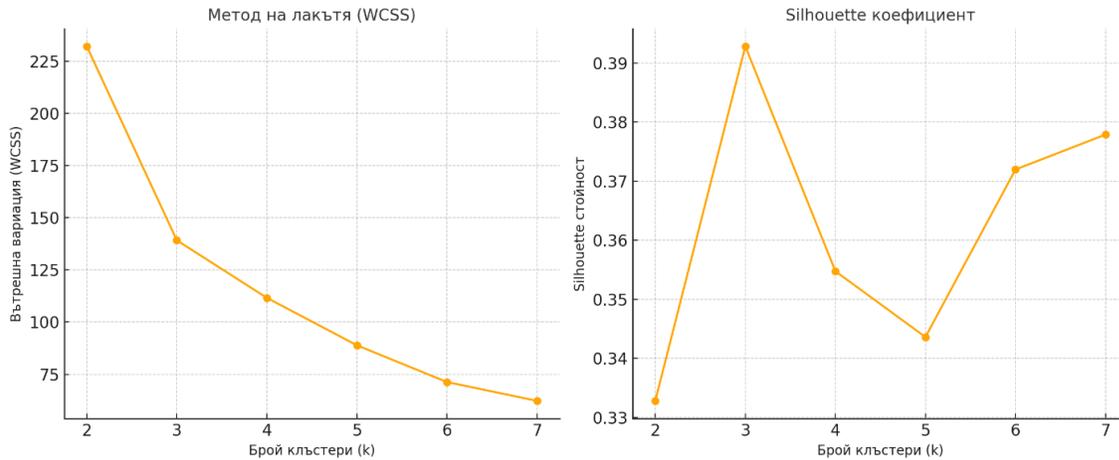
В обобщение, Модел 1 е оптимален от гледна точка на икономия на параметри, докато Модел 3 предлага по-биологично пълна картина. И двата потвърждават, че NGM е водещ фактор за добива, TGW има вторичен, но стабилен принос, а NPT и NGS действат чрез косвени компенсаторни механизми.

На тази основа се очертават няколко тенденции. Модел 5 е най-икономичен – с включването само на NGM и TGW обяснява над 98% от вариацията в добива ( $R^2 = 0.982$ ) и има най-нисък AIC, но е ограничен по биологична интерпретация. Модел 4, включващ всички променливи, е по-точен ( $R^2 = 0.983$ ), но и по-рисков за преобучаване поради високите AIC стойности, докато Модел 2 отпада като най-слаб.

Основният акцент остава върху Модел 1 и Модел 3. Първият е по-икономичен и статистически ефективен, а вторият – по-детайлен, отразяващ реалната биологична структура и баланса между признаците (Olivoto et al., 2019; Pour-Aboughadareh et al., 2025). Следователно, Модел 1 е предпочитан при нужда от яснота и минимализъм, докато Модел 3 е по-подходящ за анализ на комплексните зависимости (Grace et al., 2010; Shipley, 2016).

## II.4. Клъстерен анализ

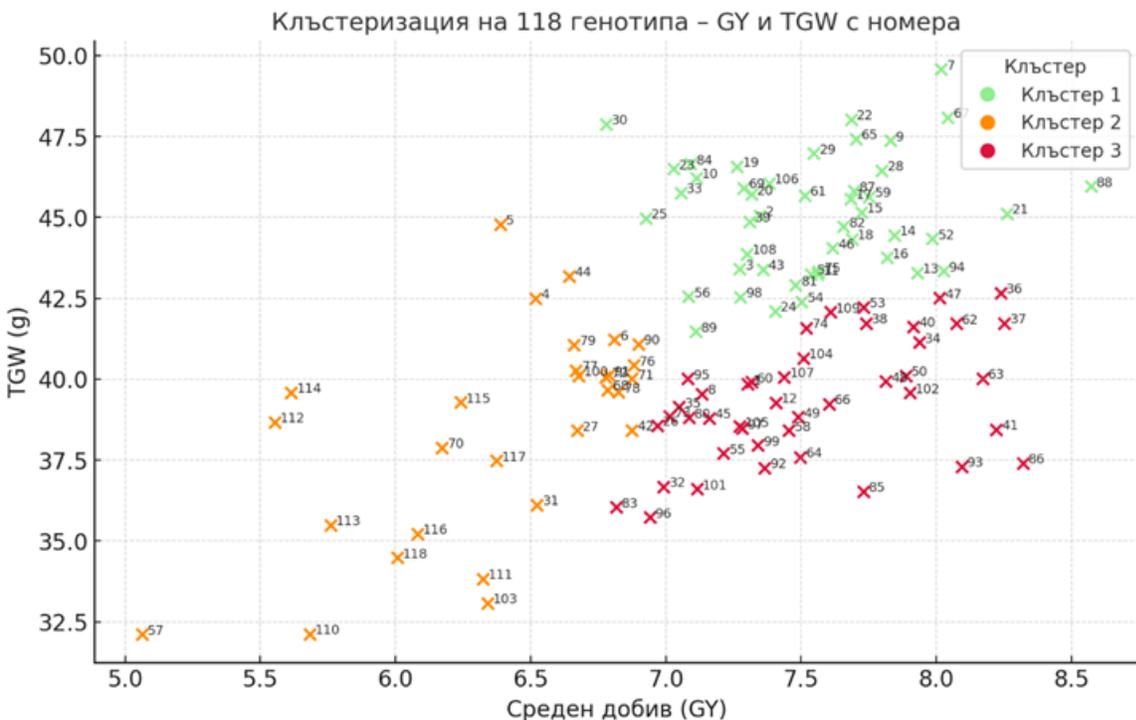
След като бяха установени основните фактори, определящи добива, беше приложен многомерният подход K-means върху стандартизирани стойности на GY, NGM и TGW. Целта беше да се обособят групи генотипове със сходна реакция спрямо средата. Оптималният брой клъстери бе определен чрез Elbow и Silhouette методите (Kaufman & Rousseeuw, 2009; Rousseeuw, 1987). Както се вижда на Фигура 4, и двата подхода показаха, че при  $k = 3$  се постига баланс между вътрешна хомогенност и разделимост (Silhouette = 0.393). По-високите стойности на k водят до незначително повишаване на точността, но затрудняват интерпретацията на резултатите (Everitt et al., 2011).



