

UNIVERZITET U BEOGRADU
POLJOPRIVREDNI FAKULTET

Nemanja J. Nišavić

ASOCIJATIVNOST MOLEKULARNIH
KARAKTERISTIKA RODITELJSKIH LINIJA
KUKURUZA I STABILNOST PRINOSA ZRNA
NJIHOVIH HIBRIDA

doktorska disertacija

Beograd, 2025

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF AGRICULTURE

Nemanja J. Nišavić

ASSOCIATION OF MOLECULAR
CHARACTERISTICS OF MAIZE PARENTAL
LINES AND GRAIN YIELD STABILITY OF
THEIR HYBRIDS

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2025

UNIVERZITET U BEOGRADU
Poljoprivredni fakultet

Mentori:

Dr Tomislav Živanović, redovni profesor,
Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Beogradu,
UNO Genetika

Dr Zoran Čamdžija, viši naučni saradnik,
Institut za kukuruz "Zemun Polje",
UNO Biotehničke nauke – ratarstvo i povrtarstvo

Članovi komisije:

Dr Slaven Prodanović, redovni profesor,
Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Beogradu
UNO Oplemenjivanje biljaka

Dr Gordana Branković, redovni profesor,
Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Beogradu
UNO Genetika

Dr Sofija Božinović, naučni savetnik,
Institut za kukuruz "Zemun Polje",
UNO Biotehničke nauke – ratarstvo i povrtarstvo

Datum odbrane doktorske disertacije: _____

ZAHVALNICA

Zahvaljujem se Institutu za kukuruz „Zemun Polje“ na tome što mi je omogućio izradu doktorske disertacije.

Posebnu zahvalnost dugujem mentorima dr Tomislavu Živanoviću, redovnom profesoru Poljoprivrednog fakulteta Univerziteta u Beogradu, i dr Zoranu Čamdžiji višem naučnom saradniku Instituta za kukuruz „Zemun Polje“. Zahvaljujući njihovoj podršci, vođstvu, znanju koje su nesebično delili, a najviše strpljenju, ova bitna tema koju su mi predložili pretočena je u pisanu formu.

Zahvaljujem se dr Nenadu Deliću i dr Jovanu Pavlovu iz Instituta za kukuruz „Zemun Polje“, koji su me prihvatili kao člana svoje grupe, a veliko hvala dugujem kolegama Aleksandru Bajiću, Radmili Savić, Svetlani Bojović i Jeleni Nikolić na podršci i motivaciji.

Zahvaljujem se dr Sofiji Božinović i dr Nikoli Grčiću iz Instituta za kukuruz „Zemun Polje“, na korisnim sugestijama i uputstvima radi poboljšanja kvaliteta ove teze, kao i na kolegijalnosti i susretljivosti.

Veliko hvala dugujem dr Aniki Kovinčić iz Instituta za kukuruz „Zemun Polje“, sestri i kolegici koja je doktorske studije učinila lakšim i prijatnijim.

Hvala doc. dr Ireni Radinović sa Poljoprivrednog fakulteta Univerziteta u Beogradu na pomoći i korisnim savetima prilikom pisanja naučnog rada.

Hvala kolegama Oliveri Đorđević Melnik i Marku Mladenoviću, sa kojima sam napravio prve korake u Institutu za kukuruz „Zemun Polje“.

Zahvalnost dugujem kolegama i prijateljima iz MDPI koji su mi bili podrška i motivacija da nastavim studije.

Neizmernu zahvalnost dugujem svojoj porodici na podršci, strpljenju, razumevanju i motivaciji. Oni su bili inicijator i najveći razlog zbog koga je ova teza privedena kraju. Ovu disertaciju posvećujem njima.

ASOCIJATIVNOST MOLEKULARNIH KARAKTERISTIKA RODITELJSKIH LINIJA KUKURUZA I STABILNOST PRINOSA ZRNA NJIHOVIH HIBRIDA

Sažetak

Cilj savremenog oplemenjivanja kukuruza je stvaranje hibrida koji ostvaruju stabilan prinos zrna u različitim proizvodnim područjima kroz višegodišnji period. U ovom istraživanju ispitivana su 22 hibrida kukuruza novije generacije registrovana u Institutu za kukuruz „Zemun Polje“. Navedeni hibridi pripadaju FAO grupama zrenja 300–800. Višelokacijski ogledi izvedeni su tokom dve proizvodne sezone (2019. i 2020.) na pet proizvodno najznačajnijih lokaliteta u Srbiji (Zemun Polje, Pančevo, Bečej, Bačka Topola, Požarevac). Ogled je postavljen po tipu slučajnog blok sistema u dva ponavljanja. Prinosi zrna su analizirani trofaktorijalnom analizom varijanse (ANOVA), parametrima stabilnosti po Eberhart & Russell (b_i , S^2d_i) i Francis & Kannenberg (CV), kao i GGE biplot analizom. Pored toga, odrađena je genotipizacija pomoću SNP markera 29 roditeljskih linija korišćenih u stvaranju pomenutih hibrida kako bi se ocenila njihova divergentnost i oplemenjivački potencijal.

Rezultati pokazuju da su genotip, lokalitet i godina, kao i njihove interakcije, značajno uticali na prinos zrna, pri čemu je faktor genotipa imao najveći doprinos ukupnoj varijabilnosti. Prosečan prinos zrna po lokalitetu kretao se od 7,5 t ha⁻¹ (ZP 6006b) do 15,57 t ha⁻¹ (ZP 6715). Hibrid ZP 6364 ostvario je najviši prosečan prinos na svim posmatranim lokalitetima (13,58 t ha⁻¹) koji se istakao i stabilnošću prinosa te se može preporučiti za gajenje u svim glavnim proizvodnim rejonima, uključujući i manje povoljne uslove. ZP 5090 je ostvario najveći prosečan prinos zrna unutar grupa FAO 300–500, pri čemu se posebno istakao u jednom od proizvodno najnepovoljnijih okruženja (PO19), što ukazuje na njegovu široku adaptabilnost. ZP 457 je ostvario visok prinos zrna (13,42 t ha⁻¹) i istovremeno je izdvojen kao jedini stabilan hibrid prema svim parametrima i pogodan za širu proizvodnju, dok je veći broj ostalih hibrida pokazao stabilne prinose uz užu adaptaciju na specifične (pretežno povoljne) uslove. U grupi veoma ranih hibrida (FAO 300), hibrid Zombor ostvario je nešto viši prinos zrna (12,48 t ha⁻¹) od ostalih u toj grupi uz izrazito nizak sadržaj vlage u zrnu pri berbi (12,85%), što predstavlja značajnu prednost sa aspekta rane berbe i skladištenja zrna. Uočen je obrazac interakcije genotip × okruženje koji je u skladu sa prethodnom rejonizacijom proizvodnih područja: hibridi kasnijih FAO grupa (FAO 600–800) najviše prinose ostvaruju u najpovoljnijim regionima (npr. Bačka), dok hibridi ranijih grupa (FAO 300–500) postižu relativno stabilnije prinose u manje povoljnim rejonima (poput južnog Banata i Pomoravsko-Podunavskog regiona).

GGE biplot analizom otkrivene su dve potencijalne megaokoline: prva koju čine Pančevo i Požarevac, i druga koju čine Bačka Topola i Bečej. Lokalitet Zemun Polje je imao različitu pripadnost u dve posmatrane godine, što naglašava potrebu za dodatnim ispitivanjima. Analiza *Which-Won-Where* grafikona identifikovala je ZP 5090 kao najbolji hibrid u Pančevu i Požarevcu, ZP 6715 u Bačkoj Topoli, dok je ZP 6364 ostvario najbolje rezultate u BC20, okruženju koje se pokazalo najreprezentativnijim i informativnim za

ocenu hibrida. Analiza diskriminativnosti i reprezentativnosti pokazala je da su BC20 i ZP20 najinformativnija okruženja, dok su PO19 i PA19 najmanje reprezentativna, što će omogućiti racionalizaciju budućih ogleda i smanjenje troškova.

Paralelno, molekularne analize potvrdile su heterotičku klasifikaciju roditeljskih linija i ukazale na genotipove od posebnog interesa za dalje oplemenjivanje. Među njima se posebno izdvajaju linije L73B048, L74B049, L94B034, L74L065, L76B051, L77B037 i L77B043 kao nosioci poželjnih osobina u roditeljskim kombinacijama. Usled dobrih performansi potomstva, linije L73B013, L-255/75-5, L-335/99, L76B004 se preporučuju za zadržavanje u programima oplemenjivanja bilo u kombinaciji sa drugim roditeljskim linijama, ili kao osnova za dalju selekciju i dobijanje boljih genotipova. Kombinovan pristup (poljski ogledi i genotipizacija) omogućava identifikaciju superiornih hibridnih kombinacija i perspektivnih roditeljskih linija, a samim tim i preciznije preporuke za gajenje određenih hibrida u odgovarajućim proizvodnim rejonima.

Ključne reči: analiza stabilnosti, GGE biplot, $G \times E$ interakcija, kukuruz, prinos zrna

Naučna oblast: Biotehničke nauke

Uža naučna oblast: Ratarstvo i povrtarstvo

UDK: 633.15:631.52]:631.559(043.3)

ASSOCIATION OF MOLECULAR CHARACTERISTICS OF MAIZE PARENTAL LINES AND GRAIN YIELD STABILITY OF THEIR HYBRIDS

Abstract

The goal of modern maize breeding is to create hybrids that achieve stable grain yields across different production areas over a multi-year period. In this study, 22 newly registered maize hybrids developed at the Maize Research Institute “Zemun Polje” were evaluated. These hybrids belong to FAO maturity groups 300–800. Multi-location field trials were conducted during two production seasons (2019 and 2020) at five major maize-growing locations in Serbia (Zemun Polje, Pančevo, Bečej, Bačka Topola, and Požarevac). The trials were conducted in a randomized complete block design with two replicates. Grain yields were analyzed using three-way analysis of variance (ANOVA), stability parameters according to Eberhart & Russell (b_i , S^2d_i) and Francis & Kannenberg (CV), as well as GGE biplot analysis. In addition, SNP genotyping was performed on 29 parental lines used in the development of the hybrids in order to assess their genetic distances and breeding potential.

The results showed that genotype, location, and year, as well as their interactions, had a significant effect on grain yield, with genotype contributing the most to total variability. Average grain yield per location ranged from 7.5 t ha⁻¹ (ZP 6006b) to 15.57 t ha⁻¹ (ZP 6715). Hybrid ZP 6364 achieved the highest average yield across all locations (13.58 t ha⁻¹) and also stood out in terms of yield stability, thus being recommended for cultivation in all major production regions, including less favorable conditions. ZP 5090 achieved the highest average yield among FAO 300–500 hybrids, with particularly outstanding performance in one of the least favorable environments (PO19), which indicates its wide adaptability. ZP 457 achieved a high yield (13.42 t ha⁻¹) and was identified as the only stable hybrid according to all stability parameters, making it suitable for production in different environments. Several other hybrids showed stable yields but with narrower adaptation to specific, mostly favorable, environments. Among very early hybrids (FAO 300), Zombor achieved a higher yield (12.48 t ha⁻¹) than the others in its group, along with very low grain moisture content at harvest (12.85%), which is a major advantage for early harvesting and grain storage. A genotype × environment interaction pattern is noticeable, which is line with previous regionalization of production areas: late-maturing hybrids (FAO 600–800) achieved the highest yields in the most favorable regions (e.g., Bačka), while early-maturing hybrids (FAO 300–500) display relatively more stable yields in less favorable regions (e.g., southern Banat and the Pomoravlje–Podunavlje regions).

GGE biplot analysis revealed two potential mega-environments: the first comprising Pančevo and Požarevac, and the second comprising Bačka Topola and Bečej. The Zemun Polje site showed different results in the two years, emphasizing the need for further trials. The Which-Won-Where biplot identified ZP 5090 as the best hybrid in Pančevo and Požarevac, ZP 6715 in Bačka Topola, while ZP 6364 performed best in BC20, the environment identified as the most representative and informative for genotype evaluation. The analysis of discriminativeness and representativeness showed that BC20 and ZP20 were

the most informative environments, while PO19 and PA19 were the least representative, which will enable rationalization of future trials and cost reduction.

Simultaneously with hybrid analyses, molecular analyses of parental lines confirmed the classification into heterotic groups and identified genotypes of particular interest for future breeding programs. Among them, lines L73B048, L74B049, L94B034, L74L065, L76B051, L77B037, and L77B043 stood out as carriers of desirable traits in parental combinations. Due to the good performance of their progeny, lines L73B013, L-255/75-5, L-335/99, and L76B004 are recommended to be kept in breeding programs either in combination with other parental lines or as a basis for further reselection and improvement. The combined approach (field trials and genotyping) enables the identification of superior hybrid combinations and promising parental lines, and thereby provides more precise recommendations for cultivating specific hybrids in appropriate production regions.

Keywords: $G \times E$ interaction, GGE biplot, grain yield, maize, stability analysis.

Scientific field: Biotechnical sciences

Scientific subfield: Field and Vegetable Crops

UDK: 633.15:631.52]:631.559(043.3)

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. CILJ ISTRAŽIVANJA	3
3. PREGLED LITERATURE	4
3.1. Oplemenjivanje na prinos zrna	7
3.2. Višelokacijski ogledi i interakcija $G \times E$	10
3.3. Parametri stabilnosti prinosa zrna kukuruza	13
3.3.1. Neparametrijske statistike	14
3.3.2. Parametrijske statistike	16
3.4. Primena molekularnih markera u oplemenjivanju kukuruza	24
4. RADNA HIPOTEZA	29
5. MATERIJAL I METODE RADA	30
5.1. Biljni materijal	30
5.2. Postavka poljskih ogleda	31
5.3. Meteorološki pokazatelji	32
5.4. Biometrijska analiza podataka	34
5.5. Statistička analiza	35
5.6. Molekularne karakteristike	37
6. REZULTATI I DISKUSIJA	39
6.1. ANOVA	39
6.2. Analiza parametara stabilnosti po Eberhart & Russell i Francis & Kannenberg ...	40
6.3. Analiza GGE biplota i vrednosti genetičke distance (GD) roditeljskih komponenti ispitivanih hibrida	47
6.3.1. Analiza GGE biplota grupa FAO 300–500	54
6.3.2. Analiza GGE biplota grupa FAO 600–800	65
6.3.3. Rangiranje genotipova u odnosu na idealan genotip	78
6.3.4. Ko je gde pobednik (<i>Which-Won-Where</i>)	80
6.3.5. Prosečna vrednost naspram stabilnosti (<i>Mean vs Stability</i>)	83
6.3.6. Diskriminativnost naspram reprezentativnosti	85
6.3.7. Rangiranje okruženja u odnosu na idealno okruženje	89
6.3.8. Analiza molekularnih markera posmatranih roditeljskih komponenti ispitivanih hibrida	91
7. ZAKLJUČAK	96
8. LITERATURA	99
9. BIOGRAFIJA	130

Izjava o autorstvu.....	131
Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada.....	132
Izjava o korišćenju.....	133

1. UVOD

Kukuruz (*Zea mays* L.) je uz pšenicu i pirinač jedan od najznačajnijih useva u celokupnoj svetskoj poljoprivrednoj proizvodnji. Prema podacima za 2023. godinu, po ukupnim zasejanim površinama u svetu je na drugom mestu sa preko 208 miliona hektara, odmah iza pšenice (FAOSTAT, 2024). Prema istim podacima, kukuruz je po ukupnoj svetskoj proizvodnji (preko 1,24 milijardi tona u zrnu) kao i po prosečnom prinosu zrna ($5,96 \text{ t ha}^{-1}$) na prvom mestu među žitima. Najveći proizvođač kukuruza na svetu su Sjedinjene Američke Države sa preko 389 miliona tona i prosečnim prinosom zrna od $\sim 11,1 \text{ t ha}^{-1}$ u 2023. godini (FAOSTAT, 2024), dok se, prema istim podacima, Srbija nalazi na dvadeset drugom mestu sa oko 6,6 miliona tona kukuruza u zrnu i prosečnim prinosom od $6,6 \text{ t ha}^{-1}$ (prosečan prinos zrna u periodu 2019–2023).

Zahvaljujući velikoj genetičkoj varijabilnosti i brojnim genotipovima, kukuruz se uspešno gaji širom sveta za različite namene. Najveći značaj kukuruza je u ishrani ljudi, kako direktno (u vidu celog zrna ili brašna), ali i indirektno u vidu brojnih prerađevina poput ulja, skroba, dekstrina, šećera i organskih kiselina. U literaturi se navodi preko 1000 različitih proizvoda dobijenih preradom kukuruza, a prema nekim izvorima i preko 1500. U stočarskoj proizvodnji, kukuruz zauzima značajnu ulogu u ishrani domaćih životinja gde se koristi celo zrno ili nadzemna biomasa (sveža ili za pripremu silaže). Pored upotrebe u ishrani ljudi i životinja, prerađevine kukuruza se koriste i za dobijanje farmaceutskih i kozmetičkih proizvoda, kao i proizvoda za tekstilnu, hemijsku i druge industrije.

S obzirom da je u dvadesetom veku došlo do naglog razvoja nauke u svim pravcima, tako je bolje poznavanje genetike doprinelo naglom i velikom povećanju potencijala rodности kod kukuruza. Program klasičnog oplemenjivanja kukuruza je uspešno započet u Sjedinjenim Američkim Državama krajem XIX i početkom XX veka, odakle je prenet na ostali deo sveta. Savremeni metodi oplemenjivanja kukuruza zasnovani su na konceptu stvaranja hibrida, a stvaranje F_1 hibrida visokog potencijala rodности postaje najvažniji cilj oplemenjivača. U našoj zemlji je ovaj zadatak uspešno ostvaren već u prvim decenijama rada na oplemenjivanju kukuruza jer su stvoreni hibridi koji su svojom rodnošću i drugim agronomskim karakteristikama (dobra prilagođenost na naše vremenske i zemljišne uslove, veća tolerantnost na sušu, čvrsto stablo, ranostasnost i ujednačenost sazrevanja, pogodnost za mehaničku berbu i kvalitetno zrno) prevazilazili dotadašnje najrodnije sorte, tj. populacije. (Institut za kukuruz "Zemun Polje", 2000)

Krajem XX i početkom XXI veka napredak u tehnologijama sekvenciranja, genotipizacije, modifikacije genoma, stvaranja dihaploida, kao i u nauci o podacima (*data science*), ostvarili su veliki uticaj na savremeno oplemenjivanje kukuruza. Kao posledica svega navedenog, pored značaja za globalnu poljoprivredu i industriju, kukuruz je postao i značajan eksperimentalni model organizam. Kao takav, kukuruz je bio među prvim organizmima za koje su generisane molekularne mape, i to upotrebom različitih tipova molekularnih markera (RFLP, SSR, RAPD, AFLP).

Usled velike zastupljenosti i ravnomerne raspoređenosti u genomu kukuruza, kao najčešća klasa DNK polimorfizama, široko su prihvaćeni polimorfizmi pojedinačnih nukleotida, tj. SNP markeri (*Single Nucleotide Polymorphism*, SNP, snip). Smanjenje cene koštanja upotrebe ovog tipa markera učinilo ih je jednom od najvažnijih metoda

genotipizacije u savremenom oplemenjivanju kukuruza, a naročito za izučavanje genomske asocijacije (GWAS—*Genome-Wide Association Studies*), ocenu divergentnosti linija, oceni genetičke čistoće, itd. SNP i drugi molekularni markeri se koriste i za detekciju QTL-ova čija ekspresija varira u različitim ekološkim uslovima ili različitim interakcijama sa spoljašnjom sredinom (QTL×E). Na osnovu SNP-ova ustanovljen je veći broj QTL-ova za otpornost kukuruza prema abiotičkim i biotičkim stresovima, kao i QTL-ova zaduženih za ekspresiju poljoprivredno značajnih svojstava (Xie, et al., 2019; Zhu, et al., 2019; Tomkowiak, et al., 2020), kako na kukuruzu, tako i na drugim značajnim poljoprivrednim vrstama (Guan, et al., 2018; Tadesse, et al., 2019; Tura, et al., 2019; Deng, et al., 2019; Xie, et al., 2020; Farouk, et al., 2021).

Kako su suša i visoke temperature jedan od glavnih ograničavajućih faktora u proizvodnji kukuruza, sve veći broj istraživanja za cilj ima detekciju genotipova koji će u takvim proizvodnim uslovima ostvariti maksimalan prinos zrna. Stoga, utvrđivanje genetske baze odgovora na stres suše i stres izazvan visokim temperaturama postaje jedan od ciljeva savremenog oplemenjivanja kukuruza. Iako se klima republike Srbije može opisati kao umereno-kontinentalna, sa aspekta gajenja kukuruza može se zaključiti da je u petogodišnjem periodu u proseku karakterišu jedna izrazito povoljna godina, jedna sušna godina i tri godine čiji se meteorološki pokazatelji kreću oko srednjih vrednosti za podneblje. Bez obzira na relativno malu geografsku površinu koju republika Srbija zauzima (88490 km² od čega je 922980 ha pod kukuruzom) (FAOSTAT, 2024), može se razdvojiti nekoliko proizvodno značajnih regiona u kojima hibridi određenih FAO grupa zrenja ili određeni hibridi unutar jedne FAO grupe ostvaruju bolje rezultate u poređenju sa drugima. Usled razlika u lokalnim agroekološkim uslovima, važno je razjasniti uticaj koji različiti ograničavajući faktori imaju na prinos zrna u različitim proizvodnim regionima.

Kao potencijalno rešenje ovog problema nameće se mogućnost detektovanja materijala koji će ostvariti potomstvo (tj. hibride) koje će biti usko adaptabilno za određeni region gajenja. Iako bi na višelokacijskim ogledima u različitim agroekološkim uslovima stabilnost prinosa takvih hibrida potencijalno znatno varirala, njihov visoki potencijal rodnošći došao bi do izražaja u određenim proizvodnim regionima. Ciljanim oplemenjivanjem na najznačajnije proizvodne regione u Srbiji kao rezultat dobili bi se visokoprinosni hibridi koji bi ostvarili značajno učešće na tržištu, a u isto vreme doveli do smanjenja troškova marketinga i komercijalnih delatnosti oplemenjivačkih kuća.

Upravo ovo će biti jedan od zadataka ovog rada – putem oglada utvrditi da li među postojećim registrovanim hibridima Instituta za kukuruz „Zemun Polje“ postoje takvi genotipovi koji su usko specijalizovani za jedan ili više najvažnijih proizvodnih regiona. Istovremeno, na osnovu rezultata poljskih oglada utvrdiće se i koji od registrovanih ZP hibrida poseduje najizraženiju stabilnost prinosa zrna i najširu adaptabilnu moć, te koji će potencijalno biti interesantan za najširi region gajenja. U isto vreme, genotipizacijom pomoću SNP markera će se pokušati utvrditi da li neke od roditeljskih linija mogu ostvariti takvo potomstvo ili predvideti ukrštanjem kojih roditeljskih komponenti se može očekivati potomstvo uske, a kojih potomstvo široke adaptabilnosti.

2. CILJ ISTRAŽIVANJA

Savremeni trendovi u poljoprivredi nalažu konstantno unapređenje proizvodnje i pronalaženje novih odgovora na nadolazeće izazove. Iako cilj savremenog oplemenjivanja kukuruza ostaje nepromenjen (stvaranje hibrida koji ostvaruju stabilan prinos u različitim proizvodnim područjima kroz višegodišnji period), velika konkurencija na tržištu zahteva uvođenje novih hibrida koji će odgovarati zahtevima potrošača.

Osnovni ciljevi ove doktorske disertacije su:

- Proučavanje uticaja lokaliteta i okruženja na variranje prinosa zrna kukuruza.
- Otkrivanje statistički značajnih razlika između ispitivanih hibrida kukuruza u pogledu prinosa zrna, što će biti ustanovljeno u multilokacijskim ogledima u periodu od dve godine.
- Otkrivanje hibrida široke adaptabilnosti na osnovu različitih parametara stabilnosti, koji će biti potencijalno interesantni za većinu proizvodnih regiona u Srbiji. Istovremeno, cilj je i sticanje uvida koji hibridi su uže adaptivne moći, ali potencijalno prinostniji u specifičnim proizvodnim uslovima. Rezultati poljskih ogleda će poslužiti za odabir perspektivnih hibrida koji će biti predloženi za uvođenje u proizvodnju i za komercijalizaciju.
- Uvid u nivo varijabilnosti ispitivane germplazme pomoću sprovedene karakterizacije linija i hibrida kukuruza, čime će se olakšati i ubrzati izbor roditeljskih linija za stvaranje novih hibrida kukuruza.
- Detekcija linija kukuruza koje daju potomstvo široke adaptabilnosti, ali i onih linija koje će dati usko adaptibilno potomstvo koje će najbolje rezultate ostvariti u određenim proizvodnim regionima. Ovaj cilj će se ostvariti genotipizacijom roditeljskih komponenti pomoću SNP markera.
- Smanjenje obima ispitivanja hibrida u postkomisijskim ogledima biranjem adekvatnih roditelja ili roditeljskih parova i ciljanim oplemenjivanjem na najvažnije rejone gajenja u Srbiji, što će za posledicu imati smanjenje troškova marketinga i komercijalno-finansijske delatnosti.

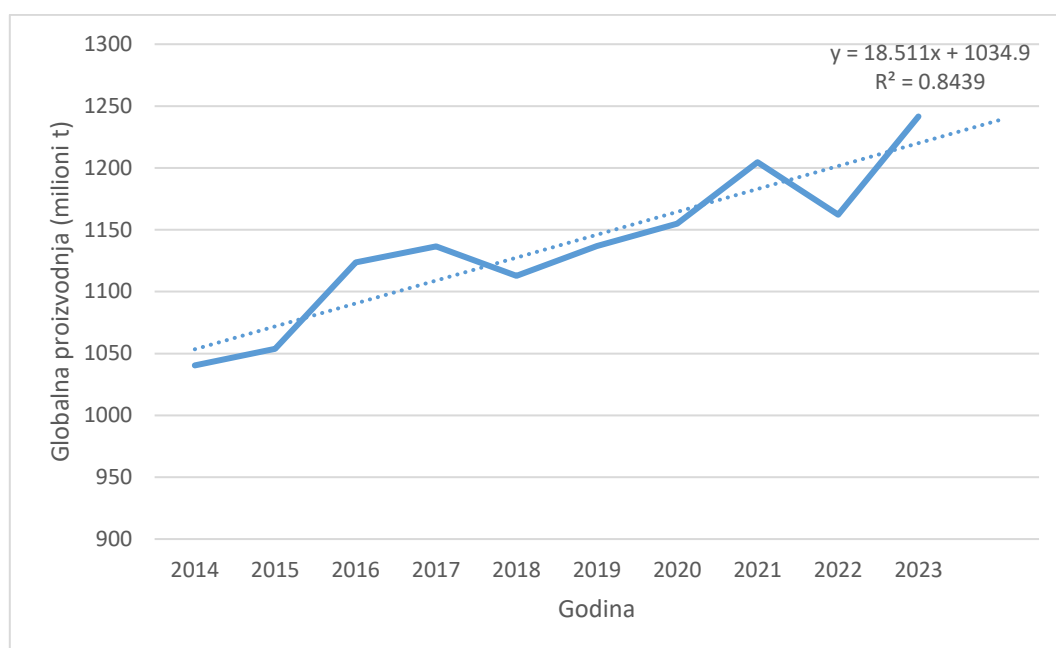
3. PREGLED LITERATURE

Kukuruz (*Zea mays* L.) je član familije trava (*Poaceae*), podfamilije *Panicoideae*, i uz pšenicu i pirinač jedan je od najznačajnijih useva u celokupnoj svetskoj poljoprivrednoj proizvodnji. Zahvaljujući velikoj genetičkoj varijabilnosti kukuruz se uspešno gaji širom sveta za različite namene, a usled velikog privrednog značaja površine pod njim u svetu se povećavaju iz godine u godinu. Prema podacima Organizacije za hranu i poljoprivredu (*Food and Agriculture Organization*, FAO) za 2023. godinu, prema ukupnim zasejanim površinama kukuruz je u svetu na drugom mestu (preko 208 miliona hektara), po ukupno ostvarenoj svetskoj proizvodnji takođe na drugom (preko 1,24 milijardi tona), a po prinosu zrna po jedinici površine kukuruz se nalazi na prvom mestu u poređenju sa ostalim žitima (FAOSTAT, 2024). Najveći proizvođač kukuruza su Sjedinjene Američke Države sa preko 389 miliona tona u 2023. godini (FAOSTAT, 2024), dok se, prema istim podacima, Srbija nalazi na dvadeset drugom mestu sa ~6,6 miliona tona kukuruza u zrnu (Tabela 1). Proizvodnja kukuruza u Srbiji se odvija mahom u ravničarskim predelima do 300 metara nadmorske visine (oko 70%), a manjim delom u brdsko-planinskim područjima do 700 m nadmorske visine (oko 30%) (Stojaković, et al., 2011). Prema poslednjim podacima FAOSTAT-a (2024), kukuruz se u Republici Srbiji gajio na 922.980 ha (podaci za 2023. godinu). Međutim, očekuje se da će se u određenim rejonima površine pod kukuruzom smanjiti i za 7,66% (Tričković, et al., 2023).

Tabela 1. Najveći proizvođači kukuruza u svetu (2023. godina) (FAOSTAT, 2024).

Mesto	Država	Milioni t
1	SAD	389,69
2	Kina	289,09
3	Brazil	131,95
4	Argentina	41,41
5	Indija	38,09
6	Ukrajina	31,03
7	Meksiko	27,55
8	Indonezija	19,99
9	Rusija	16,60
10	Južnoafrička Republika	16,43
...		
22	Republika Srbija	6,63
Ukupno	Svet	1241,56

Proizvodnja kukuruza u svetu u poslednjoj deceniji beleži rast, od 888 miliona tona u 2011. godini do 1241 miliona tona u 2023. godini (Grafik 1). Predviđa se da će proizvodnja kukuruza dostići svoj maksimum 2025. godine, naročito u zemljama u razvoju (Rosegrant, et al., 2009). Ovo ukazuje na to da će sveukupna potražnja za kukuruzom u zemljama u razvoju biti veća nego potražnja za drugim značajnim žitima (pirinač i pšenica). Ovaj očekivani porast se objašnjava rastom populacije, kao i promenama u priходу i urbanizaciji koje utiču na promenu načina ishrane u takvim ekonomijama (Shiferaw, et al., 2011).



Grafik 1. Proizvodnja kukuruza u svetu u periodu 2014–2023. godine (FAOSTAT, 2024).

Pri sadašnjem trendu rasta prinosa zrna, proizvodnja kukuruza neće zadovoljiti sve veću potražnju. Ukoliko se ne preduzmu mere za ubrzanje rasta prinosa zrna, mnoge oblasti mogu se suočiti sa glađu. Efekat cene kukuruza će posebno zavisiti od odluka za koje će se namene kukuruz koristiti, cene goriva i negativnog efekta klimatske varijabilnosti i promena na globalnu i regionalnu proizvodnju kukuruza (Shiferaw, et al., 2011). Klimatske promene se često navode kao jedan od najznačajnijih ograničavajućih faktora u proizvodnji kukuruza. Uz njih, često se uzimaju u obzir i neodgovarajuće agrotehničke mere i sortiment.

Klimatske promene dovode do povećanja prosečnih temperatura, promenjenog rasporeda padavina i smanjenja obradivog zemljišta i vodnih resursa (Dong, et al., 2020; Chávez-Arias, et al., 2021). Poljoprivredna proizvodnja bez navodnjavanja obavlja se na oko 80% obradivih površina globalno (World Water Assessment Programme, 2009; Bhattacharya, 2019). Budući da se i kukuruz pretežno uzgaja u uslovima suvog ratarenja, povećana varijabilnost padavina usled klimatskih promena može dovesti do većih gubitaka usled izraženije suše i poplava (Shiferaw, et al., 2011). Kao posledica klimatskih promena, očekuje se i pojava različitih kombinacija abiotskih (suša i ekstremne temperature) i biotskih stresova (učestala pojava zaraza ili pojava novih patogena) u mnogim poljoprivrednim oblastima. Kombinacija suše i visokih temperatura može izmeniti fiziološke, biohemijske i molekularne procese u biljkama (Prasad, et al., 2008; Lamaoui, et al., 2018).

Ovakve ekstremne pojave dovode do velikih gubitaka, a ovaj efekat će postati sve izraženiji ako se trenutni trend klimatskih promena nastavi (Keane, et al., 2009). Dostupni statistički podaci pokazuju da klimatske promene već ostvaruju značajan negativan uticaj na prinose zrna kukuruza širom sveta (Challinor, et al., 2014; Gabaldón-Leal, et al., 2016; Rose, et al., 2016; Song, et al., 2020; Wang, et al., 2020; Buhiniček, et al., 2021). Kravić, et al. (2015) navode da su u Srbiji, gde je kukuruz najvažniji usev koji se uglavnom gaji bez navodnjavanja, visoke temperature vazduha i izraženi vodni deficit doveli do nižeg prinosa

zrna u proseku za 48% 2012. godine usled dugotrajne i jake suše. Globalno, ovi gubici se kreću u proseku od 15–20% na godišnjem nivou (Chen, et al., 2012).

Niži prinosi zrna usled kombinovanog dejstva suše i visokih dnevnih temperatura javljaju se kao posledica smanjene fotosintetske aktivnosti (Killi, et al., 2016; Hussain, et al., 2019), stomatalne provodljivosti (Correia, et al., 2021), lisne površine (Killi, et al., 2016) i efikasnosti korišćenja vode (Joo, et al., 2017). Adaptacije kukuruza na otpornost ili tolerantnost prema visokim temperaturama i nedostatku vode mogu biti višestruke. Ako se otpornost posmatra sa aspekta prinosa zrna, prinos zrna se uzima za primarno svojstvo, a odgovarajuća sekundarna svojstva koja omogućuju otpornost na sušu služe kao kriterijumi za oplemenjivanje ako su sledeće pretpostavke ispunjene: svojstva treba da su u genetskoj korelaciji sa prinosom zrna, treba da su visoko heritabilna, stabilna, laka za merenje i u korelaciji sa gubicima prinosa u normalnim uslovima. Većina sekundarnih svojstava ne ispunjava sve ove kriterijume. Međutim, pouzdana sekundarna svojstva kukuruza koja su u vezi sa otpornošću na sušu su uvijanje listova, *stay green*, kraći interval metličenje–svilanje, broj zrna po klip, razvijenost korenovog sistema, ugao listova, i masa zrna (Aslam, et al., 2015). Sve ovo navodi na zaključak da se oplemenjivanje na otpornost može vršiti menjanjem arhitekture biljke. Na primer, biljke sa razvijenijim korenovim sistemom usvajaju veću količinu vode iz dubljih slojeva zemljišta. Menjanje arhitekture lista utiče na iskorišćavanje sunčeve svetlosti i fotosintetsku aktivnost. Biljke sa uspravnim listovima bolje podnose gustu setvu što se direktno odražava na viši prinos zrna (Zhao, et al., 2017). Druge adaptacije uključuju i smanjeno uvijanje listova, zbijenu metlicu, efikasnu biosintezu voska kutikule (Tiware & Yadav, 2019), smanjen broj i provodljivost stoma (Lamaoui, et al., 2018; Chávez-Arias, et al., 2021), i druge. Takođe, modifikacije se odigravaju i na ćelijskom i biohemijskom nivou (akumulacija kompatibilnih osmolita, aktivacija antioksidativne zaštite i regulatora rasta, aktivacija transkripcionih faktora, regulacija ekspresije proteina stresa) (Chávez-Arias, et al., 2021). Bez značajnijeg napretka u oplemenjivanju kukuruza, predviđa se da će svako povećanje prosečne temperature za 1 °C umanjiti prinos zrna na globalnom nivou za 7,4% (Zhao, et al., 2017).

Posebnu osetljivost na visoke temperature i deficit vode pokazuju roditeljske linije koje se koriste za stvaranje hibrida kukuruza (Pavlov, 2013). Ekstremno visoke temperature mogu izazvati trajno oštećenje listova što dovodi do sušenja listova i smanjenja fotosintetske površine. Takve biljke će obrazovati male klipove, sa malim brojem zrna smanjene mase. Ovo je važno za linije majke koje se koriste u semenskoj proizvodnji. Sa aspekta linija očeva, visoke temperature mogu dovesti i do smanjene proizvodnje polena, procenta oprašivanja, pa i do sušenja metlice (Chen, et al., 2012). Ako se deficit vode (ili neki od drugih abiotičkih stresora) javi pre cvetanja, to uglavnom neće uticati na metličenje, dok će pojava svile biti odložena. Ovo dovodi do povećanja intervala metličenje–svilanje, što će se negativno odraziti na prinos zrna (Edmeades, et al., 2000). Ako se i visoke temperature jave u kombinaciji sa sušom u periodu oplodnje, gubitak može biti i do 100% (Heiniger, 2018).

Sa aspekta gajenja kukuruza, može se zaključiti da republiku Srbiju u petogodišnjem periodu u proseku karakterišu jedna izrazito povoljna godina, jedna sušna godina i tri godine čiji se meteorološki pokazatelji kreću oko srednjih vrednosti za podneblje. Stoga, klima Srbije se može opisati kao umereno kontinentalna, sa manje ili više izraženim lokalnim karakteristikama (Republički Hidrometeorološki Zavod Srbije, 2021). Bez obzira na relativno malu geografsku površinu koju republika Srbija zauzima (88490 km² od čega je

962083 ha pod kukuruzom) (FAOSTAT, 2024), može se razdvojiti nekoliko proizvodno značajnih regiona u kojima hibridi određenih FAO grupa zrenja ili određeni hibridi unutar jedne FAO grupe ostvaruju bolje rezultate u poređenju sa drugima. Usled razlika u lokalnim agroekološkim i agrotehničkim uslovima, važno je razjasniti uticaj koji različiti ograničavajući faktori imaju na prinos zrna u različitim proizvodnim regionima (Zhao, et al., 2018). Analiza odgovora različitih hibrida na specifične klimatske uslove omogućuje identifikaciju i karakterizaciju onih koji su visoko prinosni i otporni na stres, a samim tim i poželjni za proizvodnju u datim uslovima.

Kao potencijalno rešenje navedenih problema nameće se mogućnost detektovanja materijala koji će ostvariti potomstvo (tj. hibride) koje će biti usko adaptabilno za određeni region gajenja. Iako bi na višelokacijskim ogledima u različitim agroekološkim uslovima stabilnost prinosa zrna takvih hibrida potencijalno znatno varirala, njihov visoki potencijal rodosti došao bi do izražaja u određenim proizvodnim regionima. Sa druge strane, oplemenjivanje se može vršiti i u cilju stvaranja hibrida koji će posedovati najizraženiju stabilnost prinosa i najširu adaptabilnu moć, te koji će potencijalno biti interesantni za najširi region gajenja. Takvi hibridi bi imali stabilan prinos zrna u različitim agroekološkim uslovima i različitim proizvodnim sezonama, iako niži od prethodno pomenutih.

3.1. Oplemenjivanje na prinos zrna

Oplemenjivanje kukuruza je uglavnom usmereno na iskorišćavanje heterozisa (hibridne snage), pojave da su organizmi F_1 generacije bujniji i rodniiji od roditelja. Ova pojava se uglavnom manifestuje kod potomstva nastalog ukrštanjem genetski divergentnih linija. Dobijanje heterotičnih hibrida se sastoji u odabiru materijala za stvaranje samooplodnih linija, stvaranju samooplodnih linija, ispitivanju kombinacionih sposobnosti samooplodnih linija i na kraju proizvodnji heterotičnih hibrida (Borojević, 1981).

Otkriće heterozisa iz korena je promenilo čitavu proizvodnju kukuruza. Proizvodnja hibridnog kukuruza na bazi ukrštanja samooplodnih linija započeta je u SAD tridesetih godina prošlog veka zahvaljujući pionirskim istraživanjima koje su sprovedi East (1908), Shull (1908), i Jones (1917). Danas se za oplemenjivanje na viši prinos zrna oplemenjivači mogu fokusirati na povećanje nivoa heterozisa, poboljšanje performansi samooplodnih linija, ili na oba ova cilja. S obzirom na potencijalnu dobit od heterozisa, važno je poznavati kako vršiti oplemenjivanje na izraženiji heterozis (Fu, et al., 2014).

U razvijenim zemljama, u proizvodnji se sreću skoro isključivo samo hibridi kukuruza. U našim glavnim proizvodnim područjima proizvođači gaje domaće ili inostrane hibride kukuruza. Stare populacije zubana i tvrduca mogu se sresti u brdsko-planinskim područjima ili u sistemima ekološke i održive poljoprivrede, a zrno se koristi za specijalne namene (Glamočlija, 2012).

Shvatajući pojavu i potencijal heterozisa, istraživači prelaze na formiranje i korišćenje heterotičnih grupa kao genetičkog pula, između kojih postoji potencijalna mogućnost pojave heterozisa. Jednu heterotičnu grupu čine linije ili jedinice koje ispoljavaju veći nivo heterozisa prilikom ukrštanja sa linijama van svoje grupe u poređenju sa ukrštanjem unutar grupe (Melchinger & Gumber, 1998). Prema Troyer (2004), pet heterotičnih grupa učestvuje

u 87% hibrida prisutnih na američkom tržištu i one postaju osnov savremenog oplemenjivanja kukuruza. U pitanju su sledeće heterotične grupe: Reid Yellow Dent (51%), Minnesota 13 (13%), Lancaster Sure Crop (13%), Northwestern Dent (5%) i Leaming Corn (5%). Odabirom 16 najboljih linija iz Reid Yellow Dent grupe koje su se odlikovale izvanrednom stabilnošću stabljike, formirana je Iowa Stiff Stalk Synthetic (BSSS) populacija (Hallauer, et al., 1983). Iako se inicijalno odlikovala nižim prinosom zrna *per se*, uz stabilnost stabljike karakterišu je i natprosečne kombinacione sposobnosti prilikom ukrštanja sa drugim heterotičnim grupama. Uz BSSS, danas su komercijalno najznačajnije Lancaster Sure Crop (LSC) i Iodent Reid heterotične grupe (Popović, 2020).

Iako se u savremenom oplemenjivanju kukuruza za ostvarivanje heterozisa najčešće primenjuju ukrštanja BSSS germplazme sa non-BSSS germplazmom, Institut za kukuruz „Zemun Polje“ svoj oplemenjivački program zasniva na LSC × non-LSC ukrštanjima. U non-LSC germplazmu se svrstavaju BSSS, BSSS ukršten sa Iowa Dent i sa lokalnim populacijama iz banke gena, germplazma dobijena samooplodnjom hibrida, germplazma dobijena razmenom materijala sa drugim institucijama sličnog delovanja ili od ex-PVP materijala kojem je period zabrane korišćenja prošao, a u kojem se nalaze čistokrvni predstavnici zasebnih heterotičnih grupa (Delić, 2021)

Kao što je ranije napomenuto, maksimalna hibridna snaga potomstva se očekuje kao posledica ukrštanja roditeljskih linija iz divergentnih heterotičnih grupa. Klasifikacija samooplodnih linija u heterotične grupe može se vršiti pomoću morfoloških karakteristika i analize kombinacionih sposobnosti zasnovane na podacima dobijenim u dialelnim i linija × tester ukrštanjima. Ovi metodi podrazumevaju poljske oglede, te su skupi, zauzimaju velike površine i veliko angažovanje radne snage. Genotipovi se takođe mogu podeliti u grupe na osnovu njihove genealogije, ali detaljne informacije o njihovom pedigreu nisu uvek dostupne. Stoga, upotreba molekularnih markera se pokazala kao najpouzdaniji metod utvrđivanja genetskih distanci između genotipova (de Oliveira, et al., 2021). U upotrebi se danas nalaze različiti tipovi molekularnih markera, ali za studije ispitivanja divergentnosti najčešće se koriste SSR i SNP markeri. SSR markeri se koriste za karakterizaciju kolekcija germplazme jer su laki za upotrebu, relativno jeftini, imaju visok stepen polimorfizma usled velikog broja alela po lokusu (Vignal, et al., 2002), i visoku sposobnost diskriminacije (Van Inghelandt, et al., 2010). Za utvrđivanje genetskih distanci linija iz različitih heterotičnih grupa, mnogi autori upotrebljavaju SSR markere (Nikolić, et al., 2017; Grčić, et al., 2018; Nikolić, et al., 2019; Adu, et al., 2019). Nasuprot njima, SNP markeri su precizniji i imaju veću frekvenciju od SSR markera (Van Inghelandt, et al., 2010).

