

PROCENA INTERAKCIJE GENOTIP $\times$ SREDINA ZA PRINOS PŠENICE U MULTILOKACIJSKIM OGLEDIMA PRIMENOM AMMI MODELA

Krstina Aleksić^{1*}, Jovana Timić¹, Bojan Jocković¹, Sanja Mikić¹,
Vladimir Aćin¹, Milan Mirosavljević¹

Izvod

U uslovima klimatskih kolebanja i raznolikosti agroekoloških uslova, procena interakcije genotipa i sredine (G $\times$ E) predstavlja važnu osnovu u selekciji genotipova pšenice koji se odlikuju stabilnim prinosom i dobrom sposobnošću prilagođavanja različitim uslovima sredine. Shodno tome, cilj ovog istraživanja je bio da se ispita varijabilnost prinosa i interakcije G $\times$ E genotipova ozime pšenice gajenih na više lokaliteta u Republici Srbiji. Multilokacijski ogledi sa 25 sorti (genotipova) pšenice izvedeni su na pet lokaliteta, tokom jedne vegetacione sezone. Rezultati su pokazali značajnu varijabilnost prinosa u zavisnosti od uticaja sorte, lokaliteta i njihovih interakcija, pri čemu je uticaj lokaliteta bio najizraženiji. Primena AMMI modela omogućila je identifikovanje genotipova sa visokim potencijalom za prinos i dobrom stabilnošću. Prikaz rezultata putem biplot-a omogućio je uočavanje obrazaca u reakciji genotipova, koji omogućavaju procenu njihove adaptabilnosti u odnosu na ispitivane lokalitete. Najviši ostvareni prosečni prinosi zabeleženi su kod novostvorenih sorti NS Supernova (8,08 t ha⁻¹), NS Eudora (8,07 t ha⁻¹) i NS Rajna (7,80 t ha⁻¹), sorte su pokazale dobru adaptabilnost i visoke prinose na više lokaliteta. Sorte poput NS Igra, NS Lavica i NS Kimera ostvarile su prinose koji su vrlo blizu prosečne vrednosti na većini lokaliteta, što ukazuje na relativno ujednačenu reakciju u ispitivanim uslovima i potencijal za gajenje u različitim agroekološkim uslovima. Novi Sad i Pančevo su se istakli kao lokaliteti sa povoljnijim agroekološkim uslovima, gde su sorte sa umerenim potencijalom postigle visok prinos. Na osnovu dobijenih rezultata, identifikovani su perspektivni genotipovi koji, zahvaljujući optimalnom balansu visokog i stabilnog prinosa, predstavljaju dragocen genetički resurs za dalja istraživanja.

Ključne reči: AMMI, interakcija genotipa i sredine, prinos, *Triticum sp.*

Uvod

Postizanje stabilnih i visokih prinosa pšenice (*Triticum sp.*) u uslovima sve češćih klimatskih oscilacija, predstavlja jedan od problema koji se tiču savremene poljoprivredne proizvod-

nje (Đekić i sar., 2019). Pšenica se gaji u gotovo svim klimatskim zonama, od umerenih do sušnih i polusušnih područja, i upravo široka rasprostranjenost ukazuje na sposobnost pšen-

Originalni naučni rad (Original Scientific Paper)

¹Aleksić K (0009-0009-4539-3614), Timić J (0009-0005-3257-0475), Jocković B (0000-0003-3996-6286), Mikić S (0000-0002-4215-453X), Aćin V (0000-0002-0932-9617), Mirosavljević M (0000-0002-0689-5584) Institut za ratarstvo i povrtarstvo, Odeljenje za strna žita, Novi Sad, Maksima Gorkog 30, 21000 Novi Sad, Srbija

* e-mail: krstina.aleksic@ifvcns.ns.ac.rs

ice da se prilagođava različitim klimatskim i edafskim uslovima. Iako se primarno gaji u pojasu između 30° i 60° severne geografske širine i 27° i 40° južne geografske širine, primena savremenih agrotehničkih mera i uvođenje novih sorti u proizvodnju omogućili su da se proizvodnja uspešno odvija i izvan ovih granica (Foley et al., 2020; Banjac et al., 2022).

Prema FAOSTAT (2025) ukupna svetska proizvodnja pšenice u 2023. godini iznosila je 799 miliona tona, sa prosečnim prinosom od $3,69 \text{ t ha}^{-1}$, na površini od oko 220 miliona hektara. Istorijski posmatrano, u poslednjih sedam decenija došlo je do značajnog povećanja prinosa na svetskom nivou, koji je porastao sa prosečno $1,0 \text{ t ha}^{-1}$ na više od $3,6 \text{ t ha}^{-1}$. Porast prosečnih prinosa nije slučajna, već predstavlja rezultat sistematskog rada na stvaranju visokoprinosnih sorti i u tehnologiji gajenja, tradicionalno prvenstveno primenom moderne mehanizacije, sredstava za zaštitu bilja i pravilne mineralne ishrane biljaka. U poslednjih nekoliko godina, i najsavremeniji pristupi, poput uređivanja genoma, genomske selekcije, marker-asistirane selekcije i precizne poljoprivrede dodatno doprinose povećanju prinosa i stabilnosti proizvodnje (Sanjay et al., 2024; Saha et al., 2025).

Prinos pšenice predstavlja složenu osobinu koja je rezultat interakcije uticaja genetičkog potencijala sorte, uslova spoljašnje sredine i primene agronomskih mera ($G \times E \times M$) i koja određuje ispoljavanje fizioloških, morfoloških i drugih osobina biljke. Od genetskih faktora, sa agronomskog stanovišta za formiranje prinosa veliki značaj imaju komponente prinosa, poput broja zrna po jedinici površine i mase 1000 zrna, kao i visina stabljike i vreme nastupanja i trajanje fenoloških faza. Zbog svega navedenog prinos pšenice se posmatra kao krajnji pokazatelj uspešnosti razvoja i adaptacije biljke u datim uslovima gajenja (Miroslavljević et al., 2025). Interakcija navedenih faktora uslovljava izraženu sezonsku i prostornu varijabilnost prinosa, zbog čega poznavanje udela pojedinačnih činilaca u ukupnom varijabilitetu omogućava precizniji odabir sorti koje mogu ostvariti visoke i stabilne prinose u različitim proizvodnim sredinama (Bratković i sar., 2025).