**Фигура 4.** Определяне на броя клъстери чрез Elbow и Silhouette методи ( $k = 2-7$ )

На тази основа  $k = 3$  се приема като оптимално за последваща класификация на генотипите. Това гарантира ясно разделяне и добра интерпретация в контекста на добива и продуктивните елементи. Фигура 5 представя разпределението на 118-те генотипа в двумерното пространство на средния добив (GY) и масата на 1000 зърна (TGW), като ясно визуализира трите клъстера, получени чрез k-means класификация. Пространственото разположение на точките показва, че групирането не е случайно, а отразява различни стратегии за формиране на продуктивността.

Клъстер 1 е разположен в горната част на графиката и се характеризира с високи стойности на TGW при средни до високи нива на добив, което показва, че продуктивността при тези генотипи се реализира основно чрез по-едро зърно. Този профил е типичен за селекционни форми, ориентирани към стабилност на едрината и потенциал за качество.



**Фигура 5.** Биплот на клъстерите в пространството на GY и TGW

Клъстер 2 заема ляво-долната част на пространството и се отличава с по-ниски стойности както на добива, така и на TGW, съпроводени с по-голяма вариабилност. Това предполага по-слаба продуктивна реализация и по-висока чувствителност към условията на средата.

Клъстер 3 е концентриран в дясната част на графиката и се характеризира с високи стойности на добива при умерена маса на зърното, което показва, че при тези генотипи продуктивността се формира предимно чрез други компоненти, най-вероятно свързани с броя на зърната на единица площ.

Като цяло, фигурата ясно показва, че сходни нива на добив могат да бъдат постигнати чрез различни комбинации между GY и TGW, което потвърждава компенсаторния характер на добивните компоненти и обосновава приложението на клъстерни и многомерни подходи в селекционната оценка

**Таблица 8.** Средни стойности и стандартни отклонения за трите клъстера.

Клъстер	Брой генотипи	Среден добив (t·ha <sup>-1</sup> )	GY, Std	TGW, Средно	TGW, Std	NGM Средно	NGM, Std
K1	46	7.54 <sup>a</sup>	0.36	45.04 <sup>d</sup>	1.82	16816 <sup>f</sup>	939
K2	29	6.40 <sup>b</sup>	0.48	38.49 <sup>c</sup>	3.25	16642 <sup>f</sup>	1153
K3	43	7.54 <sup>a</sup>	0.42	39.32 <sup>c</sup>	1.85	19279 <sup>e</sup>	1020

GY – добив от зърно (Grain Yield); Std – стандартно отклонение; TGW – маса на 1000 зърна (Thousand Grain Weight); NGM – брой зърна на квадратен метър. (a, b, c, d, e, f) - различия между средните стойности на клъстерите съгласно пост-хос теста на Tukey HSD при ниво на значимост  $p < 0.05$ .

Данните, представени в Таблица 8, показват ясно изразени и статистически значими различия между трите клъстера по отношение на основните компоненти на продуктивността. Това потвърждава, че приложената *k*-means класификация е успяла да разграничи генотипите в хомогенни групи със специфични селекционни профили.

Клъстер К1, включващ най-голям брой генотипи (46), се характеризира със сравнително висок среден добив ( $7.54 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), съпоставим с този на К3, но отчетливо най-висока маса на 1000 зърна ( $\text{TGW} = 45.04 \text{ g}$ ). Статистически значимите различия по *TGW* спрямо останалите клъстери показват, че продуктивността при тези генотипи се формира основно чрез по-едро зърно, при относително по-нисък брой зърна на единица площ ( $\text{NGM} = 16\ 816 \text{ зърна m}^{-2}$ ). Този профил е типичен за генотипи с по-силен компенсаторен механизъм, при който по-ниската плодовитост се компенсира от по-голяма маса на зърното.

Клъстер К2 обхваща 29 генотипа и се отличава с най-нисък среден добив ( $6.40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), както и с най-ниски стойности на *TGW* ( $38.49 \text{ g}$ ). Въпреки че *NGM* при този клъстер не се различава статистически от К1, по-ниската маса на зърното води до значимо редуцирана продуктивност. По-високите стандартни отклонения при *TGW* и *GY* показват и по-голяма вътрешна вариабилност, което предполага по-силна чувствителност на тези генотипи към условията на средата. В селекционен аспект този клъстер представя група с ограничен добивен потенциал, но с възможна приложимост при специфични цели, свързани с качество или адаптация.

Клъстер К3 включва 43 генотипа и се характеризира със среден добив, идентичен с този на К1 ( $7.54 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), но постигнат чрез коренно различен механизъм. Тук се отчита най-високият брой зърна на квадратен метър ( $\text{NGM} = 19\ 279 \text{ зърна m}^{-2}$ ), статистически значимо по-висок спрямо К1 и К2, при умерени стойности на *TGW* ( $39.32 \text{ g}$ ). Това ясно показва, че при този клъстер продуктивността се основава предимно на формирането на голям брой зърна, а не на тяхната маса. Този профил е типичен за генотипи с висока продуктивна братимост и плодовитост, които обаче могат да бъдат по-чувствителни към воден и хранителен стрес в критичните фази на развитие.

## II.5. Оценка на стабилността и продуктивността на генотипите

Стабилността и продуктивността са основни критерии при оценка на генотипи в многогодишни опити, тъй като значителните GEI взаимодействия могат да прикрият реалното превъзходство по добив и да променят подреждането между години и среди (Annicchiarico, 2002; Pour-Aboughadareh et al., 2025). Съвременните подходи препоръчват комбиниране на среден добив и стабилност чрез индекси, базирани на BLUP или AMMI разложения (Olivoto et al., 2019), за да се избегне изборът на високодобивни, но нестабилни генотипи.

Средният добив служи като базов показател за оценка на продуктивността и основа за сравнение с индексите за стабилност. По-високите стойности отразяват по-добра адаптивност и консистентност на резултатите в различни среди.

Както е показано в Таблица 9, сорт Midas има най-висок среден добив ( $8.57 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) за периода 2013–2015 г., следван от Azimut ( $8.32 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) и Находка ( $8.26 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). Водещите десет генотипа демонстрират значително по-високи добиви от средните, което ги определя като потенциални донори на стабилна продуктивност.

Този резултат служи като референтна база за последващия анализ на индекси свързани със стабилността и за изчисляване на корелациите между ранговете по Спийрман.