Mnoge studije su ispitivale povezanost genetičke distance i heterozisa kod kukuruza (Pavlov, 2013; Čamdžija, 2014; Grčić, 2016; Pavlov, et al., 2016; Dari, et al., 2018; Grčić, et al., 2018; Fareghi, et al., 2019; Punya, et al., 2019; Tomkowiak, et al., 2020). Većina navedenih autora zaključuje da su podaci o genetičkoj distanci kod ispitivanog materijala u pozitivnoj ili visoko pozitivnoj korelaciji sa heterozisom u odnosu na boljeg roditelja. Međutim, Fareghi, et al. (2019) navode da je korelacija između genetičkih distanci i heterozisa previše niska da bi se na osnovu nje predvidela hibridna snaga potomstva. Takođe, Punya, et al. (2019) preporučuju ukrštanje umereno udaljenih samooplodnih linija sa dobrim *per se* performansama za dobijanje dvolinijskih (*single-cross*) hibrida kukuruza.

Samooplodne linije unutar jedne heterotične grupe se najčešće karakterišu i odabiraju na osnovu svojih kombinacionih sposobnosti sa samooplodnim linijama iz drugih

heterotičnih grupa, a ne na osnovu svojih *per se* performansi (Yu, et al., 2020), jer nije moguće na osnovu poznavanja svojstava roditelja predvideti kakve će biti kombinacione sposobnosti tih roditelja u hibridnim kombinacijama.

Definisana su dva tipa kombinacione sposobnosti—opštu (OKS) i posebnu kombinacionu sposobnost (PKS). Opšta kombinaciona sposobnost predstavlja prosečnu vrednost jednog roditelja (linije) na osnovu njegovog ponašanja u ukrštanjima sa drugim roditeljima (linijama). Posebna kombinaciona sposobnost je ponašanje roditelja X u ukrštanju sa roditeljom Y. Prosečna vrednost te kombinacije može odstupati od proseka opšte kombinacione sposobnosti tih roditelja u poređenju sa nekim drugim roditeljima (Borojević, 1981). Sprague & Tatum (1942) smatraju da je OKS primarno pod uticajem aditivnog delovanja gena, a da je PKS pod uticajem neaditivnog delovanja gena. Aditivna varijansa je još poznata i kao oplemenjivačka vrednost roditelja, te je zato od suštinskog značaja da roditelji imaju visoke vrednosti OKS za važna svojstva. Za razliku od aditivne varijanse, neaditivna komponenta genetičke varijanse je pod kontrolom gena koji ispoljavaju efekte dominacije i epistaze, te se iz tog razloga odlikuje visokom nepredvidivošću. Analizom genetičke varijanse izračunavaju se parametri koji ilustruju vrednost i odnose komponenti varijanse.

Smatra se da neaditivni efekti gena (dominacija i epistaza) imaju veći uticaj na ispoljavanje heterozisa (Hallauer & Miranda, 1988). Stoga je PKS od većeg značaja u oplemenjivačkim programima (Grčić, et al., 2018). Međutim, relativni doprinos OKS i PKS na performanse hibrida zavisi od posmatranog svojstva i same hibridne kombinacije.

Radeći sa germplazmom Instituta za kukuruz „Zemun Polje“, koja će biti osnov istraživanja sprovedenog i u ovom doktoratu, različiti autori zaključuju da su geni sa neaditivnim delovanjem mahom imali najveći uticaj na nasleđivanje prinosa zrna kod različitih genotipova (Pavlov, 2013; Čamdžija, 2014; Grčić, 2016).

Do sličnih rezultata dolaze i Li, et al. (2021). Oni potvrđuju da geni sa neaditivnim delovanjem ostvaruju najveći uticaj na heterozis, naročito na prinos zrna.

I pored svega navedenog, dobar kombinator nije nužno završni korak oplemenjivanja, jer pored dobrih kombinacionih sposobnosti genotip mora sadržati i druge karakteristike. Svaku poljoprivrednu proizvodnju prati odgovarajuća tehnologija gajenja, patogeni, štetočine i niz abiotičkih faktora koji deluju u određenom vremenu i prostoru i utiču na zdravstveno stanje i učinak gajene biljke (Čamdžija, 2014).

Početkom XXI veka, proizvodnja kukuruza u uslovima suvog ratarenja postaje nesigurna usled čestih suša tokom vegetacionog perioda, posebno u periodima kritičnim za vodu. Sve češći sušni periodi, koji se javljaju kao posledica globalnog zagrevanja, pred oplemenjivače postavljaju novi zadatak—kako dobiti hibride tolerantnije na sušu. Neki od načina za prevazilaženje ovog problema predstavljaju stvaranje hibrida snažnijeg korenovog sistema, jače izražene ksenomorfne građe i kraćeg vegetacionog perioda. Takve biljke bi intenzivnijim porastom brže prolazile pojedine fenofaze, kao i kritičan period za vodom pre letnjih suša (Glamočlija, 2012).

Rešavanje pitanja dobijanja hibrida sa pojačanom genetičkom tolerantnošću na štetočine i uzročnike oboljenja takođe je od velikog značaja. Sistem zaštite može biti zasnovan na

tehnologiji gajenja, odnosno primeni hemijskih sredstava u cilju zaštite useva, ali i pronalasku prirodnih genotipova otpornih i tolerantnih na nepovoljno delovanje biotičkih faktora (Čamdžija, 2014). Danas, kada je zaštita useva skupa i složena agrotehnička mera, važna je svaka ušteda u proizvodnji koja ne umanjuje ukupan prinos zrna. Ovo je naročito važno za poljoprivredne proizvođače koji se opredeljuju za gajenje kukuruza u sistemu ekološke (organske) poljoprivrede gde je ograničena upotreba hemijskih sredstava (Glamočlija, 2012).

Stoga, veći dobitak ne može biti ostvaren samo stvaranjem novog sortimenta, već se celokupan sistem gajenja mora unapređivati zajedno sa oplemenjivanjem kukuruza. Samim tim, cilj oplemenjivanja kukuruza je postalo i stvaranje superiornih genotipova, sposobnih da u datim okolnostima tehnologije gajenja i sklopu biotičkih i abiotičkih faktora iskažu maksimum (Čamdžija, 2014).

3.2. Višelokacijski ogledi i interakcija G×E

Kao što je ranije napomenuto, zahvaljujući velikoj genetičkoj varijabilnosti i brojnim genotipovima, kukuruz se uspešno gaji širom sveta na različite načine i za različite namene. S obzirom da je kukuruz jedna od vrsti koja pokazuje najveću razliku u dužini vegetacije (Radan, 2016), ovo svojstvo omogućuje širok areal rasprostranjenja, od 50° SGŠ do 45° JGŠ (Hou, et al., 2014; Baloch, et al., 2021), kao i gajenje na različitim nadmorskim visinama – od područja koja su ispod nivoa mora sve do 3600 metara nadmorske visine (Chen, et al., 2013), dok arheološki podaci ukazuju da se u svojoj postojbini gajio i do 4200 mnv (Staller, 2016).

U svim navedenim slučajevima, od kukuruza se očekuje da se prilagodi veoma različitim uslovima uspevanja. Ovo svojstvo se naziva adaptabilnošću. Adaptabilnost može biti uska (specifična) i široka (generalna). Po pravilu hibridi uske adaptabilnosti poseduju visok potencijal za prinos zrna koji mogu ostvariti samo u optimalnim uslovima, a genotipovi široke adaptabilnosti daju približno jednake prinose u različitim ekološkim uslovima proizvodnje, ali na nižem nivou (Dražić, 1999). Koncepti uske i široke adaptabilnosti često se koriste da opišu relativne performanse genotipova kada je procenjena adaptacija na više od jednog okruženja. Široku adaptaciju opisuje odgovor genotipa u kom su superiorne performanse izražene preko većine, ili u svim sredinama, a specifična adaptacija opisuje odgovor gde se viši nivo performansi izražava u određenim sredinama. Poznavanje G×E interakcija je od posebnog značaja za oplemenjivače jer je celokupan proces oplemenjivanja na široku adaptabilnost komplikovan i može dovesti u pitanje efikasnost takvog oplemenjivanja (Ceccarelli, 1989).

Adaptabilnost je usko povezana sa stabilnošću, tj. postojanošću visine ostvarenih prinosa u različitim okolinama i tokom različitih godina ispitivanja (Zdunić, 1998). Stabilnost se može posmatrati kao postojanost ostvarenih poljoprivrednih rezultata, naročito prinosa, tokom dužih vremenskih perioda ili u različitim okruženjima (Urruty, et al., 2016). Za poljoprivredne proizvođače stabilnost prinosa je značajna jer omogućuje ekonomsku predvidljivost i umanjuje rizik (Reckling, et al., 2021). Da bi bio prihvaćen od strane poljoprivrednih proizvođača, jedan savremeni hibrid mora ostvarivati visok i stabilan prinos zrna u različitim agroekološkim uslovima gajenja, biti pogodan za direktno kombajniranje u zrnu, sa niskim sadržajem vlage u momentu berbe. Imajući u vidu

varijabilnost klimatskih elemenata koja nastaje kao posledica globalnih klimatskih promena, stabilnost prinosa zrna postaje jedno od najvažnijih svojstava savremenih hibrida i jedan od najznačajnijih ciljeva oplemenjivanja kukuruza. Jedan hibrid se može smatrati stabilnijim ako ima visok prosečan prinos zrna uz nizak stepen varijacije prilikom ispitivanja na različitim lokacijama (Ravindra, et al., 2017). Prinos zrna ovih hibrida je po pravilu niži od onog koji postižu hibridi sa odlikom nestabilnijeg prinosa tokom povoljnih godina, ali predstavlja veću sigurnost za proizvođače koji se opredele za njih (Bunjac, 2019). Analize stabilnosti prinosa su od posebnog značaja jer je povećana varijabilnost klime u vezi sa umanjenom stabilnošću prinosa (Müller, et al., 2018; Najafi, et al., 2018; Tigchelaar, et al., 2018).

Iako nivo prinosa zrna zavisi od genetičkog potencijala genotipa, stabilnost prinosa zavisi od sposobnosti reagovanja tog genotipa na uslove sredine (Borojević, 1981). Nestabilnost prinosa određenog hibrida nastaje kao posledica pomenute interakcije genotipa sa spoljašnjom sredinom u kojoj se nalazi, te je u oplemenjivanju potrebno odabirati one genotipove koji manje reaguju sa spoljašnjom sredinom (Bunjac, 2019). Termin „spoljašnja sredina“ odnosi se na razlike u pogledu uslova proizvodnje bilo da se radi o različitim lokalitetima, različitim godinama na istom lokalitetu ili kombinaciji godina i lokaliteta (Mitrović, 2013). Pored toga, termin „spoljašnja sredina“ može obuhvatati i sprovedene agrotehničke mere (Scapim, et al., 2000). Kao posledica interakcije genotipa i spoljašnje sredine ($G \times E$) dolazi do različitog rangiranja hibrida na osnovu prinosa zrna, između više lokacija i godina. Kod ovog tipa interakcije, pojedinačni efekti genotipa i spoljašnje sredine su statistički neaditivni, što znači da razlike u prinosu zavise od spoljašnje sredine (Hühn, 1996; Bujak, et al., 2014).

Heritabilnost igra značajnu ulogu u određivanju genetske dobiti od oplemenjivanja u svakom ciklusu oplemenjivanja. U širem smislu, heritabilnost predstavlja odnos između genotipske varijanse i ukupne fenotipske varijanse, a u užem smislu odnos između aditivne komponente genotipske varijanse i ukupne fenotipske varijanse (Borojević, 1981). Heritabilnost je osnova svakog programa oplemenjivanja (Holland, et al., 2002). Kao komponenta ukupne fenotipske varijanse, $G \times E$ interakcija ima negativan efekat na heritabilnost, naročito kada se radi o kvantitativnim svojstvima poput prinosa zrna (Pour-Aboughadareh, et al., 2022). Drugim rečima, što je efekat interakcije $G \times E$ veći, to je heritabilnost niža, a samim time je i dobit od oplemenjivanja ograničena (Becker, 1981).

Ova činjenica znatno otežava oplemenjivanje i stvaranje hibrida visokog rodnog potencijala koji će ostvarivati visok prinos zrna u različitim uslovima. Stoga, ispitivanje genotipova bi trebalo obaviti u različitim sredinama i u različitim fazama oplemenjivanja, kako bi se smanjila mogućnost registrovanja hibrida nezadovoljavajućih performansi. Pored visokog prinosa zrna, novostvorenih hibridi bi trebalo da poseduju i adaptabilnost i stabilnost prinosa, tj. da budu pogodni za određene rejone gajenja (Naves Pinto, et al., 2019).

Konstantinov, et al. (2004) definišu rejonizaciju kao „Određivanje optimalnih rejonu gajenja jedne sorte ili hibrida na osnovu provedenih odgovarajućih sortnih ogleda“. Budući da za cilj ima optimalno iskorišćavanje genotipova i prirodnih resursa, rejonizacija je predmet istraživanja mnogih autora (Jovin, et al., 2000; Stojaković, et al., 2002; Jovanović, et al., 2007; Ivanović, et al., 2007; Stojaković, et al., 2010; Jovanović, et al., 2014; Đalović & Bekavac, 2017; Madić, et al., 2021). U navedenim istraživanjima, autori su ukazali koji su to genotipovi ostvarili najbolje rezultate na ispitivanim lokacijama i u ispitivanim godinama,

te dali svoje preporuke za proizvodnju u određenim područjima. Pravilna rejonizacija, tj. preporuka hibrida za proizvodnju u određenom području vrši se na osnovu višegodišnjih, mikro, makro i demonstracionih oglada u svim proizvodno značajnim rejonima gde se kukuruz gaji. Ovo se naročito odnosi na novostvorene hibride, čak i ako su nastali ukrštanjem roditeljskih linija dobro poznatih svojstava. Nekada se čak i hibridi iste grupe zrenja i sličnog porekla međusobno razlikuju u pogledu reakcije na uslove gajenja što dalje čini osnovu za njihovu pravilnu rejonizaciju (Stojaković, et al., 2011).

Interakcija $G \times E$ u najopštijem smislu čini osnovu za definisanje megaokolina. Interakcija $G \times E$ čini osnovu za definisanje životnih okolina u najopštijem smislu (*megaenvironment*). Stabilnost genotipova, uska i široka adaptabilnost i naslednost ovih svojstava, takođe su svojstva koja oplemenjivači moraju poznavati kako bi poznavali određene megaokoline. Megaokolina za kukuruz opisuje područje gde različiti hibridi kukuruza pokazuju slično rangiranje prema prinosu zbog sličnih uslova uzgajanja (padavine, temperatura, tip zemljišta). Poznavanje megaokolina je značajno jer se na taj način teži pronalaženju genetskog materijala koji bi bio adaptabilan na tzv. marginalne okoline (Radan, 2016).

Ispitivanje hibrida u različitim agroekološkim uslovima predstavlja jednu od poslednjih i najvažnijih faza u oplemenjivanju kukuruza (Becker & Léon, 1988; Peterson, et al., 1992). Na taj način se može ustanoviti kako hibridi reaguju na različite uslove spoljašnje sredine (Mitrović, et al., 2011; Mitrović, et al., 2012). Sa ovim ciljem se sprovode višelokacijski ogledi za prinos zrna. Ocenjivanje i rangiranje hibrida u ovakvim ogledima temelji se na prinosu i ostalim agronomski važnim svojstvima i često se razlikuje od lokacije do lokacije usled interakcije genotipa i spoljašnje sredine (Branković-Radojčić, 2016).

Međutim, treba napomenuti da interakcija $G \times E$ značajno utiče na sve faze oplemenjivačkog programa i na raspodelu resursa (Pour-Aboughadareh, et al., 2022). Na primer, visok stepen $G \times E$ može uticati na razdvajanje jednog rejona na koji se vrši ciljano oplemenjivanje na dva, što bi zahtevalo dodatne troškove (Kang, 1997).

Stoga, veliki broj proizvodno značajnih regiona, u kombinaciji sa varijacijama koje se mogu uočiti na različitim lokacijama i u različitim sezonama, ukazuju na potrebu intenziviranja evaluacionih aktivnosti kako bi se ublažio efekat $G \times E$ interakcije, ali i kako bi se smanjio rizik preporuke neodgovarajućih hibrida od strane semenskih kuća (van Eeuwijk, et al., 2016; dos Santos, et al., 2019). U sortnokomisijskim ogledima u Srbiji, ispitivanje hibrida se vrši u dvoredim parcelama površine 10,5 m². Međutim, ovakve dvorede elementarne parcele su podložne uticaju rubnih redova, te rezultati ostvareni na ovakvim parcelama mogu značajno odstupati od rezultata ostvarenih u proizvodnim uslovima. Da bi se greška usled efekta rubnih redova svela na minimum, u Institutu za kukuruz se primenjuju postkomisijski ogledi. Cilj ovih višelokacijskih oglada je da se povećanjem površine elementarne parcele poveća i validnost ostvarenih rezultata. Postkomisijski ogledi se seju u osmorede parcele, pri čemu se u berbi u obzir uzimaju samo četiri unutrašnja reda. Na osnovu rezultata postkomisijskih oglada, moguće je pouzdanije utvrditi koji od novoregistrovanih hibrida ostvaruje najviše i najstabilnije prinose zrna. Samo određeni broj hibrida ispitivanih na ovaj način se dalje komercijalno proizvodi što osigurava visok standard i kvalitet (Čamdžija, 2021).

Iz višelokacijskih ogleda, uključujući i postkomisijske ogleda, dobijaju se podaci neophodni za G×E analize. Što je interakcija genotipa i spoljašnje sredine značajnija, to je oplemenjivanje na osnovu srednjih vrednosti hibrida u različitim sredinama manje efikasno (Hopkins, et al., 1995; Abera, et al., 2006). Stoga, dobra statistička analiza G×E interakcije ključna je za napredak u svakom programu oplemenjivanja (van Eeuwijk, et al., 2016).

3.3. Parametri stabilnosti prinosa zrna kukuruza

Na ekonomsku važnost stabilnosti prinosa genotipa prvi je ukazao Roemer (1917), koji je koristio varijansu između spoljašnjih sredina kao parametar za stabilnost prinosa zrna ozime pšenice.

Primenom pouzdanih statističkih metoda mogu se isključiti negativne posledice interakcije genotip × sredina i izdvojiti stabilni i visokoprinosni genotipovi. Takav način odabira hibrida kukuruza široko je prihvaćen i poznat kao dinamički koncept stabilnosti (Léon, 1985). Prema Becker & Léon (1988), dinamički (agronomski) koncept podrazumeva da je genotip stabilan ako u svakoj sredini njegova svojstva odgovaraju procenjenim vrednostima, tj. stabilan genotip ne odstupa značajno od prosečne reakcije na uslove sredine. Prema agronomskom konceptu, genotipovi povoljno reaguju na poboljšane uslove gajenja i omogućavaju proizvodnju u intenzivnim uslovima. Sa druge strane, isti autori navode i statički (biološki koncept). Prema ovom konceptu, genotipovi ne reaguju efikasno na poboljšane uslove gajenja, jer se radi o genotipovima prilagođenim širem proizvodnom području. Ovakvi genotipovi ne omogućavaju intenzivnu proizvodnju i imaju niži genetički potencijal.

Za izučavanje stabilnosti prinosa, kao i drugih kvantitativnih svojstava koja se složeno nasleđuju, preporučuje se dinamički koncept (Léon, 1985; Becker & Léon, 1988; Branković-Radojčić, 2016). Međutim, ne postoji definitivan odgovor o klasifikaciji parametara stabilnosti na osnovu dva koncepta koja predlažu Becker & Léon (1988). Dinamički i statički koncepti zavise od prirode podataka i testnih područja, te njihova apsolutna klasifikacija i dalje nije definitivna (Pour-Aboughadareh, et al., 2022).

Danas se prilikom ispitivanja stabilnosti hibrida primenjuju metode parametrijske (koje se dalje dele na univarijantne i multivarijantne) i neparametrijske statistike. Parametrijski test je procedura ispitivanja hipoteze zasnovana na tvrdnji da su osmotreni podaci (ekološki i genotipski faktori i njihova interakcija) distribuirani prema poznatoj distribuciji podataka (najčešće prema normalnoj distribuciji) do nekog nepoznatog parametra na kome će se izvesti zaključak (npr. prosečna vrednost) (De Canditiis, 2019; Bunjac, 2019). Iako se parametrijske statistike smatraju moćnijim od neparametrijskih, one nisu uvek primenljive za analizu značajnosti razlika. Ukoliko neka od pretpostavki metoda parametrijske statistike nije ispunjena, validnost ovih metoda može biti narušena. Primenom neparametrijskih metoda (koje su lake i jednostavne za primenu) izbegavaju se ove pretpostavke (Delić, et al., 2004). Neparametrijske metode se oslanjaju na srednje vrednosti ispitivanog svojstva i na rangiranje genotipova. Kao rezultat, dolazi do smanjenja pristrasnosti koja nastaje usled ekstremnih vrednosti, a za distribuciju posmatranih svojstava nisu neophodne pretpostavke (Pour-Aboughadareh, et al., 2022). Pored toga što su lake za primenu i što se pomoću njih

može lako dešifrovati interakcija $G \times E$, dodavanje ili uklanjanje jednog ili nekoliko genotipova imaće mali uticaj na dobijene rezultate (Hühn, 1990).

3.3.1. Neparametrijske statistike

Iako su parametrijske statistike jedan od najčešćih metoda za ispitivanje interakcije $G \times E$ i utvrđivanje adaptabilnosti genotipova (Hühn, 1996), iz praktičnih razloga većina oplemenjivačkih programa primenjuje neke elemente i parametrijskih i neparametrijskih statistika (Becker & Léon, 1988). Za razliku od parametrijskih statistika, koje pretpostavljaju specifičnu distribuciju (kao što je normalna), neparametrijske metode se mogu primeniti na podatke iz bilo koje distribucije, što ih čini posebno korisnim kada podaci nisu u skladu sa standardnim pretpostavkama (Sabaghnia, et al., 2012). Neparametrijske metode se često koriste u poljoprivrednim istraživanjima za analizu složenih skupova podataka, gde odnosi između varijabli nisu dobro shvaćeni. Iako parametrijska analiza varijanse određuje značajnost interakcije $G \times E$, neparametrijski testovi mogu pružiti specifičnije informacije o prirodi te interakcije (Hühn & Léon, 1995).

Godine 1979, Hühn je predložio neparametrijske metode kako bi rangirao genotipove u višelokacijskim ogledima (Hühn, 1979). Kasnije su ove statistike razvijene kako bi obuhvatale i neparametrijske metode koje su predložili Nassar & Huehn (1987). Ove statistike su prosečna vrednost apsolutnih razlika ranga genotipa na svim ispitivanim lokacijama ($S_i^{(1)}$), varijansa između rangova na svim ispitivanim lokacijama ($S_i^{(2)}$), suma apsolutnih devijacija za svaki genotip relativno u odnosu na prosečnu vrednost rangova ($S_i^{(3)}$), i suma kvadrata rangova svakog genotipa relativno u odnosu na prosečnu vrednost rangova ($S_i^{(6)}$). Za njihovo računanje, prosečni podaci o prinosu se prevode u rangove za svaki genotip i svaku lokaciju. Genotip se smatra stabilnim ako je slično rangiran na različitim lokacijama (Pour-Aboughadareh, et al., 2022). Preciznije, genotip je stabilniji što je $S_i^{(1)}$ vrednost bliža nuli, i što je niža vrednost $S_i^{(2)}$. Ove dve vrednosti se dovode u vezu sa dinamičkim konceptom stabilnosti, dok se $S_i^{(3)}$ i $S_i^{(6)}$ dovode u vezu sa statičkim konceptom (Rea, et al., 2017). U skladu sa ovim, Manjubala, et al. (2018) tvrde da su $S_i^{(1)}$ i $S_i^{(2)}$ parametri u negativnoj korelaciji sa visinom prinosa zrna soje, zbog čega su ukazali na jednu grupu genotipova kao na najstabilnije, dok su $S_i^{(3)}$ i $S_i^{(6)}$ ukazali na drugu grupu. Kako bi se bolje razumele veze između ovih metoda, autori su primenili i PCA analizu na osnovu koje su $S_i^{(1)}$ i $S_i^{(2)}$ parametri svrstani u jednu grupu, dok su $S_i^{(3)}$ i $S_i^{(6)}$ svrstani u drugu, kao što je i očekivano. Koristeći se ovim metodama, Branković-Radojčić, et al. (2022) zaključili su da su hibridi kukuruza najstabilnijeg prinosa zrna ostvarivali prosečan prinos, dok su najprinosniji hibridi bili nestabilni na osnovu svih neparametrijskih pokazatelja. I u ovom istraživanju, $S_i^{(1)}$ i $S_i^{(2)}$ parametri su izdvojili jedan genotip kao najpoželjniji, dok su druga dva pokazatelja ukazala na druge genotipove. Prema Delić, et al. (2009), $S_i^{(1)}$ i $S_i^{(2)}$ parametri se mogu smatrati ekvivalentnim metodama za procenu stabilnosti prinosa zrna kukuruza. Za razliku od njih, Aberkane, et al. (2021) su uspešno uspeli da detektuju jednu liniju tvrde pšenice koju su sva četiri Huehnova pokazatelja ocenili kao liniju stabilnog prinosa zrna.

Za oplemenjivanje visokoprinosnih i stabilnih genotipova kukuruza u različitim sredinama razvijen je Kangov rang (Kang, 1988). Ovaj metod koristi i prinos i stabilnost varijanse prema autoru Shukla (1972) kao selekциони indeks (σ_i^2). Genotipu sa najvišim prinosom zrna dodeljuje se rang 1, kao i onom genotipu koji ima najnižu varijansu.

Sabiranjem rangova za prinos zrna i varijansu za svaki genotip ponaosob, dolazi se do zaključka da je genotip sa najnižim zbirom ovih vrednosti najpoželjniji. Kang, et al. (1991) preporučuju ovaj metod i za odabir i preporuku hibrida kada se ispitivanje vrši u raznolikim sredinama, gde je stepen interakcije $G \times E$ različiti (kako za regionalna ispitivanja, tako i za međunarodna). Iako je kasnije modifikovan i unapređen, Kangov rang se i dalje koristi u studijama stabilnosti prinosa, najčešće kao provera ili potvrda drugih korišćenih statistika (Liu, et al., 2010; Branković-Radojčić, et al., 2022). Pored kukuruza, Kangov rang se pokazao pouzdan i prilikom ispitivanja stabilnost prinosa drugih značajnih ratarskih biljaka poput uljane repice (Mortazavian & Azizi-Nia, 2014), krompira (de Carvalho, et al., 2022), ječma (Abdipour, et al., 2017; Vaezi, et al., 2022), itd.

Fox, et al. (1990) predlažu jednostavan parametar za merenje opšte adaptabilnosti. TOP-Fox metod rangira genotipove kao LOW (donja trećina), MID (srednja trećina) i TOP (gornja trećina) na svim ispitivanim lokacijama. Za genotip koji se uglavnom javljao u gornjoj trećini smatra se da poseduje široku adaptabilnost. U istraživanju Branković-Radojčić, et al. (2022), TOP-Fox metoda i Kangov rang su ukazali na najproduktivniji hibrid koji je istovremeno posedovao najveću stabilnost prinosa zrna, te ih autori i preporučuju kao najbolje metode za odabir novih hibrida kukuruza. TOP-Fox metod je lak za računanje i nalazi se u značajnoj pozitivnoj korelaciji sa prinosom. Ukoliko dva hibrida imaju istu TOP vrednost, trebalo bi odabrati onaj genotip koji ima nižu vrednost na osnovu Kangovog ranga.

Indeks stabilnosti prinosa (Kang, 1993) je modifikacija prethodno spomenutog Kangovog ranga (Kang, 1988). Ovaj indeks (YS_i) je prvi put primenjen na kukuruзу (Magari & Kang, 1993). Prema ovom metodu, genotipu sa najvišim prosečnim prinosom dodeljuje se najniži rang (rang = 1). Slično, rang = 1 se dodeljuje i parametru stabilnosti koji ima najnižu procenjenu vrednost. Ocene stabilnosti se računaju kao -2, -4 i -8 za one mere stabilnosti koje su značajne pri $p < 0,1$; 0,05 i 0,01; redom, a 0 u slučaju da nisu statistički značajne. Ove vrednosti su odabrane jer mogu da promene rangiranje genotipova u odnosu na rangove koji se zasnivaju samo na prinosu. Stoga, ova statistika može biti od pomoći oplemenjivačima da odaberu genotipove sa visokim i relativno stabilnim prinosima na različitim lokacijama, naročito ako nije moguće primeniti neki drugi parametrijski metod poput GGE biplota (Fan, et al., 2007). Zajednički nedostatak metoda Kanga (1993) i Foka (1990) je u tome što ne uzimaju u obzir značajne razlike u prinosu različitih genotipova, i izračunate vrednosti su često u niskoj korelaciji sa prinosom (Mohammadi, et al., 2007). Stoga, Bujak, et al. (2008) predlažu neparametrijski metod zasnovan na razlikama homogenih grupnih rangova i koeficijenta varijacije. Ovaj metod su primenili na ispitivanju stabilnosti prinosa zrna raži, ali i kako bi izvršili rejonizaciju novih sorti. Kasnije je isti metod primenjen i za ispitivanje stabilnosti prinosa zrna hibrida kukuruza (Bujak, et al., 2014), gde se pokazao kao korisna alternativa Kangovom indeksu stabilnosti prinosa.

S obzirom da se genotipovi na konkretnim lokacijama ne mogu rangirati prema fenotipskim vrednostima, stabilnost genotipova se mora proceniti nezavisno od genotipskog efekta. Kako bi rešio ovaj izazov, Thennarasu (1995) predlaže korekciju rangiranja genotipova i lokacija na osnovu korigovanih fenotipskih vrednosti. Ovi parametri se zasnivaju na rangiranju prilagođenih prosečnih vrednosti genotipova na svakoj lokaciji, a označavaju se kao $NP^{(1)}$, $NP^{(2)}$, $NP^{(3)}$ i $NP^{(4)}$. Thennarasu predlaže i peti parametar koji je sličan je $S_i^{(1)}$ kog je definisao Hühn (1990). Pored primene u ispitivanju stabilnosti prinosa različitih poljoprivredno značajnih biljnih vrsta u višelokacijskim

ogledima (Ahmadi, et al., 2015; Rea, et al., 2017), pomenuti parametri su svoju primenu našli i u fitopatološkim istraživanjima efekta $G \times E$ (Sabaghnia, 2016; Hocaoglu, et al., 2020).

Brojni autori su koristili neparametrijske metode za analiziranje $G \times E$ interakcije i selekciju stabilnih genotipova (Čvarković, et al., 2009; Liu, et al., 2010; Živanović, et al., 2012; Bujak, et al., 2014). Ispitujući stabilnost prinosa zrna durum pšenice, Mohammadi, et al. (2007) su koristili nekoliko neparametrijskih metoda. Autori navode da su visoke vrednosti TOP metoda i niske vrednosti Kangovog ranga dovedene u vezu sa visokim prosečnim prinosom zrna. Pomoću TOP metoda i Kangovog ranga identifikovana su dva genotipa koja se karakterišu dinamičkom stabilnošću i širokom adaptabilnošću. Ostali neparametrijski metodi nisu bili u pozitivnoj korelaciji sa prosečnim prinosom. Oni su okarakterisali statički koncept stabilnosti i kao dva najstabilnija genotipa izdvojili genotipove sa najnižim prinosom zrna. Ispitujući linije i sorte hlebne pšenice, Mut, et al. (2009) dolaze do istog zaključka – da su ista dva pokazatelja (TOP metod i Kangov rang) u pozitivnoj korelaciji sa prosečnim prinosom zrna, te ih preporučuju kao pouzdane.

Isti zaključci su doneti i prilikom ispitivanja stabilnosti prinosa zrna kukuruza pomoću neparametrijskih pokazatelja. Liu, et al. (2010) takođe izdvajaju Kangov rang i TOP metod kao jedine korisne neparametrijske metode za istovremeni odabir visoko prinosnih i stabilnih genotipova.

Neparametrijske statistike su lake za korišćenje i tumačenje. Štaviše, bilo kakvo uklanjanje ili dodavanje jednog ili nekoliko genotipova neće imati značajan efekat na krajnji rezultat. Ako su oplemenjivači zainteresovani samo za postojanje razlika u rangiranju na različitim lokacijama, ovi metodi su najbolja alternativa parametrijskim statistikama. S obzirom da se neparametrijske statistike zasnivaju na vrednostima ranga, jedan genotip se može smatrati stabilnim ako se konstantno slično rangira na različitim lokacijama (Pour-Aboughadareh, et al., 2022). Omogućujući istraživačima da analiziraju podatke bez iznošenja pretpostavki o distribuciji podataka, neparametrijske metode pružaju vredan alat za unapređenje poljoprivrednih istraživanja.

3.3.2. Parametrijske statistike

Kao što je prethodno spomenuto, parametrijske statistike su jedan od najčešćih metoda za ispitivanje interakcije $G \times E$ i utvrđivanje adaptabilnosti genotipova (Hühn, 1996). One se oslanjaju na distributivne pretpostavke o uticajima spoljašnje sredine, genotipovima i njihovoj interakciji (Pour-Aboughadareh, et al., 2022). Pre njihove primene, treba razmotriti pretpostavke o distribuciji podataka i homogenosti varijanse (Flores, et al., 1998). U okviru parametrijskih statistika postoji podela na univarijantne i multivarijantne statistike. Glavni aspekti univarijantnih metoda (S^2 , θ , θ' , W , σ^2 , b_i , S^2d_i , a , λ , R^2 , CV , P_i) su analiza linearne regresije i komponente varijanse (Karimizadeh, et al., 2013). Multivarijantne metode (PCA, AMMI, BLUP, GGE) istražuju aspekte $G \times E$ interakcije iz više smerova i pokušavaju da izvuku više informacija iz komponenti te interakcije (Gauch, et al., 2008).

Roemer (1917) predlaže varijansu okoline (S^2), tj. varijansu prinosa genotipova na različitim lokacijama, kao parametar stabilnosti. Što je vrednost S^2 manja, to je stabilnost veća. Iako su iz varijanse okoline kasnije izvedene druge mere stabilnosti, poput standardne

devijacije (S) i koeficijenta varijacije (CV), ona se i čitav vek kasnije i dalje nalazi u širokoj upotrebi. Tarinejad & Abedi (2015) su proučavali stabilnost prinosa zrna pšenice koristeći različite parametrijske i neparametrijske statistike, između ostalog i Roemerovu varijansu okoline. S^2 i CV su jedini od posmatranih parametara koji su sorte sa najnižim prinosom prepoznali kao stabilne sorte. Veliki broj istraživača paralelno koristi više parametrijskih (ali i neparametrijskih) pokazatelja. Changizi, et al. (2014) su utvrđivali stabilnost prinosa zrna kukuruza pomoću više univarijantnih metoda. Autori su ustanovili visoku pozitivnu korelaciju između Roemerovog i modela koji predlažu Eberhart & Russell (1966). Ovo je u skladu sa istraživanjima Mohammadi, et al. (2012) i Karimizadeh, et al. (2012) sprovedenim na pšenici, te se ova dva modela mogu koristiti kao alternative jedan drugom.

Plaisted & Peterson (1959) predlažu $G \times E$ komponentu varijanse za interakcije između svakog mogućeg para genotipova. Ova statistika uzima u obzir procenu prosečnih vrednosti svih kombinacija kao meru stabilnosti. Što je vrednost proseka komponente varijanse (θ) niža, to je stabilnost veća. GE komponenta varijanse (θ') je modifikovana mera parametra stabilnosti. Po ovoj statistici, ako se neki genotip ukloni iz čitavog skupa podataka, varijansa $G \times E$ u tom podskupu predstavlja indeks stabilnosti tog genotipa. Genotipovi sa višim vrednostima smatraju se stabilnijim (Plaisted, 1960). Oba pomenuta parametra se i dalje koriste u studijama stabilnosti prinosa, najčešće uz druge parametre stabilnosti (Liu, et al., 2011; Ruswandi, et al., 2022). Iako je θ' izvedena iz θ , i obe predstavljaju statički koncept stabilnosti (Wicaksana, et al., 2022), ove dve mere mogu dati drugačije rezultate, tj. oceniti različite genotipove kao najstabilnije, što je i bio slučaj u istraživanju Wicaksana, et al. (2022). Štaviše, prema Ruswandi, et al. (2022), θ' , Wrickeova ekovalenca (1962) i Shuklina varijansa stabilnosti (1972) (o kojima će biti reči u narednim pasusima), su rangirali genotipove po stabilnosti na sličan način. Ovo je u skladu sa rezultatima Vaezi, et al. (2019) i Karuniawan, et al. (2021), koji predlažu ova tri parametra za odabir stabilnih genotipova ječma, tj. slatkog krompira.

Kao što je napomenuto u prethodnom pasusu, Wricke (1962) predlaže koncept ekovalence kao doprinos svakog genotipa zbiru kvadrata interakcije $G \times E$. Ekovalenca (W) nekog genotipa predstavlja njegovu interakciju sa sredinom, kvadriranu i sabranu na svim lokacijama. Na taj način, genotipovi sa nižim vrednostima imaju manja odstupanja od prosečne vrednosti za sve lokacije i biće stabilniji. Giauffret, et al. (2000) su vršili ocenu egzotične germplazme u uslovima umerene klime. Pomoću ekovalence su ocenili tropske genotipove kao nestabilne u umerenim uslovima ($W > 4\%$), genotipove poreklom iz umerenih područja kao relativno stabilne ($W = 2-4\%$), a genotipove nastale ukrštanjem ove dve grupe kao najstabilnije ($W < 2\%$). Statistika slična konceptu ekovalence je metod koji je predložio Weatherspoon (1970). Jedina razlika između ova dva metoda je što su u konceptu ekovalence efekti kvadrirani, dok po Weatherspoon nisu.

Shukla (1972) predlaže varijansu stabilnosti (σ^2) nekog genotipa kao njegovu varijansu na različitim lokacijama nakon otklanjanja efekata prosečnih vrednosti lokacija. Ovim metodom se mogu identifikovati pojedinačni faktori koji doprinose heterogenosti interakcije $G \times E$. Stabilnost varijanse nastaje kao zbir varijanse unutar jedne lokacije i varijanse genotipa između više lokacija. Genotip se smatra stabilnim ako je njegova varijansa stabilnosti jednaka varijansi unutar sredine, tj. ako je $\sigma^2 = 0$. Ako svi posmatrani genotipovi imaju visoko značajne vrednosti σ^2 , smatraju se nestabilnima i u tom slučaju se dalji odabir vrši isključivo na osnovu visine prinosa (Fan, et al., 2007). Ruswandi, et al. (2022)

pomoću W i σ^2 detektuju hibrid kukuruza koji ostvaruje visoke i relativno stabilne prinose kako u čistom usevu, tako i u združenoj setvi. Takođe, Madembo, et al. (2020) koriste varijansu stabilnosti kako bi ocenili sa kojim mahunarkama kukuruz daje najstabilniji prinos zrna u združenoj setvi. Iako je zaključak velikog broja autora da ekovalenca i varijansa stabilnosti po Shukla (1972) vrše slično ili identično rangiranje genotipova, te da je korelacija između njih često potpuna i pozitivna (Kang, et al., 1987; Piepho, 1998; Ali, 2009; Bujak, et al., 2014; Bunjac, 2019; Vaezi, et al., 2019; Karuniawan, et al., 2021; Ruswandi, et al., 2022), Mylonas, et al. (2020) su uspeli da uoče korelaciju između ekovalence i metoda po Eberhart & Russell (1966) koji su rangirali jedan genotip kao najstabilniji, dok je prema metodu Shukla najbolje rangiran drugi hibrid.

Problem analize aditivnih efekata (genotip i sredina) i interakcije $G \times E$ koja je multivarijacione prirode, u kombinovanim modelima se rešava tako što se aditivni efekti vrednuju analizom varijanse, dok se interakcija $G \times E$ analizira regresionom analizom (Dimitrijević & Petrović, 2000). Model zajedničke regresije prvo su predložili Yates & Cochran (1938), a kasnije sa manjim modifikacijama i drugi autori (Finlay & Wilkinson, 1963; Eberhart & Russell, 1966; Perkins & Jinks, 1968), za upotrebu u analizi stabilnosti i identifikaciju stabilnih genotipova u različitim sredinama. Finlay & Wilkinson (1963), a kasnije i Eberhart & Russell (1966) koristili su regresioni koeficijent (b_i) za merenje stabilnosti prinosa zrna hibrida. Ovaj koeficijent predstavlja odgovor genotipa na indeks sredine izveden od prosečnih rezultata svih genotipova na svakoj lokaciji. Analiza stabilnosti prema Finlay & Wilkinson (1963) koristi srednju vrednost svih genotipova ocenjenih na jednom lokalitetu kao indeks prinosa. Performanse pojedinačnih genotipova se zatim regresiraju u odnosu na indeks okoline. Prema dinamičkom konceptu stabilnosti, stabilnost genotipova čiji se regresioni koeficijent približava 1, po definiciji je prosečna. Stabilnost genotipova sa $b_i < 1$ je relativno visoka i obrnuto, stabilnost genotipova sa $b_i > 1$ je relativno niska. Genotip se smatra stabilnim ako je nagib na liniju regresije blizak nuli, a parametar R^2 takođe što je moguće manji. Pomoću Finlay & Wilkinson metode, Tollenaar & Lee (2002) su uspeli da dokažu da, iako se visoko prinostni hibridi mogu razlikovati prema stabilnosti prinosa, prethodne tvrdnje da su visoki prinosi i stabilnost prinosa zrna uzajamno isključivi nisu osnovane.

Po Eberhart & Russell (1966), ako b_i ne odstupa značajno od 1, genotip se smatra adaptiranim na sve ispitivane sredine. Vrednost >1 ukazuje na genotipove sa većom osetljivošću na promene sredine i sa izraženijom adaptabilnošću na povoljne uslove sredine. Vrednosti <1 ukazuju na veću otpornost na promenu sredine, što za rezultat ima adaptabilnost na lošije uslove sredine. Prema istim autorima, genotip sa indeksom stabilnosti koji odstupa od 1 može se prilagoditi specifičnim lokacijama. Pored regresionog koeficijenta, predložena je i varijansa devijacije od regresije (S^2d_i) kao jedan od najkorišćenijih parametara za selekciju stabilnih genotipova. Najstabilniji su genotipovi kod kojih je $S^2d_i = 0$, dok više vrednosti ukazuju na smanjenu stabilnost prinosa. Shodno tome, poželjni su genotipovi sa nižom vrednošću devijacije od regresije (Pour-Aboughadareh, et al., 2019). Jedna od glavnih zamerki ovom i drugim konceptima stabilnosti koji se zasnivaju na linearnoj regresiji je ta što se dobri rezultati postižu samo onda kada su podaci dobro prilagođeni linearnom modelu, odnosno kada je u interakciji prisutan jedan prevalentni faktor (Babić, et al., 2011). Međutim, kada su ovi uslovi ispunjeni, ovi pokazatelji mogu dati pouzdane rezultate. Tako, Crevar, et al. (2011) na osnovu b_i i indeksa superiornosti zaključuju koji od tada novih ZP hibrida će ostvariti stabilan i visok prinos zrna i daju

preporuku i za hibride koji se mogu uzgajati u nepovoljnim uslovima. U poređenju sa drugim linearnim pokazateljima, Cargnelutti Filho, et al. (2007) prednost daju Eberhart & Russell modelu koji u obzir uzima i prosečnu produktivnost. Hallauer & Carena (2009) takođe ističu prednost ovog modela i smatraju ga korisnim zbog jednostavnosti i tumačenja koeficijenta regresije i odstupanja od regresijskih parametara.