Interakcija genotipa i sredine (eng. $G \times E$ – genotype $\times$ environment interaction) predstavlja osnovni faktor u oceni adaptabilnosti i stabilnosti, podjednako je važan kako za oplemenjivanje, tako i za samu proizvodnju. Interakcija $G \times E$ može se uočiti kada se dva ili više genotipova gaji u različitim sredinama, a njihove relativne performanse pokazuju značajne razlike (Yue et al., 2025). Ako selekcija nije usklađena sa uslovima sredine, odnosno ako se selekcija genotipova, tj. njihovo testiranje i odabir odvija u jednim agroekološkim uslovima, ne uzimajući u obzir druge specifične agroekološke uslove u kojima će se gajiti, postoji opasnost da se izgube potencijalno dobri genotipovi koji bi u nekim drugim uslovima mogli pokazati superiorne rezultate. To značajno komplikuje selekciju i proizvodnju, jer genotip koji je superioran u jednoj sredini može pokazati slabije rezultate u drugoj (Xiong et al., 2021). Upravo iz tog razloga je poznavanje interakcije $G \times E$ omogućava razvoj optimalnih strategija za stvaranje novih sorti, ali i pravilnu preporuku odabira sorti koje su prilagođene specifičnim proizvodnim sredinama.

U savremenoj metodologiji ispitivanja interakcije $G \times E$, jedna od najčešće primenjivanih statističkih metoda jeste analiza glavnih efekata i multiplikativne interakcije (eng. AMMI – Additive Main Effects and Multiplicative Interaction), AMMI model kombinuje klasičnu ANOVA za glavne efekte genotipa i sredine sa analizom glavnih komponenti za interakciju $G \times E$ (eng. IPCA – Interaction Principal Component Analysis) (Gauch 1988). Osnovna ideja AMMI modela je da se ukupna varijabilnost podeli na komponente koje potiču od glavnih efekata genotipa, glavnih efekata sredine i interakcije, a interakcija se zatim analizira pomoću dekompozicije singularne vrednosti (eng. SVD – Singular Value Decomposition). AMMI model se često prikazuje grafički u obliku biplot-a, gde se istovremeno nalaze ocene genotipa i sredine (AMMI1 i AMMI2). Pomoću AMMI1 biplota (Gauch and Zobel, 1997) omogućeno je razmatranje prosečnih vrednosti posmatrane osobine genotipova i sredina, kao i njihovog doprinosa interakciji $G \times E$, pri čemu se za opis interakcijskog efekta koristi prva interakcijska

glavna komponenta (IPC1). Genotip ili sredina čije su vrednosti IPC1 blizu centra preseka biplota smatra se stabilnim, jer pokazuje manje odstupanje u reakciji na sredine. AMMI2 biplot se koristi u slučaju kada je za preciznije opisivanje strukture interakcije potrebno uključivanje više interakcijskih komponenti, pa se uz IPC1 prikazuju i dodatne komponente (IPC2), kako bi se preciznije procenili i analizirali obrasci interakcije G×E.

AMMI2 prikazuje biplot sa prvom i drugom komponentom interakcije, a ova vizualizacija omogućava oplemenjivačima da brzo identifikuju grupe genotipova sa sličnim G×E ponašanjem, kao i sredine koje pripadaju istoj „mega-sredini“, tj. skupu sredina sa sličnim efektom na performanse genotipova. Na ovaj način

mogu se donositi odluke o selekciji genotipova za specifičnu ili široku adaptaciju, kao i planirati proizvodnja sorti u posebnim regionima (Gauch and Zobel, 1997).

Potreba za istraživanjem interakcije G×E proizilazi iz prakse savremene proizvodnje strnih žita, gde varijabilnost uslova gajenja i klimatske oscilacije mogu značajno smanjiti prinos, narušiti kvalitet zrna i umanjiti ukupan ekonomski efekat (Pržulj et al., 2015). Zbog toga, cilj ovog istraživanja je bio da se ispita varijabilnost prinosa i interakcija G×E različitih genotipova ozime pšenice gajenih na više lokaliteta u Republici Srbiji, kako bi se identifikovale sorte koje pokazuju stabilne prinose i dobru adaptabilnost.

Materijal i metode

Multilokacijski ogledi sprovedeni su na pet lokaliteta u regionu Vojvodine: Novi Sad – Rimski Šančevi, Pančevo, Sombor, Srbobran i Šuljam, tokom vegetacione sezone 2023/24

godine (Tabela 1). Ogledi su postavljeni prema randomizovanom potpunom blok sistemu (eng. RCBD – Randomized Complete Block Design) u tri ponavljanja. Genetički materijal

Tabela 1. Srednje mesečne temperature (°C) i suma mesečnih padavina (mm) na lokalitetima

Table 1. Mean monthly temperatures (°C) and the sum of precipitation (mm) in the locations

M	Sombor		Novi Sad		Šuljam		Srbobran		Pančevo	
	t (°C)	p (mm)	t (°C)	p (mm)	t (°C)	p (mm)	t (°C)	p (mm)	t (°C)	p (mm)
X	16,6	26	17,4	12	16,8	17	14,9	36	16,9	21
XI	8,4	94	9,3	84	9,0	94	6,6	11	9,2	71
XII	4,8	56	5,8	34	5,5	31	4,8	16	5,9	25
I	3,0	34	3,3	36	2,3	72	2,2	0	3,0	28
II	9,3	14	9,8	9	9,3	4	9,3	3	9,7	3
III	10,7	50	11,2	16	11,2	27	10,9	9	11,0	20
IV	15,4	28	15,5	22	15,6	21	15,0	17	15,9	33
V	19,0	109	18,9	79	18,7	152	18,5	68	18,3	54
VI	23,1	65	24,0	58	22,9	50	23,6	65	23,7	67
VII	26,2	39	26,7	29	25,5	83	25,1	20	25,8	92