**Таблица 9.** Водещи 10 генотипа според средния добив (2013–2015 г.)

Номер	Генотип	Добив, 2013 (t·ha <sup>-1</sup> )	Добив, 2014 (t·ha <sup>-1</sup> )	Добив, 2015 (t·ha <sup>-1</sup> )	Среден добив (t·ha <sup>-1</sup> )	Ранг
88	Midas	11.00	6.54	8.18	8.57	1
86	Azimut	10.53	6.69	7.74	8.32	2
21	Находка	11.38	5.14	8.26	8.26	3
37	PKB Rodika	11.53	6.35	6.87	8.25	4
36	PKB Vizelka	11.80	6.25	6.66	8.24	5
41	Kantata	10.47	6.38	7.81	8.22	6
63	Гром	9.93	6.86	7.72	8.17	7
93	Csillag	10.80	6.06	7.42	8.09	8
62	Нота	9.67	6.64	7.91	8.07	9
67	Лут 601-09	9.38	6.27	8.48	8.04	10

### BLUP анализ

Таблица 10 представя водещите генотипи по BLUP прогноза, като Midas (8.291 t·ha<sup>-1</sup>), Azimut (8.092 t·ha<sup>-1</sup>), Находка (8.046 t·ha<sup>-1</sup>), PKB Rodika (8.039 t·ha<sup>-1</sup>) и PKB Vizelka (8.028 t·ha<sup>-1</sup>) заемат челни позиции. Всички показват положителни BLUP ефекти спрямо средната, което потвърждава стабилен генетичен принос (напр. Midas +1.035 t·ha<sup>-1</sup>, Azimut +0.836 t·ha<sup>-1</sup>).

**Таблица 10.** BLUP оценка на водещите 10 генотипа

Номер	Генотип	BLUP ефект, t·ha <sup>-1</sup>	BLUP средна прогноза, t·ha <sup>-1</sup>	BLUP 2013 (t·ha <sup>-1</sup> )	BLUP 2014 (t·ha <sup>-1</sup> )	BLUP 2015 (t·ha <sup>-1</sup> )	Амплитуда на BLUP (t·ha <sup>-1</sup> )
88	Midas	1.035	8.291	10.585	6.317	7.97	4.268
86	Azimut	0.836	8.092	10.219	6.433	7.625	3.786
21	Находка	0.790	8.046	10.88	5.223	8.034	5.657
37	PKB Rodika	0.783	8.039	11.002	6.168	6.946	4.834
36	PKB Vizelka	0.772	8.028	11.211	6.092	6.782	5.119
41	Kantata	0.759	8.015	10.17	6.193	7.682	3.977
63	Grom	0.719	7.975	9.748	6.565	7.613	3.183
93	Csillag	0.659	7.915	10.427	5.942	7.377	4.485
62	Нота	0.642	7.898	9.539	6.394	7.762	3.145
67	Лут 601-09	0.618	7.875	9.311	6.103	8.209	3.208

Амплитудата на BLUP различава два основни профила. Първият включва генотипи с висок среден добив и умерена амплитуда – *Нота*, *Grom*, *Лут 601-09* и *Azimut*, характеризиращи се с предсказуемо поведение и добра адаптивност. Вторият профил – *Находка*, *PKB Vizelka*, *PKB Rodika* – показва висока

чувствителност към средата, което вероятно ще редуцира позицията им в стабилностните индекси WAASB/WAASBY.

В заключение, BLUP прогнозите осигуряват коригирана база за оценка на генетичния потенциал по добив, а в комбинация с индексите за стабилност представляват надежден инструмент за балансиран селекционен избор.

### WAASB индекс

WAASB (Weighted Average of Absolute Scores from the BLUP matrix), предложен от Olivoto et al. (2019), представлява усъвършенстван метод за оценка на стабилността на генотипите, който интегрира информация за взаимодействието генотип × среда (GEI) и BLUP оценки в рамка REML/BLUP. За разлика от класическите AMMI модели, този подход отчита едновременно фиксирани и случайни ефекти, което осигурява по-обективна и статистически устойчива оценка на стабилността, особено при многогодишни и потенциално небалансирани данни. По-ниските стойности на WAASB отразяват по-висока стабилност на генотипите, тъй като показват минимални абсолютни стойности на IPCA компонентите и ограничена чувствителност към промените в средата. Резултатите от прилагането на индекса WAASB са представени в Таблица 11, където са подредени десетте най-стабилни генотипа въз основа на тяхната средна продуктивност и стойности на стабилност. Най-ниска стойност на WAASB показва генотипът Bohemia (0.031), който съчетава висока средна продуктивност ( $8.03 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) с минимална вариация между средите, което го определя като най-стабилен в изследването. Следващите позиции заемат Славен, Творец, Киара и Яница, всички с WAASB под 0.06 и със средни добиви над  $7.5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ , което ги характеризира като генотипи с балансирано съчетание между стабилност и продуктивност.

**Таблица 11.** Водещи 10 най-стабилни генотипа според WAASB

Номер	Генотип	Среден добив ( $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ )	WAASB	Ранг
94	Bohemia	8.03	0.031	1
33	Славен	7.06	0.039	2
61	Tvoretz	7.51	0.042	3
9	Киара	7.83	0.047	4
25	Ники	6.93	0.056	5
20	Катаржина	7.32	0.057	6
17	Яница	7.68	0.059	7
66	Мирлена	7.60	0.065	8
2	Пряспа	7.35	0.073	9
67	Лут 601-09	8.04	0.075	10

В същото време генотипът Лут 601-09, въпреки по-високата си стойност на WAASB (0.075), се отличава с най-висок среден добив в групата ( $8.04 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), което показва, че висока продуктивност може да бъде постигната и при умерено по-ниска стабилност. Това допълнително подчертава селекционния компромис между максимален добив и устойчивост към вариациите на средата. Получените резултати потвърждават приложимостта на WAASB като надежден инструмент за оценка на стабилността в многосредови изпитвания и неговата практическа

стойност при идентифициране на перспективни генотипи при зърнено-житни култури (Olivoto & Lúcio, 2020; Pour-Aboughadareh et al., 2022).

### WAASBY индекс

WAASBY (Weighted Average of Absolute Scores Based on Yield) представлява интегрален селекционен индекс, който съчетава информацията за стабилността на генотипите, измерена чрез WAASB, и тяхната средна продуктивност, оценена чрез BLUP, в единен показател с предварително зададени тегла (Olivoto et al., 2019). Основното предимство на този индекс е възможността селекционните приоритети да бъдат насочвани чрез промяна на относителната тежест на стабилността и добива, което го прави особено подходящ за практическа селекция в условия на климатична и агроекологична вариабилност.