U modelu stabilnosti po autoru Tai (1971) interakcija $G \times E$ deli se na dve komponente: linearni odgovor na efekte sredine (koji se procenjuje a statistikom) i devijaciju od linearnog odgovora (koja se računa λ statistikom). Prema ovom modelu, genotipovi sa $a = -1$ i $\lambda = 1$ su najstabilniji, dok genotipovi sa $a = 0$ i $\lambda = 1$ poseduju prosečnu stabilnost u ispitivanim sredinama. Ovaj model je sličan modelu po Eberhart & Russell (1966), osim što je procena parametara zasnovana na metodu strukturnog odnosa koji izvodi procene maksimalne verovatnoće, pod pretpostavkom da su efekat okruženja i interakcija $G \times E$ zajedno normalno raspoređeni. Parametar a je sličan linearnoj regresiji modela po Eberhart & Russell, dok je parametar λ sličan odstupanju od regresije (Torres Flores, et al., 2017), i dobijaju se na način koji predstavlja nastavak ANOVA pomoću principa strukturnih odnosa (Liu, et al., 2011). Ova dva modela su najčešće visoko saglasna, što potvrđuju brojne studije stabilnosti prinosa zrna kukuruza (Cargnelutti Filho, et al., 2007; Ali, 2009; El-Hosary, 2020), ali i drugih ratarskih biljaka (Akçura, et al., 2004; Aniskov & Safonova, 2020; Said, et al., 2020). Thayil, et al. (2020) su pomoću ovog modela i neparametrijske statistike uspeli da odrede koji hibridi kukuruza imaju najstabilniji prinos zrna u uslovima toplotnog stresa.

Pinthusov koeficijent determinacije (R^2) definiše se kao predvidljivost odgovora u kom se varijacija prosečne vrednosti prinosa objašnjava odgovorom genotipa u različitim sredinama. To je kvadrirani koeficijent korelacije prinosa zrna svakog pojedinog ispitivanog genotipa na pojedinim lokacijama sa prosečnim prinosom zrna svih ispitivanih genotipova na istim tim lokacijama. Što je vrednost R^2 viša, to je genotip stabilniji (Pinthus, 1973). De Carvalho, et al. (2000) zaključuju da hibridi sa $R^2 > 80\%$ imaju dobru stabilnost u svim posmatranim okolinama. Ispitujući stabilnost prinosa zrna u sušnim uslovima, Seboksa, et al. (2001) dobijaju vrednosti R^2 između 61–91%, s tim što su najviše vrednosti za koeficijent determinacije imali najprinosniji hibridi. Ispitujući stabilnost prinosa zrna normalnih i biofortifikovanih samooplodnih linija kukuruza pomoću različitih parametara stabilnosti, Matongera, et al. (2023) dolaze do zaključka da je R^2 izvršio isto rangiranje genotipova po stabilnosti prinosa zrna kao i ekvalenca po Wricke (1962) i Eberhart & Russell model (Eberhart & Russell, 1966). Jedini parametar koji je rangirao linije različito od njih bio je koeficijent varijacije.

Koeficijent varijacije (CV) kao parametar stabilnosti prvi su predložili Francis & Kannenberg (1978). CV pokazuje u kolikom procentu prosečnog prinosa učestvuje vrednost standardne devijacije. Najpoželjniji su genotipovi koji imaju nizak koeficijent varijacije, nisko variranje usled dejstva sredine i visok prosečni prinos. Grafičkim prikazom prosečnog prinosa (na x osi) i koeficijenta varijacije (na y osi), genotipovi se mogu podeliti u 4 grupe: (1) genotipovi sa visokim prinosom i niskom varijacijom, (2) genotipovi sa visokim prinosom i visokom varijacijom, (3) genotipovi sa niskim prinosom i niskom varijacijom, i (4) genotipovi sa niskim prinosom i visokom varijacijom. Kao jedan od rezultata ispitivanja stabilnosti kvantitativnih svojstava kukuruza, Babić (2014) navodi da je jedan hibrid istovremeno ostvario najviše prinose u svojoj FAO grupi (FAO 400), uz to ostvarivši nizak CV, što ga čini najbolje ocenjenim hibridom u svojoj FAO grupi. Ispitujući stabilnost prinosa

zrna osam najzastupljenijih hibrida kukuruza u Argentini, Di Matteo, et al. (2016) dolaze do zaključka da sa godinom registracije hibrida CV opada, tj. da je prinos zrna modernih hibrida stabilniji i viši u poređenju sa starijim hibridima. Da bi ocenili stabilnost prinosa genotipova i varijabilnost usled efekta spoljašnje sredine, pored drugih univarijantnih parametrijskih metoda (W, σ^2, b_i), Shojaei, et al. (2021) su koristili i CV. Utvrđena je pozitivna korelacija između CV i parametara stabilnosti po Eberhart & Russell modelu (1966). Kao što je prethodno navedeno, ovo nije u skladu sa istraživanjem Matongera, et al. (2023) kod kojih je rangiranje na osnovu CV dalo drugačije rezultate od ostalih primenjenih metoda.

Indeks superiornosti (P_i) definiše se kao sredina kvadrata rastojanja između dva hibrida od kojih je jedan postigao maksimalan prinos zrna na svim lokacijama. Što su vrednosti ovog parametra niže, to je manje rastojanje između ispitivanog hibrida i hibrida sa maksimalnim prinosom, pa se i taj hibrid smatra relativno stabilnijim (Lin & Binns, 1988). Ispitujući stabilnost prinosa zrna kukuruza, Scapim, et al. (2000) su uočili visoku korelaciju između regresionog koeficijenta b_i po Eberhart & Russell (1966) i P_i , i potvrdili da su najstabilniji hibridi imali nizak P_i . Pozitivna korelacija je uočena i između P_i i Hühnovog parametra $S_i^{(1)}$, što nagoveštava da čak i superiorni genotipovi sa niskim P_i mogu biti stabilni. Međutim, korelacija nije postojala između P_i i drugih Hühnovih parametara, kao ni između P_i i S^2d_i . Prema istraživanju de Oliveira, et al. (2017), P_i i Eberhart & Russell model su imali pozitivnu korelaciju, ali samo u povoljnim uslovima, dok su u nepovoljnim ova dva parametra imali negativnu korelaciju i ukazivali na različite genotipove kao na stabilne. Kao pouzdan i specifičan, indeks superiornosti preporučuju i drugi autori koji su izučavali stabilnost prinosa drugih ratarskih biljaka (de Franceschi, et al., 2010; de Vasconcelos, et al., 2015). U poređenju sa drugim univarijantnim metodama, Changizi, et al. (2014) ga ističu kao jednu od najkorisnijih metoda za ocenu stabilnosti hibrida kukuruza jer ga dovode u vezu sa dinamičkim konceptom stabilnosti. Međutim, nedostatak ovog indeksa je što pretpostavlja da su efekti genotipa fiksni, što može biti ograničavajuće za analizu ogleda koji nemaju ortogonalni eksperimentalni dizajn i imaju izraženu heterogenost varijanse (de Resende, 2007; Mendes, et al., 2012).

Na osnovu prethodno objašnjenih univarijantnih parametara stabilnosti, jedan stabilan genotip bi trebalo da ima visok prosečan prinos u poređenju sa prosečnim prinosom svih posmatranih genotipova, regresioni koeficijent jednak jedinici ($b_i = 1$), malo ili beznačajno odstupanje od regresije ($S^2d_i = 0$), visok koeficijent determinacije ($R^2 > 80\%$), nisku varijansu (S^2) u svim posmatranim sredinama, nizak koeficijent varijacije (CV) i nisku vrednost ekovalence (W) (Hassan, 2015).

Osnovna karakteristika podataka dobijenih iz multilokacijskih ogleda je kompleksna struktura interakcije. Jedan deo strukture je sistematskog tipa i može biti objašnjen nekim od postojećih statističkih modela, a drugi deo čini nesistematsku varijaciju ili šum, koji otežava interpretaciju rezultata analize (Stanisavljević, 2014).

Jedan od najpopularnijih multivarijantnih modela za ispitivanje $G \times E$ interakcije je AMMI model. S obzirom da analiza varijanse (ANOVA) objašnjava samo glavne efekte i daje odgovor da li je $G \times E$ interakcija značajan izvor varijacije, AMMI prvo primenjuje ANOVA (da bi razdvojio uzroke variranja na G , E i $G \times E$), a zatim je kombinuje sa analizom glavnih komponenti (PCA, *Principle Component Analysis*) u jedan model (Zobel, et al., 1988). AMMI model omogućava istovremeni grafički prikaz glavnih efekata genotipa i sredine, kao i njihove interakcije, i olakšava analizu interakcije $G \times E$. Pored razumevanja $G \times E$

interakcije, AMMI je efikasan i za preciznije procenjivanje prinosa, identifikaciju šablona megaokolina, veću fleksibilnost eksperimentalnog dizajna i imputiranje podataka koji nedostaju (Gauch, 1992; Gauch, et al., 2008). Gauch (2006) favorizuje AMMI model jer smatra da glavne efekte genotipa, spoljašnje sredine i $G \times E$ interakcije treba posmatrati odvojeno, radi lakšeg razumevanja i interpretacije rezultata. Prema istom autoru (Gauch, 2013), AMMI ima dva cilja: razumevanje kompleksnih $G \times E$ interakcija i povećanu preciznost radi poboljšanja preporuka, ponovljivosti, selekcije i genetske dobiti. Da bi olakšao primenu AMMI modela, on daje sledeći jednostavan protokol za analizu višelokacijskih ogleda: (1) analiza varijanse, (2) dijagnoza modela—odabir optimalnog AMMI modela, (3) razdvajanje spoljašnjih sredina u megaokoline, i (4) odabir/preporuka genotipova.

Prvobitni AMMI model su kasnije modifikovali brojni autori (Sneller, et al., 1997; Annicchiarico, 1997; Purchase, et al., 2000; Farshadfar, 2008; Zali, et al., 2012). Zahvaljujući svojoj jednostavnosti i pouzdanosti, primene AMMI modela i njegovih modifikacija su raznovrsne; međutim, najčešće se primenjuje u studijama ispitivanja $G \times E$ interakcije.

Aslam, et al. (2015) su pomoću AMMI modela odabrali genotipove kukuruza stabilnog prinosa zrna za dalje oplemenjivanje. Upotrebom istog modela, Branković-Radojčić, et al. (2018) su dali preporuku za hibride kukuruza visokog potencijala rodnošći koji imaju visoku adaptabilnost i stabilnost prinosa i koji se mogu gajiti u širokom spektru sredina, ali i za hibride za gajenje u optimalnim uslovima, takođe visokog potencijala rodnošći. Slične rezultate su ostvarili i dos Santos, et al. (2019). Takođe, Wang, et al. (2019) su pomoću AMMI analize detektovali dva hibrida koje preporučuju za široki areal gajenja.

Mirosavljević, et al. (2014) su AMMI analizom utvrdili da su genotip, spoljašnja sredina i interakcija $G \times E$ imali značajan uticaj na prinos ispitivanih superiornih linija ječma i uspešno preporučili dva nova genotipa za dalje testiranje usled njihovog visokog i stabilnog prinosa.

Mitrović, et al. (2012) su ocenjivali stabilnost prinosa zrna i adaptabilnost novih hibrida kukuruza na 12 lokacija pomoću AMMI i GGE biplot metoda. Autori zaključuju da ne postoji velika razlika između AMMI i GGE biplot analize u proceni novih hibrida kukuruza u različitim klimatskim uslovima, te da se obe metode mogu podjednako uspešno koristiti. Ovi rezultati su u skladu sa rezultatima drugih autora koji su koristili iste navedene metode (Yue, et al., 2019; Yue, et al., 2020; Omar, et al., 2022).

Metod najboljih linearnih objektivnih pokazatelja (BLUP, Best Linear Unbiased Prediction) je široko prihvaćen kao najbolja metodologija za procenu nasumičnih efekata u linearnom modelu (Smith, et al., 2005). Upotrebom BLUP i metoda ograničene najveće verovatnoće (REML, Restricted Maximum Likelihood) izvedeno je nekoliko parametara za istovremeno merenje performansi i stabilnosti posmatranog svojstva: harmonijska sredina genotipskih vrednosti (po kojoj je genotip sa najvišom harmonijskom sredinom u posmatranim sredinama najstabilniji), relativna performansa genotipskih vrednosti (koja se smatra indeksom adaptabilnosti) i harmonijska sredina relativne performanse genotipskih vrednosti (koja istovremeno uzima u obzir stabilnost, adaptabilnost i prosečne performanse) (Pour-Aboughadareh, et al., 2022). Gonçalves, et al. (2020) su pokušali da utvrde povezanost REML/BLUP i GGE biplot metoda za odabir superiornih genotipova soje, u pogledu

adaptabilnosti i stabilnosti prinosa zrna. U ovoj studiji, REML/BLUP i GGE biplot metode su u visokoj korelaciji u pogledu rangiranja genotipova u svrhu selekcije i dalje preporuke.

Iako su AMMI i BLUP modeli najzastupljeniji, oba imaju svoje nedostatke. Kako bi ih prevazišli, Olivoto, et al. (2019) su kombinacijom AMMI i BLUP razvili novi parametar stabilnosti nazvali ga ponderisana aritmetička sredina apsolutnih rezultata (WAASB, Weighted Average of Absolute Scores). Genotip sa najnižom WAASB vrednošću smatra se najstabilnijim. Iako relativno nov metod, WAASB je već našao primenu u ispitivanju G×E interakcija, kako kod kukuruza (Singamsetti, et al., 2021; Yue, et al., 2022), tako i kod drugih poljoprivredno značajnih vrsta (Sharifi, et al., 2020; Verma & Singh, 2020; Koundinya, et al., 2021; Nataraj, et al., 2021; Vineeth, et al., 2022).

GGE biplot metodologija je grafički alat koji je od pomoći oplemenjivačima pri tumačenju G×E interakcije u višelokacijskim ogledima. Iako je biplot (Gabriel, 1971) kao alat za vizuelno prikazivanje podataka zastupljen u mnogim oblastima, najveću popularnost je stekao među oplemenjivačima bilja i drugim istraživačima iz oblasti poljoprivrede (Yan, et al., 2000). U istom radu Yan, et al. ovakve biplote nazivaju GGE biplotima, jer prikazuju i genotipove (G), kao i interakciju genotip×spoljašnja sredina (GE) – dva izvora variranja koja su od značaja za ocenu genotipova. Dalje detaljne podatke o ovoj metodologiji pružio je Yan (2001), a kasnije i u saradnji sa Tinker (Yan & Tinker, 2006).

Prema Yan & Kang (2003), analiza podataka o interakciji G×E treba da obuhvata tri glavna aspekta: (1) analizu megaokoline, (2) ocenu testne sredine, i (3) ocenu genotipova. Ukoliko su dostupne dodatne informacije (npr. podaci o ekološkim ili genotipskim kovarijatima), može se uključiti i četvrti aspekt, tj. razumevanje uzroka G i GE (Yan & Hunt, 2001; Yan & Kang, 2003; Yan & Tinker, 2006; Yan, et al., 2007). Razumevanje ciljnog okruženja je preduslov za smislene procene genotipa i testnog okruženja jer su superiorni genotipovi i superiorna testna okruženja specifični za megaokolinu. Tako, iako se jedan genotip oceni kao široko adaptabilan, on je adaptabilan samo onoliko kolika je širina testnih okruženja (Yan, et al., 2007).

Prednosti ove metodologije su višestruke (Pour-Aboughadareh, et al., 2022):

- Omogućava rangiranje ispitivanih genotipova na osnovu prinosa u datim sredinama,
- Omogućava rangiranje ispitivanih sredina na osnovu relativnog prinosa datog genotipa,
- Omogućava poređenje prinosa bilo koja dva genotipa u datim sredinama,
- Prepoznaje najbolji genotip ili genotipove u svakoj sredini,
- Prepoznaje potencijalne lokacije za ispitivanje na osnovu najboljeg genotipa,
- Istovremeno ispituje genotipove na osnovu stabilnosti i prosečnih performansi,
- Određuje diskriminacionu sposobnost i moć reprezentativnosti testnih sredina,
- Daje vizuelni prikaz svih navedenih mogućnosti i za podskup podataka tako što omogućava uklanjanje određenih genotipova ili sredina.

Preko GGE biplot modela mogu se izračunati dva indeksa stabilnosti: GGE Distanca (GGED) i GGE Indeks Nestabilnosti (GGEIN). GGED meri udaljenost svakog genotipa od „idealnog“ genotipa, koji se definiše kao virtuelni genotip koji ima najveći prosečan prinos i stabilnost. GGEIN aproksimira doprinos genotipa interakciji $G \times E$ (Baxevanos, et al., 2008).

GGE biplot metodologija se može koristiti samostalno ili u kombinaciji sa drugim metodama za analizu $G \times E$ interakcije kod različitih useva. U cilju grupisanja sredina u megaokoline i izdvajanja idealne sredine, Mitrović, et al. (2011) su primenili GGE biplot analizu stabilnosti prinosa zrna 20 hibrida kukuruza. Značaj izdvajanja megaokolina ogleda se u odsustvu unakrsne interakcije koja remeti njihov rang, pa se hibridi mogu odabrati na osnovu prosečnih vrednosti određene osobine. Zaključak autora je da određivanje tzv. idealne sredine može biti od velikog značaja za izbor najreprezentativnijeg lokaliteta za testiranje, koji takođe ima i najveću moć diskriminacije hibrida. Slično su postigli i Shojaei, et al. (2022), koji su uspeli da ukažu na jedan hibrid kukuruza sa visokim i stabilnim prinosom zrna, ali i da grupišu ispitivane lokacije u dve megaokoline, kao i da preporuče optimalne hibride za svaku od ovih megaokolina. Ovi rezultati su u skladu sa rezultatima Liu, et al. (2022), koji zaključuju da je GGE biplot analiza omogućila efikasan izbor visokoprinosnih i stabilnih hibrida kukuruza za dalje ekološko gajenje i komercijalnu upotrebu.

Pomoću GGE biplota, Ghaffari, et al., (2021) su ukazali na dve značajne megaokoline za testiranje hibrida suncokreta na stabilnost prinosa ulja. Na osnovu biplota za hipotetički idealan genotip, dva hibrida su bila bolja od ostalih u pogledu prinosa ulja i stabilnosti, a imali su i najveću opštu adaptabilnost na sve sredine. Da Silva, et al. (2021) nalaze da je GGE biplot efikasan alat za identifikaciju megaokolina za testiranje sirka na stabilnost prinosa, ali i za preporuku adaptabilnijih i stabilnijih genotipova sirka za zrno.

Gonçalves, et al. (2020) su pokušali da utvrde povezanost REML/BLUP metoda i GGE biplota u oceni genotipova soje u pogledu adaptabilnosti i stabilnosti prinosa zrna. Zaključak autora je da su ove dve metode u visokoj korelaciji jer su rangirali posmatrane genotipove na sličan način.

Testirajući hibride kukuruza na većem broju lokacija, Mitrović, et al. (2012) su pored GGE biplot analize primenili i AMMI model. Stabilnost prinosa zrna ispitivanih hibrida je bila slična na osnovu oba modela, pa autori navode da su i AMMI i GGE biplot model podjednako pouzdani za ocenu stabilnosti prinosa zrna novostvorenih hibrida kukuruza u različitim klimatskim uslovima. Iste modele su primenili i Božović, et al. (2018), ali za ocenu uticaja interakcije genotip $\times$ lokalitet $\times$ godina $\times$ tretman, kako bi se identifikovale linije sa stabilnim i visokim prinosima zrna u različitim vegetacionim sezonama. Od sedam ispitivanih linija, autori su uspeli da detektuju tri koje su ostvarile natprosečno visok prinos; međutim, samo jedna se preporučuje za dalje programe oplemenjivanja zbog stabilnih i visokih prinosa. Iako su upotrebili oba modela, autori daju prednost GGE biplotu, ističući njegov grafički prikaz kao praktičniji i informativniji. Ovi zaključci su u skladu sa istraživanjem de Oliveira, et al. (2010) i Karuniawan, et al. (2021).

GGE biplot se može koristiti i u drugim studijama, ne samo za ocenu stabilnosti genotipova. Tako, Singh, et al. (2020) su primenili GGE biplot analizu u cilju razumevanja dinamike otpornosti mungo pasulja prema nematodi *Meloidogyne incognita*. Na ovaj način su prepoznata tri genotipa sa izraženom otpornošću prema *M. incognita* koji mogu poslužiti

u programima oplemenjivanja mungo pasulja na globalnom nivou. Srivastava, et al. (2021) su na sličan način uspjeli da detektuju sedam genotipova nauta sa otpornošću prema *Fusarium* sp. Pored njihove preporuke za upotrebu u budućim programima oplemenjivanja, autori su došli do zaključka i koje sredine su najreprezentativnije za buduća testiranja nauta na otpornost prema ovom patogenu.

Da bi se izbegli nedostaci koji svaki od prethodno pomenutih modela ima, a iskoristile njihove prednosti, veliki broj istraživača uporedo koristi više metoda kako bi što pouzdanije došli do zaključka o stabilnosti prinosa u različitim ispitivanim sredinama i proizvodnim sezonama.

3.4. Primena molekularnih markera u oplemenjivanju kukuruza

Krajem XX i početkom XXI veka brz tehnološki napredak u tehnologijama sekvenciranja i genotipizacije, tehnike modifikacije genoma i dihaploida ostvarili su veliki uticaj na savremeno oplemenjivanje kukuruza, a paralelno sa njima i napredak ostvaren u nauci o podacima i razvoj novih pristupa koji koriste genomske informacije (Andorf, et al., 2019). Kao posledica svega navedenog, pored značaja za globalnu poljoprivredu i industriju, kukuruz je postao i značajan eksperimentalni model organizam. Ovaj dvostruki doprinos kukuruza je u velikoj meri posledica njegovog složenog i raznolikog genoma, koji je omogućio istraživačima da bolje razumeju genetiku, citogenetiku i genomiku, i ponudio bogatu genetičku raznovrsnost kako bi oplemenjivačima pomogao da stvore poboljšanu germplazmu. Kukuruz ima genom srednje veličine u poređenju sa drugim travama, sa približno 2,4 milijarde baznih parova. Postoji između 30000 i 40000 gena u kukuruzu, pri čemu je veliki deo sintenijski očuvan sa srodnim travama (Andorf, et al., 2019).

Kukuruz karakterišu mnoga svojstva cenjena od strane biljnih genetičara kao što su lako kontrolisano ukrštanje i stvaranje samooplodnih linija, mogućnost dobijanja dihaploida i slično (Wallace, et al., 2014). Kao model organizam, kukuruz je između ostalog doprineo otkriću i/ili sticanju značajnih uvida o heterozisu (Shull, 1908), kvantitativnoj genetici (Emerson & East, 1913), translokaciji hromozoma (McClintock, 1930), transpozonima (McClintock, 1950), citoplazmatičnom (Rhoades, 1931) i epigenetskom nasleđivanju (Kermicle, 1970). Prve molekularne mape kukuruza razvijene su osamdesetih godina XX veka upotrebom kratkih DNK fragmenata koji detektuju polimorfizme dužine restrikcionih fragmenata (*Restriction Fragment Length Polymorphism*, RFLP) (Coe, et al., 1987). RFLP markeri su se pokazali korisnim i za klasifikaciju genetičkog materijala u heterotične grupe, kao i za otkrivanje povezanosti između njih (Smith, et al., 1990; Dudley, et al., 1991; Warburton, et al., 2005). Pored RFLP markera, kasnije su za generisanje mapa i karakterizaciju germplazme kukuruza korišćeni i drugi molekularni markeri (SSR, RAPD, AFLP, SNP i drugi).

Senior & Heun (1993) su među prvima proučili prisustvo i nasleđivanje mikrosatelita (SSR markera) kod kukuruza. SSR markeri (*Simple Sequence Repeats*; ponovci jednostavnih sekvenci). Zahvaljujući svojoj kodominantnoj prirodi, velikom broju alela po lokusu, ravnomernoj distribuciji duž genoma i podložnosti automatizaciji, ovaj tip markera je veoma koristan i još uvek se koristi u istraživanjima (Bocianowski, et al., 2021; Kim, et al.,

2021; Vančetović, et al., 2020; Nikolić, et al., 2019; Adu, et al., 2019; Grčić, et al., 2018; Yang, et al., 2020).

Da bi procenili genetički diverzitet 18 samooplodnih linija kukuruza, i da bi utvrdili korelaciju između genetske udaljenosti i performansi dvolinijskih hibrida, Lanza et al. (1997) koristili su nasumično umnoženu polimorfnu DNK (*Randomly Amplified Polymorphic DNA*), tj. RAPD markere. Značaj RAPD tehnike se pre svega odnosi na njenu brzinu, jednostavnost i efikasnost, kao i na prilično niske troškove koje tehnika zahteva u poređenju sa drugim tehnikama (Prodanović, et al., 2017). RAPD markeri su korišćeni u analizama genetičke varijabilnosti i najčešće kao *species*-specifični markeri za studije diverziteta i filogenetske studije. Svoju primenu su našli i u ispitivanju genotoksičnosti različitih metala (Erturk, et al., 2013; Erturk, et al., 2014; Mutlu, et al., 2018) i sredstava za zaštitu bilja na kukuruz (Bozari & Aksakal, 2013; Aksakal, et al., 2013).

Vos et al. (1995) su razvili novu tehniku otisaka (*fingerprinting*) koja se zasniva na selektivnoj amplifikaciji restrikcionih DNK fragmenata dobijenih posle razgradnje genomske DNK restrikcionim endonukleazama i nazvali je AFLP (*Amplified Fragment Length Polymorphism*), tj. polimorfizam dužine umnoženih fragmenata. Nakon ovoga, AFLP markere koristili su i drugi autori za generisanje mapa vezanosti (Castiglioni, et al., 1999) i ispitivanje genetske udaljenosti samooplodnih linija kukuruza (Pejic, et al., 1998). Zahvaljujući svojoj visokoj genomskoj abundantnosti, slučajnoj distribuciji duž genoma i visoko informativnim obrascima AFLP traka, AFLP markeri se i dalje smatraju značajnim i koriste u studijama genskog mapiranja i genetske udaljenosti i diverziteta (Castro, et al., 2022; Yi, et al., 2021; Tomkowiak, et al., 2020).

Usled svoje obilnosti i ravnomerne raspoređenosti u genomu kukuruza, široko su prihvaćeni polimorfizmi pojedinačnih nukleotida, tj. SNP markeri (*Single Nucleotide Polymorphism*, SNP, snip). Oni predstavljaju najčešću klasu DNK polimorfizama i još se nazivaju i tačkaste mutacije, tj. mutacije na jednom mestu, u jednom nukleotidu (Prodanović, et al., 2017). S obzirom da se nukleotidna baza može smatrati najmanjom jedinicom nasleđivanja, SNP markeri predstavljaju ultimativnu formu molekularnog genetskog markera (Edwards, et al., 2007).

Sve raširenijoj upotrebi SNP markera doprineo je razvoj DNK čipova. SNP čip je vid DNK mikročipa koji sadrži dizajnirane probe u kojima su očuvane SNP pozicije, a koje će hibridizovati sa fragmentima DNK da bi se odredili specifični aleli svih SNP markera na čipu za hibridizovani DNK uzorak (LaFramboise, 2009). Dizajnirani su i SNP čipovi za primenu na kukuruzu (Ganal, et al., 2011; Unterseer, et al., 2014; Tian, et al., 2015; Xu, et al., 2017). Oni su moćno sredstvo za ocenu germplazme (uključujući tu i analizu genetičkog diverziteta i podelu prema heterotičnim grupama), oplemenjivanje uz pomoć markera, mapiranje QTL-ova i GWAS studije.

Mazaheri, et al. (2019) su istraživali genomske asocijacije (*Genome-Wide Association Study*, GWAS) kako bi otkrili kandidate gena koji su u vezi sa karakteristikama značajnim za biomasu i anatomiju stabla. Koristeći 942 samooplodne linije, pronašli su 899784 SNP markera pri čemu su otkrili 16 kandidat gena koji su odgovorni za četiri posmatrana svojstva stabljike. Rezultati ovog istraživanja daju uvid u genetsku kontrolu anatomije i biomase stabljike kukuruza.

Slična izučavanja genomskih asocijacija sprovedi su i drugi naučnici. Li et al. (2016) su otkrili preko 556000 SNP markera u 504 ispitivane samooplodne linije i otkrili četiri kandidat gena za otpornost prema virusu mozaika šećerne trske (SCMV).

Lu et al. (2020) su ispitivali genetsku bazu visine biljke i visine klipa, dva agronomski značajna svojstva za sklop biljaka i otpornost na poleganje. Registrovan je veliki broj SNP markera, od čega je 12 bilo u značajnoj vezi sa visinom biljke (odgovorni za 25,8% fenotipske varijabilnosti ovog svojstva), a 15 sa visinom klipa (odgovorni za 30% fenotipske varijabilnosti ovog svojstva). Takođe, identifikovano je 5 kandidat gena za visinu biljke i 12 kandidat gena za visinu klipa.

He, et al. (2020) su istraživali genetsku bazu efikasnosti iskorišćenja azota kao sredstva za povećanje prinosa zrna, a smanjenje upotrebe mineralnih hraniva. Otkriveno je 60 kandidat gena koji bi mogli produbiti razumevanje genetske osnove različitih agronomski značajnih svojstava.

Pored navedenog, SNP markeri su praktičnu primenu našli i u DUS ispitivanju. Međunarodna unija za zaštitu novih biljnih sorti (UPOV, 2014) propisuje set SNP markera za analizu genotipova kukuruza, nastao u cilju lakšeg upravljanja njihovom referentnom kolekcijom. Hall, et al. (2016) zaključuju da su SNP markeri pouzdaniji od fenotipskih markera i metabolomičkih podataka. Navedeni rezultati ukazuju na to da bi se SNP markeri mogli koristiti za inicijalni skrining ili kao zamena za fenotipske markere, makar za ona svojstva čija je genetska osnova dobro poznata i opisana.

SNP markeri su se pokazali izuzetno pouzdanim za ocenu divergentnosti linija. Hao, et al. (2015) su izvršili genotipizaciju 110 samooplodnih linija voskovca i 110 samooplodnih linija zubana pomoću 3072 SNP markera. Rezultati su pokazali visok genetski diverzitet ispitivanog materijala.

Poznavanje diverziteta germplazme je od ključnog značaja za uspeh programa oplemenjivanja jer pomaže da se raščlane genetski odnosi među linijama i lakšu identifikaciju superiornih roditelja i roditeljskih parova. Silva, et al. (2020) su ispitivali genetički diverzitet 1041 samooplodne linije kukuruza i pokušali da utvrde vezu između genetičkog diverziteta i heterotičnih grupa kojima linije pripadaju na osnovu performansi njihovih dvolinijskih hibrida. Pri tome je generisano 32840 SNP markera. Analiza diverziteta zasnovana na SNP markerima bila je efikasna i pouzdana za razvrstavanje linija unutar predefinisanih heterotičnih grupa. Takođe, stečeni su važni uvidi za efikasan odabir roditelja, izbegavanjem ukrštanja genetski sličnih tropskih linija kukuruza.

Perić, et al. (2021) su pokušali da utvrde genetičku distancu između samooplodnih linija kukuruza i da ispituju da li postoji značajna korelacija između genetičke distance roditeljskih linija, posebnih kombinacionih sposobnosti i heterozisa u odnosu na boljeg roditelja za prinos zrna. Sedam samooplodnih linija je analizirano pomoću SNP čipa. Njihovi hibridi dobijeni po metodu nepotpunog dialela ispitivani su u polju zajedno sa samooplodnim linijama *per se*. Autori su potvrdili ocenu genetičke distance kao efikasan metod za procenu kombinacionih sposobnosti roditeljskih linija i predviđanje heterozisa, a SNP markeri su još jednom potvrđeni kao pouzdan metod za detekciju dobrih heterotičnih parova samooplodnih linija.

Metod ocene genetičkih distanci kao pouzdan potvrdili su i de Oliveira, et al. (2021). Rezultati njihove studije pokazali su da metode grupisanja zasnovane na procenama genetičkog diverziteta korišćenjem SNP markera nude pouzdanu klasifikaciju samooplodnih linija u heterotične grupe. Upotreba ovih markera kao dopuna oplemenjivačkim programima može pružiti detaljnije informacije o identifikovanim heterotičnim grupama i omogućiti poboljšanu eksploataciju genetičke varijabilnosti unutar samooplodnih linija.

Pored ispitivanja diverziteta samooplodnih linija, SNP markeri mogu pružiti uvid i u čistoću ispitivanog materijala. Josia, et al. (2021) su upravo to imali za cilj i pokušali su da utvrde diverzitet ispitivanih samooplodnih linija kao i njihovu genetičku čistoću, za šta su koristili 92 SNP markera. Na ovaj način je utvrđeno da je većina ispitivanih linija genetski čista sa zaostalom heterozigotnošću od <5%. SNP markeri su se pokazali kao visoko polimorfni i efikasni, i autori ih preporučuju za kontrolu genetičke čistoće.

SNP i drugi molekularni markeri se koriste i za detekciju QTL-ova čija ekspresija varira u različitim ekološkim uslovima ili različitim interakcijama sa spoljašnjom sredinom (QTL×E) (Monteverde, et al., 2019). Na osnovu SNP-ova ustanovljen je veći broj QTL-ova za otpornost kukuruza prema biotskim i abiotskim stresovima, ali i QTL-ova zaduženih za ekspresiju poljoprivredno značajnih svojstava (Xie, et al., 2019; Zhu, et al., 2019; Tomkowiak, et al., 2020).

Di, et al. (2015) su razvili dCAPS markere na osnovu SNP markera koji su usko povezani sa QTL-om zaslužnim za otpornost prema prašnoj gari (*Sporisorium reilianum* (J.G. Kühn) Langdon & Full. (1978)). Mengesha, et al. (2017) su pomoću SNP markera otkrili linije rezistentne na *Striga hermonthica*, parazitsku biljku koja značajno umanjuje prinose zrna kukuruza u podsaharskoj Africi. Rezultati SNP analize bili su u skladu sa prethodno dostupnim pedigree podacima. Linije koje su autori ispitivali dobijene su ukrštanjem linija kod kojih je potvrđena otpornost na *S. hermonthica* sa linijama otpornim na sušu. S obzirom da je suša jedan od najznačajnijih ograničavajućih faktora u globalnoj proizvodnji, autori su za cilj imali otkrivanje linija koje će posedovati oba vida otpornosti i na taj način biti od interesa za dalje oplemenjivanje kukuruza.

Otkrivanje QTL-ova koji su u vezi sa otpornošću prema abiotskim stresovima, a najpre prema suši i visokim temperaturama, cilj je istraživanja i drugih autora (Beyene, et al., 2015; Li, et al., 2018; Hu, et al., 2021).

Pored stresa suše, drugi autori su upotrebom SNP markera otkrili značajan broj QTL-ova koji se dovode u vezu sa tolerantnošću prema drugim abiotskim stresovima, poput saliniteta (Cui, et al., 2015; Luo, et al., 2017; Xie, et al., 2019), niskog sadržaja azota i fosfora (Ribeiro, et al., 2018; Wang, et al., 2019), niskih temperatura (Zhang, et al., 2021), plavljenja (Du, et al., 2017), prisustva metala (Guimaraes, et al., 2014), i drugih.

Pored detekcije QTL-ova zaduženih za različite vidove otpornosti, pomoću SNP markera otkriven je i veliki broj QTL-ova koji se dovode u vezu sa drugim poljoprivredno značajnim svojstvima ili sa botaničkim karakteristikama. Xie, et al. (2019) su na ovaj način pružili uvid u genetske mehanizme koji kontrolišu arhitekturu metlice, koja igra značajnu ulogu u proizvodnji F₁ hibridnog semena i u konačnom prinosu zrna.

Primena SNP markera nije ograničena samo na kukuruz. Slična istraživanja rađena su i na drugim značajnim poljoprivrednim vrstama poput pšenice (Guan, et al., 2018; Tadesse, et al., 2019; Tura, et al., 2019; Farouk, et al., 2021), pirinča (Tareke Woldegiorgis, et al., 2019; Zhang, et al., 2019; Habila, et al., 2022), ječma (Abed & Belzile, 2019), sirka (Mengistu, et al., 2020), soje (Ludke, et al., 2019; da Silveira, et al., 2019), pasulja (Leitao, et al., 2021), graška (Jha, et al., 2019), nauta (Seo, et al., 2020), uljane repice (Deng, et al., 2019; Xie, et al., 2020), šećerne repe (Ravi, et al., 2021), krompira (Koizumi, et al., 2021) i mnogih drugih.

Uz sve navedene markere, kloniran je i okarakterisan veliki broj gena koji utiču na kontrolu različitih aspekata razvoja biljke, otpornost ka biotskim i abiotskim stresovima, kvalitet svojstava, itd. Oni predstavljaju odlična sredstva za oplemenjivanje kukuruza uz pomoć markera (Prasanna, et al., 2010).

4. RADNA HIPOTEZA

Prilikom izvođenja ogleda za ovu doktorsku disertaciju, pošlo se od pretpostavke da između ispitivanih hibrida kukuruza postoje statistički značajne razlike u pogledu prinosa zrna, što će biti ustanovljeno u višelokacijskim ogledima u periodu od dve godine. Takođe, postavlja se pitanje da li pomenuti lokaliteti i okruženja imaju uticaj na variranje prinosa. Na osnovu različitih parametara stabilnosti, očekuje se da će se otkriti koji hibridi imaju široku adaptabilnost i koji će biti potencijalno interesantni za većinu proizvodnih regiona u Srbiji. U isto vreme, očekuje se otkrivanje hibrida koji su uže adaptivne moći, ali potencijalno prinasniji u specifičnim proizvodnim uslovima. Rezultati poljskih ogleda mogu poslužiti za odabir perspektivnih hibrida koji će biti predloženi za uvođenje u proizvodnju i za komercijalizaciju.

Očekuje se da će sprovedena karakterizacija linija i hibrida kukuruza pružiti uvid u nivo varijabilnosti ispitivane germplazme čime će se olakšati i ubrzati izbor roditeljskih linija za stvaranje novih hibrida kukuruza.

Genotipizacijom roditeljskih komponenti pomoću SNP markera očekuje se detekcija linija koje daju potomstvo široke adaptabilnosti, ali i onih linija koje će dati usko adaptibilno potomstvo koje će najbolje rezultate ostvariti u određenim proizvodnim regionima.

Očekuje se da će se izborom adekvatnih roditelja ili roditeljskih parova i ciljanim oplemenjivanjem na najvažnije rejone gajenja u Srbiji, u budućnosti moći smanjiti obim ispitivanja hibrida u postkomisijskim ogledima.

Kao posledica svega navedenog, očekuje se da će ovakav vid selekcije smanjiti troškove marketinga i komercijalno-finansijske delatnosti.

5. MATERIJAL I METODE RADA

5.1. Biljni materijal

Celokupan materijal korišćen u istraživanju predstavljaju hibridi kukuruza Instituta za kukuruz „Zemun Polje“. Za postavljanje ogleda korišćena su ukupno 22 hibrida kukuruza srednje ranih do kasnih grupa zrenja (FAO 300–800):

- FAO 300: ZP 3714, ZP 3071, Zombor,
- FAO 400: ZP 427, ZP 457,
- FAO 500: ZP 500, ZP 5550, ZP 5089, ZP 5090, ZP 555, ZP 560,
- FAO 600: ZP 606, ZP 6714, ZP 6715, ZP 6263, ZP 6364, ZP 6006b, ZP 552b,
- FAO 700: ZP 707, ZP 7072,
- FAO 800: ZP 7357, ZP 7777.

Svi navedeni hibridi registrovani su pri Ministarstvu poljoprivrede, šumarstva i vodoprivrede Republike Srbije u periodu od 2009–2021. godine.

Za roditeljske komponente navedenih hibrida, korišćeno je 29 samooplodnih linija Instituta za kukuruz „Zemun Polje“. Sve navedene linije pripadaju Lancaster Sure Crop (LSC) ili Iowa Stiff Stalk Synthetic (BSSS) heterotičnim grupama i različitim grupama zrenja, od FAO 280 do FAO 800. Detaljni podaci o svim linijama navedeni su u Tabeli 2.

Tabela 2. Podaci o roditeljskim linijama ispitivanih hibrida.

Redni broj	Naziv linije/komponente	FAO grupa zrenja	Heterotična grupa
1	L73L024	280	LSC
2	L73B064	350	BSSS
3	L73B048	350	BSSS
4	L73B013	400	BSSS
5	L94B034	400	BSSS
6	L04BA031	450	BSSS
7	L74B040	450	BSSS
8	L74B049	450	BSSS
9	L74L065	450	LSC
10	ZPL-255/75-5	450	LSC
11	ZPPL301	450	BSSS
12	L05BA040	500	BSSS
13	L05L061	500	LSC
14	ZPL-155/18-4/1	500	LSC
15	L-335/99	550	BSSS
16	L 325/75-2	600	LSC

17	L76B061	600	BSSS-b
18	L76B004	600	BSSS
19	L76B006	600	BSSS-b
20	L76B044	600	BSSS
21	L76B051	600	BSSS
22	L76B066	600	BSSS
23	L76L007	600	LSC-b
24	L76L023	600	LSC-b
25	L76L060	800	LSC
26	R-802-B-37-7	600	BSSS-b
27	L77B037	700	BSSS
28	L77B043	800	BSSS
29	L77B052	700	BSSS

Oznaka -b u koloni „Heterotična grupa“ označava inbred linije belog zrna.

Roditeljske kombinacije svakog od ispitivanih hibrida navedene su u Tabeli 3.

Tabela 3. Ispitivani hibridi i njihove roditeljske kombinacije

Hibrid	FAO grupa	Tip hibrida	Majčinska komponenta	Očinska komponenta	Godina registrovanja
ZP 3714	300	TC	(L73L024 × L 325/75-2)	L73B064	2020
ZP 3071	300	SC	L05L061	ZPPL301	2020
Zombor	400	TC	(L73L024 × L 325/75-2)	L73B048	2021
ZP 427	400	TC	(ZPL-155/18-4/1 × L 325/75-2)	L73B013	2011
ZP 457	500	TC	(ZPL-155/18-4/1 × L 325/75-2)	L74B049	2018
ZP 500	500	SC	L 325/75-2	L74B040	2016
ZP 5550	500	SC	L-335/99	L74L065	2020
ZP 5089	500	TC	(L04BA031 × L05BA040)	L 325/75-2	2020
ZP 5090	500	TC	(ZPL-155/18-4/1 × L 325/75-2)	L94B034	2020
ZP 555	500	SC	L-335/99	L-255/75-5	2009
ZP 560	500	SC	L76B004	ZPL-155/18-4/1	2010
ZP 606	600	SC	L-335/99	L 325/75-2	2009
ZP 6714	600	SC	L76B066	L 325/75-2	2020
ZP 6715	600	SC	L77B037	ZPL-155/18-4/1	2020
ZP 6263	600	SC	L76B044	L 325/75-2	2018
ZP 6364	600	SC	L76B051	L 325/75-2	2018
ZP 6006b	600	TC	(L76L007 × L76L023)	L76B061	2020
ZP 552b	600	TC	(R-802-B-37-7 × L76B006)	L76L007	2014
ZP 707	700	SC	L77B037	L 325/75-2	2015
ZP 7072	700	SC	L77B052	L 325/75-2	2018
ZP 7357	800	SC	L77B043	L 325/75-2	2018
ZP 7777	800	SC	L76L060	L-335/99	2019

SC – *Single Cross*; TC – *Tripple Cross*

Svi navedeni hibridi su ispitivani u poljskim ogledima, dok su roditeljske linije korišćene za genotipizaciju pomoću SNP markera.

5.2. Postavka poljskih ogleda

Poljski ogled je izveden u četiri za kukuruz najznačajnija proizvodna regiona u Srbiji: Srem (Zemun Polje), Banat (Pančevo), Bačka (Bečej, Bačka Topola) i Stig (Požarevac). U sva četiri regiona, ogled je postavljen na po jednoj lokaciji, osim u Bačkoj gde je postavljen na dve lokacije (Bečej i Bačka Topola). Ogled je izveden u dve uzastopne godine (2019. i 2020.).

Ogled je postavljen po tipu slučajnog blok sistema u dva ponavljanja. Hibridi su sejani u osmorede elementarne parcele u redove dužine 5 m, sa međurednim rastojanjem od 0,75 m. Dakle, površina jedne elementarne parcele iznosi 30 m². Gustina setve je iznosila 61000–72000 biljaka ha⁻¹, zavisno od FAO grupe zrenja (FAO 300–400: 72000 biljaka ha⁻¹; FAO 500: 66667 biljaka ha⁻¹; FAO 600: 64000 biljaka ha⁻¹; FAO 700–800: 61000 biljaka ha⁻¹). Prilikom berbe, korišćena su samo četiri unutrašnja reda kako bi se eliminisao efekat rubnih redova i ostvarili pouzdaniji rezultati, te efektivna površina koja je uzeta u obračun iznosi 15 m².

Setva je izvedena mašinski, specijalizovanom sejalicom za mikrooglede, Wintersteiger Dual Disc (Wintersteiger AG, Rid u Inkrajsu, Austrija). Berba biljaka u ogledu vršena je kombajnom Wintersteiger Split istog proizvođača.