Republički hidrometeorološki zavod Srbije (2024): Mesečni agrometeorološki bilteni i arhivirani meteorološki podaci za 2023. i 2024. godinu. RHMZ Srbije. Available in hidmet.gov.rs. (27. April, 2026); M – mesec

korišćen u ovom istraživanju obuhvatao je 25 sorti ozime pšenice, poreklom iz Instituta za ratarstvo i povrtarstvo u Novom Sadu. Veličina eksperimentalne parcele iznosila je 5 m², pri čemu je setvena norma iznosila 500 klijavih zrna po m² za svaku sortu. Tokom vegetacije su primenjene sve preporučene agrotehničke mere: prihrana, zaštita od korova, bolesti i štetočina, kao i mere za sprečavanje poleganja

$$y_{ij} = \mu + g_i + e_j + \sum_1^r (\lambda_a + r_{ai} + c_{aj}) + \delta_{ij} + e_{ij}$$

gde je y_{ij} je vrednost osobine i - tog genotipa u j - toj sredini, μ predstavlja opštu srednju vrednost, g_i je efekat genotipa, e_j je efekat sredine, λ_a su singularne vrednosti, r_{ai} su vrednosti genotipskih komponenta, c_{aj} su

useva. Setva i žetva obavljene su mehanizovano. Prinos zrna pšenice korigovan je na 13% vlage i izražen u t ha⁻¹. Statistička obrada prikupljenih podataka obavljena je u programskim paketima Genstat, Infostat i Xlstat. Za interpretaciju interakcije G×E, primenjen je AMMI model, koji je omogućio grafičku i statističku procenu adaptabilnosti i stabilnosti sorti.

vrednosti sredinskih komponenta. δ_{ij} predstavlja rezidualnu interakciju, a je e_{ij} eksperimentalna greška.

Rezultati i diskusija

Analiza varijanse za 25 sorti pšenice, ispitivanih u različitim sredinama, ukazala je na visoko značajan uticaj genotipa, sredine i njihove interakcije na prinos zrna (Tabela 2). Sredina je imala dominantan efekat ($F = 117,18^{**}$), zatim genotip ($F = 17,34^{**}$), dok je i interakcija G×E bila statistički značajna ($F = 3,80^{**}$). Analiza udela sume kvadrata pojedinačnih izvora varijacije u sumi kvadrata tretmana ukazala je da je uticaj sredine bio najizraženiji, te da je objasnio preko dve trećine ukupne varijacije (71,9%), preostali deo varijacije objašnjen je uticajem genotipa (15%) i interakcije G×E (13,1%). Ovi rezultati su u skladu sa nalazima iz literature, gde se navodi da sredina (godina/lokalitet) obično ima najveći uticaj, dok je uticaj genotipa i interakcije G×E uglavnom značajno manji. Slično tome Jędzura et al. (2023) su naveli da sredina ima najizraženiji efekat na prinos jare pšenice, dok je prema Alemayehu (2025) uticaj sredine objasnio 82,0%, genotip 8,7% i interakcija G×E 9,3% varijacije. Dominantan udeo

faktora sredine u ukupnom varijabilitetu se može objasniti izraženim agroekološkim razlikama između ispitivanih lokaliteta i godina. Abiotički faktori poput temperature, padavina, sunčevog zračenja, ali i edafski faktori kao što su tip i plodnost zemljišta, u kombinaciji sa primenjenom agrotehnikom direktno utiču na rast i razvoj biljaka pšenice, a samim tim i na formiranje prinosa. Njihovim delovanjem može doći do značajnih varijacija u ispoljavanju rodnosti, čak i kod visokoprinosnih sorti gajenih uz primenu optimalne agrotehlike. S obzirom na statistički značajnu interakciju G×E, izvršena je dalja analiza korišćenjem AMMI modela.

AMMI1 biplot analiza omogućava istovremenu vizualizaciju glavnih efekata prinosa i interakcije G×E. Posmatrajući rezultate (Tabela 2), prve dve IPCA ose su bile značajne, gde je prva osa objasnila 62,85%, a druga IPCA osa 22,57% interakcije G×E.

Tabela 2. AMMI analiza varijanse prinosa zrna pšenice

Table 2. The AMMI analysis of variance for wheat grain yield

Izvor varijacije	df	SS	Udeo SS u SSt (%)	Udeo SS u SSi (%)	MS	F
Ukupno	374	1069,3			2,86	-
Tretmani	124	970,6			7,83	22,40**
Genotip	24	145,4	15,0		6,06	17,34**
Sredina	4	697,6	71,9		174,40	117,18**
Interakcija G×E	96	127,6	13,1		1,33	3,80**
IPCA 1	27	80,2		62,85	2,97	8,50**
IPCA 2	25	28,8		22,57	1,15	3,30**
Ostatak	44	18,6			0,42	1,21
Blok	10	14,9			1,49	4,26**
Greška	240	83,9			0,35	-

**značajno na nivou $p < 0,01$; df – stepeni slobode; SS – suma kvadrata; SSt – suma kvadrata tretmana; SSi – suma kvadrata G×E interakcije; MS – sredina kvadrata; F – F vrednost