В Таблица 12 са представени водещите 10 генотипа при два сценария на селекционна тежест: 50:50, при който стабилността и продуктивността имат равна значимост, и 65:35, при който е поставен по-силен акцент върху добива. Този сравнителен подход позволява да се оцени доколко класирането на генотипите е устойчиво спрямо промяна в приоритетите на стратегията.

**Таблица 12.** Стойности на WAASBY индекс за водещите 10 генотипа

Номер	Генотип	Среден добив (t·ha <sup>-1</sup> )	WAASBY 50:50	WAASBY 65:35	Ранг WAASBY 50:50	Ранг WAASBY 65:35
62	Нота	8.07	0.860	0.859	4	3
67	Лут 601-09	8.04	0.886	0.875	2	2
94	Bohemia	8.03	0.922	0.899	1	1
40	Sonata	7.91	0.841	0.832	6	7
9	Киара	7.83	0.881	0.853	3	5
22	Красен	7.69	0.820	0.798	10	14
17	Яница	7.68	0.849	0.818	5	10
109	Mv Aprod	7.61	0.820	0.792	9	19
66	Мирлена	7.60	0.832	0.800	8	13
61	Tvorets	7.51	0.840	0.797	7	15

Генотипът Bohemia заема водеща позиция при двата сценария, комбинирайки висок добив (8.03 t·ha<sup>-1</sup>) и висока стабилност. Следват Лут 601-09 и Нота, които също показват добър баланс и минимална промяна между вариантите. Българските генотипи Киара, Яница и Красен също попадат сред водещите позиции, демонстрирайки потенциала на местната селекция.

Наблюдаваните размествания при промяна на тежестите (например Tvorets от 7-мо до 15-то място) показват чувствителността на WAASBY към приоритетите на селекцията и подчертават нуждата от внимателно балансиране между добив и стабилност в зависимост от агроекологичните цели.

### YSI индекс

Индексът на стабилност на добива (YSI), предложен от Bouslama & Schapaugh (1984), измерва толерантността на генотипите към стрес, като оценява способността им да поддържат продуктивност при неблагоприятни условия. В изследването индексът е изчислен (таблица 13) чрез съотношението между добива през 2014 г. (стресова среда) и 2013 г. (благоприятна среда), което позволява да се оцени тяхната реакция спрямо контрастните условия на средата. Индексът по този начин акцентира върху относителната стабилност на генотипите, а не върху абсолютните стойности на добива. Това позволява да се идентифицират генотипи, които проявяват по-слаба редуция на продуктивността при стрес, дори когато не са сред най-високодобивните в благоприятни условия. Подобен подход е особено ценен при оценка на адаптивността в години с изразени климатични ограничения и допринася за по-обективна интерпретация на реакцията генотип × среда.

**Таблица 13.** Водещи 10 генотипа според YSI

Номер	Генотип	Добив, 2013 (t·ha <sup>-1</sup> )	Добив, 2014 (t·ha <sup>-1</sup> )	Добив, 2015 (t·ha <sup>-1</sup> )	YSI	Ранг
44	Lilyana	6.91	6.29	6.74	0.910	1
83	Авантаж	7.32	6.64	6.48	0.907	2
57	Юнона	6.16	5.46	3.57	0.886	3
55	Таня	7.87	6.7	7.07	0.851	4
65	Jumna	8.93	7.54	6.64	0.844	5
48	Litera	9.27	7.54	6.62	0.813	6
45	F02065G2-204	7.88	6.36	7.23	0.807	7
82	Лиман	8.62	6.9	7.45	0.800	8
58	Есаул	8.06	6.42	7.88	0.797	9
84	Арпач	7.33	5.82	8.12	0.794	10

*YSI – индекс за стабилност на добива (Yield Stability Index), изчислен като съотношение между добива в стресова среда (2014) и продуктивната (2013) година.*

Най-високи стойности на YSI показват Lilyana (0.910), Авантаж (0.907) и Юнона (0.886), като сортове с доказана адаптивност при стресови условия. Повечето от тях произхождат от Румъния, Молдова и Южна Украйна, което потвърждава ролята на географския произход за устойчивостта към стрес. Индексът YSI се потвърждава като ефективен инструмент за първична оценка на устойчивост, особено когато се комбинира с други интегрални показатели като STI и GMP, които осигуряват по-пълна оценка на селекционния потенциал (Farshadfar et al., 2012; Mohi-Ud-Din et al., 2025).

### **Индекс на превъзходство (P<sub>i</sub>)**

Той е предложен от Lin и Binns (1988), и се използва за едновременна оценка на средната продуктивност и стабилността на генотипите в множество среди. По същество той измерва отклонението на всеки генотип от най-високите добиви, постигнати във всяка среда, като по-ниските стойности на индекса отразяват по-близко представяне до оптималното във всички условия. Анализът на резултатите, представени в Таблица 14, показва, че сорт Midas има най-ниска стойност на P<sub>i</sub> (0.6918), което свидетелства за изключително висока и устойчива продуктивност във всички години от изпитването.

**Таблица 14.** Водещи 10 генотипа според индекса на превъзходство ( $P_i$ )

Номер	Генотип	Добив, 2013 (t·ha <sup>-1</sup> )	Добив, 2014 (t·ha <sup>-1</sup> )	Добив, 2015 (t·ha <sup>-1</sup> )	$P_i$	Ранг
88	Midas	11.00	6.54	8.18	0.6918	1
86	Azimut	10.53	6.69	7.74	1.1818	2
41	Kantata	10.47	6.38	7.81	1.3918	3
93	Grom	9.93	6.86	7.72	1.7356	4
63	Csillag	10.80	6.06	7.42	1.7379	5
37	PKB Rodika	11.53	6.35	6.87	1.7899	6
62	Нота	9.67	6.64	7.91	2.0706	7
21	Находка	11.38	5.14	8.26	2.0909	8
36	PKB Vizelka	11.80	6.25	6.66	2.1388	9
47	F05190 GP-1	10.21	6.87	6.95	2.1830	10

Следващи по ранг са Azimut (1.1818) и Kantata (1.3918), те също показват добиви близки до най-високите във всяка среда и затова са сред най-високо представените по този критерий. Наличието на стойности под 1.0 за всички водещи 10 генотипа е ясен показател за добра адаптация и конкурентоспособност в разнообразни агроекологични условия. Тези резултати съответстват и на други изследвания, които потвърждават ефективността на  $P_i$  като селекционен критерий (Lin & Binns, 1988; Cheshkova et al., 2020). Въз основа на  $P_i$  може да се направи първична селекция на генотипи с доказан добивен потенциал, независимо от вариациите в условията на средата.