5.3. Meteorološki pokazatelji

Meteorološki podaci za 2019. i 2020. godinu za ispitivane lokalitete, koji prikazuju srednje mesečne temperature (°C) i srednje mesečne padavine (mm) u toku vegetacionog perioda kukuruza, prikazani su u Tabelama 4 i 5.

Tabela 4. Srednje mesečne temperature vazduha (°C) i mesečna suma padavina (mm) na ispitivanim lokacijama u 2019. godini (Republički hidrometeorološki Zavod Republike Srbije, 2020)

Temperatura (°C)	April	Maj	Jun	Jul	Avgust	Septembar
Zemun Polje	13,8	15,0	23,5	23,4	25,1	19,2
Pančevo	13,4	15,3	22,9	22,2	23,4	18,3
Bečej	13,3	14,8	23,3	22,9	24,5	18,6
Bačka Topola	13,3	15,1	23,4	23,0	24,0	17,7
Požarevac	13,2	14,9	22,9	22,7	23,8	18,9
Padavine (mm)	April	Maj	Jun	Jul	Avgust	Septembar
Zemun Polje	55,1	146,8	133,0	25,7	35,9	20,4
Pančevo	63,1	121,2	117,5	97,6	23,3	24,8
Bečej	60,6	177,9	119,5	18,0	41,4	32,9
Bačka Topola	27,2	163,9	100,8	39,4	37,8	65,4
Požarevac	62,6	139,0	95,1	54,0	27,9	25,6

2019. godina je bila relativno povoljna za proizvodnju kukuruza. Temperature su se kretale u okviru višegodišnjih proseka za posmatrane mesece. U aprilu, temperature zemljišta bile su optimalne za setvu kao i za klijanje i nicanje kukuruza. Padavine su bile u granicama prosečnih za ovo doba godine, a zaliha vlage u površinskom i dubljim slojevima u većini područja je bila dobra. Jedino u severnim delovima zemlje zaliha vlage je u ovom delu godine bila veoma slaba. U maju na najvećem delu zemlje registrovano je dva do tri, a na severu Banata i četiri puta više padavina nego što je uobičajeno za ovaj mesec. Dospele padavine bitno su popravile stanje vlage u dubljim slojevima zemljišta u svim proizvodnim područjima i time stvorile dragocenu rezervu za predstojeći topao period i važan deo

vegetacije. Promenljivo vreme sa dosta padavina obeležilo je i jun. Tokom meseca padavine su bile skoro svakodnevna pojava. Od posmatranih lokacija najviše padavina registrovano je u Zemun Polju, a najmanje u Požarevcu. Toplotni uslovi tokom jula pogodovali su kukuruzu, koji se tada nalazio u generativnim fazama razvoja. Minimalne i maksimalne temperature tokom većeg dela meseca bile su oko i iznad, a u prvoj polovini meseca i ispod višegodišnjeg proseka. Osim obilnih padavina, u pojedinim područjima bilo je i vremenskih nepogoda praćenih gradom pri čemu je pričinjena šteta usevima. Iako je tokom jula palo manje kiše od proseka, vlažnost zemljišta je bila povoljna zahvaljujući velikim količinama padavina iz prethodna dva meseca. Avgust je imao znatno toplije vreme od uobičajenog uz povremene padavine, uglavnom lokalnog karaktera i sa zbirnom količinom manjom od proseka. Minimalne i maksimalne temperature vazduha tokom većeg dela meseca bile su iznad višegodišnjeg proseka. Toplotni uslovi tokom avgusta pogodovali su naliwanju i zrenju zrna. Septembar je obeležen toplim vremenom sa manjim dotokom padavina. Do polovine meseca temperature vazduha su bile iznad proseka za ovo doba godine što je bilo povoljno za završno zrenje i berbu kukuruza.

Procenjuje se da je kukuruz 2019. godine imao viši prinos za 22% u odnosu na višegodišnji prosek (Radičević, et al., 2019).

Tabela 5. Srednje mesečne temperature vazduha (°C) i mesečna suma padavina (mm) na ispitivanim lokacijama u 2020. godini (Republički hidrometeorološki Zavod Republike Srbije, 2021)

Temperatura (°C)	April	Maj	Jun	Jul	Avgust	Septembar
Zemun Polje	12,8	15,6	19,4	22,3	23,3	19,5
Pančevo	12,9	16,0	20,3	21,7	23,0	19,3
Bečej	12,8	16,2	20,7	22,8	23,8	19,7
Bačka Topola	12,6	15,6	20,4	22,4	23,4	18,8
Požarevac	12,4	16,0	20,4	22,0	23,0	19,5
Padavine (mm)	April	Maj	Jun	Jul	Avgust	Septembar
Zemun Polje	6,5	71,2	129,4	20,2	126,6	32,8
Pančevo	6,4	84,8	126,9	73,5	80,9	30,6
Bečej	9,8	57,5	111,0	57,7	91,3	25,0
Bačka Topola	2,8	28,4	107,4	94,4	51,4	29,2
Požarevac	2,5	92,4	89,6	110,6	62,0	30,3

Povoljna vlažnost zemljišta i optimalne temperature omogućavale su prolećnu setvu kukuruza u aprilu. U maju, maksimalne dnevne temperature su u većini dana bile ispod proseka, osim sredinom meseca kada je u više mesta izmerena temperatura vazduha od preko 30 °C. U oblastima gde je zabeležen manji priliv padavina nicanje kukuruza je bilo otežano (Bačka Topola sa svega 28,4 mm), dok je na lokacijama gde je bilo više padavina imao povoljne agrometeorološke uslove za rast i razvoj. Uglavnom povoljni temperaturni uslovi tokom juna su omogućavali dalji intenzivan razvoj kukuruza. Tokom juna padavine su bile svakodnevna pojava (registrovano je dva do tri puta više padavina nego što je to uobičajeno za ovo doba godine). Kao i prethodne godine, najviše padavina registrovano je u Zemun Polju, a najmanje u Požarevcu od svih posmatranih lokacija. Obilne kiše stvorile su dobru zalihu vlage pred predstojeći topao i suv deo vegetacije. Najveći deo jula obeležilo je svežije vreme sa čestim padavinama, samo je početkom i krajem meseca zabeleženo znatno toplije vreme sa maksimalnim temperaturama preko 30 °C. Akumulirane toplotne

sume do kraja jula bile su u granicama višegodišnjeg proseka. Prosečno toplo i sunčano vreme bez ekstremno visokih temperatura, kako dnevnih maksimalnih tako i jutarnjih minimalnih, stvorilo je uslove za neometanu oplodnju, zemetanje i naliivanje zrna. Zahvaljujući dospelim padavinama, kao i obilnim padavinama iz prethodnog meseca stanje vlažnosti bilo je veoma povoljno i kukuruz se nalazio u odličnom stanju. Ovakve vremenske prilike su odgovarale i omogućavale nesmetan protok faze naliivanja zrna i porast ploda kod kukuruza. Tokom većeg dela avgusta nije bilo velikih temperaturnih ekstrema koji bi ometali aktuelne fenološke procese kod biljaka. Avgust je obleležen čestim, a u pojedinim područjima i obilnim padavinama. Međutim, one nisu značajno ometale završne faze zrenja kod kukuruza. Toplotni uslovi tokom septembra bili su povoljni za konačno zrenje kukuruza.

Procenjuje se da su prinosi kukuruza u 2020. bili viši od višegodišnjeg proseka (Radičević, et al., 2020).

5.4. Biometrijska analiza podataka

Dobijeni podaci prinosa zrna ispitivanih hibrida su korišćeni za računanje proseka prinosa i rangiranje hibrida uz pomoć trofaktorijske analize varijanse (ANOVA) i testa najmanje značajne razlike na nivou od 5% (LSD 5%). Statistička analiza podataka izvedena je primenom kompjuterskog statističkog programa MSTAT-C (1991). Tabela ANOVA je predstavljena ispod (Tabela 6).

Tabela 6. Tabela analize varijanse (ANOVA)

Izvor varijacije	Stepeni slobode ®	Suma kvadrata (SS)	Sredina kvadrata (MS)	F vrednost
Ponavljanja	$n_{pon} - 1$	SS_{pon}	$MS_{pon} = \frac{SS_{pon}}{r_{pon}}$	$F_{pon} = \frac{MS_{pon}}{MS_{gr}}$
Godine (God)	$n_{god} - 1$	SS_{god}	$MS_{god} = \frac{SS_{god}}{r_{god}}$	$F_{god} = \frac{MS_{god}}{MS_{gr}}$
Lokacije (Lok)	$n_{lok} - 1$	SS_{lok}	$MS_{lok} = \frac{SS_{lok}}{r_{lok}}$	$F_{lok} = \frac{MS_{lok}}{MS_{gr}}$
God × Lok	$(n_{god} - 1)(n_{lok} - 1)$	$SS_{god \times lok}$	$MS_{god \times lok} = \frac{SS_{god \times lok}}{r_{god} \times r_{lok}}$	$F_{god \times lok} = \frac{MS_{god \times lok}}{MS_{gr}}$
Genotipovi (Gen)	$n_{gen} - 1$	SS_{gen}	$MS_{gen} = \frac{SS_{gen}}{r_{gen}}$	$F_{gen} = \frac{MS_{gen}}{MS_{gr}}$
God × Gen	$(n_{god} - 1)(n_{gen} - 1)$	$SS_{god \times gen}$	$MS_{god \times gen} = \frac{SS_{god \times gen}}{r_{god} \times r_{gen}}$	$F_{god \times gen} = \frac{MS_{god \times gen}}{MS_{gr}}$
Lok × Gen	$(n_{lok} - 1)(n_{gen} - 1)$	$SS_{lok \times gen}$	$MS_{lok \times gen} = \frac{SS_{lok \times gen}}{r_{lok} \times r_{gen}}$	$F_{lok \times gen} = \frac{MS_{lok \times gen}}{MS_{gr}}$
God × Lok × Gen	$(n_{god} - 1)(n_{lok} - 1)(n_{gen} - 1)$	$SS_{god \times lok \times gen}$	$MS_{god \times lok \times gen} = \frac{SS_{god \times lok \times gen}}{r_{god} \times r_{lok} \times r_{gen}}$	$F_{god \times lok \times gen} = \frac{MS_{god \times lok \times gen}}{MS_{gr}}$
Greška	$n_{god} \times n_{lok} \times n_{gen} - 1$	SS_{gr}	$MS_{gr} = \frac{SS_{gr}}{r_{gr}}$	
Ukupno				

Kako bi ANOVA pružila bolji uvid u ostvarene interakcije G×E, u ovom istraživanju proizvod svake lokacije i godine definisan je kao „okruženje“ (Greveniotis, et al., 2023).

5.5. Statistička analiza

Korišćena je metodologija ispitivanja stabilnosti i ispitivanja interakcije između hibrida i spoljne sredine, tj. ostvarivanja prinosa zrna ispitivanog materijala u različitim agroekološkim uslovima, rejonima i godinama gajenja. Za ispitivanje svega navedenog, koristiće se GGE biplot analiza i statistička analiza parametara stabilnosti ispitivanih hibrida. Dobijeni rezultati biće protumačeni i prikazani tabelarno i grafički. Za obradu podataka GGE biplot analizom koristiće se program GEA-R (Genotype $\times$ Environment Analysis with R for Windows), Version 4.1 (2017-08-3). Program je napravljen u međunarodnoj organizaciji CIMMYT u okviru njihovog Odeljenja za statistiku i biometriku (BSU – *Biometrics and Statistics Unit*) (Pacheco, et al., 2015).

GGE biplot analiza prema Yan & Kang (2003) modelu je:

$$\hat{Y}_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \Phi_{ij}$$

gde je:

$\hat{Y}_{ij}$ – očekivani prinos genotipa i u spoljašnjoj sredini j ;

μ – srednja vrednost svih posmatranja;

α_i – uticaj genotipa i ;

β_j – uticaj spoljašnje sredine j ; i

Φ_{ij} – interakcija genotipa i i spoljašnje sredine j .

Karakteristika GGE biplot metoda je, da pri proučavanju stabilnosti prinosa ne raščlanjuje, već objedinjeno analizira varijabilnost nastalu usled delovanja genotipa i interakcije genotip $\times$ spoljašnja sredina, deleći je na dva dela:

$$\hat{Y}_{ij} - \mu - \beta_j = g_{i1}e_{1j} + g_{i2}e_{2j} + \varepsilon_{ij}$$

gde je:

g_{i1} – primarna ocena za genotip i ;

e_{1j} – primarna ocena za sredinu j ;

g_{i2} – sekundarna ocena za genotip i ;

e_{2j} – sekundarna ocena za sredinu j ;

ε_{ij} – nerazjašnjeni ostatak.

Grafički prikaz rezultata višelokacijskih ogleda može se ostvariti pomoću GGE biplota, koji se konstruiše postavljanjem vrednosti prve glavne komponente (PC1) genotipova i lokaliteta, naspram odgovarajućih vrednosti za drugu glavnu komponentu (PC2), u koordinatnom sistemu. Genotipovi sa visokom vrednošću komponente PC1 ispoljavaju visoke prosečne vrednosti za prinos zrna i njegove komponente. Pri tome, genotipovi sa

visokim vrednostima komponente PC1 i vrednostima komponente PC2 bliskim nuli predstavljaju genotipove od interesa za dalja istraživanja. Takvi genotipovi se odlikuju širokom adaptabilnošću, za razliku od genotipova specifične adaptabilnosti, koji su locirani daleko od koordinatnog početka.

U većini godina, glavna komponenta PC1 predstavlja srazmernu reakciju genotipa po lokalitetima, što ukazuje na ne-krossover interakciju, dok komponenta PC2 predstavlja nesrazmernu reakciju genotipa kroz lokalitete, odgovornu za sve krossover interakcije (Yan, et al., 2000)

Zbog broja hibrida korišćenih u ovom radu, a radi lakše i preciznije interpretacije dobijenih GGE grafikona, GGE analiza je podeljena na grupu zrenja FAO 300–500, odnosno FAO 600–800. Prvu grupu predstavljaju hibridi namenjeni za direktnu vršidbu u zrnju, dok je druga grupa predstavljena hibridima namenjenim za berbu u klipju.

Analiza parametara stabilnosti prinosa zrna hibrida kukuruza izvedena je preko regresionog koeficijenta (b_i) i varijanse devijacije od regresije (S^2d_i) po Eberhart & Russell (1966), kao i koeficijenta varijacije (CV) po Francis & Kannenberg (1978). Svi korišćeni parametri stabilnosti izračunati su pomoću GEA-R softvera (Version 4.1) (Pacheco, et al., 2015). Takođe, pomoću istog softvera analiziran je odnos visine postignutih prinosa zrna sa CV vrednošću svakog hibrida ponaosob, na osnovu čega je generisan jedinstveni grafik (PlotCV) za sve ispitivane hibride.

Regresioni koeficijent (b_i) predstavlja odgovor genotipa na indeks sredine izveden od prosečnih rezultata svih genotipova na svakoj lokaciji.

$$b_i = 1 + \frac{\sum_i (x_{ij} - \bar{x}_{i.} - \bar{x}_{.j} + \bar{x}_{..}) \times (\bar{x}_{.j} - \bar{x}_{..})}{\sum_j (\bar{x}_{.j} - \bar{x}_{..})^2}$$

gde je:

x_{ij} – prinos i -tog genotipa u j -toj sredini;

$\bar{x}_{i.}$ – prosečan prinos i -tog genotipa;

$\bar{x}_{.j}$ – prosečan prinos u j -toj sredini;

$\bar{x}_{..}$ – prosečan prinos.

Po Eberhart & Russell (1966), ako b_i ne odstupa značajno od 1, genotip se smatra adaptiranim na sve ispitivane sredine. Vrednost >1 ukazuje na genotipove sa većom osetljivošću na promene sredine i sa izraženijom adaptabilnošću na povoljne uslove sredine. Vrednosti <1 ukazuju na veću otpornost na promenu sredine, što za rezultat ima adaptabilnost na lošije uslove sredine. Prema istim autorima, genotip sa indeksom stabilnosti koji odstupa od 1 može se prilagoditi specifičnim lokacijama.

Pored regresionog koeficijenta, predložena je i varijansa devijacije od regresije (S^2d_i) kao jedan od najkorišćenijih parametara za selekciju stabilnih genotipova.

$$S_{di}^2 = \frac{1}{E-2} \times \left[\sum_i (x_{ij} - \bar{x}_i - \bar{x}_j - \bar{x}_{..}) - (b_i - 1)^2 \times \sum (\bar{x}_{ij} - \bar{x}_{..})^2 \right]$$

gde je:

E – broj sredina.

Najstabilniji su genotipovi kod kojih je $S_{di}^2 = 0$, dok više vrednosti ukazuju na smanjenu stabilnost prinosa. Shodno tome, poželjni su genotipovi sa nižom vrednošću devijacije od regresije.

Koeficijent varijacije (CV) prema Francis & Kannenberg (1978) pokazuje u kolikom procentu prosečnog prinosa učestvuje vrednost standardne devijacije.

$$CV = \frac{\sqrt{S_i^2}}{\bar{X}_i} \times 100$$

gde je:

S_i^2 – varijansa ispitivane osobine (prinosa zrna);

$\bar{X}_i$ – prosečan prinos.

Najpoželjniji su genotipovi koji imaju nizak koeficijent varijacije, nisko variranje usled dejstva sredine i visok prosečni prinos.

5.6. Molekularne karakteristike

Genotipizacija ispitivanih linija će biti izvršena primenom genskog čipa Maize 25K XT Illumina Infinium array koji sadrži 23908 markera (SNP) raspoređenih ravnomerno duž celog genoma kukuruza. Ovaj genski čip sadrži 14171 markera preuzetih sa Illumina Infinium 50k Maize (Illumina, Inc., San Dijego, Kalifornija, SAD) i 8847 SNP markera preuzetih sa Affymetrix Axiom 600k Maize genskog čipa (Thermo Fisher Scientific Inc., Voltam, Masačusets, SAD). Sve etape u analizi DNK uslužno su izvršene od strane TraitGenetics GmbH kompanije (Gatersleben, Nemačka) uključujući i ekstrakciju DNK prema standardnom protokolu koja je izvršena iz lista.

Podaci genotipizacije će biti čuvani u Excel tabeli (Microsoft, Redmond, Vašington, SAD) u kojoj će, za svaku inbred liniju, aleli na svakoj od pozicija markera biti predstavljeni kodovima prema IUPAC-ovoj nomenklaturi.

Filtriranje sirovih podataka genotipizacije će biti izvršeno upotrebom standardnih skripti u R programskom jeziku i u TASSEL 5.0 programu (Bradbury, et al., 2007) primenom odgovarajućih programskih alata. Svi SNP markeri koji su neuspešno identifikovani na više od 5% ispitivanih inbred linija će biti odbačeni (*miss rate* > 5%), kao i oni koji imaju frekvenciju minor alela manju od 5% (*minor allele frequency* (MAF) <5%). Na taj način će biti odbačeni nedovoljno kvalitetni markeri, a zadržani samo oni najinformativniji za dalje

analize. Primenom TASSEL 5.0 programa će se izračunati genetičke distance između ispitivanih linija. Na osnovu dobijenih vrednosti genetičkih distanci, formiraće se dendrogram pomoću DendroUPGMA (Garcia-Vallvé, et al., 1999).

Da bi se razjasnilo genetičko poreklo ispitivanih inbred linija kukuruza izvršiće se analiza njihove genetičke strukture primenom programa STRUCTURE 2.3.4 (Pritchard, et al., 2000). STRUCTURE se zasniva na primeni Bajesove statistike i koristeći algoritam analizira razlike u frekvencijama alela između inbred linija koje klasifikuje prema sličnim obrascima alelne varijacije.

6. REZULTATI I DISKUSIJA

6.1. ANOVA

Rezultati ANOVA dati su u Tabeli 7. Na osnovu dobijenih rezultata, može se zaključiti da su svi faktori pojedinačno imali veoma značajan uticaj na prinos zrna ispitivanih hibrida (pri čemu je faktor Gen imao najveći uticaj). Pored pojedinačnog uticaja, i interakcije Gen $\times$ Lok, Lok $\times$ God (okruženje) i Gen $\times$ Lok $\times$ God, veoma su značajno uticale na prinos zrna ispitivanih hibrida. Ponavljanje i interakcija genotipa i godine nisu značajno uticali na prinos zrna.

Tabela 7. Tabela ANOVA za prinos zrna ispitivanih hibrida kukuruza

Izvor variranja	Stepeni slobode (r)	Suma kvadrata (SS)	Sredina kvadrata (MS)	F vrednost
Ponavljjanje	1	0.018	0.018	0.0216
God	1	156.081	156.081	189.2762**
Lok	4	37.679	9.42	11.4233**
God $\times$ Lok	4	35.549	8.887	10.7775**
Gen	21	239.333	11.397	13.8207**
God $\times$ Gen	21	19.5	0.929	1.126
Lok $\times$ Gen	84	113.098	1.346	1.6328**
God $\times$ Lok $\times$ Gen	84	114.867	1.367	1.6583**
Greška	219	180.591	0.825	
Ukupno	439	896.716		

Gen – genotip; Lok – lokalitet; God – godina; * – statistički značajno na nivou verovatnoće 0,05; ** – statistički značajno na nivou verovatnoće 0,01.

Najveći uticaj na prinos zrna ispitivanih hibrida imao je faktor „genotip“. Ovo ukazuje je zabeleženo značajno variranje prinosa zrna među hibridima izabranim za ovo istraživanje. Na osnovu ovoga, može se zaključiti da selekcija i oplemenjivanje na osnovu ovih genotipova, tj. njihovih roditeljskih linija, može dati uspeha u budućim programima oplemenjivanja (Antony, et al., 2024) S obzirom da su obe godine u kojima je obavljeno ispitivanje bile povoljne sa aspekta uzgajanja kukuruza (Radičević, et al., 2019; Radičević, et al., 2020), u povoljnim uslovima uticaj genotipa dolazi do izražaja u odnosu na uticaj godine ili lokaliteta.

Ispitujući performanse i stabilnost prinosa zrna veoma ranih hibrida kukuruza u uslovima suše i navodnjavanja, Bonkounou, et al. (2024) zaključuju da jedino genotip ima statistički veoma značajan uticaj na prinos zrna, dok ostali faktori i njihove interakcije ne utiču statistički značajno (što je naročito uočljivo u uslovima bez navodnjavanja). Do sličnih rezultata dolaze i Konate, et al. (2023) takođe ispitujući performanse veoma ranih hibrida kukuruza.

Rezultate slične onima ostvarenim u ovoj disertaciji zabeležili su i Pavlov, et al. (2024) ispitujući hibride kasnih grupa zrenja u multilokacijskim ogledima. Autori zaključuju da su

svi faktori i interakcije imali značajan uticaj na prinos zrna hibrida kasnih FAO grupa zrenja, izuzev interakcije genotip $\times$ godina.

Za razliku od ovih rezultata, Nišavić, et al. (2025) ističu da na prinos zrna hibrida ranih i srednje ranih FAO grupa zrenja (FAO 300–500) statistički značajan uticaj nije ostvarila interakcija genotip $\times$ lokalitet, što potvrđuje da ovi hibridi, u poređenju sa hibridima srednje kasnih i kasnih grupa zrenja, generalno ostvaruju stabilnije prinose uz manja variranja i na lokalitetima manje povoljnim za proizvodnju kukuruza. S obzirom da je pomenuto istraživanje obavljeno upotrebom istih hibrida FAO grupa zrenja 300–500, ovo navodi na zaključak da u istraživanju na kojem se bazira ova disertacija do uticaja koji ostvaruje interakcija Gen $\times$ Lok dolazi usred uključivanja i genotipova srednje kasnih i kasnih FAO grupa zrenja (FAO 600–800).

U istraživanju Yue, et al. (2022), svi ispitivani faktori i njihove interakcije (izuzev interakcije Gen $\times$ Lok $\times$ God) imali su statistički veoma značajan uticaj na ostvareni prinos zrna. Međutim, autori ne navode FAO grupe zrenja ispitivanih genotipova.

Ma, et al. (2024) navode da svi posmatrani faktori i sve interakcije ostvaruju statistički značajan uticaj na prinos zrna hibrida. Međutim, ni ovi autori ne navod kojim FAO grupama zrenja ispitivani genotipovi pripadaju.

Važno je napomenuti da ANOVA ima ograničenja jer objašnjava samo glavne efekte i ne pruža informaciju o individualnim genotipovima ili lokalitetima koji su komponente interakcije (Mitrović, et al., 2012).

6.2. Analiza parametara stabilnosti po Eberhart & Russell i Francis & Kannenberg

Kako je prethodno navedeno, analiza parametara stabilnosti prinosa zrna kukuruza izvedena je pomoću dva parametra prema Eberhart & Russell modelu (1966) – regresioni koeficijent (b_i) i varijansa devijacije od regresije (S^2d_i), kao i koeficijenta varijacije (CV) koga su uveli Francis & Kannenberg (1978).

Regresioni koeficijent predstavlja odgovor genotipa na indeks sredine izveden od prosečnih rezultata svih genotipova na svakoj lokaciji. Ako b_i ne odstupa značajno od 1, genotip se smatra adaptiranim na sve ispitivane sredine. Genotip sa indeksom stabilnosti različitim od 1 može se prilagoditi specifičnim uslovima proizvodnje, bilo povoljnim ili nepovoljnim. Vrednost >1 ukazuje na genotipove sa većom osetljivošću na promene sredine i sa izraženijom adaptabilnošću na povoljne uslove sredine. Vrednosti <1 ukazuju na veću otpornost na promenu sredine, što za rezultat ima adaptabilnost na lošije uslove sredine.

Što se tiče varijanse devijacije od regresije (S^2d_i), najstabilniji su genotipovi kod kojih je $S^2d_i = 0$, dok vrednosti koje odstupaju od 0 ukazuju na smanjenu stabilnost prinosa. Shodno tome, poželjni su genotipovi sa nižom vrednošću devijacije od regresije (Pour-Aboughadareh, et al., 2019).

Prema koeficijentu varijacije (CV), najpoželjniji su genotipovi koji imaju nisku vrednost CV i visok prosečni prinos.

Dakle, jedan idealan hibrid mora imati što viši prosečan prinos, koeficijent regresije $b_i = 1$ i varijansu devijacije od regresije $S^2d_i = 0$ (Radan, 2016), uz niske vrednosti koeficijenta varijacije CV.

Vrednosti sva tri navedena parametra stabilnosti date su u Tabeli 8.

Tabela 8. Prinos zrna (t ha^{-1}) i parametri stabilnosti prinosa zrna hibrida.

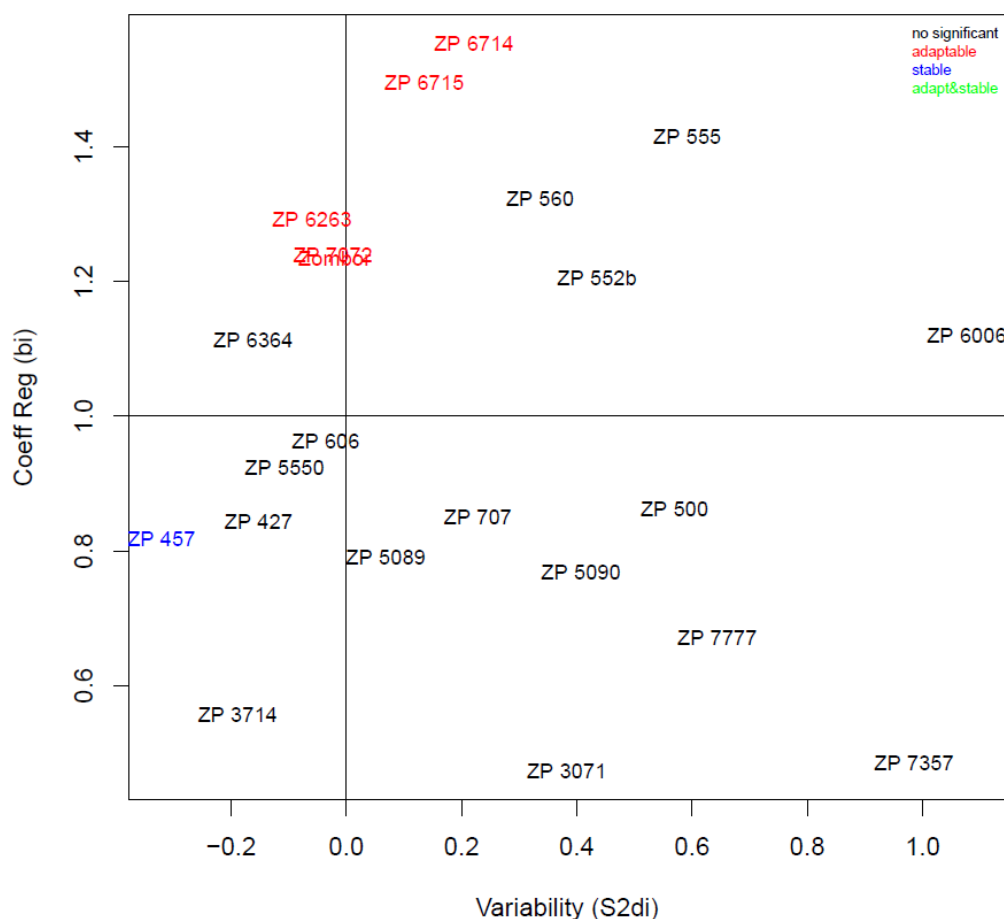
Hibrid	Prinos (t ha^{-1})	Rang prema prinosu	b_i	Rang prema b_i	S^2d_i	Rang prema S^2d_i	CV	Rang prema CV
Zombor	12,4775	15	1,2343	12	-0,0199	9	8,8882	14
ZP 3071	12,3025	19	0,4734	21	0,3824	15	7,428	8
ZP 3714	12,384	18	0,5562	18	-0,1883	2	4,9591	1
ZP 427	12,783	12	0,8439	7	-0,1522	4	6,2708	3
ZP 457	13,4215	3	0,8184	8	-0,3208	1	5,0975	2
ZP 500	12,5495	14	0,8619	5	0,5696	18	9,092	15
ZP 5089	12,2475	20	0,7912	10	0,0686	10	7,2518	7
ZP 5090	13,4695	2	0,7694	11	0,4074	16	7,6806	9
ZP 552b	10,59	22	1,2058	9	0,4353	17	11,923	21
ZP 555	12,4065	16	1,416	17	0,5918	19	11,5474	20
ZP 5550	13,23	7	0,9232	2	-0,107	5	6,606	4
ZP 560	12,9775	10	1,3223	15	0,3363	14	9,9782	17
ZP 6006b	11,0015	21	1,1198	4	1,0869	22	13,0388	22
ZP 606	13,3525	4	0,9623	1	-0,0356	7	6,9854	5
ZP 6263	13,2105	9	1,2922	14	-0,0593	6	8,5627	12
ZP 6364	13,578	1	1,1139	3	-0,1615	3	7,1417	6
ZP 6714	13,2135	8	1,5529	22	0,2217	12	10,5924	19
ZP 6715	13,3335	5	1,4958	19	0,1354	11	10,0102	18
ZP 707	12,7815	13	0,8501	6	0,2283	13	7,7722	10
ZP 7072	13,239	6	1,2399	13	-0,0229	8	8,395	11
ZP 7357	12,8075	11	0,4858	20	0,9853	21	9,1652	16
ZP 7777	12,3755	17	0,6711	16	0,6437	20	8,8458	13

Na osnovu vrednosti b_i , hibridi Zombor, ZP 552b, ZP 555, ZP 560, ZP 6006b, ZP 6263, ZP 6364, ZP 6714, ZP 6715 i ZP 7072 su bolje prilagođeni na bolje uslove proizvodnje, budući da je vrednost $b_i > 1$. Ovo je očekivano za hibride srednje kasnih i kasnih grupa zrenja koji ostvaruju bolje performanse u boljim uslovima proizvodnje (Ivan, et al., 2023). Međutim, od hibrida ranih i srednje ranih FAO grupa zrenja, važno je istaći da su hibridi Zombor, ZP 555, i ZP 560 takođe prilagođeni optimalnim uslovima proizvodnje, te da su najviše i najstabilnije prinose ostvarili u okruženjima u kojima vladaju upravo takvi uslovi, o čemu će biti više reči u narednoj sekciji. Ovo je u skladu sa rezultatima Crevar, et al. (2011) gde je hibrid ZP 560, tada jedan od novostvorenih hibrida, bio jedan od najprinosnijih hibrida sa takođe vrednošću $b_i > 1$.

Vrednost b_i za ostale posmatrane hibride iznosila je <1 što označava bolju adaptiranost na lošije uslove proizvodnje, što je karakteristično za hibride ranijih FAO grupa zrenja (Nagy & Honti, 2005). Od hibrida srednje kasnih i kasnih grupa zrenja, sa vrednošću $b_i < 1$, sledeći hibridi su takođe adaptirani na lošije uslove proizvodnje: ZP 606, ZP 707, ZP 7357 i ZP 7777. Ne samo da je ZP 606 jedan od hibrida prilagođenih na lošije uslove proizvodnje, ovaj hibrid se pokazao kao najstabilniji na osnovu parametra b_i (0,9623). Dalje, prate ga hibridi ZP 5550, ZP 6364, ZP 6006b, ZP 500, i ostali, dok je ZP 6714 najnestabilniji sa vrednošću $b_i = 1,5529$.

Drugi parametar koji uvode Eberhart & Russell (1966) jeste varijansa devijacije od regresije (S^2d_i). Na osnovu ovog parametra, najstabilniji prinos ostvario je hibrid Zombor koji pripada FAO grupi zrenja 300, praćen hibridima ZP 7072, ZP 606, ZP 6263 i ZP 5089. Najnestabilniji hibrid u ovom pogledu je hibrid ZP 6006b. Za razliku od parametra b_i koji objašnjava linearnost između zavisnih i nezavisnih promenljivih, parametar S^2d_i objašnjava varijansu zbog odstupanja od linearnosti (Kumar, et al., 2012). Stoga se rangovi hibrida na osnovu ova dva parametra razlikuju (Tabela 8).

Na osnovu dobijenih podataka o parametrima b_i i S^2d_i , generisan je biplot stabilnosti prinosa (Grafik 2), koji je koristan za bolje razumevanje stabilnosti genotipova (Becker & Léon, 1988). Na osnovu biplota, može se uočiti da se ZP 606 kao hibrid najstabilniji na osnovu b_i , nalazi neposredno uz horizontalnu liniju koja prolazi kroz koordinatni početak biplota, a koja ima vrednost $b_i = 0$. Hibridi ispod ove linije predstavljaju genotipove koji su adaptirani na nepovoljnije uslove proizvodnje, dok su hibridi iznad nje prilagođeni optimalnim uslovima proizvodnje. Sa druge strane, ako se uzmu u obzir vrednosti S^2d_i , hibridi su rangirani sa leva nadesno u skladu sa vrednostima za ovaj parametar, od najnižih ka najvišima.



Grafik 2. Biplot stabilnosti prinosa zrna hibrida kukuruza prema parametrima stabilnosti (b_i , S^2d_i) po Eberhart & Russell.

Uopšteno govoreći, hibridi prikazani na ovako generisanom biplotu mogu se podeliti u četiri grupe:

1. Hibridi visoke stabilnosti prinosa zrna koji ostvaruju dobar performans u povoljnim uslovima proizvodnje. Nalaze se u gornjem levom sektoru biplota;
2. Hibridi visoke stabilnosti prinosa zrna koji ostvaruju dobar performans u nepovoljnim uslovima proizvodnje. Nalaze se u donjem levom sektoru biplota;
3. Hibridi niske stabilnosti prinosa adaptirani na povoljne uslove proizvodnje. Nalaze se u gornjem desnom sektoru biplota; i
4. Hibridi niske stabilnosti prinosa adaptirani na nepovoljne uslove proizvodnje. Nalaze se u donjem desnom sektoru biplota (Changizi, et al., 2014).

Dakle, zavisno od uslova proizvodnje u kojima će se gajiti, poželjne hibride treba tražiti u sektorima biplota koji se nalaze levo od vertikalne linije koja prolazi kroz koordinatni početak biplota i ima vrednost $S^2d_i = 0$.

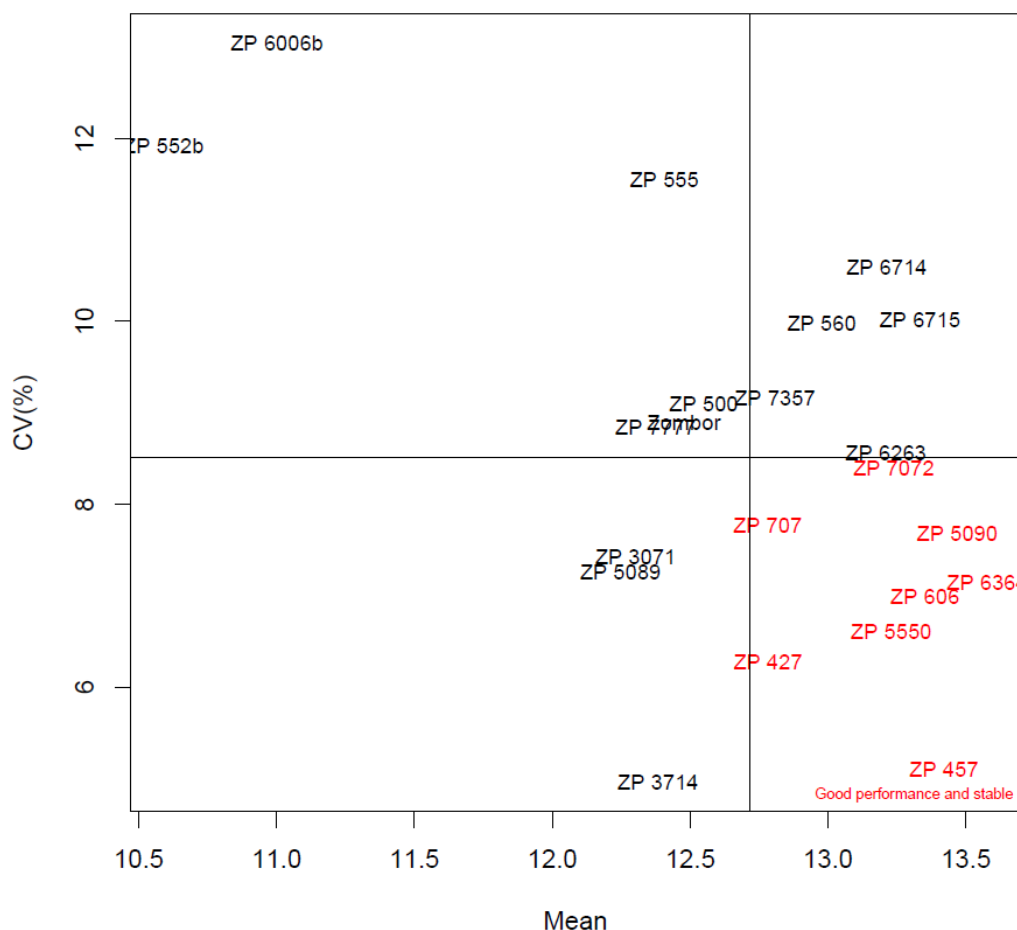
Posmatrajući oba parametra, hibrid ZP 457 može se izdvojiti kao jedini stabilan parametar, dok su hibridi Zombor, ZP 6714, ZP 6715, ZP 6263 i ZP 7072 označeni kao adaptabilni hibridi. U ovom istraživanju, nijedan od ispitivanih hibrida nije klasifikovan

kao adaptabilan i stabilan. Budući da se ZP 6364 kao najprinosniji hibrid u ovom istraživanju nalazi u blizini koordinatnog početka biplota, sa S^2d_i vrednošću manjom od 0 ($S^2d_i = -0,1615$) i b_i vrednošću većom od 1 ($b_i = 1,1139$), može se zaključiti da je ovo hibrid stabilnog prinosa zrna koji ipak zahteva povoljnije uslove proizvodnje kako bi iskazao svoj maksimalni potencijal. Uslovi proizvodnje u 2019. i 2020. godini, kada je sprovedeno ovo istraživanje, bili su upravo takvi sa aspekta proizvodnje kukuruza (Radičević, et al., 2019; Radičević, et al., 2020). Na osnovu spomenutih parametara, ZP 6364 je rangiran kao treći od svih ispitivanih hibrida.

Iako Eberhart & Russell model ima svoje nedostatke (pouzdana rezultati se postižu samo onda kada su podaci dobro prilagođeni linearnom modelu, tj. kada je u interakciji prisutan jedan prevalentni faktor) (Babić, et al., 2011), ovom modelu se i dalje daje prednost jer istovremeno uzima u obzir prinos, stabilnost i adaptabilnost u opštim, povoljnim i nepovoljnim proizvodnim uslovima (Cargnelutti Filho, et al., 2007).

S obzrom na prethodno navedene nedostatke Eberhart & Russell modela, on se često upotrebljava sa parametrima analize stabilnosti. U ovom istraživanju, upotrebljen je koeficijent varijacije (CV) po Francis & Kannenberg (1978). Prema CV, najpoželjniji su genotipovi koji imaju nizak koeficijent varijacije, a koji istovremeno ostvaruju visok prinos zrna.

U ovom istraživanju, najniži CV zabeležen je kod hibrida ZP 3714 (4,9591%), dok je najviši zabeležen kod hibrida ZP 6006b (13,0388%). Iako niskog CV, ZP 3714 je jedan od hibrida koji su ostvarili najniži prinos zrna te se ne može smatrati najpoželjnijim genotipom od svih ispitivanih (Nišavić, et al., 2025). Radi lakše analize, pomoću GEA-R softvera generisan je PlotCV biplot (Grafik 3), koji osim vrednosti CV (y osa), u obzir uzima i prosečan prinos zrna (x osa). Svi hibridi koji se nalaze levo od vertikalne linije koja prolazi kroz koordinatni početak biplota ostvarili su prinos zrna manji od prosečnog, i obrnuto. Nasuprot ovome, svi hibridi čiji je CV ispod prosečnog nalaze se sa donje strane horizontalne linije koja prolazi kroz koordinatni početak biplota, i obrnuto. Dakle, poželjne genotipove treba tražiti u donjem desnom sektoru PlotCV biplota.



Grafik 3. Biplot analiza stabilnosti prinosa zrna ispitivanih hibrida kukuruza na osnovu CV po Francis & Kannenberg (Francis & Kannenberg, 1978).

Na osnovu CV svi hibridi se mogu podeliti u četiri grupe (Changizi, et al., 2014):

1. Hibridi relativno visokog prosečnog prinosa zrna i niske vrednosti CV koji se nalaze u donjem desnom sektoru biplota i označeni su kao „dobrih performansi i stabilni“;
2. Hibridi koji su ostvarili prinos zrna viši od prosečnog prinosa i visoke vrednosti CV (što nagoveštava usku adaptabilnost), koji se nalaze u gornjem desnom sektoru biplota;
3. Hibridi relativno niskog prosečnog prinosa i niske vrednosti CV, čiji prinos jeste stabilan ali nisu poželjni zbog niskog prosečnog prinosa zrna. Nalaze se u donjem levom sektoru biplota; i
4. Hibridi niskog prosečnog prinosa zrna i visoke vrednosti CV koji se ne preporučuju usled ovih vrednosti. Nalaze se u gornjem levom sektoru biplota.

Stoga, poželjne genotipove treba tražiti u prvoj grupi, tj. u donjem desnom sektoru biplota. Hibridi koji su označeni kao genotipovi dobrih performansi i stabilnog prinosa su hibridi ZP 457, ZP 427, ZP 5550, ZP 606, ZP 6364, ZP 5090, ZP 707, i ZP 7072. O ovim hibridima i njihovom performansu biće više reči u nastavku.

Upoređivanjem rezultata CV sa rezultatima dobijenim putem Eberhart & Russell metode, uočava se da je na osnovu svih parametara jedino hibrid ZP 457 izdvojen kao stabilan genotip. Hibridi ZP 6714, ZP 6715, ZP 6263 i ZP 7072 su takođe ostvarili stabilne prinose, međutim, oni su usko adaptirani na određena područja (uglavnom na povoljne uslove proizvodnje).