Rezultati istraživanja pokazuju da je prosečan prinos sorti u Novom Sadu ($9,36 \text{ t ha}^{-1}$) i Pančevu ($7,78 \text{ t ha}^{-1}$) bio relativno visok u poređenju sa ostalim lokalitetima (Tabela 3). Prosečan prinos u Srbobranu iznosio je $7,69 \text{ t ha}^{-1}$, dok je u Šuljmu bio statistički značajno niži i iznosio je $6,02 \text{ t ha}^{-1}$. Sa druge strane, u Somboru je ostvaren najniži prosečan prinos ($5,55 \text{ t ha}^{-1}$). Zabeležena odstupanja u prosečnom prinosu između lokaliteta objašnjavaju se većom sumom padavina koje su prema podacima sa RHMZ-a iznosile 109 mm u Som-

boru i 152 mm u Šuljmu tokom meseca maja, u periodu kada se pšenica nalazila u fenofazi cvetanja. Ovakav suficit vlage, praćen manjim brojem sunčanih dana, direktno je uticao na oštećenje samih cvetova u klasu i ometanje procesa oplodnje. Navedeni uslovi su, uz kasnije veće prisustvo patogenih lista i klasa, rezultirali smanjenjem ostvarenog prinosa na ovim lokalitetima u poređenju sa Novim Sadom, Pančevom i Srbobranom, gde su zabeležene znatno niže sume padavina u periodu cvetanja (RHMZ, 2024; Noia Junior et al., 2023).

Tabela 3. Prosečan prinos zrna ($t\ ha^{-1}$) 25 sorti pšenice na pet lokalitetaTable 3. Average grain yields ($t\ ha^{-1}$) of 25 wheat varieties across five locations

Sorta	Novi Sad	Pančevo	Sombor	Srbobran	Šuljam	Prosek
NS 40S	8,78	9,15	4,86	9,04	6,38	7,64 ^{a-d}
NS Alnora	9,72	7,42	5,85	7,34	6,66	7,40 ^{a-e}
NS Arijana	8,54	7,56	4,29	7,47	5,80	6,73 ^{e-g}
NS Efira	10,40	7,52	6,15	7,43	5,96	7,49 ^{a-e}
NS Eona	8,84	4,75	5,06	4,70	5,55	5,78 ^h
NS Epoha	10,38	8,12	5,42	8,03	6,14	7,62 ^{a-d}
NS Eudora	10,55	8,42	6,75	8,33	6,31	8,07 ^a
NS Idila	9,89	7,87	6,25	7,78	5,52	7,46 ^{a-e}
NS Igra	9,22	8,39	5,74	8,29	6,64	7,66 ^{a-c}
NS Kimera	10,21	8,35	5,88	8,26	5,85	7,71 ^{a-c}
NS Kira	8,92	8,43	5,38	8,33	6,36	7,48 ^{a-e}
NS Lavica	9,17	8,53	5,22	8,44	7,14	7,70 ^{a-c}
NS Lenija	8,75	5,78	5,95	5,71	4,90	6,22 ^{f-h}
NS Modena	8,72	9,05	5,22	8,95	6,55	7,70 ^{abc}
NS Noema	8,84	7,82	6,26	7,73	4,81	7,09 ^{bcde}
NS Olena	9,62	7,95	5,79	7,86	6,30	7,50 ^{abcde}
NS Ozrena	10,06	7,90	5,22	7,81	7,33	7,66 ^{abc}
NS Rajna	9,81	8,55	5,66	8,45	6,52	7,80 ^{ab}
NS Scena	8,34	7,41	5,88	7,32	5,06	6,80 ^{defg}
NS Supernova	11,02	8,54	6,12	8,44	6,30	8,08 ^a
NS Svetlana	9,82	7,27	5,20	7,19	5,07	6,91 ^{c-f}
NS Tijara	8,68	9,06	4,98	8,96	6,06	7,55 ^{a-e}
NS Tokata	10,24	8,05	6,01	7,96	5,90	7,63 ^{a-d}
Simonida	8,22	6,29	4,68	6,22	5,72	6,23 ^{f-h}
Zvezdana	7,17	6,24	4,93	6,17	5,73	6,05 ^{gh}
Prosek	9,36 ^A	7,78 ^B	5,55 ^D	7,69 ^B	6,02 ^C	7,28

*Vrednosti označene različitim slovima se statistički značajno razlikuju ($p < 0,05$ – Tukey test)

Prosečan prinos zrna (Tabela 3) 25 sorti ozime pšenice, gajenih na pet lokaliteta iznosio je ($7,28\ t\ ha^{-1}$). Kada se posmatraju pojedinačne sorte, najviši prosečni prinosi su ostvareni kod novih sorti NS Supernova ($8,08\ t\ ha^{-1}$), NS Eudora ($8,07\ t\ ha^{-1}$) i NS Rajna ($7,80\ t\ ha^{-1}$), pri čemu su sorte pokazale dobru adaptabilnost i visoke prinose na više lokaliteta, što ih čini pogodnim

kandidatima za širenje u poljoprivrednoj proizvodnji. Sa druge strane, najniži prosečni prinosi zabeleženi su kod starijih sorti Zvezdana ($6,05\ t\ ha^{-1}$) i Simonida ($6,23\ t\ ha^{-1}$), i sorte visokog kvaliteta zrna, NS Eona ($5,78\ t\ ha^{-1}$). Prilikom analize lokaliteta na kojima su gajene, može se uočiti da su pojedine sorte imale slične prinose na različitim lokalitetima. Na primer sorte poput NS Igra,