### Индекс на стабилност на Kang (KSI)

Индексът на Kang (KSI), въведен от Kang (1993), представлява комбиниран показател, който интегрира добива и стабилността чрез непараметрично рангуване. Всеки генотип получава отделен ранг по среден добив и по стабилност, като генотипите с най-нисък KSI се считат за най-продуктивни и стабилни (Pour-Aboughadareh et al., 2022; Tsenov et al., 2022).

**Таблица 15.** Водещи 10 генотипа според стойностите на KSI

Номер	Генотип	KSI	Среден Добив (t·ha <sup>-1</sup> )	Ранг
62	Нота	20	8.07	1
94	Bohemia	24	8.02	2
41	Kantata	30	8.22	3
86	Azimuth	32	8.32	4
63	Grom	35	8.17	5
87	Renan	35	7.69	6
17	Яница	35	7.68	7
9	Киара	35	7.83	8
22	Красен	38	7.68	9
88	Midas	38	8.57	10

Както показва Таблица 15, Нота заема първо място (KSI = 20.0) с най-добро съчетание на висок добив (8.07 t·ha<sup>-1</sup>) и стабилност. Следват Bohemia (24.0),

Kantata (30.0), Azimut (32.0) и Grom (35.0), като всички са с добиви над 8.0 t·ha<sup>-1</sup> и стабилно представяне в различни среди.

KSI потвърждава значението на комбинираната оценка на продуктивност и стабилност. Сортове като Нота и Azimut, които се открояват и по Pi, показват висока адаптивност и стабилност в различни среди. Тези резултати са в съответствие с изследванията на Tsenov et al. (2022) и Al-Ashkar et al. (2022c), които подчертават практическата стойност на този индекс в селекционните програми.

### II.5.1. Сравнителна оценка на индексите на добив и стабилност

Ключов аспект в селекцията е изборът на индекси, които комбинират висока продуктивност и стабилност. Класическите показатели като Pi (Lin & Binns, 1988) и WAASB (Olivoto et al., 2019) акцентират съответно върху едното измерение. Затова са разработени композитни индекси като KSI и WAASBY, които осигуряват балансирана оценка (Olivoto & Nardino, 2021).

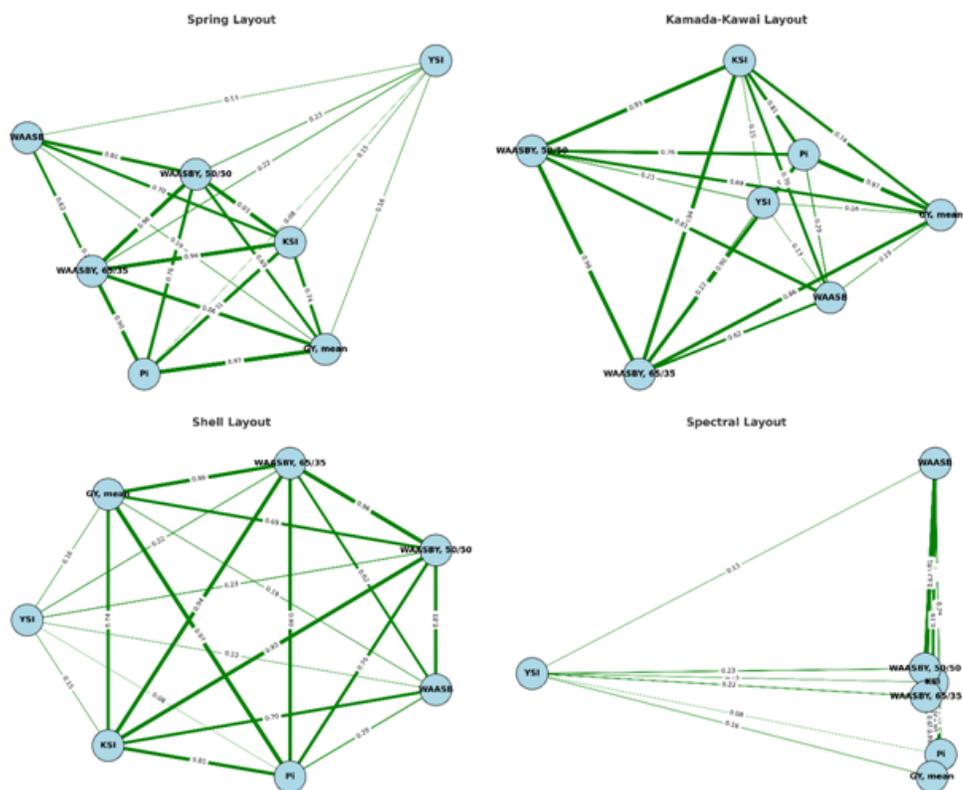
Корелационният анализ (Таблица 16) показва, че Pi е най-силно свързан с добива ( $r = 0.97$ ), докато WAASB отразява максимално стабилността ( $r = 1.00$ ). Най-добър баланс демонстрира WAASBY (50:50) чрез висока корелация с GY ( $r = 0.69$ ), силна връзка с WAASB ( $r = 0.81$ ), най-висока геометрична средна (0.75) и минимално отклонение от идеала (4.2°). KSI също показва добър баланс (Angle = 1.5°), но с по-ниска комбинирана сила. Вариантът WAASBY (65:35) измества фокуса към добива, подходящ за селекционни цели, ориентирани към висока продуктивност.

**Таблица 16.** Сравнителна оценка на индекси за добив и стабилност

Индекс	r(GY)	r(WAASB)	GeomMean( r )	MaxiMin( r )	Angle_to_Ideal(Å°)
WAASBY,50:50	0.69	0.81	0.75	0.69	4.2
WAASBY,65:35	0.86	0.62	0.73	0.62	9.2
KSI	0.74	0.70	0.72	0.70	1.5
Pi	0.97	0.29	0.53	0.29	28.7
WAASB	0.19	1	0.43	0.19	34.5
YSI	0.16	0.13	0.15	0.13	5.3

Мрежовата диаграма на корелациите (Фигура 6) допълнително илюстрира тези зависимости, като ясно се вижда централната позиция на индекса WAASBY между Pi и WAASB.

Обобщено, Pi се откроява като най-подходящ показател за оценка на средна продуктивност, докато WAASB остава водещ инструмент за оценка на стабилността. Между тях WAASBY (50:50) изпълнява ролята на интегрален индекс, който обединява предимствата на двата подхода и позволява едновременно селектиране по добив и стабилност. Практическият извод е, че WAASBY (50:50) трябва да се използва като основен индекс за крайно подреждане, а WAASB да служи като контролен показател за потвърждение на стабилността. Тази стратегия осигурява надежден, възпроизводим и методологично обоснован избор на генотипи с висок и устойчив добив в различни среди на отглеждане.