CV se nalazi u pozitivnoj korelaciji sa oba parametra po Eberhart & Russell (1966). Između CV i S^2d_i je zabeležena jaka pozitivna korelacija (0,7243), dok je između CV i b_i zabeležena umerena pozitivna korelacija (0,5795). Ovo je u skladu sa rezultatima Shojaei, et al. (2021) gde je takođe zabeležena pozitivna korelacija između CV i oba parametra Eberhart & Russell modela ponaosob. Nasuprot ovome, između parametara S^2d_i i b_i ustanovljena je slaba negativna korelacija (-0.0969), koja se može smatrati zanemarljivom. U jednoj od posmatranih godina pomenutog istraživanja autora Shojaei, et al. (2021), zabeležena je slična korelacija ova dva parametra.

6.3. Analiza GGE biplota i vrednosti genetičke distance (GD) roditeljskih komponenti ispitivanih hibrida

S obzirom da ANOVA često ne uspeva da otkrije značajnu komponentu interakcije (Zobel, et al., 1988), ona se u testiranjima dopunjuje drugim metodama poput GGE biplot modela.

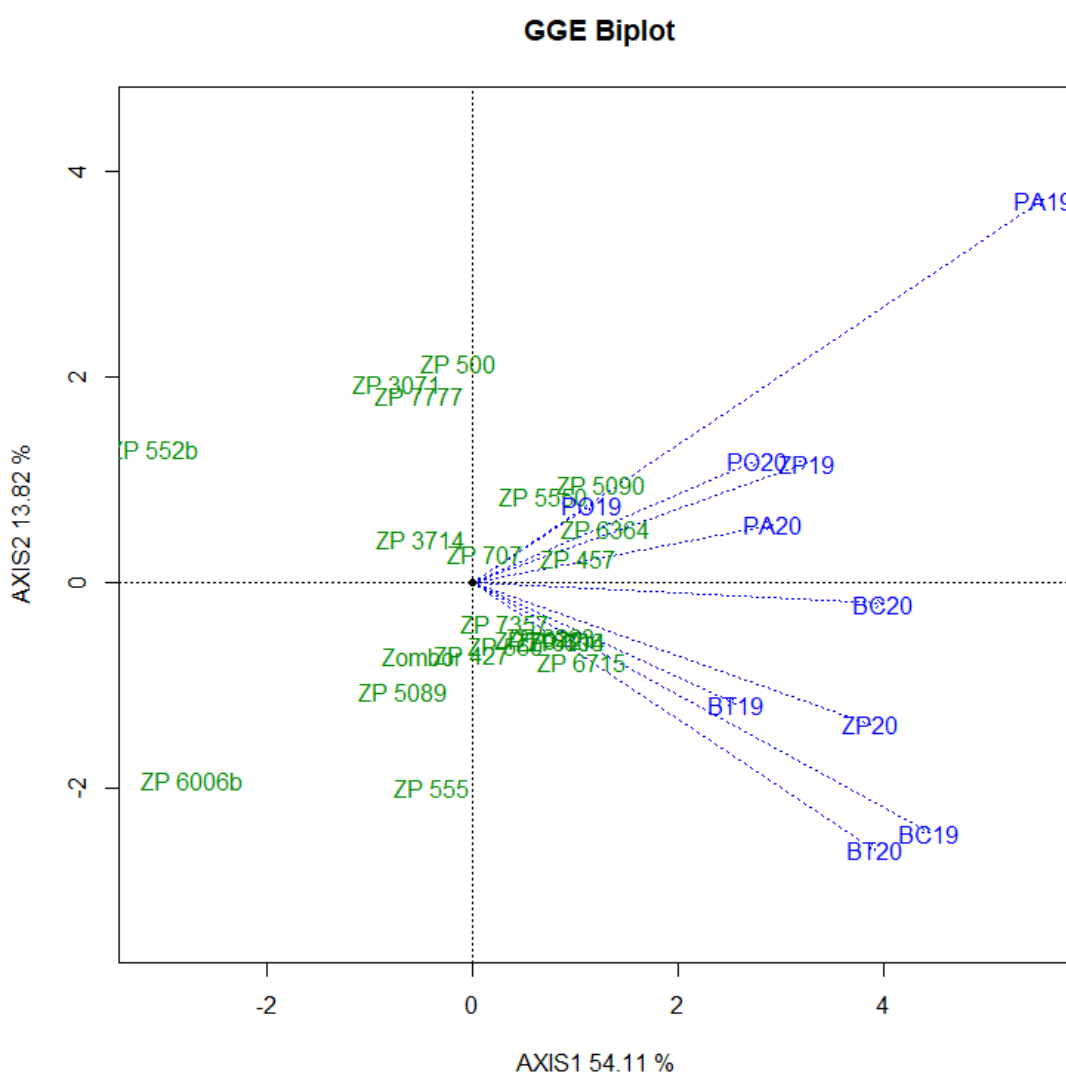
GGE biplot analiza je koristan metod za oplemenjivače i predstavlja pouzdanu platformu za procenu performansa ispitivanih genotipova u različitim okruženjima i identifikaciju superiornih genotipova (Oral, 2018; Akinwale, et al., 2014). Štaviše, GGE biplot analiza omogućava vizuelni prikaz genetskih korelacija između osobina, čime se olakšava definisanju ciljeva oplemenjivanja i razumevanje performansi useva (Yan & Tinker, 2005). Pored navedenog, GGE biplot analiza pomaže u proceni stabilnosti i adaptabilnosti genotipova čime se olakšava odabir visokoprinosnih i stabilnih genotipova za dalje gajenje u konkretnim rejonima (Saeidnia, et al., 2023).

U odnosu na slične modele, poput AMMI modela, GGE biplot analiza je superiornija u analizi megaokolina i ocenjivanju genotipova jer objašnjava više G+GE, „diskriminativnost naspram reprezentativnosti“ funkcija GGE biplota je efikasna u oceni testnih sredina (što nije moguće kod AMMI modela), lakši je za konstruisanje i tumačenje, između ostalog (Yan, et al., 2007)

Na osnovu GGE biplot analize, raspored svakog od 22 testirana hibrida predstavljen je zelenom bojom, dok se plava boja koristi za označavanje svake od deset ispitivanih okruženja. Ova analiza je zasnovana na analizi glavnih komponenti (PCA, *Primary Component Analysis*) koja se uspešno koristi pri ispitivanju rezultata ostvarenih u multilokacijskim ogledima (Yan, et al., 2001). X osa (AXIS1, PC1) aproksimira glavne efekte genotipa (prosečan performans), dok Y osa (AXIS2, PC2) aproksimira efekte interakcije G×E (mera nestabilnosti) za svaki genotip (Yan & Tinker, 2006). Da bi se biplot dijagram smatrao pouzdanim, dovoljno je da obuhvata svega 60% varijanse (Shojaei, et al., 2022), ili više od 60% (varijabilnosti genotip + genotip × spoljašnja sredina) ako se koriste višegodišnji prosečni prinosi (Yang, et al., 2009). Udeo GGE interakcije u sprovedenom istraživanju

iznosi 54,11% i 13,82% (Grafik 4), što zbirno iznosi 67,93%, a što je više od idealne granice od 66% (Habtegebriel, 2022). Zbirni procenat od ~70% potvrđuje da PC1 i PC2 zajedno adekvatno aproksimiraju podatke o performansama ispitivanih genotipova na više lokaliteta (Konate, et al., 2023).

Nedostaci upotrebe GGE biplot koordinatnog sistema su ograničen broj podataka koji se može koristiti u analizi, tj. brojem ispitivanih genotipova i lokaliteta (Badu-Apraku, et al., 2020; Vulchinkov, et al., 2021; Yang, et al., 2009). Uprkos ovim ograničenjima, GGE biplot analiza se i dalje nalazi u širokoj upotrebi u oplemenjivanju biljaka jer uspešno prepoznaje stabilne genotipove u višelokacijskim ogledima (Habtegebriel, 2022).



Grafik 4. GGE biplot prinosa zrna za sva ispitivana okruženja i hibride.

Tabela 9. Prosečan prinos zrna po hibridu i okruženju (t ha)

Hibrid	ZP19	PO19	BC19	BT19	PA19	ZP20	PO20	BC20	BT20	PA20	Prosek
ZP 3714	11,93 abc	12,25 abc	12,43 abcd	12,65 abcdef	11,93 a	12,73 fg	13,54 abc	12,99 ab	11,97 ghi	11,44 cdef	12,38 f
ZP 3071	12,05 abc	12,73 ab	10,39 e	12,36 bcdefgh	12,39 ab	11,61 h	13,68 abc	13,34 ab	11,99 ghi	12,49 abcde	12,3 f
Zombor	11,61 bcd	12,19 abc	11,51 bcde	12,91 abcd	10,62 abc	12,87 fg	13,9 abc	13,81 a	13,57 cde	11,77 bcdef	12,48 ef
ZP 427	12,02 abc	12,06 abc	12,96 abc	13,3 abc	11,26 abc	13,2 cdef	13,99 abc	13,3 ab	13,14 defgh	12,61 abcde	12,78 def
ZP 457	12,66 ab	12,7 ab	13,35 ab	12,75 abcde	13,13 abc	14,05 abcd	14,35 ab	14,51 a	13,59 bcde	13,11 abc	13,42 ab
ZP 500	12,48 ab	11,12 bc	10,83 de	12,49 bcdefg	13,56 abc	12,85 fg	14,65 ab	13,4 ab	12,09 fghi	12,03 bcdef	12,55 ef
ZP 5550	12,15 abc	13,1 a	12,43 abcd	13,12 abc	13,44 abc	13,2 cdef	15,13 a	13,6 a	13,83 bcde	12,3 abcde	13,23 abcd
ZP 5089	11,34 bcd	12 abc	12,81 abc	11,33 efghi	10,68 abc	13,42 bcdef	12,61 bc	12,57 ab	13,19 defg	12,53 abcde	12,25 f
ZP 5090	12,15 abc	13,14 a	13,72 a	11,57 defgh	14,65 abcd	13,49 bcdef	14,51 ab	14,08 a	14,46 abcd	12,94 abc	13,47 ab
ZP 555	10,78 cde	11,65 abc	12,75 abc	12,38 bcdefgh	10,53 abcd	13,11 def	12,75 bc	14,82 a	14,24 abcde	11,06 def	12,41 f
ZP 560	10,03 de	13,01 ab	12,91 abc	13,47 ab	12,43 bcd	14,21 ab	14,41 ab	13,97 a	13,41 cdef	11,92 bcdef	12,98 bcde
ZP 6714	11,99 abc	10,38 c	12,8 abc	13,75 ab	12,69 bcde	14,16 abc	15,32 a	13,91 a	14,37 abcde	12,76 abc	13,21 abcd
ZP 6715	12,07 abc	11,14 bc	12,59 abcd	13,05 abcd	13,06 bcde	14,59 a	14,51 ab	14,06 a	15,57 a	12,68 abcd	13,33 abcd
ZP 6263	11,9 abc	11,36 abc	12,77 abc	12,82 abcd	12,28 bcde	13,86 abcde	14,44 ab	14,42 a	14,34 abcde	13,91 a	13,21 abcd
ZP 6364	13,26 a	12,17 abc	13,18 abc	12,47 bcdefg	13,28 bcde	14,1 abc	15,33 a	14,74 a	13,94 bcde	13,31 ab	13,58 a
ZP 6006b	10,13 de	11,42 abc	11,37 cde	11,62 defgh	7,5 bcde	12,06 gh	12,7 bc	10,84 b	11,76 hi	10,61 f	11 g
ZP 552b	9,4 e	10,68 c	8,48 f	10,05 i	10,24 cde	10,35 i	13,09 abc	10,78 b	11,83 ghi	11,01 ef	10,59 g
ZP 606	11,98 abc	12,25 abc	13,2 abc	14 a	13,03 de	14,09 abcd	14,56 ab	13,11 ab	14,64 abc	12,66 abcde	13,35 abc
ZP 7072	12,86 ab	12,66 ab	13,41 ab	11,88 cdefgh	11,48 de	14,13 abc	15,24 a	13,73 a	14 bcde	13,01 abc	13,24 abcd
ZP 7357	11,93 abc	12,68 ab	12,93 abc	10,98 hi	13,24 de	14,39 ab	12,01 c	12,43 ab	14,98 ab	12,49 abcde	12,81 cdef
ZP 7777	11,54 bcd	12,96 ab	11,56 bcde	11,02 ghi	12,68 e	13,89 abcde	13,91 abc	13,01 ab	10,93 i	12,27 abcdef	12,38 f
ZP 707	13,47 a	11,6 abc	12,9 abc	11,22 fghi	11,67 f	13,06 ef	14,29 abc	13,73 a	13,06 efgh	12,82 abc	12,78 def
Prosek	11,81	12,06	12,33	12,33	12,08	13,34	14,04	13,42	13,4	12,35	12,71
LSD 0.05	1,6	1,938	1,904	1,484	2,197	0,9754	2,335	2,726	1,392	1,679	0,56

Različita eksponentna slova označavaju značajne razlike ($p < 0,05$).

Tabela 10. Genetičke distance (GD) roditeljskih linija ispitivanih hibrida dobijene pomoću SNP analize.

	L73L024	L73B013	L73B048	ZPL-255/75-5	L76B004	L04BA031	ZPPL301	L74B040	L74B049	L94B034	ZPL-155/18-4/1	L74L065	L 325/75-2	L-335/99	L76B006	R-802-B-37-7	L76L007	L77B037	L76L060	L73B064	L76B061	L76B066	L05L061	L05BA040	L76B051	L76B044	L77B043	L77B052	L76L023
L73L024		0.448	0.443	0.218	0.453	0.458	0.441	0.446	0.445	0.447	0.224	0.305	0.174	0.465	0.421	0.412	0.321	0.459	0.324	0.443	0.456	0.456	0.260	0.438	0.459	0.459	0.455	0.459	0.330
L73B013	0.448		0.136	0.460	0.372	0.374	0.229	0.274	0.267	0.343	0.462	0.408	0.463	0.402	0.420	0.421	0.443	0.372	0.425	0.231	0.390	0.404	0.449	0.375	0.399	0.397	0.374	0.374	0.435
L73B048	0.443	0.136		0.457	0.390	0.375	0.237	0.241	0.211	0.343	0.457	0.381	0.457	0.421	0.434	0.428	0.440	0.398	0.417	0.183	0.406	0.422	0.440	0.376	0.420	0.414	0.394	0.398	0.430
ZPL-255/75-5	0.218	0.460	0.457		0.446	0.460	0.457	0.458	0.456	0.437	0.026	0.217	0.190	0.462	0.393	0.396	0.358	0.456	0.221	0.458	0.452	0.452	0.269	0.442	0.454	0.453	0.457	0.454	0.358
L76B004	0.453	0.372	0.390	0.446		0.380	0.397	0.406	0.361	0.369	0.443	0.400	0.450	0.285	0.333	0.328	0.410	0.105	0.380	0.432	0.154	0.147	0.446	0.383	0.180	0.117	0.120	0.101	0.409
L04BA031	0.458	0.374	0.375	0.460	0.380		0.383	0.399	0.386	0.364	0.457	0.418	0.460	0.378	0.414	0.394	0.453	0.371	0.429	0.407	0.391	0.402	0.426	0.195	0.386	0.383	0.378	0.374	0.452
ZPPL301	0.441	0.229	0.237	0.457	0.397	0.383		0.334	0.296	0.357	0.459	0.392	0.453	0.428	0.454	0.451	0.440	0.393	0.426	0.223	0.412	0.425	0.440	0.371	0.420	0.415	0.403	0.392	0.429
L74B040	0.446	0.274	0.241	0.458	0.406	0.399	0.334		0.213	0.358	0.459	0.401	0.454	0.416	0.417	0.429	0.438	0.413	0.421	0.248	0.406	0.416	0.437	0.388	0.419	0.412	0.407	0.414	0.424
L74B049	0.445	0.267	0.211	0.456	0.361	0.386	0.296	0.213		0.336	0.456	0.399	0.459	0.402	0.417	0.414	0.444	0.374	0.437	0.304	0.382	0.397	0.449	0.409	0.390	0.383	0.376	0.374	0.428
L94B034	0.447	0.343	0.343	0.437	0.369	0.364	0.357	0.358	0.336		0.434	0.404	0.441	0.407	0.405	0.411	0.411	0.377	0.411	0.358	0.392	0.406	0.431	0.381	0.392	0.392	0.374	0.380	0.407
ZPL-155/18-4/1	0.224	0.462	0.457	0.026	0.443	0.457	0.459	0.459	0.456	0.434		0.240	0.196	0.460	0.388	0.391	0.360	0.453	0.238	0.460	0.449	0.452	0.267	0.441	0.452	0.450	0.455	0.452	0.355
L74L065	0.305	0.408	0.381	0.217	0.400	0.418	0.392	0.401	0.399	0.404	0.240		0.300	0.458	0.451	0.433	0.388	0.409	0.193	0.378	0.436	0.431	0.329	0.427	0.443	0.433	0.415	0.408	0.385
L 325/75-2	0.174	0.463	0.457	0.190	0.450	0.460	0.453	0.454	0.459	0.441	0.196	0.300		0.462	0.407	0.395	0.313	0.457	0.305	0.456	0.450	0.454	0.164	0.446	0.456	0.455	0.453	0.457	0.310
L-335/99	0.465	0.402	0.421	0.462	0.285	0.378	0.428	0.416	0.402	0.407	0.460	0.458	0.462		0.240	0.233	0.449	0.209	0.460	0.436	0.163	0.183	0.459	0.402	0.134	0.183	0.207	0.208	0.441
L76B006	0.421	0.420	0.434	0.393	0.333	0.414	0.454	0.417	0.417	0.405	0.388	0.451	0.407	0.240		0.130	0.405	0.330	0.414	0.449	0.294	0.328	0.411	0.424	0.292	0.313	0.328	0.325	0.408
R-802-B-37-7	0.412	0.421	0.428	0.396	0.328	0.394	0.451	0.429	0.414	0.411	0.391	0.433	0.395	0.233	0.130		0.414	0.315	0.409	0.435	0.287	0.305	0.401	0.401	0.263	0.282	0.306	0.312	0.411
L76L007	0.321	0.443	0.440	0.358	0.410	0.453	0.440	0.438	0.444	0.411	0.360	0.388	0.313	0.449	0.405	0.414		0.432	0.362	0.443	0.432	0.417	0.344	0.446	0.431	0.420	0.433	0.432	0.077
L77B037	0.459	0.372	0.398	0.456	0.105	0.371	0.393	0.413	0.374	0.377	0.453	0.409	0.457	0.209	0.330	0.315	0.432		0.405	0.430	0.112	0.166	0.458	0.377	0.128	0.117	0.119	0.023	0.429
L76L060	0.324	0.425	0.417	0.221	0.380	0.429	0.426	0.421	0.437	0.411	0.238	0.193	0.305	0.460	0.414	0.409	0.362	0.405		0.403	0.423	0.408	0.312	0.387	0.430	0.402	0.401	0.403	0.363
L73B064	0.443	0.231	0.183	0.458	0.432	0.407	0.223	0.248	0.304	0.358	0.460	0.378	0.456	0.436	0.449	0.435	0.443	0.430	0.403		0.424	0.436	0.437	0.364	0.429	0.427	0.423	0.430	0.431
L76B061	0.456	0.390	0.406	0.452	0.154	0.391	0.412	0.406	0.382	0.392	0.449	0.436	0.450	0.163	0.294	0.287	0.432	0.112	0.423	0.424		0.163	0.451	0.379	0.108	0.137	0.173	0.111	0.428
L76B066	0.456	0.404	0.422	0.452	0.147	0.402	0.425	0.416	0.397	0.406	0.452	0.431	0.454	0.183	0.328	0.305	0.417	0.166	0.408	0.436	0.163		0.456	0.395	0.162	0.119	0.122	0.181	0.414
L05L061	0.260	0.449	0.440	0.269	0.446	0.426	0.440	0.437	0.449	0.431	0.267	0.329	0.164	0.459	0.411	0.401	0.344	0.458	0.312	0.437	0.451	0.456		0.423	0.450	0.451	0.450	0.456	0.340
L05BA040	0.438	0.375	0.376	0.442	0.383	0.195	0.371	0.388	0.409	0.381	0.441	0.427	0.446	0.402	0.424	0.401	0.446	0.377	0.387	0.364	0.379	0.395	0.423		0.387	0.374	0.380	0.379	0.441
L76B051	0.459	0.399	0.420	0.454	0.180	0.386	0.420	0.419	0.390	0.392	0.452	0.443	0.456	0.134	0.292	0.263	0.431	0.128	0.430	0.429	0.108	0.162	0.450	0.387		0.102	0.163	0.132	0.424
L76B044	0.459	0.397	0.414	0.453	0.117	0.383	0.415	0.412	0.383	0.392	0.450	0.433	0.455	0.183	0.313	0.282	0.420	0.117	0.402	0.427	0.137	0.119	0.451	0.374	0.102		0.111	0.126	0.414
L77B043	0.455	0.374	0.394	0.457	0.120	0.378	0.403	0.407	0.376	0.374	0.455	0.415	0.453	0.207	0.328	0.306	0.433	0.119	0.401	0.423	0.173	0.122	0.450	0.380	0.163	0.111		0.127	0.427
L77B052	0.459	0.374	0.398	0.454	0.101	0.374	0.392	0.414	0.374	0.380	0.452	0.408	0.457	0.208	0.325	0.312	0.432	0.023	0.403	0.430	0.111	0.181	0.456	0.379	0.132	0.126	0.127		0.430
L76L023	0.330	0.435	0.430	0.358	0.409	0.452	0.429	0.424	0.428	0.407	0.355	0.385	0.310	0.441	0.408	0.411	0.077	0.429	0.363	0.431	0.428	0.414	0.340	0.441	0.424	0.414	0.427	0.430	

Tabela 11. Procenat poleglih i slomljenih biljaka u odnosu na pun sklop biljaka po hibridima

Hibrid	Pogle i slomljene biljke (%)
ZP 3714	7,29
ZP 3071	3,7
Zombor	5,78
ZP 427	9,1
ZP 457	4,57
ZP 500	5,71
ZP 5550	4,56
ZP 5089	11,18
ZP 5090	6,7
ZP 555	6,1
ZP 560	4,62
ZP 606	6,24
ZP 6714	3,47
ZP 6715	3,27
ZP 6263	5,11
ZP 6364	3,89
ZP 6006b	10,52
ZP 552b	5,6
ZP 707	3,05
ZP 7072	4,05
ZP 7357	3,66
ZP 7777	7,34

Tabela 12. Prosečna vlažnost zrna u momentu berbe

Hibrid	Vlažnost zrna (%)
ZP 3714	13,37
ZP 3071	15,06
Zombor	12,85
ZP 427	14,40
ZP 457	16,04
ZP 500	15,74
ZP 5550	18,68
ZP 5089	17,02
ZP 5090	17,16
ZP 555	20,09
ZP 560	18,86
ZP 606	21,54
ZP 6714	20,59
ZP 6715	21,09
ZP 6263	20,94
ZP 6364	20,59
ZP 6006b	22,03
ZP 552b	20,80
ZP 707	22,86
ZP 7072	22,38
ZP 7357	22,68
ZP 7777	24,02

Koordinatni početak biplota (*biplot origin*) predstavlja genotip koji ima prosečne performanse, odnosno prosečan prinos i visoku stabilnost prinosa u svakom okruženju. Okruženja ili genotipovi koji su slični po ispitivanom svojstvu imaju tendenciju da se

grupišu jedni u blizini drugih (Frutos, et al., 2013). Uvidom u Grafik 4, uočava se grupisanje hibrida ZP 5090, ZP 5550, ZP 6364, ZP 457. S obzirom na njihov položaj u odnosu na koordinatni početak biplota na x osi, može se zaključiti da ovi hibridi ostvaruju natprosečan prinos u svim ispitivanim okruženjima. Takođe, veći broj hibrida je pokazao slične performanse i formirali su drugi, veoma gusto zbijeni klaster. U ovom klasteru se nalaze sledeći hibridi: ZP 560, ZP 606, ZP 6263, ZP 6714, ZP 6715, ZP 7072, i ZP 7357. Navedeni hibridi su takođe ostvarili natprosečne performanse u svim posmatranim okruženjima.

Osim hibrida ZP 6364, preostala tri hibrida prvog pomenutog klastera predstavljaju hibride grupe zrenja FAO 450–550 i prvenstveno su namenjeni za berbu u zrnju. Ove hibride karakteriše brzo otpuštanje vlage u periodu sazrevanja i naklonjeni su lokalitetima Pančevo i Požarevac u obe posmatrane godine i lokalitetu Zemun Polje u 2019. godini. Za razliku od prvog, drugi klaster čine hibridi značajno dužeg vegetacionog perioda (FAO 550–800), prvenstveno namenjeni za berbu u klipju i silažu. Ovaj klaster je više pogodan za lokalitete Bačka Topola, Bečej (u obe posmatrane godine) i Zemun Polje (samo za 2020. godinu). Na osnovu ovoga, može se pretpostaviti izdvajanje dve megaokoline (*mega-environments*): prve koju čine Pančevo i Požarevac, i druge koju čine Bečej i Bačka Topola. S obzirom da se lokalitet Zemun Polje grupisao uz prvu megaokolinu 2019. godine, a uz drugu megaokolinu 2020. godine, potrebna su dodatna istraživanja kako bi se ovaj lokalitet uvrstio u neku od gore-pomenutih megaokolina ili izdvojio kao zasebna, treća megaokolina. Međutim, iako je grupisanje lokaliteta neophodno za definisanje megaokolina, ono samo nije dovoljno (Yan, et al., 2007). O definitivnom izdvajanju megaokolina, biće više reči kasnije, u sekciji „Ko je gde pobednik“.

Okruženja su povezana sa koordinatnim početkom biplota preko vektora. Korelacija između okruženja može se odrediti na osnovu uglova koje zaklapaju vektori različitih okruženja. Oštar ugao ukazuje na pozitivnu korelaciju, prav ugao ukazuje da nema korelacije, dok tup ugao ukazuje na negativnu korelaciju između dva okruženja (Malik & Piepho, 2018). Na osnovu Grafika 4, može se zaključiti da je između svih okruženja uočen veći ili manji stepen pozitivne korelacije. Iako je očekivano da se između istih lokaliteta u različitim godinama javlja veoma visok stepen pozitivne korelacije, pored toga, visok stepen je uočen i između lokaliteta Pančevo i Požarevac, te Bačka Topola i Bečej. Postojanje jake pozitivne korelacije između lokaliteta implicira da isti podaci o performansu genotipa mogu biti prikupljeni sa manjeg broja lokaliteta, čime se mogu smanjiti troškovi testiranja. Ukoliko par testnih lokaliteta konstantno pokazuje visoku korelaciju tokom višegodišnjeg testiranja, jedan od njih može biti eliminisan bez značajnog uticaja na dobijene informacije o genotipu (Yan & Tinker, 2006).

Dužina vektora je srazmerna intenzitetu interakcije genotip $\times$ spoljašnja sredina (Demelash, 2024). Duži vektori ukazuju na značajniju interakciju i obrnuto. Stoga, može se zaključiti da je ova interakcija bila najuočljivija u okruženjima PA19 i BC19.

Ovo je potvrđeno ostvarenim prinosima zrna u obe godine. Rezultati obe ispitivane godine pokazuju da je 2020. godina bila rodija ($13,31 \text{ t ha}^{-1}$) u odnosu na 2019. godinu kada je prosečan prinos iznosio $12,12 \text{ t ha}^{-1}$ (Tabela 13). Ovo je u skladu sa zabeleženim meteorološkim pokazateljima i njihovim značajem sa aspekta proizvodnje kukuruza (Radičević, et al., 2019; Radičević, et al., 2020). Posmatrajući svaki lokalitet ponaosob, lokalitet Pančevo predstavlja lokalitet sa prosečno najnižim ostvarenim prinosima zrna ($12,22 \text{ t ha}^{-1}$), dok je Požarevac sa prosečnim prinosom od $13,05 \text{ t ha}^{-1}$ za obe godine bio

lokalitet u kome su ispitivani hibridi bili najprinosniji. Trebalo bi naglasiti da lokalitet Požarevac ovakav rezultat duguje 2020. godini, u kojoj je prosečan prinos zrna na ovom lokalitetu bio 14,04 t ha⁻¹. Isti lokalitet u 2019. godini bio je jedan od lokaliteta sa najnižim ostvarenim prosečnim prinosom zrna (12,06 t ha⁻¹), što je ispod proseka za sve posmatrane lokalitete u 2019. godini.

Tabela 13. Prosečan ostvareni prinos zrna po lokalitetima i godinama.

Godina	Prinos zrna (t ha ⁻¹)					Prosek
	Zemun Polje (ZP)	Požarevac (PO)	Bečej (BC)	Bačka Topola (BT)	Pančevo (PA)	
2019	11,81	12,06	12,33	12,33	12,08	12,12
2020	13,34	14,04	13,42	13,4	12,35	13,31
Prosek	12,57	13,05	12,87	12,86	12,22	12,71

Po Jockoviću (2008), proizvodna područja za proizvodnju kukuruza dele se na nekoliko reiona. Prvi rejon čine južna i zapadna Bačka, Južni Srem i Podrinjsko-Kolubarski region. Drugi rejon, nešto nepovoljnijih uslova za ovu proizvodnju, čine Južni Banat i Šumadijsko-Pomoravski region. Treći rejon, sa još nepovoljnijim uslovima za proizvodnju kukuruza, čine Severna Bačka, Severni, Srednji i Istočni Banat. Četvrti i najnepovoljniji rejon za proizvodnju kukuruza u Srbiji čine: Centralna, Istočna i Južna Srbija. Na osnovu višegodišnjeg iskustva, stručnjaci Instituta za kukuruz „Zemun Polje“ teritoriju Republike Srbije su podelili na sledeća proizvodna područja (agroekološke rejone) za proizvodnju ZP hibrida kukuruza (Jovanović, et al., 2011):

1. Severno-Bačko-Banatski;
2. Zapadno-Južno Bački;
3. Srednje-Južno Banatski;
4. Sremski.

Navedena područja nalaze se u AP Vojvodini, i ujedno predstavljaju najpogodnije rejone za proizvodnju ZP hibrida kukuruza. U Centralnoj Srbiji, dalje su izdvojeni sledeći proizvodni rejoni za gajenje kukuruza:

5. Beogradski;
6. Podrinjsko-kolubarski;
7. Podunavsko-pomoravski;
8. Šumadijsko-zapadnomoravski;
9. Timočko-negotinski;
10. Nišavsko-toplički;
11. Južnomoravski;

12. Zlatiborski; i

13. Kosovsko-metohijski rejon.

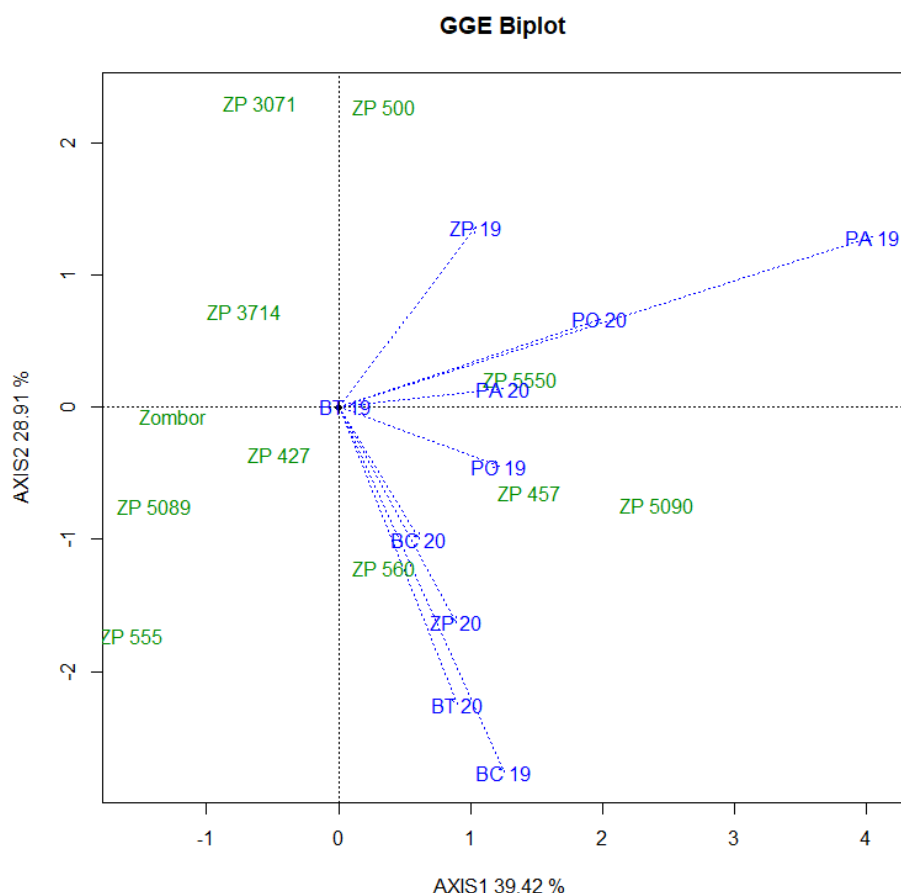
Lokaliteti posmatrani u ovom radu pokazali su podeljenost u odnosu na podobnost određene genetike i hibrida – dok su Bečej, Bačka Topola i Požarevac (2020) više pogodovali kasnijim hibridima, hibridi ranijih grupa zrenja su ostvarili bolje rezultate na lokalitetima Zemun Polje, Pančevo i Požarevac (2019). Ovakav zaključak je u skladu sa ranijim istraživanjima gde se ističe bolja adaptabilnost hibrida kukuruza ranijih FAO grupa zrenja na nestabilnije i lokalitete na kojima se prosečno ostvaruju niži prinosi zrna (Crevar, et al., 2011). Nasuprot tome, lokaliteti na kojima je moguće ostvariti nesmetanu proizvodnju hibrida kukuruza duže vegetacije više pogoduju hibridima kasnijih FAO grupa zrenja (Ivan, et al., 2023).

Rezultati ostvareni na ispitivanim lokalitetima su u saglasnosti sa rejonizacijom po Jockoviću (2008) i Jovanović, et al. (2011). Kako je prethodno navedeno, prema ovim podelama, lokaliteti južnog Banata i Pomoravsko-Podunavskog regiona pripadaju rejonu drugog reda, koji su pod većim uticajem ekoloških faktora u merkantilnoj proizvodnji kukuruza. U takvim rejonima, hibridi ranijih FAO grupa zrenja imaju tendenciju da ostvaruju stabilnije prinose zrna (Radojčić, et al., 2008; Madić, et al., 2010; Nišavić, et al., 2025), što je i potvrđeno i rezultatima ovog rada.

6.3.1. Analiza GGE biplota grupa FAO 300–500

Kako je prethodno navedeno, radi lakše i preciznije interpretacije dobijenih GGE biplota, u ovom radu GGE analiza će biti podeljena na analizu hibrida FAO grupe zrenja FAO 300–500, odnosno FAO 600–800. Pomenuta podela se opravdava time što prvu grupu predstavljaju hibridi namenjeni za direktnu vršidbu u zrnu, dok je druga grupa predstavljena hibridima namenjenim za berbu u klip. Na taj način se, pored utvrđene rejonizacije, može dati odgovarajuća preporuka za uzgajanje određenog hibrida i na osnovu nivoa dostupne mehanizacije.

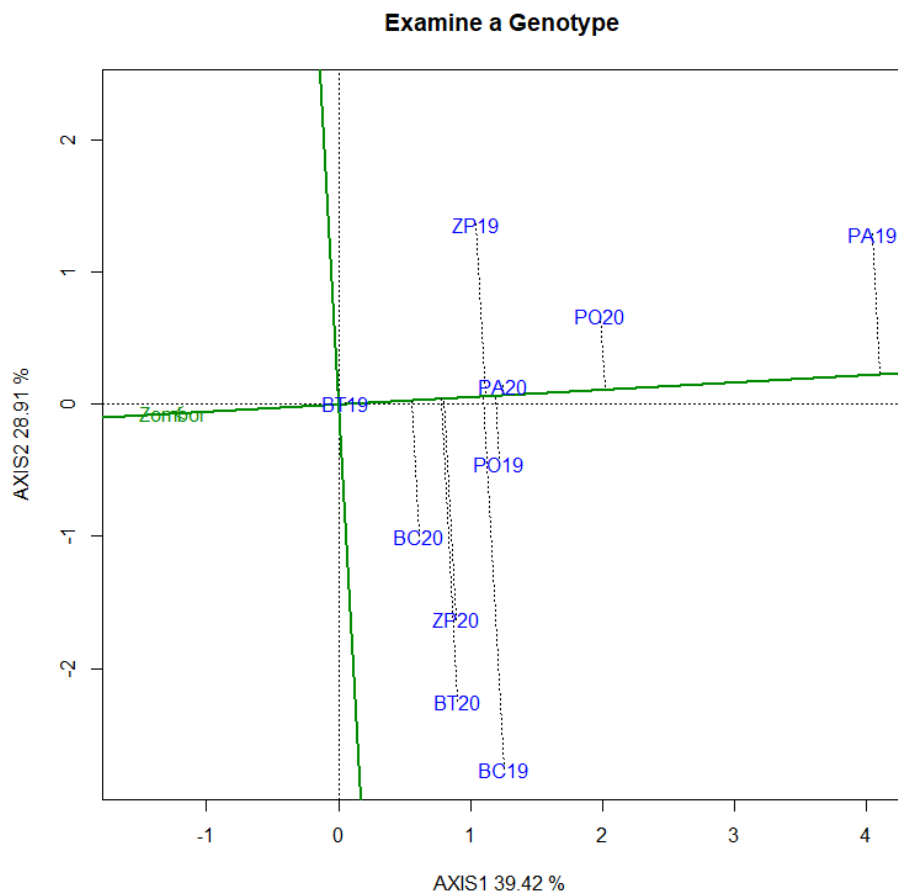
Biplot analiza hibrida srednje ranih i ranih grupa zrenja (FAO 300–500) predstavljena je Grafikom 5.



Grafik 5. GGE biplot prinosa zrna za sva okruženja i hibride FAO grupa zrenja 300–500.

6.3.1.1. Hibridi FAO 300

U ovom radu, grupa zrenja FAO 300 je predstavljena hibridima Zombor, ZP 3071, ZP 3714. Pomenuta grupa zrenja ima učešće na tržištu Republike Srbije u iznosu od 15% i ne predstavlja težište potražnje (PSS Sombor, 2023). Na osnovu ostvarenih rezultata prinosa hibrida grupe zrenja FAO 300, hibrid Zombor se izdvaja kao hibrid sa nešto višim prinomom zrna ($12,48 \text{ t ha}^{-1}$), naspram ZP 3071 i ZP 3714 sa $12,3 \text{ t ha}^{-1}$, odnosno $12,38 \text{ t ha}^{-1}$ (Tabela 9). Takođe, procenat vlage u zrnu hibrida Zombor u momentu berbe je bio vrlo nizak – 12,85% naspram 15,06%, odnosno 13,37% u druga dva navedena hibrida (Tabela 12), izdvajajući hibrid Zombor kao hibrid sa najboljim odnosom postignutog prinosa zrna i odgovarajućeg sadržaja vlage za berbu u zrnu. Ovo je važna prednost sa aspekta čuvanja zrna (Pavlov, et al., 2011). GGE biplot analiza otkriva podobnost hibrida Zombor za bolje uslove gajenja, obzirom da se na Grafiku 5 nalazi u blizini lokaliteta Bačka Topola, Bečej i Zemun Polje (2020), što je u skladu sa zaključkom Jockovića o rejonizaciji proizvodnih rejona Republike Srbije za podobnost gajenja kukuruza (Jocković, 2008). U oblasti Bačke hibridi kasnijih FAO grupa zrenja (FAO 600) najčešće ostvaruju najviše prinose zrna (Ivan, et al., 2023), što takođe potvrđuje da je ovo oblast sa optimalnim uslovima za proizvodnju kukuruza koji su takođe neophodni za hibrid Zombor. Međutim, u slučaju okruženja BC19 i BT20, zabeleženo je značajnije variranje prinosa hibrida Zombor u poređenju sa ostalim okruženjima (Grafik 6).



Grafik 6. GGE biplot prinosa zrna hibrida Zombor

Analiza parametara stabilnosti po Eberhart & Russell modelu u potpunoj je saglasnosti sa GGE biplot analizom, potvrđujući podobnost hibrida Zombor (b_i vrednost 1,2343; Tabela 8) za ostvarivanje boljih rezultata na lokalitetima sa boljim uslovima proizvodnje. Ovaj i ostali parametri stabilnosti izračunati su pomoću GEA-R softvera (Pacheco, et al., 2015).

Dalje, biplot generisan na osnovu parametara stabilnosti po Eberhart & Russell modelu (Grafik 2), svrstava Zombor među adaptabilne hibride. Ovo je zahvaljujući niskoj vrednosti S^2d_i od -0.0199 . Budući da je CV vrednost hibrida Zombor (8,8882%) (Tabela 8) relativno visoka u poređenju sa ostalim ispitivanim hibridima, on se ipak ne ističe po stabilnosti prinosa na osnovu ovog parametra.

Visoka stabilnost prinosa zrna je generalno karakteristika hibrida FAO grupa zrenja 300–400. Zbog povoljnijih vrednosti parametara stabilnosti, srednje rani hibridi se mogu preporučiti za gajenje u uslovima nižeg nivoa agrotehnike i za stresne sredine (Đurović, et al., 2014).

Na osnovu rezultata Mokrienko & Kornienko (2024), potvrđeno je da hibridi FAO grupe zrenja 300 i raniji, poseduju izraženija svojstva plastičnosti, naročito u poređenju sa hibridima kasnijih grupa zrenja. Pored toga, oni poseduju i niži udeo vlage u zrnu u momentu berbe što umanjuje troškove sušenja i čuvanja. Autori navode da su hibridi koji pripadaju FAO grupama 200–300 najstabilniji, naročito uzevši u obzir njihovu ekonomsku efikasnost.

Međutim, Buhiniček, et al. (2021) ističu da uzgajanje hibrida kukuruza ranih FAO grupa zrenja nije optimalna opcija ubuduće za tzv. „Evropski kukuruzni pojas“, koji obuhvata delove Bugarske, Hrvatske, Mađarske, Rumunije i Srbije. U spomenutom istraživanju, hibridi ranijih FAO grupa zrenja pokazali su se podložnijim sveprisutnom toplotnom stresu u poređenju sa hibridima kasnijih FAO grupa zrenja. Kako autori navode, ograničenje pomenutog rada je što nije uspeo da zabeleži interakciju lokacija $\times$ godina, koja značajno doprinosi ukupnom variranju prinosa zrna kukuruza (Zorić, et al., 2017).

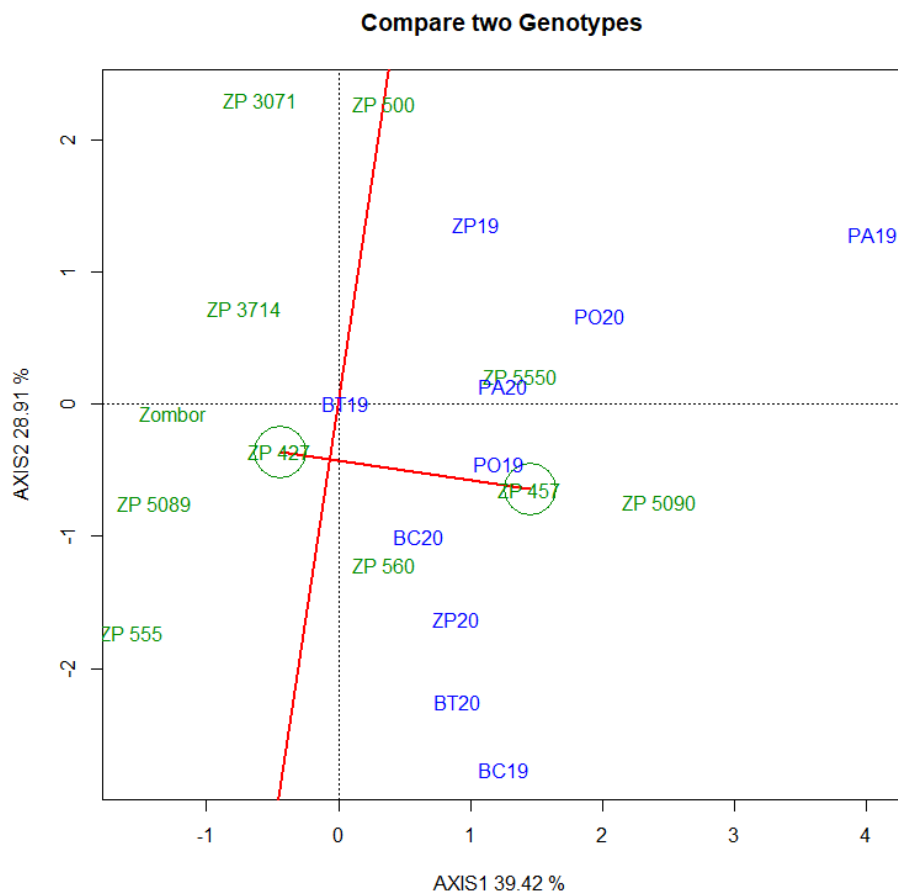
Očinska komponenta hibrida Zombor (L73B048) je genetički najbližija (GD = 0,136, Tabela 10) očinskoj liniji ZP 427 (L73B013) što navodi na zaključak da se radi o genetički veoma bliskim roditeljima. Međutim, jedna očigledna razlika da je linija L73B048 više podobna za kreiranje hibrida rane FAO 300 grupe zrenja, tj. hibrida sa brzim otpuštanjem vlage u periodu sazrevanja zrna. U skladu sa ovime, hibrid Zombor je ostvario najniži procenat vlage u zrnu u momentu berbe od svih ispitivanih hibrida (12,85%). Ovo je važno sa aspekta skladištenja, budući da je ova vrednost ispod idealnih 13% (Shepherd, 2010).