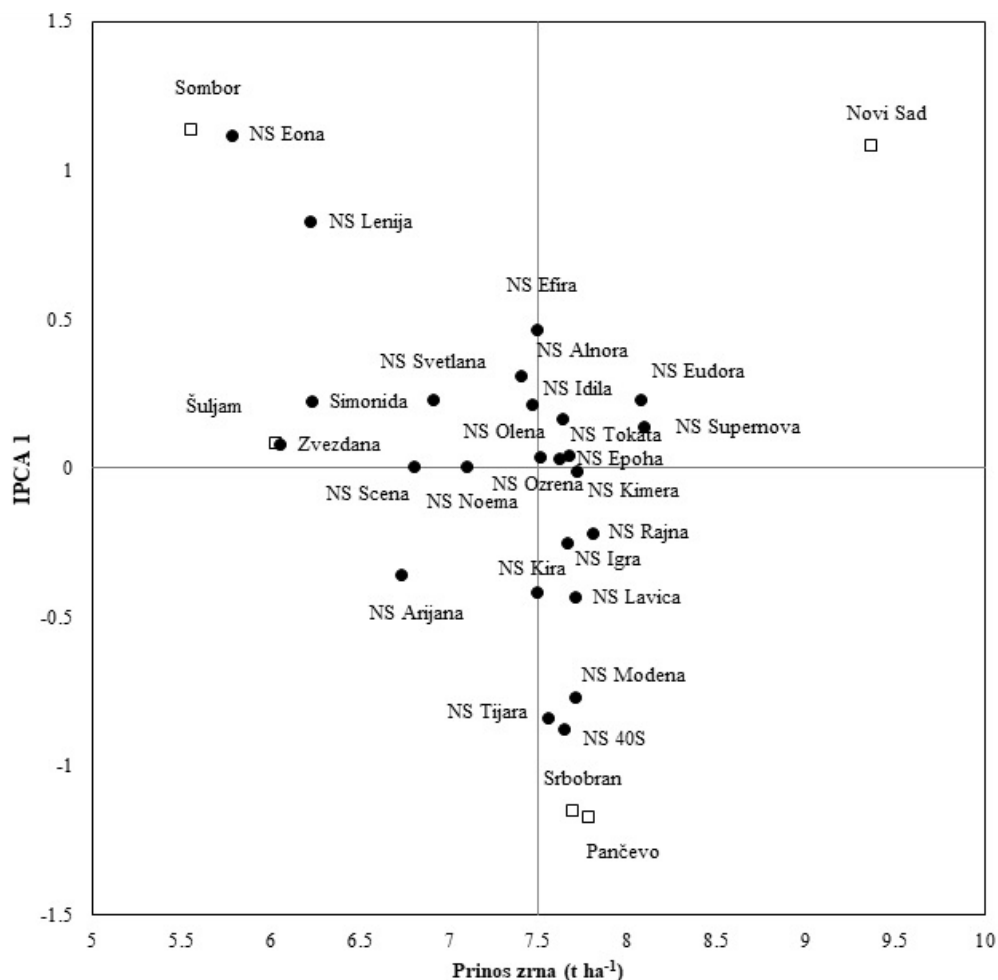
NS Lavica i NS Kimera ostvarile su prinose blizu proseka nivoa ogleda, što ukazuje na relativno ujednačenu reakciju u ispitivanim uslovima i potencijal za gajenje u različitim sredinama. Takođe, sorte kao NS Arijana u Somboru i NS Lenija u Srbobranu pokazale su niske prinose, dok su bolje rezultate ostvarile u Novom Sadu i Pančevu. Razmatrajući rezultate po sredinama i genotipovima zajedno, može se zaključiti da je varijabilnost prinosa pšenice u značajnoj meri uslovljen interakcijom $G \times E$. Na lokalitetima sa povoljnijim agroekološkim uslovima, kao što su Novi Sad i Pančevo, čak i sorte sa umerenim potencijalom postigle su visoke prinose, dok su iste sorte na manje pogodnim lokalitetima, kao što je Sombor, ispoljile slabije proizvodne rezultate.

Prema Gauch (2006), AMMI modeli poseduju dobra prediktivna svojstva i predstavljaju pouzdan metod za analizu složenih odnosa između genotipa i sredine. Generalno, preporučuje se primena AMMI modela sa prvih nekoliko IPCA osa, jer one objašnjavaju najveći procenat interakcije $G \times E$, dok su naredne ose uglavnom opterećene „šumom“, odnosno slučajnim varijacijama (Gauch, 2013). Kod AMMI1 biplota (Grafikon 1), na horizontalnoj osi prikazan je prosečan prinos zrna (glavni efekat genotipa i sredine), dok je na vertikalnoj osi prikazana prva glavna komponenta interakcije (IPCA1). Prema Voltas et al. (1999) AMMI biplotovi su veoma koristan alat za vizuelnu analizu $G \times E$ obrasca, jer omogućavaju identifikaciju genotipova i sredina koje odstupaju od proseka, kao i grupisanje genotipova sa sličnim reakcijama u određenim uslovima. U skladu sa navodima, primenjen model jeste omogućio lako uočavanje genotipova sa visokim prinosom i stabilnim vrednostima IPCA1, kao i identifikaciju onih koji pokazuju izraženu specifičnu adaptaciju na pojedine lokalitete. Primenjeni model je ukazao

na grupisanje ispitivanih sorti u tri glavne celine, koje se jasno razlikuju prema stabilnosti i reakciji na uslove sredine. NS Supernova i NS Eudora su se izdvojile kao idealne sorte, kombinujući visoke prosečne prinose ($8,0 - 8,1 \text{ t ha}^{-1}$) sa stabilnošću u svim sredinama (IPCA1 vrednosti blizu nule), preporučuju se za gajenje na svim lokalitetima. Drugu grupu čine specifično adaptirane sorte poput NS Eone i NS Lenije koje pokazuju nizak prinos i visoke pozitivne IPCA1 vrednosti. Treću grupu predstavljaju sorte kao što su NS 40S, NS Modena i NS Tijara, sa prinosom bliskim opštem proseku i visokim negativnim IPCA1 vrednostima, pa se mogu preporučiti lokalitetima Pančevo i Srbobran koji imaju sličan interakcijski odgovor. Stare standardne sorte Zvezdana i Simonida pokazale su niske prinose i bolju stabilnost.