**Фигура 6.** Мрежова диаграма на Спиърманови корелации между индекси за добив и стабилност.

## II.6. Многопризнакови селекционни индекси

Досегашните резултати показваха, че единичните индекси като BLUP и WAASB осигуряват надеждни, но частични оценки, тъй като разглеждат продуктивността и стабилността отделно. Интегралният WAASBY (50:50) доказано предлага по-балансиран подход, комбинирайки двете характеристики, но остава ограничен до едномерния показател, именно добива.

Предходните анализи потвърдиха, че броят на зърната на квадратен метър (NGM) е водещ фактор за формиране на добива, докато теглото на 1000 зърна (TGW) има допълваща роля. Затова следващата логична стъпка е преминаването към многопризнакови индекси, които оценяват генотипите едновременно по GY, NGM и TGW, осигурявайки по-пълна и реалистична картина на селекционната стойност (Rocha et al., 2018; Olivoto & Nardino, 2020).

Този подход надгражда класическите методи, тъй като обединява продуктивността, структурните ѝ детерминанти и стабилността в обща рамка. В контекста на зимната пшеница, където добивът се формира под влияние на сложни морфофизиологични и климатични фактори, многофакторната оценка предоставя възможност за идентифициране на генотипи с устойчиво висока продуктивност и адаптивност (Olivoto et al., 2019).

Настоящият раздел е насочен към класификация и подбор на приоритетни генотипи чрез прилагане на многопризнакови индекси: MGIDI и MTSI, както и към сравнението между тях с цел изграждане на консенсусен списък от генотипи с висока селекционна стойност (Zuffo et al., 2020).

### MTSI индекс

Оценката на генотипите чрез Multi-Trait Stability Index (MTSI) бе фокусирана върху трите водещи признака, определящи добива при зимна пшеница: добив зърно (GY), брой зърна на  $m^2$  (NGM) и маса на 1000 зърна (TGW). И трите показателя са разгледани с желано повишение, тъй като по-високите им стойности отразяват по-добра продуктивност и селекционна стойност. Това съответства както на предходните резултати, така и на литературни данни, потвърждаващи водещата роля на NGM и значението на TGW за стабилността на добива.

Класирането по MTSI (Таблица 17) откроява десет генотипа с най-добро съчетание на продуктивност и стабилност. Bohemia заема първо място (MTSI = 0.1959) с висок среден добив ( $8.03 t \cdot ha^{-1}$ ), следван от Славен (ранг 2) и Красен (ранг 3). Генотипи като Катаржина, Гизда и Мирлена демонстрират устойчиво поведение и добри стойности на NGM, докато Киара и Mv Kikelet съчетават високи TGW и GY, потвърждавайки ефективността на MTSI при идентифициране на балансирани селекционни кандидати.

Таблица 17. MTSI стойности на водещи 10 генотипа

Номер	Генотип	MTSI стойност	MTSI, Ранг	TGW, g	NGM	Mean GY ( $t \cdot ha^{-1}$ )
94	Bohemia	0.1959	1	43.34	18461	8.03
33	Славен	0.2904	2	45.76	15401	7.06
22	Красен	0.4239	3	48.03	16005	7.69
76	Meleag	0.4831	4	40.43	17191	6.88
20	Катаржина	0.5373	5	45.71	16188	7.32
32	Гизда	0.6016	6	36.68	19100	6.99
9	Киара	0.6088	7	47.37	16701	7.83
66	Мирлена	0.6155	8	39.23	19351	7.60
2	Пряспа	0.6431	9	45.05	16092	7.35
106	Mv Kikelet	0.6912	10	46.06	16333	7.38

Като цяло, MTSI анализът ясно идентифицира генотипите с високи стойности на основните компоненти на добива и стабилност на проявлението им. Тези десет линии могат да служат като основа за селекционни програми, насочени към едновременно повишаване на добива и гарантиране на устойчиво представяне при контрастни среди.

### MGIDI индекс

Прилагането на многопризнаковия индекс Multi-trait Genotype-Ideotype Distance Index (MGIDI) в анализа на изследваните генотипи позволи ясно разграничаване на генотипите според тяхната близост до дефинирания идеотип. Генотипите с по-ниски стойности на индекса са тези, които съчетават висок добив и балансирана структура на компонентите, а именно броя на зърната на  $m^2$  (NGM) и масата на 1000 зърна (TGW).

Резултатите (Таблица 18) показват, че сортът Midas заема първо място (MGIDI = 1.14), демонстрирайки максимален добив и благоприятни стойности на TGW и

NGM. Следват PKB Vizelka и PKB Rodika, които също комбинират висока продуктивност с добре изразена структурна стабилност. Българският сорт Находка (MGIDI = 1.71) се откроява с конкурентен профил, подчертаващ потенциала на местната генетична база.

Сред водещите десет попадат още Нота, Bohemia и Glosa, които показват равновесие между трите признака. Генотипи като Grom и Sonata също се класират високо благодарение на високия NGM, който компенсира по-ниските TGW стойности. Резултатите потвърждават, че MGIDI е надежден инструмент за комплексна оценка, тъй като интегрира продуктивността и баланса между основните елементи на добива, осигурявайки обективна основа за селекция на генотипи с оптимално съчетание на характеристики (Olivoto & Nardino, 2021; Rocha et al., 2018).