6.3.1.2. Hibridi FAO 400

Grupa zrenja FAO 400 predstavlja najtraženiju grupu zrenja na tržištu semenskog kukuruza Republike Srbije sa učešćem u prodajnoj strukturi od 50% (PSS Sombor, 2023). Hibridi ove grupe zrenja se karakterišu visokim i stabilnim prinosima (Đurović, et al., 2014) ali i obavezno kraćom vegetacijom, sa akcentom na brzo otpuštanje vlage u periodu sazrevanja, što ih čini idealnim za vršidbu u zrnu. Pored toga, adaptabilnost ovih hibrida je izražena, jer se lako prilagođavaju različitim uslovima gajenja što rezultira visokom stabilnošću prinosa zrna (Nagy & Honti, 2005). U poređenju sa hibridima srednje kasnih i kasnih grupa zrenja, hibridi FAO grupe 400 odlikuju se većom fenotipskom plastičnošću i približno podjednakim prinosom zrna, što ih čini favoritima za komercijalnu proizvodnju (Ivanović, et al., 2003).

U sprovedenom istraživanju, kao standardni hibrid grupe zrenja FAO 400 korišćen je hibrid ZP 427 registrovan 2011. godine, sa učešćem u prodajnoj strukturi na tržištu Republike Srbije sa 2,75% (PSS Sombor, 2023). Hibrid ZP 457, registrovan 2018. godine, predstavlja hibrid novije generacije sa pokušajem da se zameni postojeći hibrid ZP 427. Analiza rezultata prinosa zrna za hibrid ZP 457 potvrđuje da je ostvaren značajan napredak u selekciji unutar date grupe zrenja, s obzirom da je u međusobnom poređenju sa ZP 427 (Tabela 9), u svim ispitivanim okruženjima (osim BT19) ostvario viši prinos zrna. Hibrid ZP 457 je ostvario prosečan prinos zrna od 13,42 t ha⁻¹, što je statistički značajno viši prinos od prinosa zrna hibrida ZP 427 (12,78 t ha⁻¹).

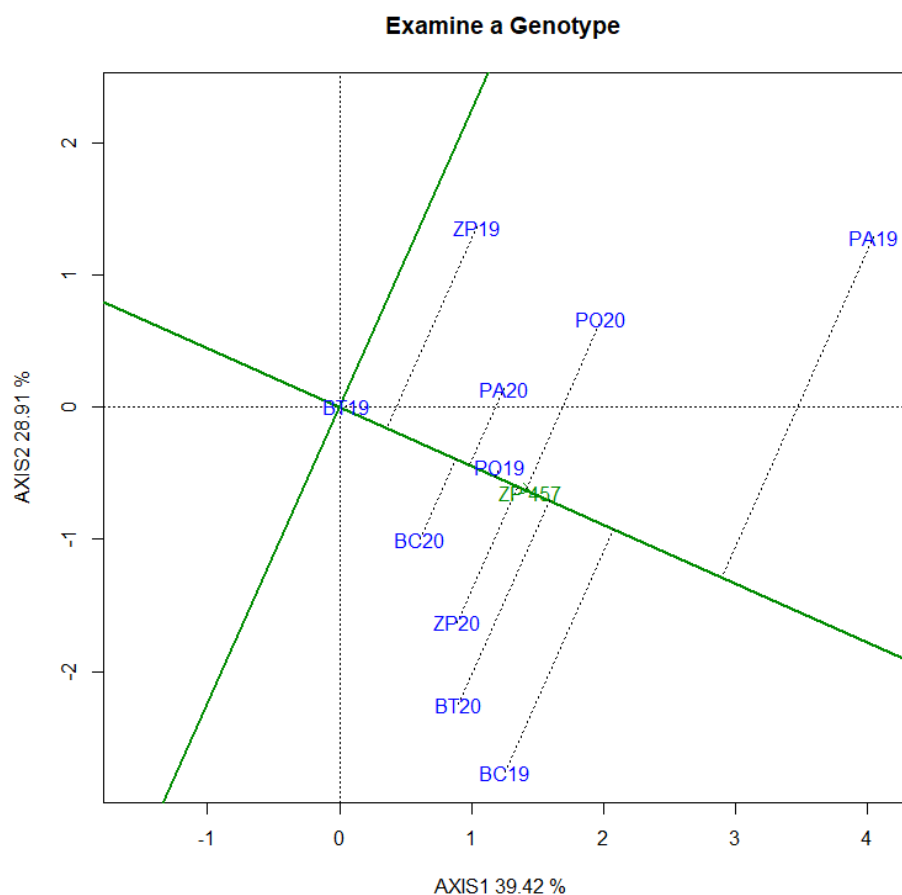
Komparativna GGE biplot analiza (Grafik 7) ova dva hibrida, pokazala je daleku nadmoć hibrida ZP 457, imajući u vidu da je ovaj hibrid u svim ispitivanim okruženjima ostvario natprosečan prinos zrna u poređenju sa ostvarenim prosečnim prinosima zrna ispitivanih hibrida grupe zrenja FAO 300–500 (Tabela 9). Jedino okruženje u kome je hibrid ZP 457 ostvario niži prinos zrna u odnosu na standardni hibrid ZP 427 bilo je upravo BT19.



Grafik 7. Komparativna biplot analiza prinosa zrna hibrida ZP 427 i ZP 457.

U ranijim istraživanjima (Mladenović, et al., 2021), hibrid ZP 427 je jedini preporučen za lošije uslove proizvodnje, budući da je najbolje adaptiran na nepovoljne uslove spoljašnje sredine. U sprovedenom istraživanju, ZP 427 je ostvario najniži prinos od svih ispitivanih hibrida, ali autori navode da se od ovog hibrida mogu očekivati stabilni prinosi čak i u najnepovoljnijim okruženjima i godinama. U istraživanju na osnovu koga je izrađena ova disertacija, ZP 427 je ostvario prosečan prinos zrna u rangi sa ukupnim prosekom ($12,78 \text{ t ha}^{-1}$ naspram $12,72 \text{ t ha}^{-1}$).

Biplot analiza samog hibrida ZP 457 (Grafik 8) ukazuje na vrlo visoku stabilnost prinosa zrna na svim ispitivanim lokalitetima u obe godine. Najmanje pogodnim okruženjem za uzgajanje ovog hibrida može se smatrati BT19, gde je ZP 457 ostvario jedan od najnižih prinosa zrna ($12,75 \text{ t ha}^{-1}$). Međutim, i u ovom okruženju je ZP 457 ostvario natprosečno visok prinos zrna u odnosu na prosek okruženja ($12,33 \text{ t ha}^{-1}$), tj. u odnosu na prosečan prinos iz svih okruženja za hibride grupa zrenja FAO 300–500.



Grafik 8. Biplot analiza prinosa zrna hibrida ZP 457.

Grafik 2 po Eberhart & Russell modelu izdvaja hibrid ZP 457 kao jedini stabilan od svih ispitivanih, na taj način dajući potvrdu da se radi o hibridu vrlo visoke stabilnosti prinosa zrna. Stabilnost su potvrdile i vrednosti S^2d_i od -0.3208 (Tabela 8), sa regresionim koeficijentom $b_i = 0.82$ bliskim regresionom koeficijentu hibrida ZP 427 ($b_i = 0.84$). Ovakav koeficijent pokazuje vrednost nižu od jedinične ($b_i < 1$), svrstavajući ZP 457 u hibride prilagodljive na uslove proizvodnje različitih nivoa agrotehnike. Analizom PlotCV grafika (Grafik 3) nanovo daje potvrdu o stabilnosti prinosa zrna hibrida ZP 457, s obzirom da se ovaj hibrid nalazi u donjem desnom sektoru koji predstavlja hibride visokog prinosa zrna i istovremeno niskog CV ispitivanog svojstva. Kako je prethodno istaknuto, ovako visoka stabilnost prinosa zrna je karakteristika hibrida FAO grupa zrenja 400 (Drašković, et al., 2021). Zbog povoljnijih vrednosti parametara stabilnosti, srednje rani hibridi se mogu preporučiti za gajenje u uslovima nižeg nivoa agrotehnike i za stresne sredine (Đurović, et al., 2014).

Nasuprot ovim rezultatima, u istraživanju Pavlov, et al. (2022), hibridi grupe zrenja FAO 400 ostvarili su niže prinose zrna u poređenju sa hibridima ostalih FAO grupa zrenja. Takođe, nestabilnost prinosa je bila izraženija u poređenju sa hibridima kasnijih grupa zrenja.

Hibridi ZP 427 i ZP 457 dele istu majčinsku komponentu, dok očinske komponente pokazuju genetičku distancu od 0,267, ukazujući na blisku genetičku osnovu i zajedničku pripadnost heterotičnoj osnovi BSSS/ID.

Očinska linija hibrida ZP 427 je L73B013. U istraživanju Popović, et al. (2020), najviši prinosi zrna u *test cross* ukrštanjima ostvareni su upravo kod onih hibrida kod kojih je L73B013 upotrebljena kao roditeljska linija. Takođe, hibridi nastali ukrštanjem ove linije imali su dobre rezultate za masu 1000 zrna (Popović, et al., 2024), što predstavlja svojstvo koje se može smatrati pouzdanim za selekciju visokoprinosnih hibrida kukuruza.

Pokušaji Instituta za kukuruz „Zemun Polje“ da reselekcijom očinske komponente ZP 427 (L73B013) ostvare poboljšanje date linije rezultiralo je selekcijom očinske komponente hibrida ZP 457 (L74B049). Imajući u vidu ostvarene rezultate novostvorenog hibrida ZP 457, reselekcija se može smatrati uspelom. Očinska komponenta ZP 457 (L74B049) predstavlja poželjan genotip za dalju upotrebu u programu oplemenjivanja, prvenstveno na svojstva visokog prinosa zrna praćenog visokom stabilnošću prinosa i adaptabilnošću hibrida. Važno je spomenuti da ova linija doprinosi nižem procentu vlage u zrnu u momentu berbe (Čamdžija, et al., 2022), što je naročito važno sa aspekta berbe u zrnu i čuvanja zrna.

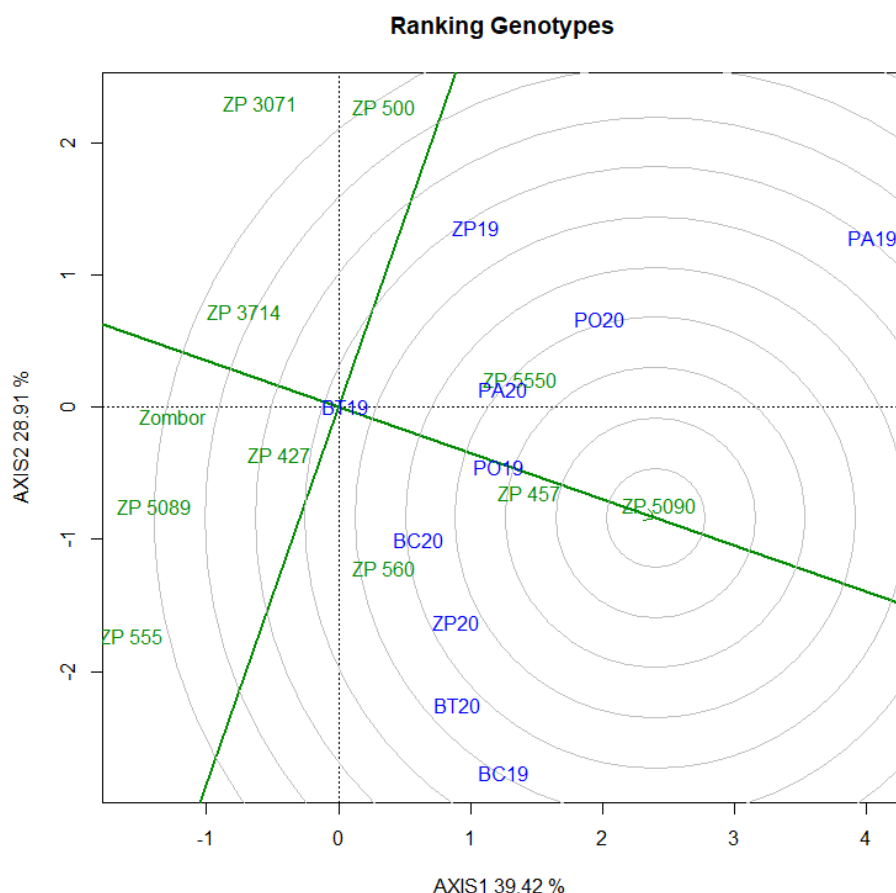
Roditeljske komponente hibrida ZP 427 i prethodno analiziranog hibrida Zombor predstavljaju linije uske genetičke osnove, tj. niske genetičke udaljenosti, te je njihov učinak u poljskim ogledima vrlo sličan, sa prosečnim prinosom od 12,78 t ha⁻¹, odnosno 12,48 t ha⁻¹. Ostvarena asocijativnost ova dva hibrida između molekularnih markera i ostvarenih poljskih rezultata ukazuje na visoku korelaciju i pouzdanost multidisciplinarnog pristupa u oplemenjivanju bilja.

6.3.1.3. Hibridi FAO 500

U ovom istraživanju, FAO 500 grupa zrenja predstavljena je hibridima ZP 500, ZP 5550, ZP 5089, ZP 5090, ZP 560, i ZP 555. ZP 555 i ZP 560 su uzeti kao standardni hibridi, registrovani 2009. i 2010. godine. Prema somborskom izveštaju za 2022. godinu (PSS Sombor, 2023), u ukupnim atestiranim količinama za prodaju ZP 555 učestvuje sa 2,88%, što ga čini najprodavanijim hibridom kukuruza u svojoj grupi zrenja.

U odnosu na standardne hibride ZP 555 (12,41 t ha⁻¹) i ZP 560 (12,98 t ha⁻¹), statistički značajno viši prosečan prinos zrna su ostvarili ZP 5550 i ZP 5090 (13,23, odnosno 13,47 t ha⁻¹) (Tabela 9).

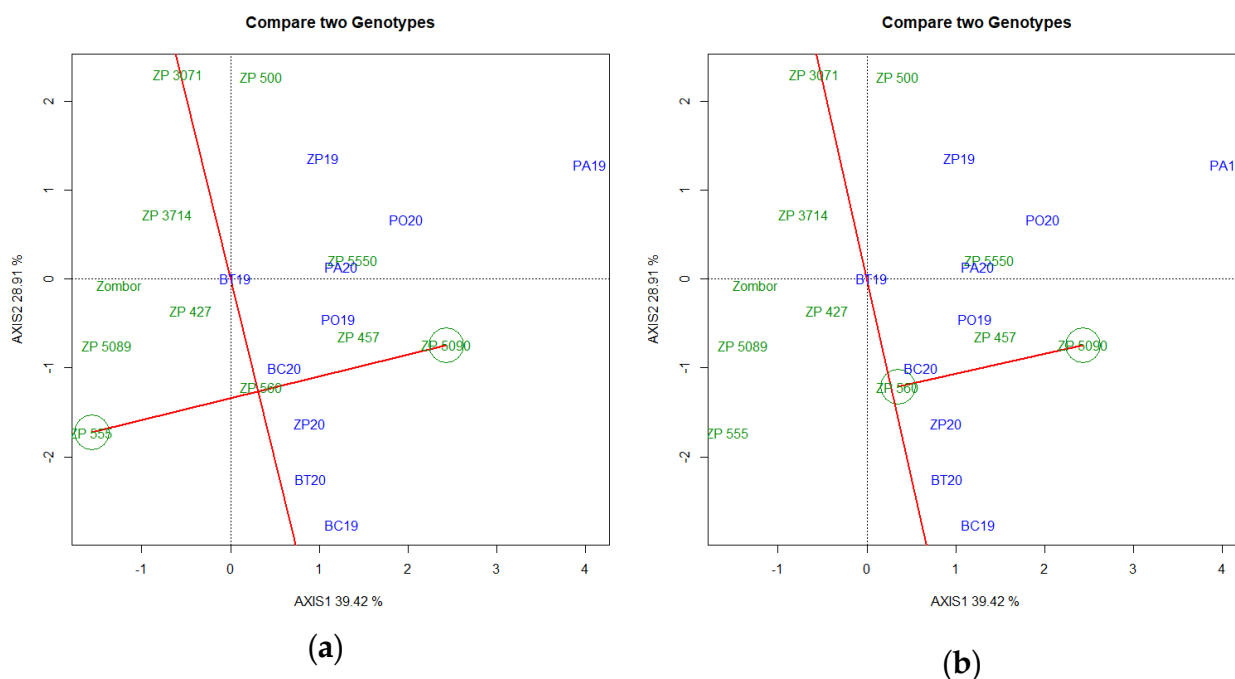
Biplot analiza prema rangiranju ispitivanih hibrida FAO 300–500 preporučuje ZP 5090 kao idealan genotip (Grafik 9).



Grafik 9. Biplot analiza rangiranja genotipova u odnosu na „idealni“ genotip.

Na biplotu koji rangira genotipove u odnosu na idealan genotip (Grafik 9), zelena strelica na liniji koordinacije prosečnog okruženja (*average-environment coordination*, AEC) označava idealan genotip za sva testna okruženja. Lokacija strelice na AEC jednaka je nuli, što ukazuje na apsolutnu stabilnost. S obzirom da se hibrid ZP 5090 nalazi u neposrednoj blizini strelice na AEC, to znači da je idealan genotip sa izuzetnom stabilnošću prinosa, naročito kada su u pitanju genotipovi ranih i srednje ranih grupa zrenja namenjenih za berbu u zrnu. U skladu s tim, genotipovi koji se nalaze u manjem koncentričnom krugu zajedno sa idealnim genotipom su poželjniji (ZP 457, ZP 5550, ZP 560) od onih u većem koncentričnom krugu (npr. ZP 3071, ZP 555). Pored toga, što je manji krug koji sadrži lokaciju, to su performanse i stabilnost idealnog genotipa u tom okruženju veće. Okruženje PO19 će verovatno biti idealno okruženje za genotip ZP 5090 u smislu postizanja visokog prinosa zrna i dobre stabilnosti prinosa. Budući da je PO19 jedno od okruženja u kom je ostvaren naniži prinos zrna, ovo potvrđuje da je hibrid ZP 5090 pogodan za uzgajanje u manje povoljnim uslovima (Nišavić, et al., 2025).

Biplot analiza poređenja ZP 5090 sa standardnim hibridima ZP 555 i ZP 560 (Grafik 10) je pokazala superiornost hibrida ZP 5090, s obzirom da je u svim ispitivanim okruženjima u obe ispitivane godine ostvario viši prinos zrna, osim u okruženjima BT19 (u odnosu na oba standardna hibrida), i BC20 (u odnosu na hibrid ZP 555).



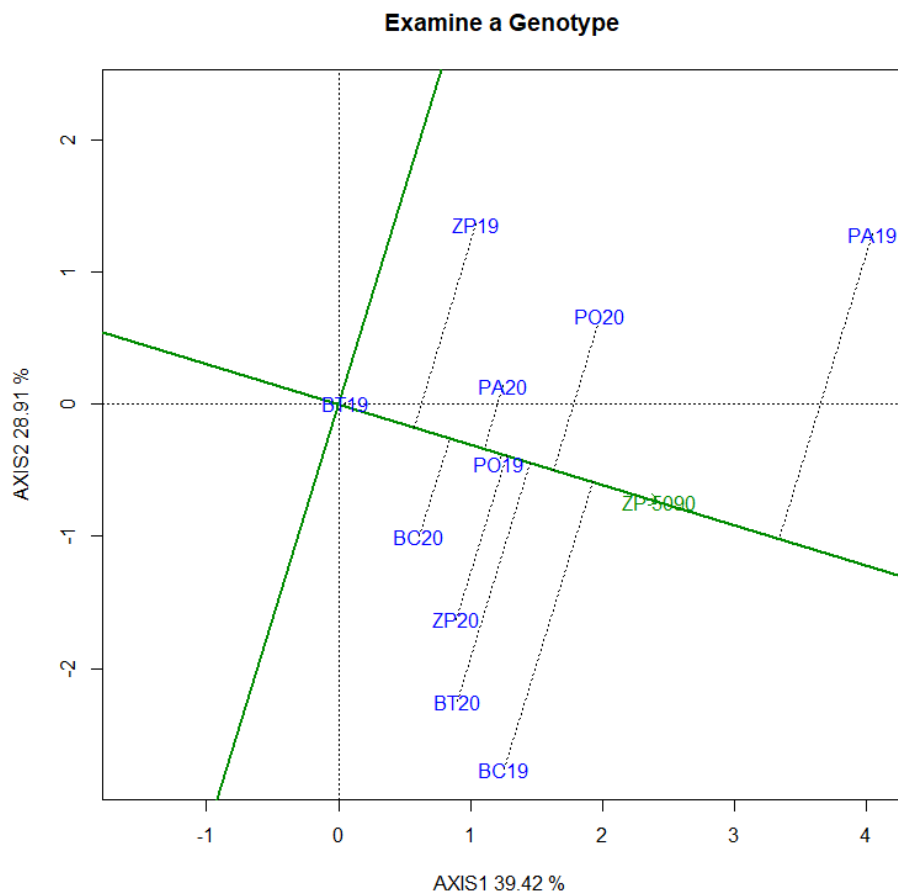
Grafik 10. Komparativna biplot analiza prinosa zrna hibrida ZP 5090 u odnosu na (a) standardni hibrid ZP 555; i (b) standardni hibrid ZP 560.

Komparativna analiza ZP 5090 i ZP 560 u okruženju BC20 pokazala je veću podobnost ZP 560 za datu lokaciju (blisko su pozicionirani na Grafiku 10b); međutim, sama analiza prinosa je otkrila da na ovoj lokaciji nije bilo statistički značajne razlike u prednosti ZP 560 u odnosu na ZP 5090 kada je ostvareni prinos zrna u pitanju (Tabela 9). Budući da se oba poređena hibrida nalaze sa iste strane upravne linije koja prolazi kroz koordinatni početak biplota, kao i da su markeri svih ispitivanih okruženja takođe na istoj strani, ovo navodi na zaključak da su oba hibrida podobna za gajenje na svakom od ispitivanih okruženja.

Rezultati prinosa zrna su otkrili superiornost hibrida ZP 5090, s obzirom da je ovaj hibrid ostvario najviši prinos u ispitivanim grupama zrenja FAO 300–500, odnosno drugi najviši prinos u proseku od svih ispitivanih hibrida u ovom radu (Tabela 9).

Međutim, valja napomenuti da, iako hibrid starije generacije, ZP 560 se i dalje odlikuje visokim prinosom i adaptiranošću na povoljnije uslove proizvodnje što su prethodno dokazali i drugi autori (Crevar, et al., 2011; Madić, et al., 2021; Rajčić, et al., 2024; Nišavić, et al., 2025).

Biplot analiza hibrida ZP 5090 (Grafik 11) otkriva podobnost ovog hibrida za sva ispitivana okruženja, s obzirom da je u svim okruženjima ostvario natprosečno visok prinos zrna. Analiza PlotCV grafika je otkrila i visoku stabilnost ovog hibrida (Grafik 3) s obzirom da se nalazi u donjem desnom sektoru datog grafika. Na osnovu biplota stabilnosti prinosa hibrida prema parametrima stabilnosti Eberhart & Russell, ZP 5090 je svrstan među hibride čija je prinos nestabilan, ali koji su prilagođeni na nepovoljne uslove proizvodnje. Budući da su obe posmatrane godine bile povoljne sa aspekta proizvodnje kukuruza (Radičević, et al., 2019; Radičević, et al., 2020), potrebna su dalja istraživanja kako bi se ocenila stabilnost prinosa ovog hibrida.



Grafik 11. Biplot analiza prinosa zrna hibrida ZP 5090.

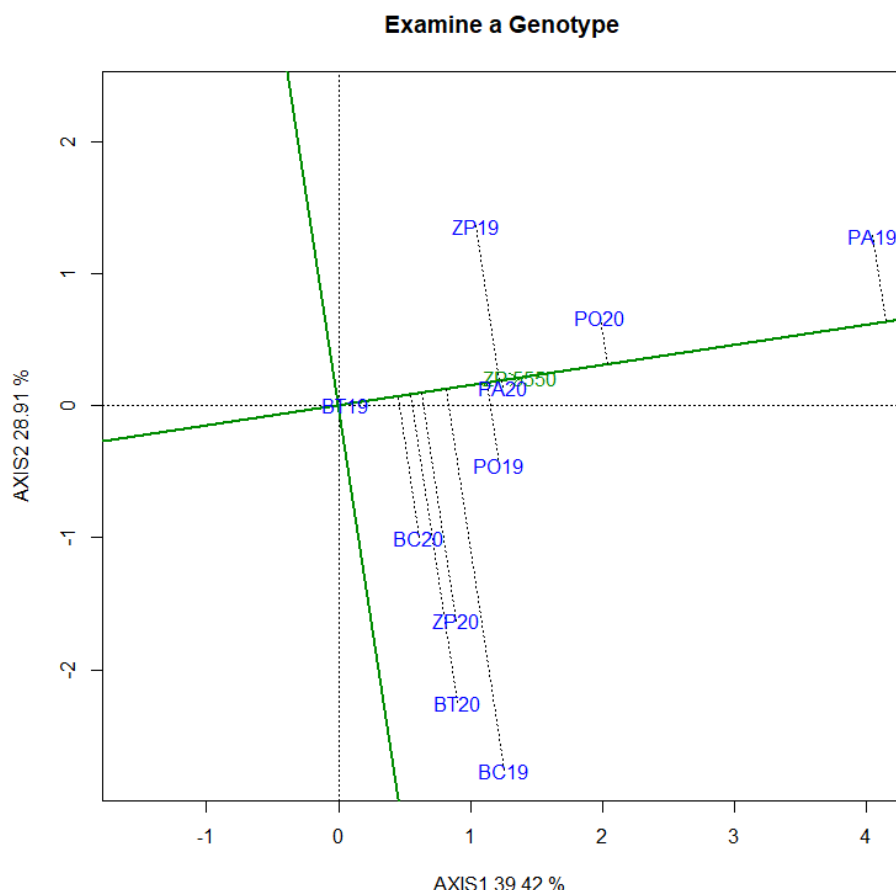
Roditeljske linije zajedničke za sva tri hibrida (L-255/75-5, ZPL-155/18-4/1 i L 325/75-2) predstavljaju genetički pul heterotične grupe LSC, veoma uske genetičke osnove, sa GD vrednostima nižim od 0,2. Stoga, razlike u performansama ova tri hibrida treba tražiti u drugim roditeljskim komponentama (non-LSC). Non-LSC komponente hibrida ZP 555, ZP 560 i ZP 5090 (L-335/99, L76B004 i L94B034) su prema SNP analizi veoma udaljene, prema vrednostima GD (0,285–0,407) (Tabela 10). Linije L-335/99 (Dodig, et al., 2019; Ranković, et al., 2021) i L76B004 (Ranković, et al., 2021) su dokazano elitne inbred linije. Međutim, na osnovu ostvarenih rezultata, može se zaključiti da inbred linija L94B034 (roditeljska komponenta hibrida ZP 5090) predstavlja značajno unapređenje postojeće genetike iz non-LSC pula koje je predstavljeno adaptabilnošću i stabilnošću datog hibrida u svim ispitivanim okruženjima (Nišavić, et al., 2025).

Na osnovu performansa, pored ZP 5090, u odnosu na ostale hibride izdvojio se i hibrid ZP 5550. Tabela prosečnih prinosa (Tabela 9) pokazala je da je hibrid ZP 5550 ostvario prosečan prinos zrna od 13,23 t ha⁻¹, što je iznad ukupnog proseka svih ispitivanih hibrida u svim okruženjima (12,72 t ha⁻¹). U odnosu na standardne hibride ZP 555 i ZP 560, na osnovu ANOVA rezultata, između ZP 5550 i ZP 560 (12,98 t ha⁻¹) ne postoji statistički značajna razlika u pogledu prinosa zrna, dok je ZP 5550 ostvario statistički značajno viši prinos zrna u poređenju sa ZP 555 (12,41 t ha⁻¹).

U okviru FAO grupa zrenja 300–500, hibrid ZP 5550 je ostvario prinos zrna viši od prosečnog prinosa zrna ispitivanih hibrida u svim okruženjima, osim okruženja BC20, gde

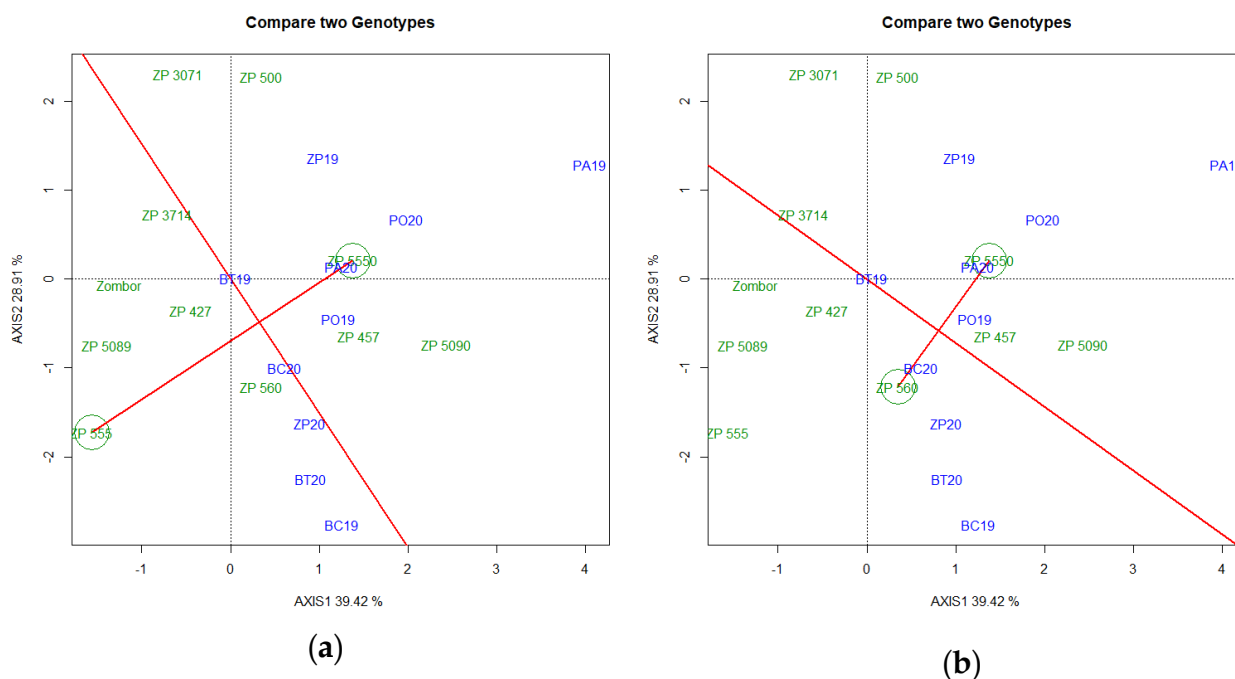
je ostvario prinos zrna u rangu proseka okruženja ($13,6 \text{ t ha}^{-1}$ u odnosu na $13,67 \text{ t ha}^{-1}$). Međutim, osvrtnom na prinose svih posmatranih hibrida FAO 300–800 (Tabela 9) između hibrida ZP 5550 i najprinosnijih hibrida u ovom okruženju ne postoji statistički značajna razlika po pogledu prinosa zrna.

GGE biplot analiza hibrida ZP 5550 (Grafik 12) grafički potvrđuje ostvarene dobre performanse u svim ispitivanim okruženjima. Dalje, data biplot analiza je otkrila rejonizaciju i podobnost gajenja ovog hibrida na području Južnog Banata, Stiga i Braničeva i donekle Srema, a manje podobnog za rejon Bačke.



Grafik 12. Biplot analiza prinosa zrna hibrida ZP 5550.

Komparativna biplot analiza ZP 5550 sa dva standarda (ZP 555, ZP 560) pokazuje slične rezultate, izdvajajući hibrid ZP 5550 kao više pogodnog za Južni Banat i područje Stiga i Braničeva (Grafik 13). Razlika u ispitivanim odnosima pokazuje veću prednost hibrida ZP 5550 u odnosu na ZP 555, nego u odnosu na hibrid ZP 560. Okruženje BT20 u komparativnoj analizi pokazuje veću podobnost za hibrid ZP 560, međutim, analiza prinosa zrna ipak izdvaja ZP 5550 kao prinosniji hibrid na tom lokalitetu. Imajući u vidu nedostatke GGE biplot analize koje ističu Yang, et al. (2009), preporučuju se dalja istraživanja kako bi se otkrilo koji je od ova dva hibrida podobniji za navedeni lokalitet.



Grafik 13. Komparativna biplot analiza prinosa zrna hibrida ZP 5550 u odnosu na (a) standardni hibrid ZP 555; i (b) standardni hibrid ZP 560.

Analiza parametara stabilnosti po Eberhart & Russell modelu pokazala je da je ZP 5550 drugi najstabilniji hibrid (Tabela 8), dok na grafiku PlotCV (Grafik 3) isti hibrid je svrstan u grupu hibrida koji pokazuju i dobre performanse i stabilnost prinosa.

Hibridi ZP 5550 i ZP 555 dele istu majčinsku komponentu (L-335/99), dok je očinska komponenta hibrida ZP 555 (L-255/75-5) oplemenjena u cilju kreacije inbred linije sa boljim performansama, prvenstveno po pitanju visine prinosa, stabilnosti i adaptabilnosti. Kao rezultat takvog procesa oplemenjivanja stvorena je inbred linija L74L065, očinska komponenta ZP 5550, što potvrđuje vrlo niska vrednost genetičke distance od 0,217. Napred navedeni rezultati, su pokazali poboljšane performanse (ostvaren viši prinos zrna), adaptabilnost i stabilnost (na osnovu vrednosti parametara stabilnosti po Eberhart & Russell modelu), a samim tim i širu rejonizaciju hibrida.

6.3.2. Analiza GGE biplota grupa FAO 600–800

6.3.2.1. Hibridi FAO 600

U sprovedenom istraživanju, FAO 600 grupa zrenja predstavljena je hibridima ZP 6714, ZP 6715, ZP 6263, ZP 6364, ZP 6006b, ZP 552b i ZP 606. Hibridi ove FAO grupe, uz hibride FAO grupe 500, su među najprodavanijim hibridima Instituta za kukuruz „Zemun Polje“ u prethodnih deset godina, i ove dve grupe hibrida se zajedno gaje na oko 15–20% površina pod kukuruzom u Srbiji (Babić, et al., 2024). S obzirom da su ZP 6006b i ZP 552b hibridi bele boje zrna, o njima će biti više reči u nastavku.

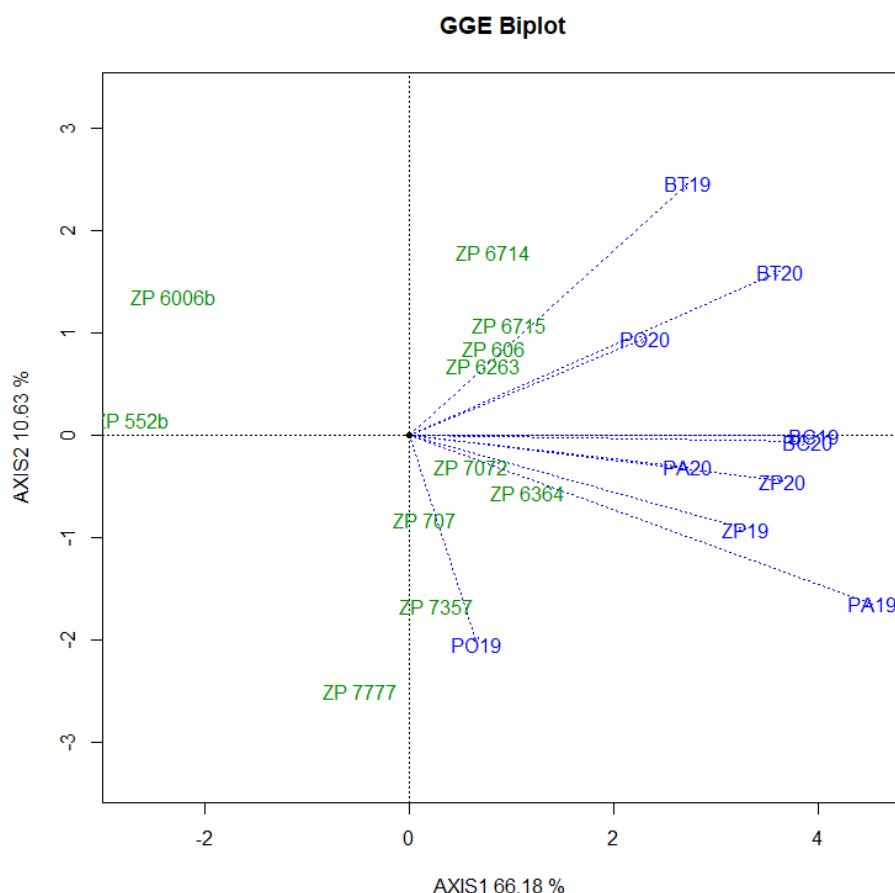
Kao standardni hibrid, uzet je ZP 606, registrovan 2009. godine. Prema izveštaju Poljoprivredne Stručne Službe Sombor o atestiranim količinama semena i sadnog materijala

u sezoni 2021/2022. godine (PSS Sombor, 2023), ZP 606 je u ukupnim atestiranim količinama za prodaju semena učestvovao sa 4,36%. Ovo ga čini najprodavanijim hibridom na teritoriji Republike Srbije, ne samo u okviru ZP asortimana hibrida, već i u odnosu na ostale semenske kuće. Hibrid ZP 606 se odlikuje visokim i stabilnim prinosom zrna (Stevanović, et al., 2014) i adaptiranošću na bolje uslove gajenja (Čamdžija, et al., 2012) i savremene mere agrotehnike (Mladenović, et al., 2021).

U odnosu na standardni hibrid ZP 606 (koji je ostvario prosečan prinos zrna od 13,35 t ha⁻¹), među hibridima novijih generacija proizvedenih u Institutu za kukuruz „Zemun Polje“, jedino je hibrid ZP 6364 ostvario viši prosečan prinos zrna (13,58 t ha⁻¹). Međutim, između ova dva hibrida ne postoji statistički značajna razlika. Ostali ispitivani hibridi FAO grupe 600 (ZP 6714, ZP 6715, ZP 6263) ostvarili niži prosečan prinos zrna u poređenju sa ZP 606. Konačno, između prosečnih prinosa zrna svih ispitivanih hibrida FAO 600 grupe zrenja nisu uočene statistički značajne razlike (Tabela 9).

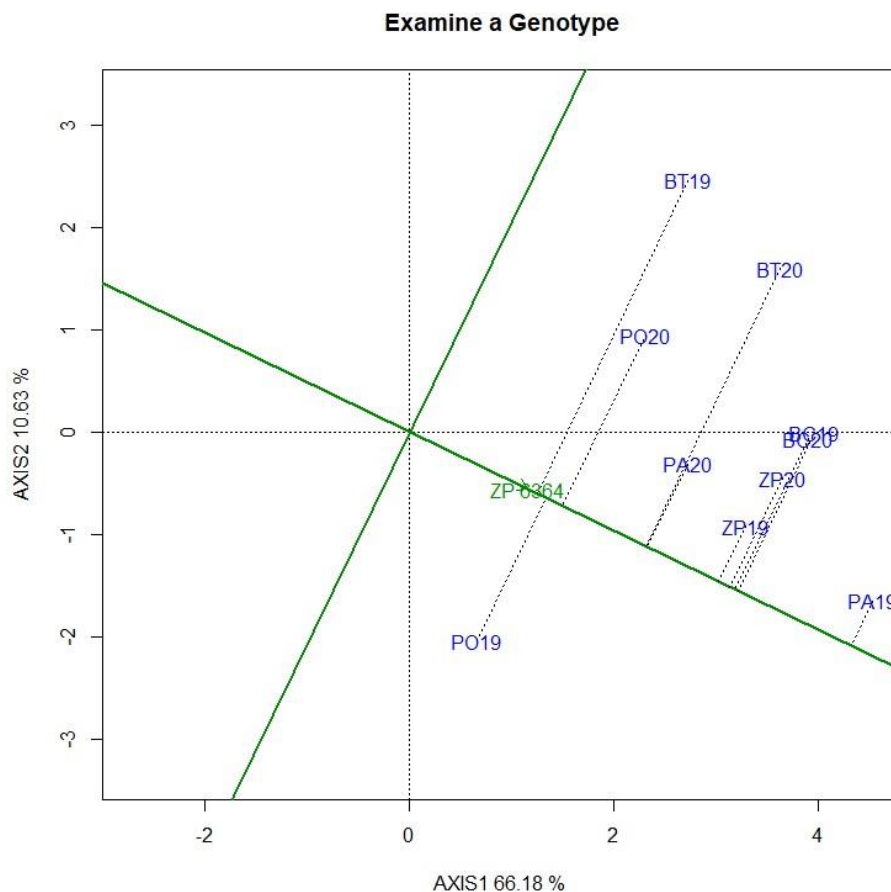
Uvidom u GGE biplot grafik za hibride FAO grupa zrenja 600–800, može se primetiti razdvajanje hibrida FAO grupe zrenja 600 u dva klastera (Grafik 14). U prvom klasteru, uočavaju se hibridi ZP 6714, ZP 6715, ZP 606 i ZP 6263, dok drugi klaster sačinjava samo jedan hibrid, ZP 6364. Svi hibridi ove FAO grupe zrenja nalaze se desno od koordinatnog početka biplota što znači da su svi ostvarili natprosečno visoke prinose zrna. Kako se prvi klaster nalazi u blizini okruženja BT19, BT20 i PO20, može se zaključiti da su ti hibridi pogodniji za gajenje u uslovima Bačke i Stiga i Braničeva. Takođe, imajući u vidu da je najviši prosečan prinos ostvaren upravo u okruženju PO20, a da se lokalitet Bačka Topola pokazao izuzetno povoljnim u obe proizvodne sezone, dalje se može izvući zaključak da hibridi prvog klastera zahtevaju povoljne uslove da bi ostvarili dobar prinos zrna, što je generalno pravilo za hibride srednje kasnih i kasnih FAO grupa zrenja (Đurović, et al., 2014). Ovo je u skladu sa prethodnim stanovištem da u rejonu Bačke hibridi FAO grupe 600 obično ostvaruju najviše prinose (Ivan, et al., 2023).

Za razliku od njih, hibrid ZP 6364 se može preporučiti za uzgajanje u svim ostalim okruženjima, budući da ostvaruje visoke i stabilne prinose i u nešto nepovoljnijim uslovima.