AMMI analiza, pored procene stabilnosti i adaptabilnosti genotipova, omogućava i identifikaciju megasredina, odnosno grupa lokaliteta u kojima su reakcije genotipova slične. Na osnovu toga mogu se davati preporuke za najpogodnije sorte u određenim agroekološkim uslovima, što značajno unapređuje rejonizaciju proizvodnje i preciznije usmerava selekciju.

Rezultati ukazuju da se Novi Sad posebno izdvojio, kao najproduktivniji lokalitet sa prosečnim prinosom od $9,3 \text{ t ha}^{-1}$ i umerenom diskriminativnošću, što ukazuje na povoljne agroekološke uslove za većinu ispitivanih sorti. Nasuprot tome, Sombor se izdvojio kao lokalitet sa najnižim prosečnim prinosom od $5,5 \text{ t ha}^{-1}$ uz visoku diskriminativnost, što ukazuje na značajne razlike u adaptabilnosti ispitivanih sorti u uslovima nižeg proizvodnog potencijala. Pančevo i Srbobran ostvarili su prinose u nivou proseka ogleda oko $7,7 \text{ t ha}^{-1}$ i negativnim IPCA1 vrednostima, dok je na lokalitetu Šuljam zabeležena niska diskriminativnost između sorti.

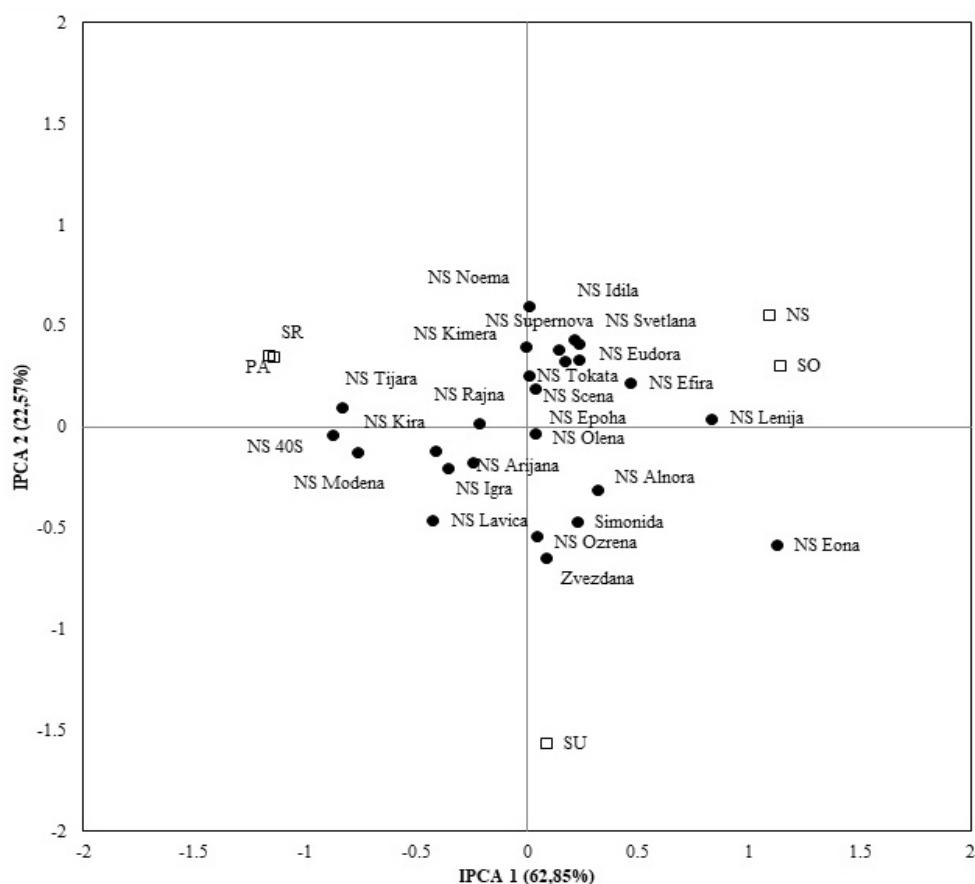


Grafikon 1. AMMI1 biplot 25 sorti pšenice gajenih na pet lokaliteta

Figure 1. AMMI1 biplot of 25 wheat varieties grown at five locations

AMMI2 biplot (Grafikon 2) prikazuje interakciju G×E korišćenjem prve dve glavne interakcijske ose (IPCA1 i IPCA2). Prikaz sa dve IPCA ose (IPCA1 i IPCA2) omogućava detaljniju analizu obrazaca adaptacije i grupisanja genotipova i lokaliteta u odnosu na AMMI1 model. Ovaj model olakšava grupisanje genotipova prema sličnosti njihovog odgovora na uslove sredine, kao i identifikaciju genotipova koji imaju najbolje performanse u specifičnim sredinama ili imaju široku adaptabilnost na

više lokaliteta (Mullualem et al., 2024). Na AMMI2 biplotu (Slika 2) lokaliteti Novi Sad (NS) i Sombor (SO) pozicionirani na desnoj strani sa pozitivnim IPCA1 vrednostima (oko 0,5 – 1,5), Srbobran (SR) i Pančevo (PA) nalaze se na levoj strani grafika sa negativnim IPCA1 vrednostima (oko -1,0 do -1,3) i pozitivnim IPCA2 (oko 0,3), dok je Šuljam (SU) izolovano pozicioniran u donjem delu grafika sa ekstremno negativnom IPCA2 vrednošću (oko -1,6).