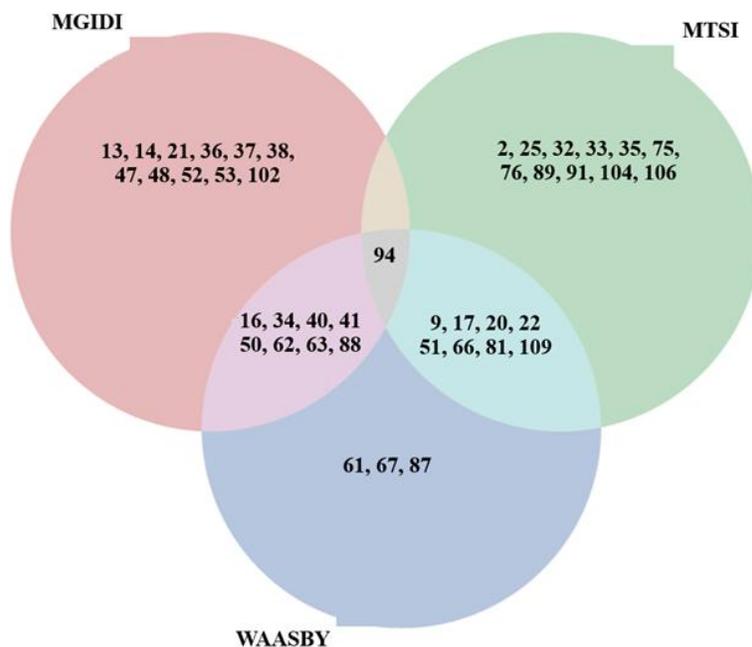
**Таблица 18.** Стойности на MGIDI за генотипи, близки до идеотипа

Номер	Генотип	GY	NGM	TGW	MGIDI	MGIDI, Ранг
	<b>Идеотип</b>	<b>8.57</b>	<b>21729.83</b>	<b>49.58</b>	<b>0.00</b>	
88	Midas	8.57	18605.16	45.96	1.14	1
36	PKB Vizelka	8.24	19363.73	42.66	1.48	2
37	PKB Rodika	8.25	19984.63	41.73	1.53	3
21	Находка	8.26	17810.40	45.12	1.71	4
62	Нота	8.07	19664.09	41.72	1.73	5
47	F05190 GP-1	8.01	19104.17	42.50	1.77	6
94	Bohemia	8.03	18460.56	43.34	1.83	7
52	Glosa	7.98	18245.50	44.34	1.86	8
63	Grom	8.17	20670.53	40.02	1.87	9
40	Sonata	7.91	19239.78	41.62	1.95	10

*MGIDI – многопризнаков индекс за разстояние генотип–идеотип (Multi-Trait Genotype–Ideotype Distance Index). GY – добив от зърно ( $t \cdot ha^{-1}$ ); NGM – брой зърна на квадратен метър; TGW – маса на 1000 зърна.*

### Съпоставено подреждане на генотипите по ранга от индексите

За сравнението бяха използвани трите независими подреждания на MGIDI, MTSI и WAASBY (при тегло 50:50 между продуктивност и стабилност), с цел да се оцени доколко водещите генотипи запазват позициите си независимо от избрания индекс. Вен диаграмата (Фигура 7) показва частично припокриване между класациите и ясно разграничение в акцентите им. Само Bohemia присъства едновременно сред водещите 20 по всички индекси, което потвърждава съчетаването при нея на висока продуктивност, стабилност и балансиран многопризнаков профил.



**Фигура 7.** Вен диаграма на припокриването между водещите 20 генотипа според MGIDI, MTSI и WAASBY (общо 42 генотипа)

Връзката между индексите показва, че осем генотипа са общи за MGIDI и WAASBY, а други осем – за MTSI и WAASBY, което позиционира WAASBY като междинен индекс между идеотипната близост и стабилността на изявата. Липсата на припокриване само между MGIDI и MTSI подчертава, че MGIDI акцентира върху близостта до идеалния профил, докато MTSI е по-чувствителен към стабилността на отделните признаци.

Съвпаденията между MTSI и WAASBY за сортовете Киара, Яница и Мирлена потвърждават стабилното им и продуктивно представяне. Аналогично, общите позиции на MGIDI и WAASBY за Midas и Гром подсказват висок потенциал при запазена адаптивност и добър баланс между компонентите на добива. Финалната подредба (Таблица 19) включва 24 статистически достоверно високи позиции на генотипи при  $p < 0.05$ , които се потвърждават като приоритетни селекционни кандидати. Те комбинират висока продуктивност, стабилност и балансиран профил, представлявайки стратегическа основа за създаване на устойчиви сортове. Особено интересни са генотипите Утриш (59), Веста (74) и Косара (18), които не заемат водещи места по отделните индекси, но чрез RRA се класират високо (рангове 18–21;  $p < 0.05$ ), доказвайки последователна изява в различни подреждания.

В този контекст приложението на RRA (Robust Rank Aggregation) позволи да се идентифицират генотипите, които систематично заемат водещи места независимо от индекса. Резултатите показаха, че Bohemia (94), Нота (62), Sonata (40), Mv Aprod (109), Киара (9) и Мирлена (66) демонстрират стабилно предимство с висока статистическа достоверност. Присъствието на български сортове като Киара, Красен и Златица сред водещите подчертава конкурентоспособността на местната генетична база.

**Таблица 19.** Стойности и рангове на трите индекса за 25 генотипа по RRA

Номер	Генотип	GY, t·ha <sup>-1</sup>	MTSI	WAASBY	MGIDI	Среден ранг	RRA, ранг	RRA, pV
94	Bohemia	8.03	1	1	7	3	1	0.0002
62	Нота	8.07	27	4	5	12	2	0.0052
40	Sonata	7.91	22	6	10	13	3	0.0065
109	Mv Aprod	7.61	18	9	24	17	4	0.0084
9	Киара	7.83	7	3	29	13	5	0.0101
34	Elly	7.94	26	13	12	17	6	0.0107
66	Мирлена	7.60	8	8	34	17	7	0.0132
75	Кирия	7.56	15	22	32	23	8	0.0199
22	Красен	7.69	3	10	54	22	9	0.0203
51	Воета	7.54	14	14	33	20	10	0.0219
14	Златица	7.85	34	29	15	26	11	0.0239
88	Midas	8.57	58	18	1	26	12	0.0252
16	Мерилин	7.82	35	16	17	22	13	0.0261
104	GK Kögös	7.51	19	33	35	29	13	0.0261
63	Гром	8.17	66	12	9	29	15	0.0289
87	Репан	7.70	21	11	37	23	16	0.0308
17	Яница	7.68	16	5	38	19	17	0.0334
59	Утриш	7.75	39	31	26	32	18	0.0361
74	Веста	7.52	33	40	36	36	19	0.039
81	Ливада	7.48	17	15	41	24	20	0.0419
18	Косара	7.69	43	42	28	38	21	0.0484
33	Славен	7.06	2	25	88	38	23	0.05
36	РКВ Vizelka	8.24	112	94	2	69	23	0.05
67	Лут 601-09	8.04	59	2	22	28	23	0.05
20	Катарджина	7.32	5	17	68	30	25	0.0563

Тези резултати подчертават силата на RRA да улавя не само екстремни, но и стабилни тенденции, които често остават скрити при едностранен анализ. Интеграцията на MGIDI, MTSI и WAASBY (50:50) чрез RRA осигурява най-надеждната и обективна оценка, минимизирайки риска от методологична зависимост и гарантирайки консенсусно подреждане, приложимо за финална оценка избор.