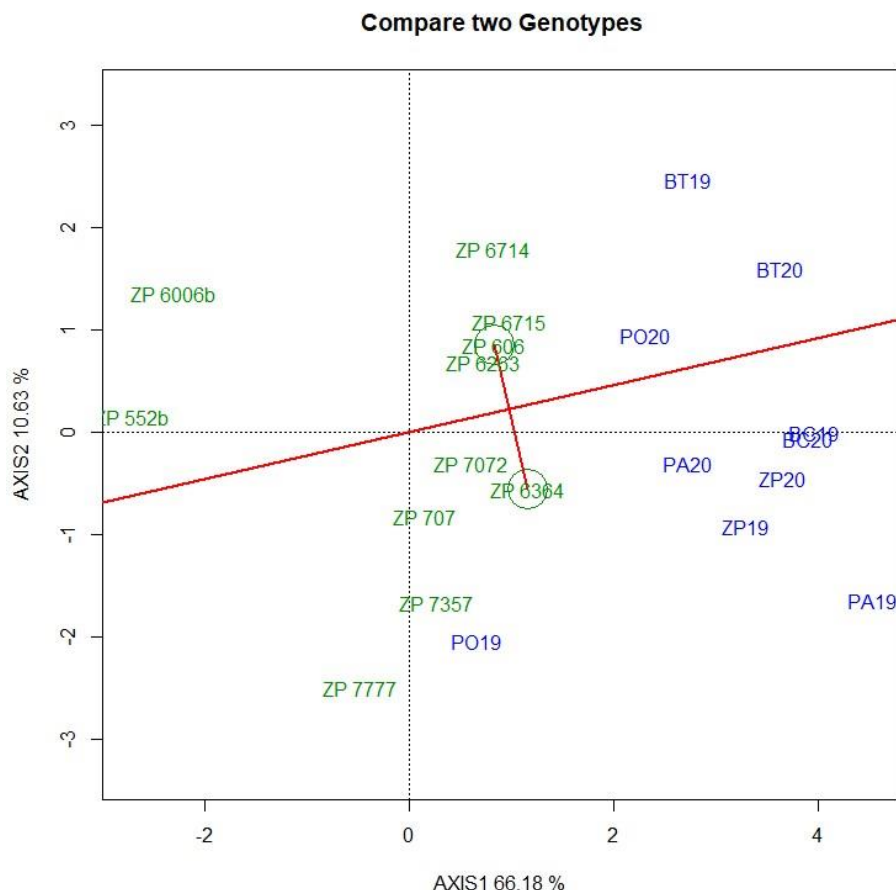
Grafik 14. Biplot analiza prinosa zrna hibrida srednje kasnih i kasnih FAO grupa zrenja (FAO 600–800)

Hibrid ZP 6364 ostvario je najviše prinose zrna (sa prosečnim ostvarenim prinosom $13,58 \text{ t ha}^{-1}$) u poređenju sa svim ostalim hibridima u ovom istraživanju (Tabela 9). Na osnovu biplot analize ovog hibrida (Grafik 15), zaključuje se da je ostvario natprosečne prinose u svim ispitivanim okruženjima. Najstabilniji prinos ostvario je u okruženju PA19 koji se pokazao i kao najbolje okruženje za uzgajanje ovog hibrida, praćeno okruženjima BC19, BC20, ZP20, ZP19 i PA20. Dakle, na lokalitetima Pančevo, Bečej i Zemun Polje u obe proizvodne sezone, ostvareni prinos zrna hibrida ZP 6364 bio je i visok i stabilan, što se može zaključiti na osnovu dužine upravnih isprekidanih linija. Nestabilan prinos zrna ostvaren je na lokalitetima Bačka Topola i Požarevac u obe posmatrane sezone. Stoga, hibrid ZP 6364 se može preporučiti za gajenje u svim glavnim oblastima za proizvodnju kukuruza u Republici Srbiji. Od ovog hibrida se može očekivati visok prinos, kao i visoka stabilnost prinosa, naročito u nepovoljnijim uslovima proizvodnje u kojima će većina ostalih hibrida ostvariti niže i nestabilnije prinose.



Grafik 15. Biplot analiza prinosa zrna hibrida ZP 6364.

U skladu sa prethodno navedenom podelom na klastere u okviru FAO 600 grupe zrenja, poređenjem hibrida ZP 6364 sa standardnim hibridom ZP 606, može se dati preporuka o gajenju na različitim lokacijama. Uporedbom ova dva hibrida (Grafik 16), može se zaključiti da se standardni hibrid ZP 606 preporučuje za uzgajanje na lokalitetima sa povoljnijim uslovima proizvodnje (Bačka Topola i Požarevac 2020). Sa druge strane, hibrid ZP 6364 se preporučuje za uzgajanje na svim ostalim lokalitetima, u uslovima različitih nivoa agrotehnike, gde može ostvariti stabilne i visoke prinose zrna.



Grafik 16. Komparativna biplot analiza prinosa zrna hibrida ZP 6364 u odnosu na standardni hibrid ZP 606.

Kod hibrida kasnijih FAO grupa zrenja generalno je prisutna specifična reakcija i bolja adaptacija na povoljnije uslove spoljašnje sredine, što zauzvrat rezultira i višim prosečnim prinosima zrna (Madić, et al., 2010; Đurović, et al., 2014). Stabilnost prinosa zrna i dobre performanse hibrida ZP 606 potvrđene su i u ranijim istraživanjima drugih autora (Mladenović, et al., 2021; Madić, et al., 2021; Stevanović, et al., 2021; Madić, et al., 2023; Rajčić, et al., 2024), gde je obično ovaj hibrid najprinosniji ili među najprinosnijim hibridima, uz šta autori navode da je adaptiran na bolje uslove proizvodnje. Stevanović, et al. (2021) preporučuju hibrid ZP 606 za uzgajanje u uslovima Srema (lokaliteti Zemun Polje i Sremska Mitrovica). I u ovom istraživanju, ZP 606 je na lokalitetu Zemun Polje ostvario prinos u rangi najprinosnijeg hibrida u obe godine.

U ovom istraživanju, rezultati dobijeni GGE biplot analizom u skladu su sa rezultatima gore navedenih autora. Međutim, oni se u određenoj meri razlikuju od rezultata ostvarenih analizom parametara stabilnosti.

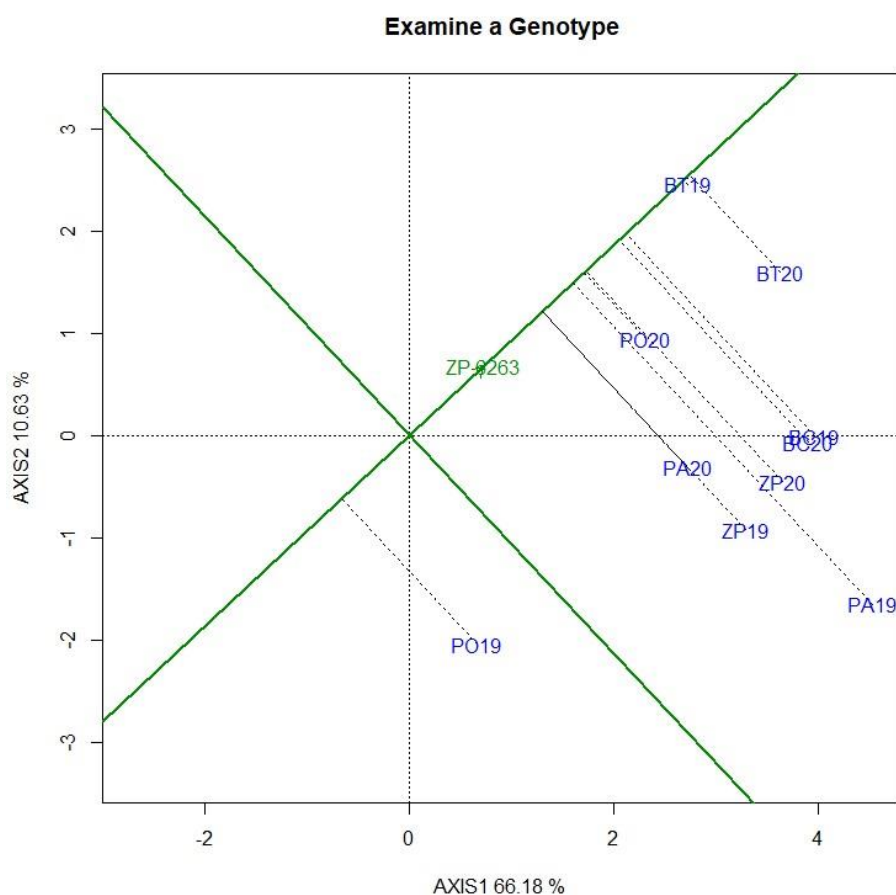
Na osnovu b_i , ZP 606 je rangiran kao najstabilniji hibrid od svih posmatranih ($b_i = 0,9623$) koji je pritom prilagođen na nešto lošije uslove proizvodnje (Tabela 8). Za razliku od njega, ZP 6364 je treći najstabilniji hibrid sa $b_i = 1,1139$, što ukazuje da ovaj hibrid bolje reaguje na povoljne uslove proizvodnje. Oba hibrida su pokazala visok stepen stabilnosti i na osnovu S^2d_i parametra. Na biplotu generisanom na osnovu parametara stabilnosti (Grafik 2) može se uočiti da, iako oba hibrida poseduju visok stepen stabilnosti prinosa zrna,

nijedan se ne može definisati kao adaptabilan i stabilan. Analizom parametra CV (Tabela 8, Grafik 3), oba hibrida su dobro rangirana i mogu se svrstati među stabilne hibride dobrih performansi.

Budući da se navedeni rezultati dobijeni analizom parametara stabilnosti razlikuju od rezultata GGE biplot analize, potrebna su dodatna istraživanja kako bi se dala definitivna preporuka za gajenje ova dva hibrida na specifičnim lokalitetima.

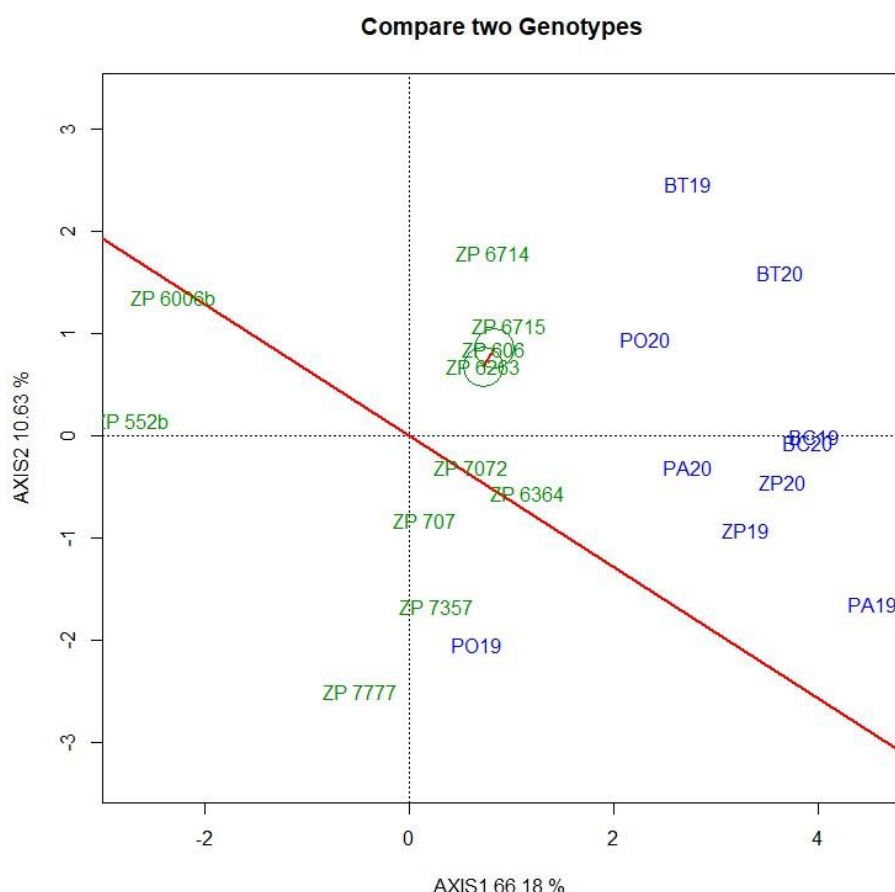
Uz hibrid ZP 6364, važno je istaći i hibrid ZP 6263. Hibrid ZP 6263 je hibrid novije generacije koji se u višegodišnjim ogledima ostvario dobar performanse. Na osnovu analize parametara stabilnosti po Eberhart & Russell modelu (Grafik 2), hibrid ZP 6263 prepoznat je kao adaptabilan hibrid koji ipak zahteva nešto povoljnije uslove proizvodnje ($b_i = 1,2922$). Što se tiče CV, vrednost ovog parametra je bila u rangu proseka za sve ispitivane hibride (CV = 8,5627%).

GGE biplot analiza hibrida ZP 6263 grafički prikazuje da je ovaj hibrid ostvario dobre rezultate u svim ispitivanim okruženjima (osim PO19; Grafik 17). Stabilnost prinosa se može jasno uočiti na lokalitetu Bačka Topola u obe proizvodne sezone, i ovaj hibrid se preporučuje za uzgajanje u proizvodnom rejonu Bačke. Na ostalim lokalitetima, ZP 6263 je ostvario visoke prinose zrna (u rasponu od 11,9–14,44 t ha⁻¹), uz primetnije variranje prinosa.



Grafik 17. Biplot analiza prinosa zrna hibrida ZP 6263.

Sličan zaključak se može izvući i poređenjem hibrida ZP 6263 sa standardnim hibridom ZP 606 (Grafik 18). Budući da se oba navedena hibrida nalaze sa iste strane linije jednakosti, kao i većina okruženja u kojima su ispitivani, može se zaključiti da se i ZP 6263 i ZP 606 mogu preporučiti za gajenje u tim okruženjima. Jedini izuzetak je okruženje PO19, koji je jedno od okruženja sa najnepovoljnijim uslovima uzgajanja i na kom se ne može očekivati da ijedan od dva navedena hibrida ostvari zapaženije rezultate. U slučaju ovog okruženja, kao preporuka za gajenje može se dati hibrid ZP 6364.



Grafik 18. Komparativna biplot analiza prinosa zrna hibrida ZP 6263 u odnosu na standardni hibrid ZP 606.

Svi navedeni hibridi o kojima je bilo reči u prethodni pasusima (ZP 6364, ZP 6263 i ZP 606) dele istu očinsku komponentu – L 325/75-2. Ova linija pripada genetičkom pulu LSC heterotične grupe (Nišavić, et al., 2025). Linija L325/75-2 je elitna inbred linija razvijena u Institutu za kukuruz „Zemun Polje“, i primenu je našla i kao majčinska i kao očinska komponenta nekoliko hibrida koji se uspešno gaje kako u Srbiji, tako i u inostranstvu. L 325/75-2 predstavlja liniju dobrih opštih kombinacionih sposobnosti i karakteriše je tolerantnost prema suši tokom kritičnih faza rasta za potrebe prema vodi (Dodig, et al., 2019). Budući da je očinska komponenta ova tri hibrida ista, razlike u ostvarenim rezultatima mogu se tražiti među majčinskim komponentama.

Majčinske komponente pomenutih hibrida su sestrinske linije koje pripadaju BSSS heterotičnoj grupi. Između njih se javlja veoma niska vrednost genetičke distance u rasponu

od 0,102–0,183 (L76B051, L76B044 i L-335/99). Kao i liniju L 325/75-2, i liniju L-335/99 karakterišu dobre opšte kombinacione sposobnosti i tolerantnost prema suši (Dodig, et al., 2019). Linije L76B051 i L76B044 su nastale reselekcijom linija L-335/99 i L76B004 u sa ciljem stvaranja materijala sa boljim performansama u odnosu na polazni materijal. Linija L76B051 predstavlja unapređenje, s obzirom da je ostvarila bolje rezultate sa istim ocem (L 325/75-2) u dvogodišnjem ispitivanju. Stoga, može se zaključiti da se upravo L76B051 preporučuje u daljim programima oplemenjivanja kukuruza. Sa druge strane, budući da je elitna linija L-335/99 kao majčinska komponenta uključena u stvaranje dva hibrida visoko stabilnog prinosa i dobrih performansi (ZP 606, ZP 5550), preporučuje se njeno dalje zadržavanje u programima oplemenjivanja bilo u kombinaciji sa drugim očinskim linijama, ili kao osnova za dalju reselekciju i dobijanje boljih genotipova.

Sa druge strane, vrednosti GD između sve tri majčinske komponente hibrida ZP 606, ZP 6263 i ZP 6464 sa očinskom komponentom variraju u veoma uskom opsegu (0,455-0,462), što navodi na visoku heterotičnost sva tri hibrida, ali ne otkriva pozadinu relacije viši prinos-više vrednosti GD (Würschum, et al., 2023).

6.3.2.2. Hibridi bele boje zrna

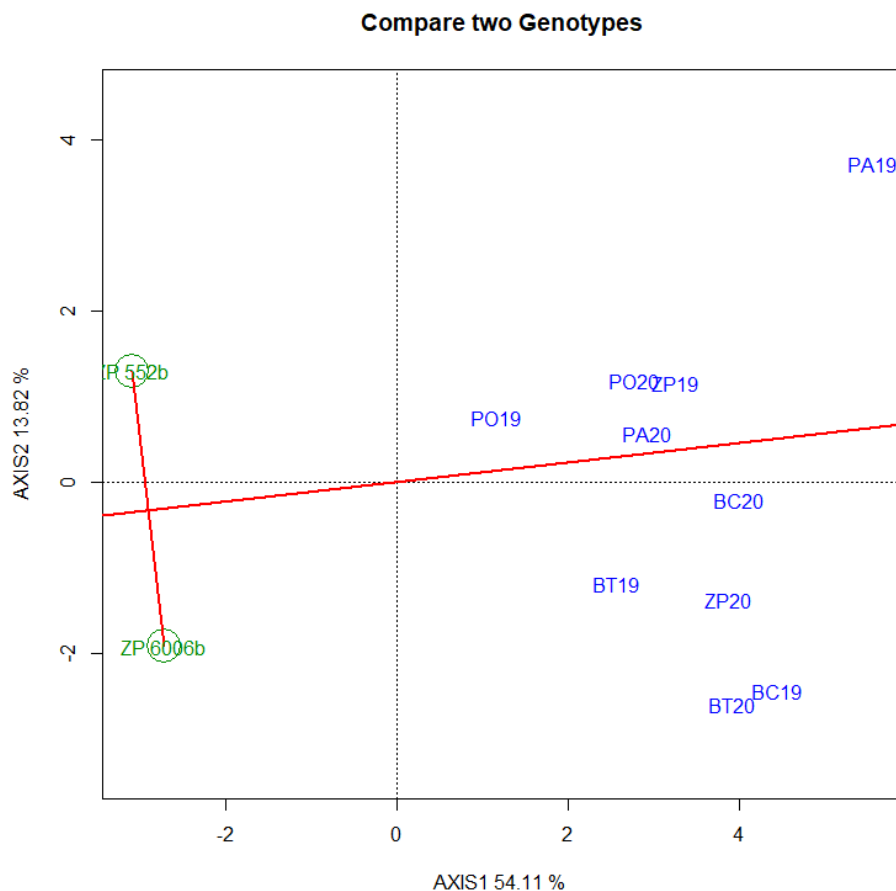
U postupku priznavanja sorte utvrđuje se kvalitet i bitne proizvodne osobine sorte, kao i različitost, uniformnost i stabilnost sorte, na osnovu kojih se ta sorta može priznati, a seme i sadni materijal te sorte stavljati u promet kao sortni na teritoriji Republike Srbije (Službeni Glasnik 30/2010) (2010). Prema važećem zakonu priznat hibrid kukuruza ne sme da sadrži procenat poleglih i slomljenih biljaka viši od 5% pri sadržaju vlage nižem od 20% u momentu berbe.

Hibridi kukuruza bele boje zrna u poređenju sa hibridima kukuruza standardnog kvaliteta zrna žute boje postižu niže prosečne prinose u istoj FAO grupi zrenja, dok sa druge strane, po ceni kukuruz belog zrna se na međunarodnom tržištu kotira više u poređenju sa zrnom žute boje (International Maize and Wheat Improvement Center, 1997). Na razlike u prinosu utiču regionalni prioriteti oplemenjivanja i specifični ciljevi uzgoja kukuruza. U mnogim razvijenim zemljama, istraživanja su najčešće usmerena ka unapređenju kukuruza žute boje zrna, koji se pretežno koristi kao hrana za životinje, što je dovelo do stvaranja prinosačijih hibrida u poređenju sa hibridima bele boje zrna. U Republici Srbiji, hibridi kukuruza bele boje zrna prvenstveno su namenjeni za ljudsku ishranu i prehrambenu industriju.

ZP 552b i ZP 6006b su jedina dva hibrida bele boje zrna uključena u ovaj ogled. Na osnovu postignutih rezultata, može se zaključiti da su prinosi ova dva hibrida značajno niži u odnosu na sve ostale hibride žute boje zrna iz svih grupa zrenja (Tabela 9). Ovo je u saglasnosti sa stavom da hibridi bele boje zrna postižu niže prinose i da su manje profitabilniji za uzgajanje u odnosu na svoje žute parnjake (Maqbool, et al., 2019).

Poređenjem ova dva hibrida preko GGE biplota, uočava se da hibrid ZP 552b bolje podnosi nešto nepovoljnije uslove proizvodnje, jer je preporučen za gajenje na lokalitetima Pančevo i Požarevac u obe proizvodne godine, te u okruženju ZP19. Sa druge strane, ZP 6006b zahteva optimalne uslove za ostvarivanje visokog prinosa, te se pokazao boljim na

takvim lokalitetima: Bačka Topola i Bečej u obe proizvodne godine, te u okruženju ZP20 (Grafik 19).



Grafik 19. Komparativna analiza prinosa hibrida bele boje zrna – ZP 552b i ZP 6006b.

Iako je ZP 6006b prosečno ostvario 410 kg ha viši prinos zrna u poređenju sa ZP 552b, u okruženju PA19 uočen je visok procenat poleglih i slomljenih biljaka hibrida ZP 6006b (36,42%) koji je doveo do drastičnog pada u prinosu ($7,5 \text{ t ha}^{-1}$; Tabela 9) u odnosu na ZP 552b koji je na istoj lokaciji ostvario prinos od $10,24 \text{ t ha}^{-1}$. Na osnovu ovih rezultata, ZP 552b bi imao prednost u preporuci za gajenje i distribuciju na tržištu. S obzirom da su pomenuti ogledi izvedeni 2019. i 2020. godine kada su oba hibrida bila u procesu ispitivanja, do 2024. se ovo potvrdilo tako što se ZP 552b i dalje nalazi u ponudi ZP hibrida, dok je ZP 6006b isključen iz prodaje.

Uopšteno govoreći, uočeno je da je sklop biljaka u svim posmatranim okruženjima u 2019. godini u poređenju sa 2020. godinom bio lošiji. Ovo je naročito izraženo u okruženjima PO19 i PA19 (Tabela 14), što je i očekivano, budući da su Požarevac i Pančevo lokaliteti podložniji uticajima spoljašnje sredine. U 2020. godini, procenat poleglih i slomljenih biljaka na ova dva lokaliteta bio je među najnižima što dalje potvrđuje da je ova godina bila optimalna sa aspekta proizvodnje kukuruza (Radičević, et al., 2020).

Tabela 14. Procenat pleglih i slomljenih biljaka u odnosu na pun sklop biljaka po okruženjima za sve ispitivane hibride.

Okruženje	Pogle i slomljene biljke (%)
ZP19	2,40
PO19	15,07
BC19	6,55
BT19	4,60
PA19	14,39
ZP20	1,57
PO20	1,60
BC20	4,78
BT20	3,00
PA20	1,35

Posmatrajući prosečan udeo pleglih i slomljenih biljaka na nivou hibrida, najviši procenat je zabeležen kod hibrida ZP 5089 (11,18%) (Tabela 11), dok je najniži imao hibrid ZP 707. Kako je prethodno navedeno, lošiji sklopovi biljaka zabeleženi su u 2019. godini. Osim hibrida ZP 6006b, ekstremno visok procenat pleglih i slomljenih biljaka zabeležen je i kod hibrida ZP 427, ZP 500, ZP 5089, ZP 5090, ZP 606, ZP 7777 i ZP 552b. Sve ekstremne vrednosti zabeležene su 2019. godine, za sve pomenute hibride samo u jednom okruženju i u samo jednom ponavljanju.

SNP analiza roditeljskih komponenti ZP 6006b, otkrila je veoma nisku genetičku distancu između L76L007 i L76L023 (0,077) koje čine majčinsku komponentu. Istovremeno, L76L007 predstavlja i očinsku komponentu ZP 552b. Vrednost GD između dve linije (R-802-B-37-7 i L76B006) koje čine majčinsku komponentu ZP 552b je iznosila je nešto višu vrednost od 0,130. Obzirom da oba hibrida bele boje zrna dele istu komponentu (L76L007) razlog za sklonost ka lomu i poleganju hibrida ZP 6006b treba tražiti u očinskoj komponenti (L76B061), što je kao takvu isključuje iz dalje upotrebe u programima selekcije. Analiza vrednosti GD između roditelja koji čine ZP 552b i ZP 6006b je, takođe, otkrila višu GD između roditelja hibrida ZP 6006b (0,432 i 0,428), sa jedne, odnosno hibrida ZP 552b (0,414 i 0,405). Imajući u vidu da vrednosti GD između svih roditeljskih komponenti ispitivanih hibrida variraju između 0,410–0,463, dobijeni rezultat za ZP 552b otkriva da postoji visoka korelacija između visokih vrednosti GD-a sa jedne strane i visokog prinosa sa druge strane, ali da korelacija nije jedinična.

6.3.2.3. Hibridi FAO 700–800

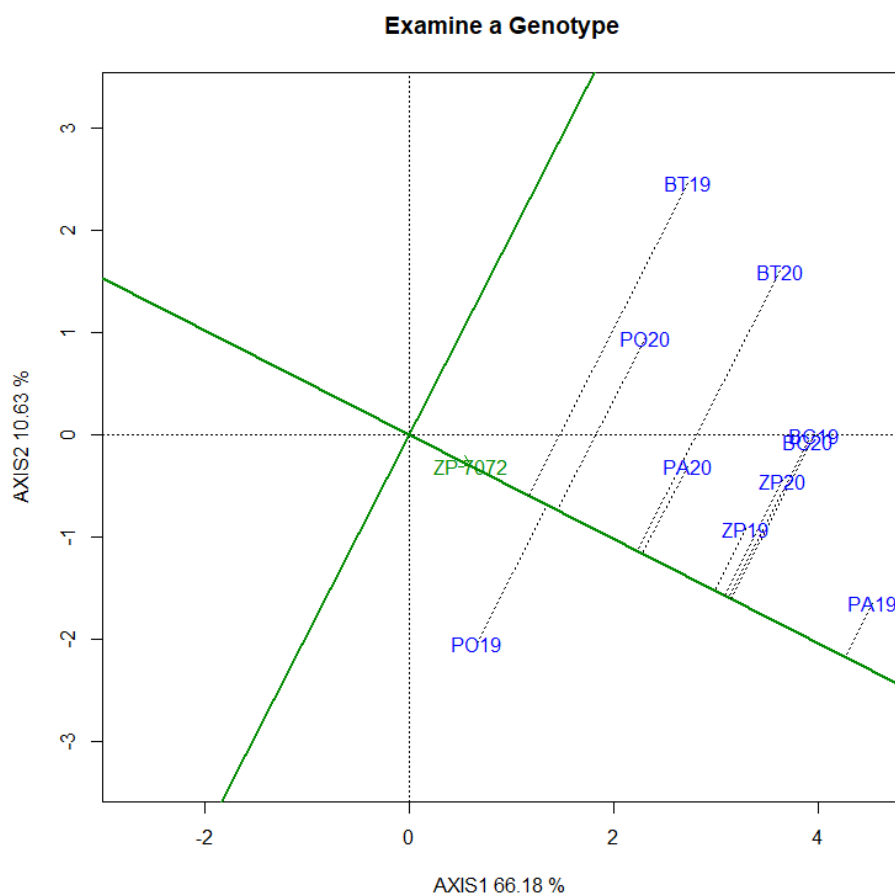
U ovom istraživanju, u okviru FAO grupa zrenja 700 i 800 ispitivani su sledeći hibridi: ZP 7072, ZP 707 (kao predstavnici FAO grupe 700), ZP 7777 i ZP 7357 (kao predstavnici FAO grupe 800). Iako se radi o hibridima različitih grupa zrenja, budući da im je namena ista (za berbu u klip i silažu), u ovom radu će biti posmatrani i upoređivani zajedno.

Kao standardni hibrid uzet je hibrid ZP 7777, hibrid novije generacije registrovan 2019. godine. Prosečan ostvareni prinos zrna ovog hibrida na svim lokalitetima i u obe proizvodne sezone bio je 12,38 t ha⁻¹ (Tabela 9). Ovo je najniži ostvareni prinos zrna u okviru

FAO grupa 700–800, koji je ujedno ispod proseka koji su ostvarili svi hibridi srednje kasnih i kasnih FAO grupa zrenja ($12,68 \text{ t ha}^{-1}$). Preostala tri hibrida ostvarila su viši prinos zrna: ZP 707 $12,78 \text{ t ha}^{-1}$, ZP 7357 $12,81 \text{ t ha}^{-1}$, i ZP 7072 sa ostvarenim prosečnim prinosom zrna od $13,24 \text{ t ha}^{-1}$. Pored toga što je prinos zrna ZP 7072 bio najviši, on se jedini statistički značajno razlikovao od prinosa standardnog hibrida ZP 7777. Međutim, što se tiče kvaliteta silaže, prednost treba dati ostalim spomenutim hibridima ovih FAO grupa zrenja, usled visokog procenta svarljivosti suve materije i niskog udela lignoceluloznih vlakana (Nikolić, et al., 2022; Milovanović, et al., 2024). U pogledu *in vitro* svarljivosti i sadržaja suve materije, ovaj hibrid je najviše varirao.

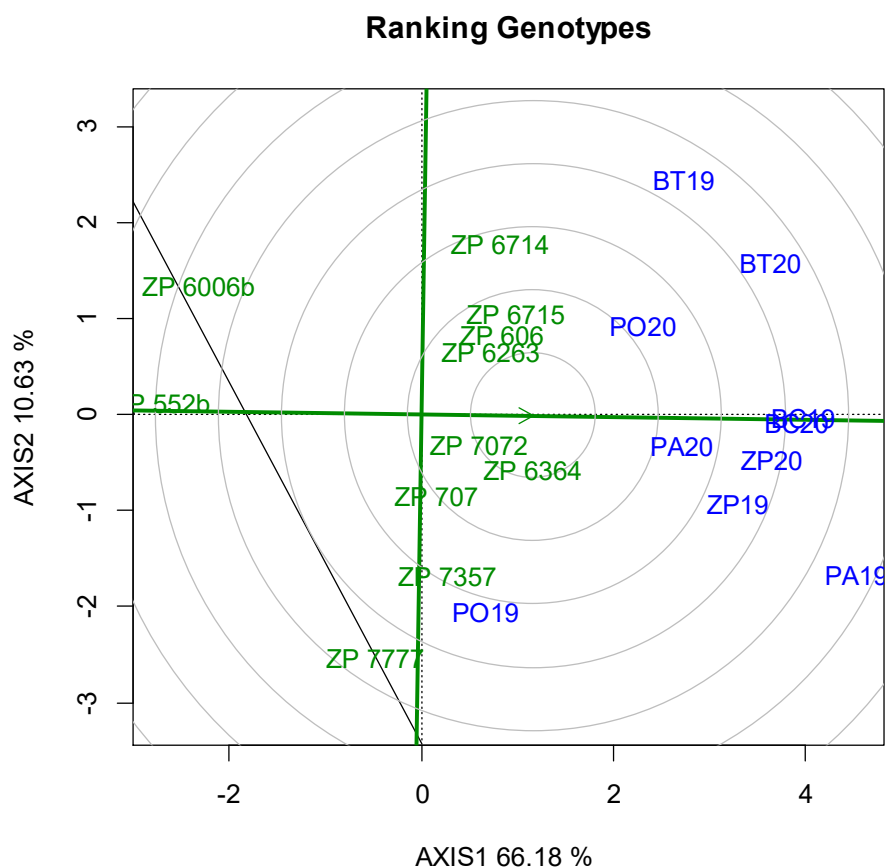
Uvidom u GGE biplot (Grafik 14) uočava se da je jedino hibrid ZP 7777 lociran sa leve strane vertikalne linije koja prolazi kroz koordinatni početak biplota. Ostali hibridi ovih FAO grupa nalaze se sa desne strane, što znači da su ostvarili prinose zrna iznad proseka svih posmatranih hibrida. Hibrid ZP 7072 nalazi se u neposrednoj blizini koordinatnog početka biplota, što ukazuje na visoku adaptabilnost u pogledu na posmatrano svojstvo (prinos zrna) (Kona, et al., 2024).

GGE biplot hibrida ZP 7072 (Grafik 20) potvrđuje da je ovaj hibrid adaptiran na različite uslove gajenja i da se može preporučiti za uzgajanje na svim ispitivanim lokalitetima. Na prvom mestu, preporuka se odnosi na lokalitete Pančevo, Bečej i Zemun Polje. Iako je i na lokalitetima Bačka Topola i Požarevac ovaj hibrid ostvario dobre rezultate, varijabilnost prinosa je bila nešto viša u obe proizvodne sezone.



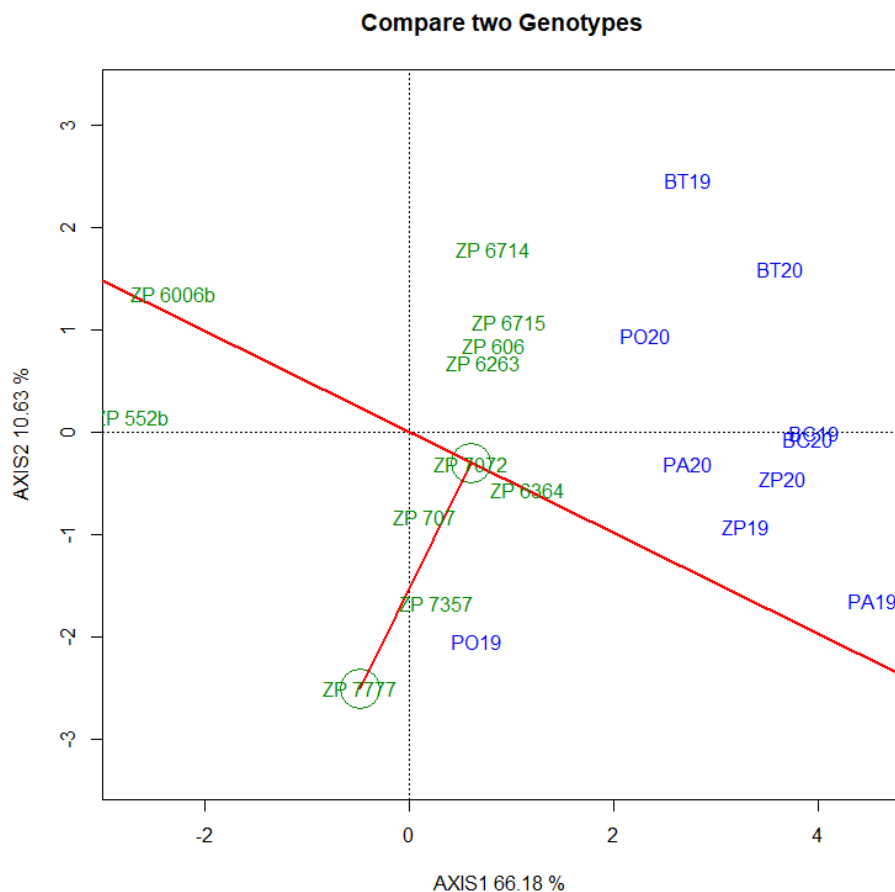
Grafik 20. Biplot analiza prinosa zrna hibrida ZP 7072.

Dalje, hibrid ZP 7072 je prepoznat kao idealan hibrid među svim hibridima srednje kasnih i kasnih FAO grupa zrenja (FAO 600–800) (Grafik 21). Prema definiciji, jedan idealan genotip treba da ima natprosečan prinos zrna koji je veoma stabilan u svim okruženjima (Yan & Tinker, 2006). Ne samo da se ZP 7072 nalazi u blizini zelene strelice koja označava idealan genotip, već se nalazi i nedaleko od AEC što označava visoku stabilnost prinosa. Osim ZP 7072, u istom koncentričnom krugu sa hipotetičkim idealnim genotipom nalazi se i hibrid ZP 6364 što takođe potvrđuje vrhunske performanse i ovog hibrida u svim posmatranim okruženjima.



Grafik 21. Biplot analiza rangiranja genotipova u odnosu na „idealni“ genotip u okviru FAO grupa zrenja 600–800.

Dalje, poređenjem performansi hibrida ZP 7072 sa standardnim hibridom ZP 7777, može se dati preporuka o gajenju ZP 7072 u skoro svim ispitivanim okruženjima, sa izuzetkom okruženja PO19 (Grafik 22). Ovo je u skladu sa prethodno navedenim. Kako je PO19 jedno od okruženja sa najnižim prosečnim prinosom zrna, za uzgajanje hibrida kasnih grupa zrenja u lošijim uslovima proizvodnje, prednost se može dati standardnom hibridu ZP 7777.



Grafik 22. Komparativna biplot analiza prinosa zrna hibrida ZP 7072 u odnosu na standardni hibrid ZP 7777.

Pomenuta slabija adaptiranost na nepovoljnije uslove proizvodnje nije nedostatak hibrida ZP 7072, već generalna karakteristika hibrida kasnijih FAO grupa zrenja (Ivan, et al., 2023). Sa vrednošću $b_i = 1,2399$, hibrid ZP 7072 je bolje prilagođen na bolje uslove proizvodnje (Tabela 8), te je ocenjen kao adaptabilan (Grafik 2). Nasuprot njemu, kod ostalih hibrida FAO grupa 700–800 zabeležena je vrednost $b_i < 1$, što ukazuje da su ovi hibridi adaptirani i na nešto nepovoljnije uslove proizvodnje. Ako se uzme u obzir i S^2d_i vrednost, ovi hibridi se svrstavaju među hibride niže stabilnosti prinosa koji su adaptirani na nepovoljne uslove proizvodnje. Na osnovu CV vrednosti i prosečnog ostvarenog prinosa zrna, hibridi ZP 7072 i ZP 707 ocenjeni su kao stabilni hibridi dobrih performansi. Za razliku od njih, ZP 7357 je ocenjen kao hibrid dobrih performansi, ali usko adaptiran za određena područja (Changizi, et al., 2014). Konačno, usled niskog prosečnog prinosa zrna i visoke vrednosti CV, ZP 7777 se ne preporučuje za proizvodnju zrna.

Majčinske linije hibrida ZP 707 i ZP 7072 (L77B037 i L77B052) su sestrinske linije veoma uske genetičke osnove. Između ove dve linije, zabeležena je najniža vrednost genetičke distance (0,023). Zajedno sa L77B043 (majčinska linija ZP 7357), pripadaju BSSS heterotičnoj grupi. Očinska komponenta sva tri navedena hibrida je linija L 325/75-2 (LSC). Stoga, razlike u performansama treba tražiti u majčinskim linijama. Majčinska komponenta hibrida ZP 707, linija L77B037, elitna je linija koja ostvaruje visok prinos zrna čak i tokom nepovoljnih sezona što bi je moglo okarakterisati kao tolerantnu na abiotički stres (Dragičević, et al., 2020). Iako hibrid starije generacije Instituta za kukuruz „Zemun Polje“,

ZP 707 i dalje uživa veliku potražnju. Uzevši u obzir da je hibrid ZP 7072 nadmašio ZP 707 po ostvarenim prinosima zrna, može se reći da linija L77B052 predstavlja unapređenje postojeće genetike, te da predstavlja perspektivnu liniju za dalje programe oplemenjivanja. Međutim, ako je cilj oplemenjivanja stvaranje hibrida za proizvodnju silaže, fokus se može usmeriti ka L77B043, majčinskoj komponenti hibrida ZP 7357, budući da ovaj hibrid uz ZP 707 i standardni hibrid ZP 7777 daje kvalitetniju silažu u poređenju sa ZP 7072 (Nikolić, et al., 2022; Milovanović, et al., 2024).

Sa druge strane, majčinska linija standardnog hibrida ZP 7777 (L76L060) pripada LSC heterotičnoj grupi, dok je očinska komponenta L-335/99 pripadnik BSSS grupe. Zabeležena GD vrednost između ove dve linije je visoka (0,46). Međutim, visoka vrednost GD može biti dobar pokazatelj heterozisa, ali ne nužno (Dermail, et al., 2020; Würschum, et al., 2023). Linija L-335/99 je uključena u programe oplemenjivanja Instituta za kukuruz „Zemun Polje“ mahom kao majčinska komponenta hibrida FAO grupa zrenja 400–600. Ovo je dokazano elitna inbred linija dobrih opštih kombinacionih sposobnosti i karakteriše je tolerantnost prema suši tokom kritičnih faza rasta za potrebe prema vodi (Dodig, et al., 2019). Prema istraživanju Babić, et al. (2024), koje je obuhvatilo neke od linija i hibrida korišćenih i u ovom radu, očinske linije nisu značajno uticale na variranje komponenti prinosa. Stoga, može se preporučiti reselekcija majčinske linije L76L060 ili njeno isključivanje iz daljih programa oplemenjivanja.

6.3.3. Rangiranje genotipova u odnosu na idealan genotip

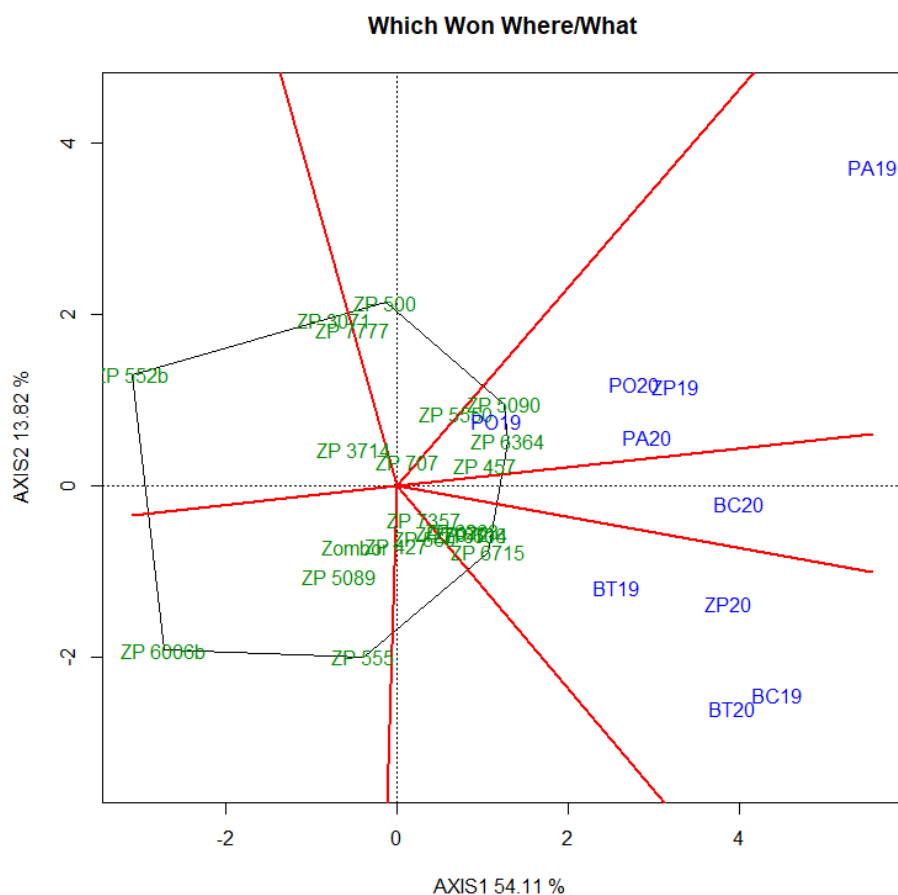
Jedan idealan genotip treba da ima natprosečan prinos zrna koji je veoma stabilan u svim okruženjima (Yan & Tinker, 2006). Budući da proizvođači često odlučuju o izboru hibrida na osnovu mehanizacije kojom raspolažu, tj. da li će berbu sprovesti u zrnju ili klipju (Đurić, 2023), u prethodnoj sekciji rangiranje u odnosu na idealan genotip je izvršeno u okviru hibrida ranih i srednje ranih FAO grupa zrenja koji se najčešće direktno kombajniraju u zrnju (FAO 300–500, Grafik 9), tj. srednje kasnih i kasnih FAO grupa zrenja koji se uglavnom beru u klipju (FAO 600–800, Grafik 21). Kada se rangiranje u odnosu na idealan genotip izvrši poređenjem svih testiranih hibrida, dobija se drugačiji rezultat (Grafik 23).