Grafikon 2. AMMI2 biplot 25 sorti pšenice gajenih na pet lokaliteta

Figure 2. AMMI2 biplot of 25 wheat varieties grown at five locations

AMMI2 model omogućava grupisanje genotipova prema sličnosti u odgovoru na ekološke faktore i identifikaciju onih koji pokazuju najbolje performanse u specifičnim ili više različitih sredina (Bocianowski et al., 2019). Sorte koje su pozicionirane u blizini koordinatnog početka (0,0) na biplotu ukazuje na njihovu visoku stabilnost i potencijal za široku adaptabilnost, s obzirom na to da su zadržale ujednačen nivo prinosa na svim ispitivanim lokalitetima. Ovakvi genotipovi su od značaja za programe oplemenjivanja, jer pokazuju odsustvo izražene interakcije G×E, što predstavlja povoljnu osnovu za dalji razvoj visokoprinosnih sorti širokog areala gajenja. NS Olena, NS Epoha, NS Rajna i NS Scena nalaze se u centralnom

delu grafika, što ukazuje na njihovu široku adaptabilnost i sposobnost ostvarivanja stabilnih prinosa u različitim agroekološkim sredinama. NS Eona je pozicionirana u donjem desnom kvadrantu, dijagonalno od lokaliteta Srbobran i Pančevo, ukazujući da nije bila adaptirana na date lokalitete. NS Lenija pozicionirana je u desnom kvadrantu biplota, uz pozitivnu vrednost druge glavne komponente interakcije (IPCA2), što ukazuje na njenu povoljnu interakciju sa specifičnim faktorima sredine lokaliteta Sombor. Grupa sorti uključujući NS 40S i NS Tijaru pozicionirana je u levom delu grafika sa negativnim IPCA1 vrednostima, pokazujući specifičnu adaptaciju na uslove Srbobrana i Pančeva.

Zaključak

Na osnovu dobijenih rezultata istraživanja, primenjeni AMMI modeli su se pokazali kao izuzetno pouzdani za analizu multilokacijskih ogleda pšenice, čime je obezbeđen objektivan uvid u stabilnost ispitivanih genotipova i identifikaciju onih sa visokim potencijalom za prinose. AMMI1 analiza izdvojila je lokalitet Novi Sad na osnovu visoke produktivnosti i umerene diskriminacione sposobnosti, dok su se NS Supernova i NS Eudora izdvojile kao idealne sorte, kombinujući visoke prosečne prinose sa dobrom stabilnošću u svim sredinama. Sorte pozicionirane bliže koordinatnom početku u

AMMI1 grafiku, kao što su NS Olena, NS Epoha, NS Rajna i NS Scena pokazale su najveću stabilnost i najbolju opštu adaptaciju. AMMI2 analiza omogućila je preciznije grupisanje sorti i lokaliteta, tako da su sorte NS 40S i NS Tjara pokazale adaptaciju na uslove Srbobrana i Pančeva, a sorta NS Lenija na uslove u Somboru. Međutim, za sveobuhvatniju selekciju neophodno je proširiti analizu na komponente prinosa i parametre kvaliteta zrna, pri čemu bi buduća istraživanja trebalo da obuhvate veći broj lokaliteta tokom više godina.

Zahvalnica

Ovo istraživanje je podržano od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, evidencioni broj Ugovora: 451-03-33/2026-03/ 200032. Istraživanja su

u skladu sa ciljevima dva i 15 održivog razvoja Ujedinjenih nacija.

Doprinos autora

Konceptualizacija, K.A.; Metodologija, M.M.; Softver, M.M.; Priređivanje podataka, K.A.; Formalna analiza, M.M.; Istraživanje, K.A., B.J., M.M.; Resursi, M.M., B.J., S.M.; Nadzor, M.M.; Vizualizacija, J.T.; Validacija, V.A,

B.J., S.M.; Obezbeđivanje finansiranja, M.M.; Pisanje — originalna priprema nacrtu rada, K.A.; Pisanje — pregled i uređivanje, K.A, J.T., B.J., S.M., V.A., M.M.

Literatura

- Alemayehu L, Kebede M, Wada E (2025): AMMI analysis of elite bread wheat (*Triticum aestivum* L.) selections for genotype by environment interaction and stability of grain yield in Southern Ethiopia. PLOS One, Vol 20 (1): e0318559. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318559>
- Banjac B, Mladenov V, Petrović S, Vojnović Đ, Begić D, Šućur R, Jocković B (2022): Varijabilnost pokazatelja tehnološkog kvaliteta genotipova pšenice u različitim mikroklimatskim uslovima. Selekcija i semenarstvo, Vol 28 (1): 43-54. <https://doi.org/10.5937/SelSem2201043B>
- Bocianowski J, Warzecha T, Nowosad K, Bathelet R (2019): Genotype by environment interaction using AMMI model and estimation of additive and epistasis gene effects for 1000-kernel weight in spring barley (*Hordeum vulgare* L.). Journal of Applied Genetics, Vol 60 (2): 127-135. <https://doi.org/10.1007/s13353-019-00490-2>
- Bratković K, Đorović S, Luković K, Perišić V, Rakonjac A, Matković Stojšin M (2025): Uticaj genotipa i vegetacione sezone na produktivne osobine jarog dvoredog ječma. Selekcija i semenarstvo, Vol 31 (1): 1-10. <https://doi.org/10.5937/SelSem2501001B>
- Đekić V, Perišić V, Luković K, Popović V, Terzić D, Đurić N (2019): Uticaj klimatskih