### III. ИЗВОДИ

1. Взаимодействието генотип × среда (GEI) е статистически значимо и определя различията в продуктивността и стабилността във всеки един от изследваните образци. Отделени са генотипи с предвидимо поведение спрямо промяната на условията, което улеснява оценката им.

2. Комбинираното използване на различни статистически подходи (AMMI, REML/BLUP) повишава надеждността при анализиране на резултатите за GEI, като позволява едновременно описание на структурата на взаимодействията и оценка на генотипния потенциал.

3. Според относителния дял на влиянието на условията на средата върху изследваните признаци те могат да бъдат разделени на две основни групи: i) с преобладаващо влияние на средата маса на 1000 зърна (65%), добив на зърно (60%) и брой продуктивни брата на  $m^2$  (43%); и ii) с ефект, сходен по големина с този на генотипа брой на зърната в класа (25%) и брой на зърната на  $m^2$  (22%).

4. Взаимодействието генотип × среда предизвиква вариране, което е от порядъка на 11-16% за преобладаващата част от признаците, с изключение на броя на зърната на  $m^2$ , където е почти двойно по-силно (29%).

5. При съществена промяна на условията масата на 1000 семена (TGW) показва най-ясна и пропорционална реакция, което свидетелства за относително линейна зависимост спрямо промените в условията на средата. За останалите признаци се установява по-сложна, нелинейна динамика на вариране, отразена във високия дял на втория главен компонент (PC2), който при броя на продуктивните стъбла и броя на зърната на  $m^2$  достига 44–45% от общото вариране – стойности, близки до тези на първия компонент.

6. С помощта на няколко различни статистически подхода е установено, че признакът брой на зърната на квадратен метър (NGM) определя в най-висока степен нивото на добива зърно (GY). Признакът масата на 1000 зърна (TGW) има също съществен, но второстепенен принос, който способства за постигане на най-високия възможен добив при някои от образците.

7. Броят на продуктивните брата (NPT) и броят на зърната в клас (NGS) оказват косвено влияние върху крайния добив, като ефектът им се реализира основно чрез формирането на признака NGM, чиито положителен ефект върху добива е пряк.

8. Приложените многомерни методи за оценка позволяват ясно разграничаване на генотипите в хомогенни групи, като клъстерите се характеризират със специфични комбинации от добив (GY) и основни структурни признаци.

9. Клъстерният анализ (K-means) обособи три статистически различни групи и очерта две ефективни стратегии за реализация на висок добив: 1) чрез повишаване на NGM и съхранение на нивото на TGW или 2) чрез увеличаване на

TGW при запазено съществуващото в изследваните сортове ниво на признака NGM.

10. Класификацията на генотипите на база многопризнакови индекси води до ясно разграничаване на групи с различен селекционен потенциал, което улеснява практическата интерпретация на резултатите.

11. Многопризнаковите индекси MGIDI, MTSI и WAASBY (50:50) улавят различни селекционни аспекти, като комбинирането им обогатява получената за отделния сорт информация.

12. Точният и обективен избор изисква осъществяване на комбинирана, но едновременна оценка на продуктивност и стабилност; оценка, основана само на абсолютен добив зърно, крие риск от специфична адаптация.

13. Комбинирането на традиционни и съвременни подходи осигурява логически възпроизводим протокол за комплексна оценка на сорта, която се превръща в негова специфична характеристика на фона на осезаемото влияние на условията на средата.

14. Добивът зърно и неговите основни компоненти са тясно свързани с температурната сума и водния баланс в критичните зимно-пролетни и пролетно-летни периоди през вегетацията.

15. Идентифицирани са сортове с широка адаптация благодарение на своята балансирана комбинация между висока продуктивност и стабилност, което ги прави подходящи за пряко райониране в производството.

## **IV. ПРИНОСИ**

### **IV.1. Научно-теоретични приноси**

1. Нагледно е показано и статистически доказано, че на фона на взаимодействието генотип  $\times$  среда при основни признаци на продуктивността е възможна многопластова оценка на сорта на фона на голяма група от изследвани образци.

2. Въведена е интегрирана методология за оценка на сортове зимна пшеница, която обединява многофакторна статистика (ANOVA, AMMI, REML), компонентен анализ на добива и многопризнакова интеграция (MGIDI, MTSI, WAASBY 50:50), обобщени чрез метод аз агрегиране на рангова оценка (RRA).

3. Доказана е водещата роля на NGM за стабилно висока продуктивност в различни среди.

4. Обособени са три принципно различни, но взаимно допълващи се статистически подходи за обективна оценка, които могат да служат за основа на целенасочена оценка на сорта в дадена група, в зависимост от поставената конкретна цел

5. Разработен е протокол чието логическо стъпаловидно възпроизвеждане дори при промяна на конкретните параметрите, води до сходни подреждания на анализирани сортове.

6. Групирането на генотипите на база комбинации от техните конкретни нива на признаците е значително по-прецизна оценка от тази, основана единствено на добива или признак, влияещ му директно.

### **IV.2. Научно-приложни приноси**

1. Идентифицирани са генотипи с висока продуктивност и стабилност, подходящи за внедряване и използване като изходен материал в кръстоски.

2. Предоставени са конкретни насоки за селекционен избор, основан на приоритизиране на NGM при поддържана TGW, което оптимизира подбора в различни среди.

3. Разработен е прозрачен и лесно възпроизводим протокол за оценка, който съкращава времето за обработка на данните и повишава възпроизводимостта в селекционната практика.

4. Нагледно е посочен конкретен статистически подход за балансирана оценка чрез комбиниране на продуктивност и стабилност.

5. Прилагането на интегрирани индекси води до различно подреждане на генотипите в сравнение с класификация, основана само на средния добив, като това пренареждане отразява реалното влияние на взаимодействието генотип  $\times$  среда.

## V. ПУБЛИКАЦИИ, СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Raykov, G., Chamurliyski, P., Doneva, S., Penchev, E., Tsenov, N., 2016, Productivity performance of bread winter wheat genotypes of local and foreign origin. *Agricultural Science and Technology*, 8(4), 276–279, DOI:10.15547/ast.2016.04.052.

Raykov, G., 2025, Number of grains per square meter as a key predictor of yield potential in winter wheat. *Agricultural Science and Technology*, 17(2), 30–39. DOI: 10.15547/ast.2025.02.017