- promena na prinos zrna pšenice. Zbornik naučnih radova Instituta PKB Agroekonomik, Vol 25 (1-2): 9-18.
- FAOSTAT (2025): Food and agricultural organisation of the United Nations FAOSTAT statistical database. Available in <https://www.fao.org/faostat/en/#data> (25. January, 2026)
- Foley DJ, Thenkabail PS, Aneece IP, Teluguntla PG, Oliphant AJ (2020): A meta-analysis of global crop water productivity of three leading world crops (wheat, corn, and rice) in the irrigated areas over three decades. *International Journal of Digital Earth*, Vol 13 (8): 939–975. <https://doi.org/10.1080/17538947.2019.1651912>
- Gauch HG (2006): Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE. *Crop Science*, Vol 46 (4): 1488-1500. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.07-0193>
- Gauch HG, Zobel RW (1997): Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Crop Science*, 37 (2): 311-326. <https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700020002x>
- Gauch Jr HG (1988): Model selection and validation for yield trials with interaction. *Biometrics*, 44: 705-715. <https://doi.org/10.2307/2531585>
- Gauch Jr HG (2013): A simple protocol for AMMI analysis of yield trials. *Crop Science*, 53 (5): 1860-1869. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.04.0241>
- Jędzura S, Bocianowski J, Matysik P (2023): The AMMI model application to analyze the genotype–environment interaction of spring wheat grain yield for the breeding program purposes. *Cereal Res. Commun.* Vol 51 (1): 197-205. <https://doi.org/10.1007/s42976-022-00296-9>
- Mirosavljević M, Momčilović V, Aćin V, Jocković B, Pržulj N, Jaćimović G (2025): Yield Determination in Major Small Grain Crops in Response to Nitrogen Fertilization. *Plants*, Vol 14 (7): 1017. <https://doi.org/10.3390/plants14071017>
- Mullualem D, Tsega A, Mengie T, Fentie D, Kassa Z, Fassil A, Wondaferew D, Gelaw TA, Astatkie T (2024): Genotype-by-environment interaction and stability analysis of grain yield of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes using AMMI and GGE biplot analyses. *Heliyon*, Vol 10 (12): e32918. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32918>
- Nóia Júnior RS, Deswarte JC, Cohan JP, Martre P, van der Velde M, Lecerf R, Webber H, Ewert F, Ruane AC, Slafer GA, Asseng S (2023): The extreme 2016 wheat yield failure in France. *Global Change Biology*, 29 (11): 3130–3146. <https://doi.org/10.1111/gcb.16662>
- Pržulj N, Mirosavljević M, Čanak P, Zorić M, Boćanski J (2015): Evaluation of spring barley performance by biplot analysis. *Cereal Research Communications*, 43 (4): 692-703. <https://doi.org/10.1556/0806.43.2015.018>
- Republički hidrometeorološki zavod Srbije (2024): Mesečni agrometeorološki bilteni i arhivirani meteorološki podaci za 2023. i 2024. godinu. RHMZ Srbije. Available in <https://hidmet.gov.rs/> (27. April, 2026)
- Saha S, Kucher OD, Utkina AO, Rebouh NY (2025): Precision agriculture for improving crop yield predictions: a literature review. *Frontiers in Agronomy*, 7: 1566201. <https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1566201>
- Sanjay PS, Prakash S (2024): Advancements of Breeding and Genomics in Wheat (*Triticum aestivum* L.): Enhancing Yield and Nutritional Value for Sustainable Agriculture. *Journal of Advances in Biology and Biotechnology*, Vol 27 (5): 863–875. <https://doi.org/10.9734/jabb/2024/v27i5848>
- Voltas J, Romagosa I, Lafarga A, Armesto AP, Sombrero A, Araus JL (1999): Genotype by environment interaction for grain yield and carbon isotope discrimination of barley in Mediterranean Spain. *Aust. J. Agric. Res.* Vol 50 (7): 1263-1271. <https://doi.org/10.1071/AR98137>
- Xiong W, Reynolds MP, Crossa J, Schulthess U, Sonder K, Montes C, Addimando N, Singh RP, Ammar K, Gerard B, Payne T (2021): Increased ranking change in wheat breeding under climate change. *Nature Plants*, Vol 7 (9): 1207-1212. <https://doi.org/10.1038/s41477-021-00988-w>
- Yue H, Wang Y, Chen Z, Zhu J, Behera PP,

Liu P, Yang H, Wei J, Bu J, Jiang X, Ma W (2025): Assessing the role of genotype by environment interaction of winter wheat cultivars using envirotyping techniques in North China. *Front. Plant Sci.* 16: 1538661. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1538661>

G×E INTERACTION AND YIELD VARIABILITY OF WHEAT ACROSS MULTI-ENVIRONMENT TRIALS USING THE AMMI MODEL

Krstina Aleksić, Jovana Timić¹, Bojan Jocković¹, Sanja Mikić¹,
Vladimir Aćin, Milan Mirosavljević¹

Summary

Under conditions of climate variability and heterogeneity of agro-ecological environments, assessment of genotype × environment (G×E) interaction constitutes a fundamental basis for the selection of wheat genotypes exhibiting both stable yield performance and strong adaptability across diverse environments. Accordingly, the objective of this study was to evaluate yield variability and G×E interactions among winter wheat genotypes grown across multiple locations in the Republic of Serbia. Multilocal field trials involving 25 wheat varieties were conducted over a single growing season at five locations. Results revealed statistically significant variability in grain yield attributable to genotype, location, and their interaction—with the location effect being the most pronounced. Application of the AMMI (Additive Main Effects and Multiplicative Interaction) model enabled identification of genotypes combining high yield potential with satisfactory stability. Visualization of results via a genotype–environment biplot facilitated interpretation of response patterns, thereby clarifying the nature and magnitude of genotype-specific adaptability across the tested environments. The highest mean yields were recorded for the newly released varieties NS Supernova (8.08 t ha⁻¹), NS Eudora (8.07 t ha⁻¹), and NS Rajna (7.80 t ha⁻¹); all three demonstrated robust adaptability and consistently high yields across multiple locations. In contrast, varieties such as NS Igra, NS Lavica, and NS Kimera yielded values close to the overall site-mean across most locations, indicating relatively uniform responsiveness and broad adaptability under variable agro-ecological conditions. Novi Sad and Pančevo emerged as locations with comparatively favorable agro-ecological conditions, where even varieties possessing only moderate yield potential achieved high absolute yields. Based on these findings, a set of promising genotypes was identified, characterized by a favorable combination of high and stable yield, and recommended for advancement into subsequent breeding stages and multi-year, multi-environment testing.

Key words: AMMI, genotype × environment interaction, grain yield, *Triticum sp.*

Primljen: 01.04.2026.

Prihvaćen: 11.05.2026.