Važno je napomenuti da što je manji krug oko idealnog genotipa koji sadrži okruženje, to su performanse i stabilnost idealnog genotipa u tom okruženju veće. Okruženje PO19 će verovatno biti idealno okruženje za genotip ZP 457 u smislu postizanja visokog prosečnog prinosa zrna i dobre stabilnosti. U ovom okruženju, ZP 457 je ostvario prinos od 12,7 t ha⁻¹. Budući da je u ovom okruženju ostvaren jedan od najnižih prosečnih prinosa zrna (11,6 t ha⁻¹), ovo govori u prilog tvrdnji da je ZP 457 hibrid dobro prilagođen nepovoljnim uslovima proizvodnje i da su prinosi zrna koji ostvaruje stabilni.

6.3.4. Ko je gde pobednik (*Which-Won-Where*)

Biplot „Ko je gde pobednik“ (*Which-Won-Where*), omogućava otkrivanje najboljeg genotipa za svako ispitivano okruženje (Frutos, et al., 2013). Kod ovog biplota, poligon se formira povezivanjem genotipova koji su najudaljeniji od koordinatnog početka biplota, tako da su svi ostali genotipovi unutar poligona. Takođe, ucrtane su linije upravne na svaku stranicu poligona, koje predstavljaju skup hipotetičkih okruženja u kojima dva genotipa koja definišu tu stranu imaju jednake performanse (Yan, et al., 2007). One dele biplot u nekoliko sektora. Najbolji genotip za svaki sektor je onaj koji je lociran na uglu poligona, i obično se nalazi unutar sektora, ali ne nužno (Yan, 2002).

Može se videti da je svih deset okruženja svrstano u tri sektora (Grafik 24), na vrhovima čijih uglova se nalaze genotipovi ZP 5090, ZP 6364 i ZP 6715. Okruženja ZP19, PA19, PO19, PA20 i PO20 pripadaju sektoru u na čijem je vrhu genotip ZP 5090. Ovo znači da je ZP 5090 najbolji genotip za pomenuta okruženja, tačnije za lokalitete Pančevo i Požarevac, dok se takođe pokazao kao najbolji izbor i za Zemun Polje u prvoj ispitivanoj godini. Dalje, hibrid ZP 6715 je određen kao najbolji izbor za BT19, BC19, ZP20 i BT20. Stoga se može zaključiti da je ovaj hibrid pogodan za uzgajanje u uslovima Bačke Topole, dok je potencijalno dobar izbor i za uslove Zemun Polja i Bečeja, ali na ovim lokalitetima faktor godine može imati značajniji uticaj na njegov performans. Konačno, iako je ostvario najviši prosečan prinos zrna u svim ispitivanim okruženjima, hibrid ZP 6364 određen je kao najbolji hibrid za svega jedno okruženje – BC20. Specifičnost BC20 je ta da u ovom okruženju statistički nije uočena razlika između ostvarenih prinosa zrna među svim ispitivanim hibridima (izuzev hibrida belog zrna, ZP 552b i ZP 6006b). Ovo dalje navodi da je ovo okruženje u kome vladaju optimalni uslovi za proizvodnju kukuruza, i da u takvim uslovima hibrid ZP 6364 ostvaruje izvanredne rezultate.



Grafik 24. „Ko je gde pobednik“ (*Which-Won-Where*) biplot za ispitivane hibride i okruženja.

Kako navodi Yan (2002), zaključci izvedeni na osnovu biplota „ko je gde pobednik“ mogu biti velikim delom, mada ne u potpunosti, potvrđeni na osnovu originalnih podataka (Tabela 9). Razlog ovome leži u činjenici da je svega ~68% $G \times E$ interakcije objašnjeno biplotima, a ne 100%, kao što je i ranije naglašeno.

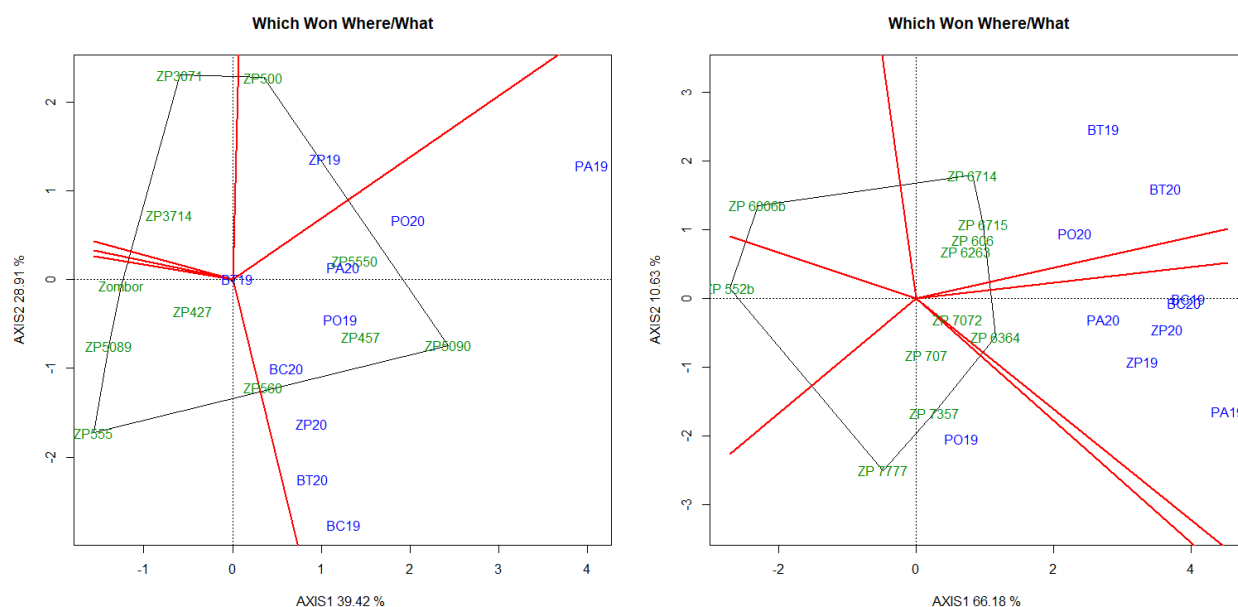
Pored prepoznavanja koji je hibrid ostvario najbolje performanse u kom okruženju te davanja preporuka za dalje gajenje, „ko je gde pobednik“ biplot je koristan u prepoznavanju potencijalnih megaokolina među ispitivanim lokalitetima. Naime, megaokolina predstavlja grupu lokaliteta koji dosledno dele najbolji skup genotipova tokom višegodišnjeg ispitivanja (Yan & Rajcan, 2002). Kako je prethodno navedeno, megaokolina za kukuruz opisuje područje gde različiti hibridi kukuruza pokazuju slično rangiranje prema prinosu zbog sličnih uslova uzgajanja (Radan, 2016).

Sa aspekta oplemenjivača, poznavanje megaokolina je neophodno kako bi se umanjila interakcija $G \times E$, a informacije o megaokolini se takođe mogu koristiti za reorganizaciju ekoloških zona za konkretan genotip, planiranje programa proizvodnje specifičnih za lokalitet, isključivanje nepouzdatih testnih lokaliteta i maksimiziranje korišćenja resursa (Das, et al., 2019). Poznavanjem megaokolina oplemenjivač može prikupiti iste podatke o performansu genotipa sa manjeg broja lokaliteta, čime se mogu smanjiti troškovi testiranja (Yan & Tinker, 2006; Yan, et al., 2007).

Na osnovu ovog biplota, potvrđeno je da se mogu izdvojiti dve potencijalne megaokoline: prva koju sačinjavaju Pančevo i Požarevac, i druga koju čine Bačka Topola i Bečej. Da bi se lokalitet Zemun Polje uvrstio u neku od ove dve megaokoline, ili izdvojio kao zasebna, potrebna su dodatna istraživanja.

Kao što je ranije navedeno, zajedničko grupisanje lokaliteta na biplotu je preduslov za definisanje megaokolina, ali nije dovoljno (Yan, et al., 2007). Da bi se skup lokaliteta označio kao megaokolina, neophodno je da se tokom višegodišnjih ispitivanja sa istim genotipovima i na istim lokalitetima ponavlja isti „ko je gde pobednik“ obrazac. Stoga, da bi se hipoteza o potencijalnim megaokolinama dokazala, neophodna su dalja istraživanja (Yan & Rajcan, 2002; Yan & Kang, 2003).

Ukoliko se posmatraju hibridi ranih i srednje ranih grupa zrenja (FAO 300–500) zasebno od hibrida srednje kasnih i kasnih grupa zrenja (FAO 600–800), „Ko je gde pobednik“ biploti daju sledeće rezultate (Grafik 25):



Grafik 25. „Ko je gde pobednik“ biplot za sva ispitivana okruženja i (a) hibride FAO grupa zrenja 300–500; tj. (b) hibride FAO grupa zrenja 600–800.

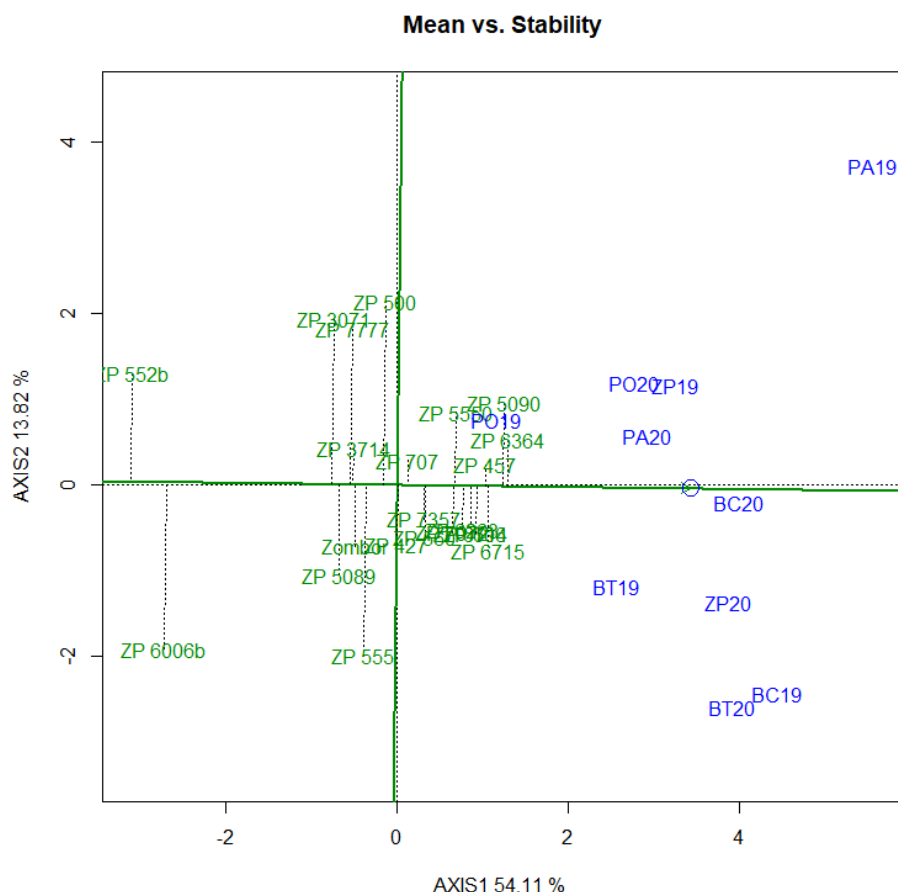
Na osnovu Grafika 25a, može se zaključiti da je ZP 500 najbolji izbor za okruženje ZP19. Osim ovog slučaja, ZP 5090 je bio najbolji izbor za sva ostala okruženja. Na prethodnom biplotu, okruženje ZP19 se nalazilo u sektoru u kom je ZP 5090 bio najbolji hibrid. Međutim, uvidom u Tabelu 9, uočava se da je ZP 500 zapravo ostvario viši prinos zrna u pomenutom okruženju u odnosu na ZP 5090 ($12,15 \text{ t ha}^{-1}$ prema $12,05^{-1}$). Međutim, među ostvarenim prinosima zrna ovih hibrida ne postoji statistički značajna razlika u okruženju ZP19. Budući da se sva ostala okruženja nalaze u sektoru u kome je najbolji hibridi ZP 5090, ovo navodi na zaključak da se ovaj hibrid generalno preporučuje kao optimalni hibrid za gajenje u svim regionima značajnim za proizvodnju kukuruza kada je reč o hibridima za berbu u zrnu.

„Ko je gde pobednik“ biplot hibrida FAO grupa zrenja 600–800 koji su generalno namenjeni za berbu u klipu predstavljen je na Grafiku 25b. Biplot je podeljen u sedam

sektora, od čega se testna okruženja nalaze u svega tri. U sektoru u kome je najbolji hibrid ZP 6714, nalaze se okruženja BT19, BT20 i PO20. U sektoru u kome je najbolji hibrid ZP 7777, nalazi se jedino okruženje PO19. Sva ostala okruženja (tj. lokaliteti Zemun Polje, Bačka i Pančevo) nalaze se u sektoru u kome je „pobednik“ hibrid ZP 6364. Dakle, kada su u pitanju hibridi za berbu u klip, preporuka se može dati hibridu ZP 6364 na navedenim lokalitetima.

6.3.5. Prosečna vrednost naspram stabilnosti (*Mean vs Stability*)

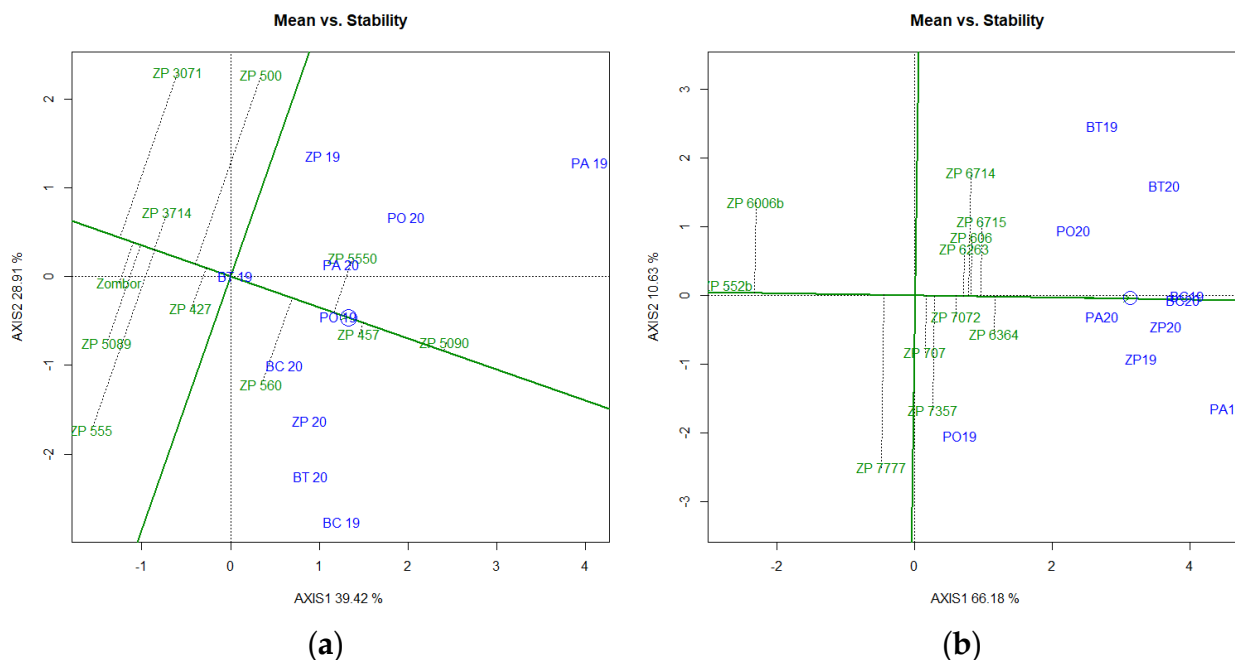
Unutar jedne megaokoline, genotipove bi trebalo oceniti i na osnovu prosečnih performansi, i na osnovu stabilnosti. Biplot prosečne vrednosti (u ovom slučaju prinosa zrna) naspram stabilnosti (Grafik 26) je AEC prikaz GGE biplota. AEA je usmerena ka višem prosečnom prinosu zrna u svim sredinama (Yan & Tinker, 2006). Stoga, hibrid ZP 6364 je ostvario najviši prosečan prinos zrna u svim okruženjima, praćen hibridima ZP 5090, ZP 6715, ZP 457, itd.; dok je ZP 552b ostvario naniži prosečan prinos zrna (ZP 3071 ukoliko se posmatraju samo hibridi standardne žute boje zrna).



Grafik 26. Biplot prosečne vrednosti naspram stabilnosti prinosa zrna ispitivanih hibrida.

AEC ordinata je normalna na AEA i ukazuje na veću varijabilnost, odnosno lošiju stabilnost u oba smera (Yan & Tinker, 2006). Što je marker genotipa bliže AEA, to je stabilniji prinos i obrnuto. Imajući to u vidu, prinos zrna hibrida ZP 500 je bio veoma nestabilan, dok je kod hibrida ZP 457 izražena visoka stabilnost prinosa.

Ukoliko se ovaj biplot formira zasebno za hibride ranih i srednje ranih FAO grupa zrenja (FAO 300–500), prvenstveno namenjenih za berbu u zrnu, a zasebno za hibride srednje kasnih i kasnih grupa zrenja (FAO 600–800), prvenstveno namenjenih za berbu u klipju, dobijaju se sledeći rezultati (Grafik 27):



Grafik 27. Biplot prosečne vrednosti naspram stabilnosti prinosa zrna ispitivanih hibrida u okviru (a) hibrida FAO grupa zrenja 300–500; (b) FAO grupa zrenja 600–800.

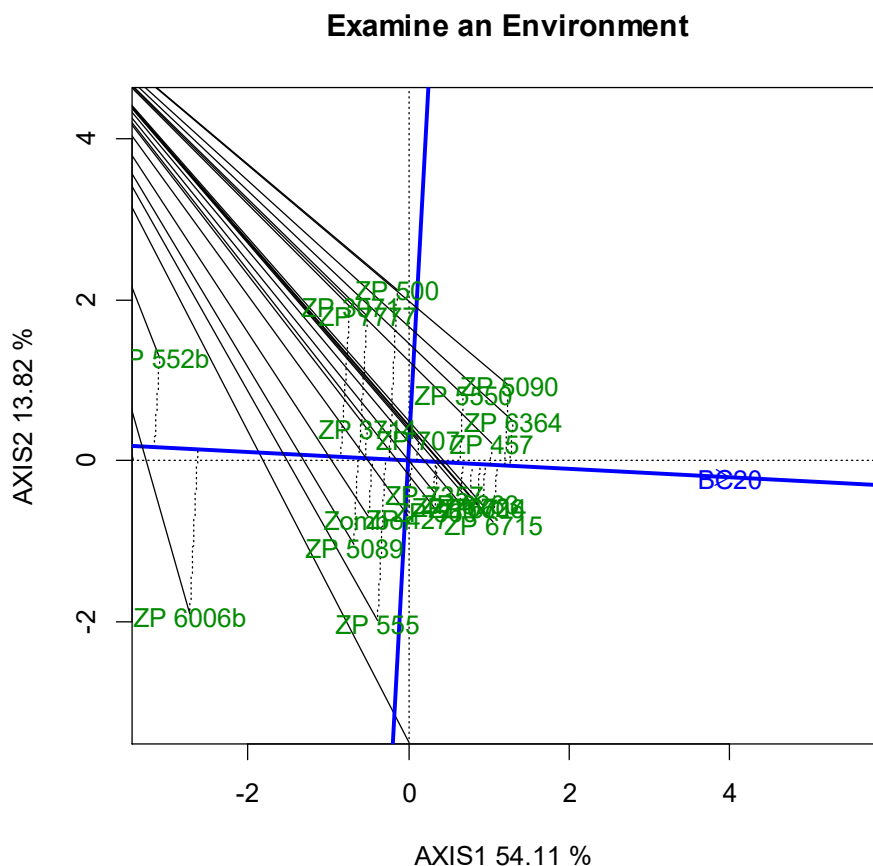
Na grafiku 27a uočava se da je ZP 5090 imao najviši prosečan prinos zrna u svim sredinama, dok je ZP 3071 imao najniži. Dalje, ne samo da je ZP 5090 ostvario najviši prosečan prinos, već je i njegov prinos bio najstabilniji pošto se praktično nalazi na AEA. Nasuprot njemu, ZP 3071 je bio jedan od najnestabilnijih hibrida, posle hibrida ZP 555 i ZP 500.

Ukoliko se posmatraju hibridi srednje kasnih i kasnih FAO grupa zrenja (Grafik 27b), biplot prosečne vrednosti naspram stabilnosti izgledaće slično kao biplot svih ispitivanih hibrida (Grafik 26). ZP 6364 se ponovo ističe kao hibrid sa najvišim prosečnim prinosom. Pored toga, stabilnost ostvarenog prinosa je izrazito visoka. Pored ZP 6364, po stabilnosti prinosa ističe se još i hibrid ZP 7072, čiji je prinos iako stabilniji, niži u poređenju sa ZP 6364. Nasuprot njima, genotipovi koji su ostvarili najniži prosečan prinos zrna su hibridi belog zrna (ZP 552b i ZP 6006b). Ovo je očekivano budući da hibridi belog zrna uglavnom daju niže prinose u odnosu na svoje parnjake žutog zrna (Maqbool, et al., 2019). Međutim, važno je istaći da je prinos hibrida ZP 552b iako najniži, izrazito stabilan što je važno sa aspekta gajenja u nepovoljnim uslovima. Među hibridima žute boje zrna, najniži ali i najnestabilniji prinos zrna ostvario je standardni hibrid ZP 7777. Budući da je analizom hibrida ove FAO grupe zrenja i ranije navedeno da su svi ostali hibridi te grupe imali bolje performanse u odnosu na ZP 7777, ovo je jasan pokazatelj da su ga novostvoreni hibridi nadmašili u pogledu visine i stabilnosti prinosa, te da se ovaj hibrid može postepeno zameniti novostvorenim hibridima na tržištu. Potencijalna namena hibrida ZP 7777 ostaje gajenje za dobijanje silaže, budući da je silaža dobrog kvaliteta (Nikolić, et al., 2022; Milovanović, et

Od 10 testnih okruženja, PA19 je najdiskriminativnije (najinformativnije), zatim BC19 i BT20, dok je PO19 najmanje diskriminativno. Okruženja čiji su vektori kratki, poput PO19, nisu toliko korisna jer pružaju malo diskriminativnih informacija o performansu genotipova. Dalje, takva testna okruženja, koja konstantno imaju nisku diskriminativnu sposobnost (tj. nisu informativna) treba izbegavati u multilokacijskim ogledima (Akinwale, et al., 2014), što zauzvrat može pomoći u smanjenju troškova testiranja fokusiranjem na pogodnija okruženja.

Ako je okruženje i informativno i reprezentativno, pogodno je za odabir opšte prilagođenih genotipova (Gemechu, et al., 2022). U sprovedenom istraživanju, okruženje koje najbolje odgovara ovoj definiciji je BC20, koje na biplotu zaklapa veoma oštar ugao sa prosečnim okruženjem, a poseduje jedan od najdužih vektora okruženja (odmah nakon PA19, BC19, i BT20).

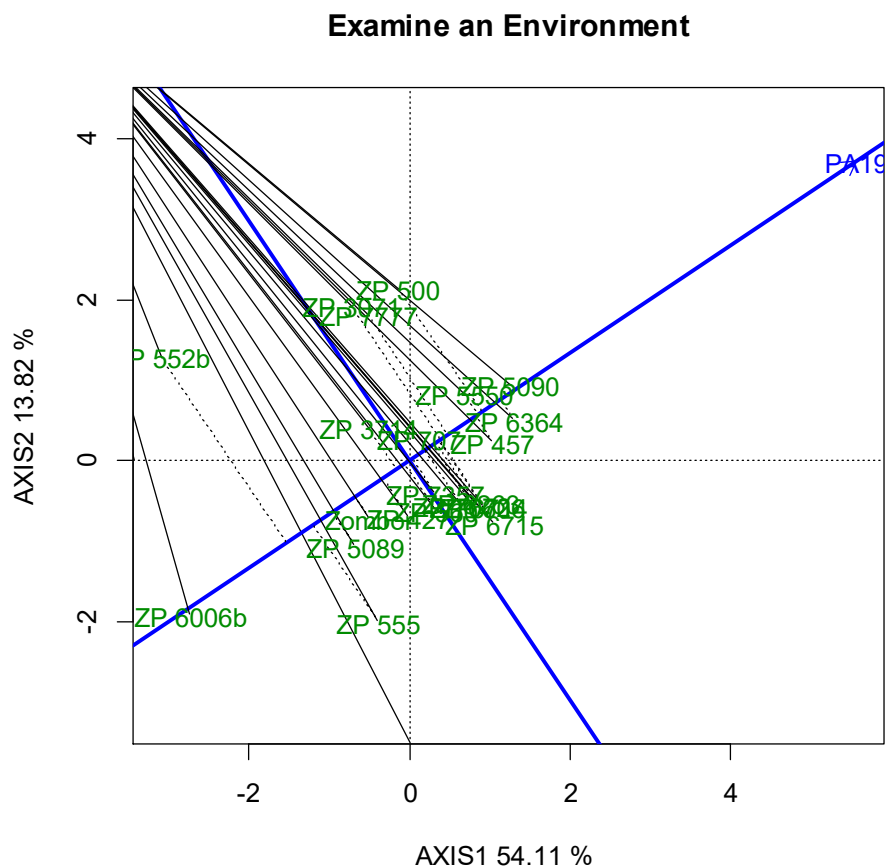
Na osnovu biplota za pomenuto okruženje (BC20), kao optimalni hibrid za ovo okruženje izdvaja se hibrid ZP 6364. Ne samo da je ovaj hibrid ostvario najviši prinos zrna na BC20, već je njegov prinos i stabilan o čemu govori kratak vektor genotipa na biplotu (Grafik 29). Slede ga hibridi ZP 5090, ZP 6715 i ZP 457. Kako je prethodno navedeno, u okruženju BC20 nije uočena statistički značajna razlika između ostvarenih prinosa zrna među ispitivanim hibridima (izuzev hibrida belog zrna, ZP 552b i ZP 6006b). Ukoliko se izostave hibridi bele boje zrna, najniži prinos zrna je ostvario hibrid ZP 3071, koji je pritom bio i nestabilan. Nestabilnost prinosa zrna u ovom okruženju primećena je i kod hibrida ZP 500 i ZP 555. Na osnovu svega navedenog, hibridi ZP 6364, ZP 5090, ZP 6715 i ZP 457 mogu se smatrati hibridima opšte prilagođenosti na različite uslove gajenja budući da su ostvarili visoke prinose zrna na lokaciji BC20 koju odlikuje informativnost i reprezentativnost.



Grafik 29. Biplot analiza ostvarenih prinosa zrna u okruženju BC20.

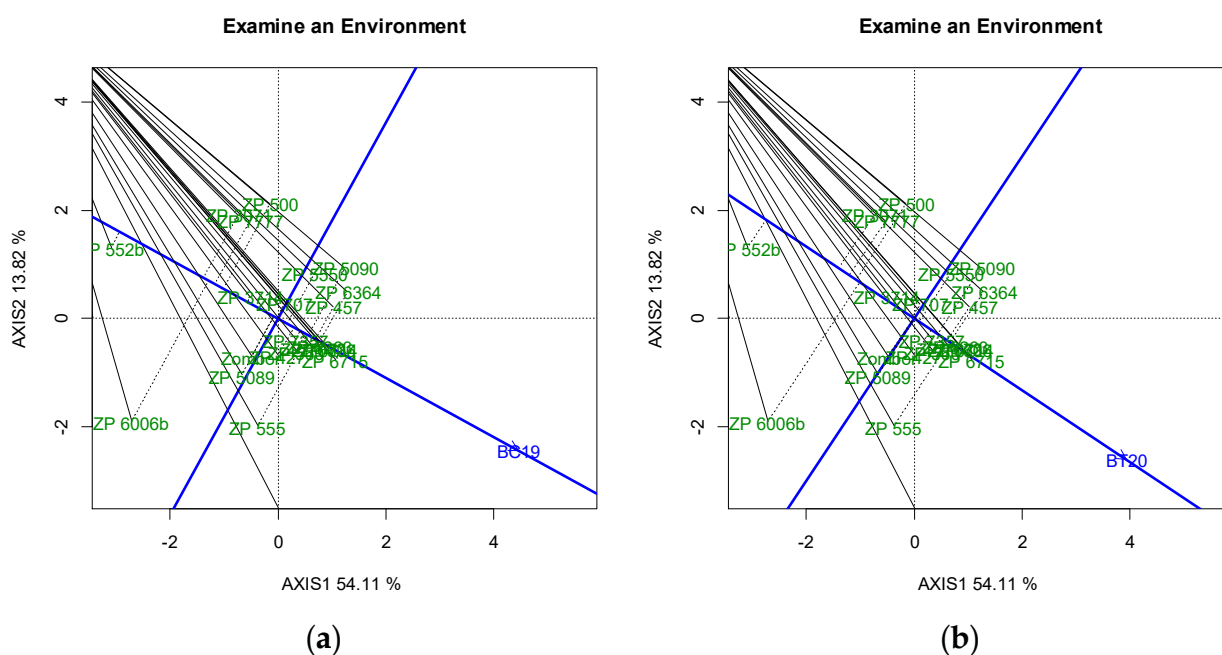
Sa druge strane, diskriminatorna, ali nereprezentativna okruženja (npr. PA19, BT20, BC19), korisna su za odabir specifično prilagođenih genotipova ako se testna okruženja mogu razdvojiti u megaokoline (Al-Naggar, et al., 2020). Ukoliko bi se izdvojile dve megaokoline, kao što je spomenuto u analizi biplota „Ko je gde pobjednik“, to bi značilo da bi se najbolji hibrid u okruženju PA19 mogao preporučiti za gajenje u megaokolini koju sačinjavaju lokaliteti Pančevo i Požarevac, tj. za lokalitete istočne Srbije gde se u višegodišnjem proseku tradicionalno beleži manja količina padavina. Isto tako, najbolji hibrid u okruženjima BT20 i BC19 mogao bi se smatrati specifično prilagođenim na uslove megaokoline koju sačinjavaju Bačka Topola i Bečej, tj. za uslove oblasti Bačke Vred napomenuti i da, ako je ciljano okruženje diskriminatorno i nereprezentativno, i kao takvo predstavlja jednu megaokolinu, ono može biti korisno za otklanjanje nestabilnih genotipova (Yan & Tinker, 2006; Mare, et al., 2017).

Grafik 30 predstavlja biplot okruženja PA19. Može se uočiti da je najbolji performans ostvario hibrid ZP 5090 čija je stabilnost prinosa ujedno bila veoma izražena. Dalje, hibrid ZP 6364 je takođe ostvario visok i stabilan prinos zrna, praćen hibridom ZP 500 čiji je prinos nestabilniji. Sa druge strane, izuzev hibrida bele boje zrna koji su ostvarili najniže prinose zrna (važno je napomenuti da je stabilnost prinosa ZP 6006b u ovom okruženju bila veoma izražena), lošiji performans zabeležen je i kod hibrida ZP 555, ZP 5089, Zombor, ZP 427 i ZP 3714. Prinosi zrna ovih hibrida, iako ispod proseka, bili su stabilni što jeste karakteristika hibrida ranijih FAO grupa zrenja (Đurović, et al., 2014; Mokrienko & Kornienko, 2024).



Grafik 30. Biplot analiza ostvarenih prinosa zrna u okruženju PA19.

S obzirom da okruženja BC19 i BT20 mogu biti pouzdana za odabir usko adaptiranih genotipova na uslove potencijalne megaakoline koju sačinjavaju lokaliteti Bečej i Bačka Topola, biploti ova dva okruženja su predstavljani Grafikom 31.

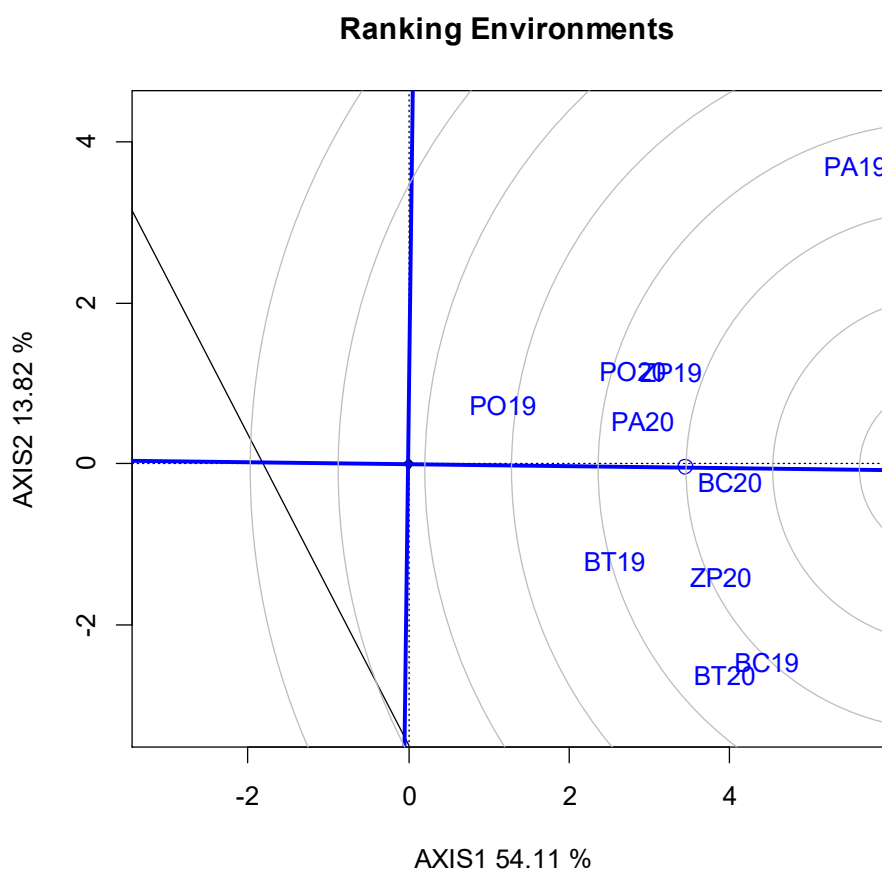


Grafik 31. Biplot analiza ostvarenih prinosa zrna u okruženjima (a) BC19; (b) BT20.

Performanse hibrida u ova dva okruženja su slične. Kao najprinosniji hibrid izdvojio se ZP 6715 koji je takođe pokazao i visoku stabilnost prinosa. Ovo je u skladu sa analizom parametara stabilnosti, gde je za ovaj hibrid ustanovljena vrednost $b_i = 1,4958$ (Tabela 8). Ovakva vrednost ukazuje da je ovo hibrid adaptiran na dobre proizvodne uslove. Slede ga hibridi koji formiraju gusto zbijeni klaster (ZP 560, ZP 606, ZP 6263, ZP 6714, ZP 6715, ZP 7072, i ZP 7357), među kojima su svi ostvarili natprosečno visoke prinose zrna uz visoku stabilnost. U oba okruženja, ispodprosečne prinose zrna ostvarili su hibridi FAO grupe 300, ZP 500, ZP 5089 i ZP 7777, kao i hibridi bele boje zrna. Pored niskih prinosa zrna, uglavnom je izražena i nestabilnost prinosa, izuzev kod ZP 3714 i ZP 552b.

6.3.7. Rangiranje okruženja u odnosu na idealno okruženje

Idealno testno okruženje treba da bude najreprezentativnije za ciljanu sredinu, ali i najdiskriminativnije (informativno) (Frutos, et al., 2013). U biplotu (Grafik 32), idealno okruženje se nalazi u centru koncentričnih krugova i označeno je strelicom na AEA u pozitivnom smeru (najreprezentativnije). Idealno okruženje treba da ima visoku vrednost druge glavne komponente, PC2 (više moći da diskriminiše genotipove u smislu glavnog efekta genotipa) i nisku (apsolutnu) vrednost prve glavne komponente, PC1 (da bude reprezentativnije za sva okruženja) (Kebede, et al., 2023).



Grafik 32. Biplot rangiranja okruženja u odnosu na „idealno“ okruženje.

U idealnom okruženju, najbolji genotipovi adaptirani na ceo region se mogu lako identifikovati (Frutos, et al., 2013). Udaljenost od idealnog okruženja do početka biplota jednaka je dužini najdužeg vektora, tj. najinformativnijeg okruženja (Yan & Tinker, 2006). BC20 je okruženje najbliže idealnom i stoga je najbolje za selekciju genotipova prilagođenih za ceo region, dok je okruženje PO19 najlošije. Da bi se potvrdilo da je jedno okruženje idealno za odabir hibrida koji su opšte adaptirani, potrebna su višegodišnja istraživanja (Yan & Tinker, 2006).

Što je manji koncentrični krug koji sadrži okruženje, to više atributa deli sa našim idealnim okruženjem. Na primer, BC20 deli više atributa sa BC19 i ZP20, nego sa PO19. U prethodnoj sekciji prikazan je biplot za okruženje BC20, koje je izdvojeno kao idealno (Grafik 29).

Grafik 32 potvrđuje rezultate dobijene biplotom „Ko je gde pobednik“. U tom biplotu (Grafik 24) hibrid ZP 6364 je izdvojen kao najbolji hibrid upravo u okruženju BC20. Prinos i stabilnost ZP 6364 u ovom okruženju natprosečno su visoki. Budući da je svrha biplota za rangiranje okruženja u odnosu na idealno okruženje da lako identifikuje najbolje genotipove koji poseduju opštu adaptiranost, u tom smislu osim ZP 6364, izdvajaju se i hibridi: ZP 5090, ZP 6715, ZP 457. Specifičnosti ove lokacije su i ranije navedene. S obzirom da je utvrđeno da je ovo okruženje u kome vladaju optimalni uslovi za proizvodnju kukuruza, u takvim uslovima hibrid ZP 6364 i ostali navedeni hibridi ostvaruju izvanredne rezultate.

6.3.8. Analiza molekularnih markera posmatranih roditeljskih komponenti ispitivanih hibrida

U ovom radu je analizirano 29 roditeljskih komponenti ispitivanih hibrida. SNP analiza je pokazala pripadnost materijala određenim heterotičnim grupama kukuruza. Selekcioner se u svom programu oplemenjivanja oslanja na empirijske podatke dobijene iz njive koji razvrstavaju korišćeni materijal u određene heterotične grupe. Pravac oplemenjivanja kukuruza u privatnim kompanijama je uglavnom oslonjen na heterotični par BSSS vs. Non-BSSS (Barata & Carena, 2006; Kovačević, 2024), dok se u Institutu za kukuruz „Zemun Polje“ koristi najviše heterotični par LSC vs. Non-LSC (Čamdžija, et al., 2023). U okviru grupe Non-LSC, najčešće se spominju heterotične grupe BSSS i ID. Rezultati SNP analize pokazuju pripadnost korišćenog materijala ovim trima heterotičnim grupama.

SNP analiza i vrednosti genetičke distance su pokazali da se vrednosti GD korišćenog materijala kreću od 0,023–0,465 (Tabela 10), i u saglasnosti su sa pedigreeom i genetičkim poreklom ispitivanih linija.

Najniža vrednost GD (0,023) zabeležena je između linija L77B037 i L77B052. Obe navedene linije su majčinske komponente hibrida FAO grupe 700 (ZP 707 i ZP 7072, redom). Dalje, očinska komponenta ova dva hibrida je ista, linija L 325/75-2, kao i GD vrednost između majčinskih komponenti i očinske komponente –0,457. Na osnovu ostvarenih prinosa, ne postoji statistički značajna razlika između ova dva hibrida (Tabela 9). Međutim, s obzirom na prethodno navedene rezultate GGE biplot analize, prednost se daje hibridu ZP 7072. Ovaj hibrid pokazao je visoku adaptabilnost i može se uzgajati na svim ispitivanim lokalitetima.

Najviša vrednost GD (0,465) uočena je između linija L73L024 i L-335/99. Ove dve linije pripadaju dvema heterotičnim grupama, LSC i BSSS, redom. Iako se na osnovu visoke GD vrednosti može očekivati veoma izražen heterozis kod novostvorenog hibrida, nijedan od genotipova upotrebljenih u ovom istraživanju nije nastao kao rezultat ukrštanja ove dve linije. Razlog tome je što se navedene linije mahom koriste kao majčinske komponente, ali i razlika u pogledu dužine vegetacionog perioda, tj. FAO grupe zrenja (L73L024 pripada FAO grupi zrenja 280, dok L-335/99 pripada FAO 550) Linija L73024 je jedna od majčinskih komponenti trostrukih hibrida ranijih FAO grupa zrenja. Linija L-335/99 je majčinska komponenta hibrida FAO grupa zrenja 400–600, ali i očinska komponenta kasnog hibrida ZP 7777 (FAO 800), u kombinaciji sa LSC linijom L76L060. U pitanju je elitna inbred linija razvijena u Institutu za kukuruz „Zemun Polje“, dobrih opštih kombinacionih sposobnosti i karakteriše je tolerantnost prema suši tokom kritičnih faza rasta za potrebe prema vodi (Dodig, et al., 2019).

Na osnovu Tabele 15, može se uočiti da vrednost GD za korišćene hibride varira od 0,41 do 0,463 što ukazuje na vrlo visoku genetičku udaljenost roditelja za dobijanje novih hibrida.

Tabela 15. Vrednosti genetičkih distanci roditeljskim komponenti ispitivanih hibrida.

Hibrid	GD roditeljskih linija	Prosečan prinos (t ha ⁻¹)
ZP 3714	0,450	12,38
ZP 3071	0,440	12,30
Zombor	0,450	12,48
ZP 427	0,463	12,78
ZP 457	0,458	13,42
ZP 500	0,454	12,55
ZP 5550	0,458	13,23
ZP 5089	0,453	12,25
ZP 5090	0,438	13,47
ZP 555	0,462	12,41
ZP 560	0,443	12,98
ZP 606	0,462	13,35
ZP 6714	0,454	13,21
ZP 6715	0,453	13,33
ZP 6263	0,455	13,21
ZP 6364	0,456	13,58
ZP 6006b	0,430	11,00
ZP 552b	0,410	10,59
ZP 707	0,457	12,78
ZP 7072	0,457	13,24
ZP 7357	0,453	12,81
ZP 7777	0,460	12,38

Iako je generalno prihvaćeno da ukrštanja udaljenijih roditeljskih linija vode izraženijem heterozisu (Fujimoto, et al., 2018), zabeleženi su podaci o negativnoj korelaciji između genetičke distance i heterozisa kada je udaljenost roditeljskih linija ekstremno visoka (Moll, et al., 1965). U spomenutom istraživanju Moll, et al. (1965), s obzirom da molekularni markeri nisu bili dostupni, različiti nivoi genetičke udaljenosti između populacija kukuruza klasifikovani su na osnovu geografske udaljenosti roditeljskih linija.

Sa pojavom molekularnih markera, postale su moguće naprednije studije koje direktno mere genetičku distancu na nivou genoma na osnovu čega se može izračunati udaljenost heterotičnih lokusa. Dakle, uprkos značaju u oplemenjivanju kukuruza i višedecenijskim istraživanjima na ovu temu, koja su odnedavno potpomognuta dostupnošću molekularnih markera, odnos između genetičke distance i heterozisa i dalje je nejasan. Pitanje se postavlja, da li se povećanjem genetičke udaljenosti između roditeljskih komponenti povećava i heterozis ili se on povećava kroz optimizaciju ove genetičke udaljenosti (Würschum, et al., 2023). Wei & Zhang (2018) predlažu da, čak i unutar jedne vrste postoji optimalna genetička distanca između roditelja hibrida koja povećava podobnost balansirajući prednosti heterozisa i štete koja može nastati usled genetske nekompatibilnosti.

Različiti autori navode različite rezultate o korelaciji između GD vrednosti roditeljskih linija i prinosa zrna kukuruza (Pavlov, et al., 2016; Grčić, et al., 2018; Perić, et al., 2021; Čamdžija, et al., 2022). Rezultati ovog istraživanja ukazuju da između vrednosti genetičkih distanci roditeljskih linija i ostvarenog prosečnog prinosa zrna ispitivanih hibrida kukuruza postoji umereno jaka pozitivna korelacija ($r = 0.705068854$) (Tabela 16). Stoga, iako vrednosti GD dobijene pomoću različitih molekularnih markera jesu informativne za predviđanje heterozisa, one ne daju odgovor koja je hibridna kombinacija

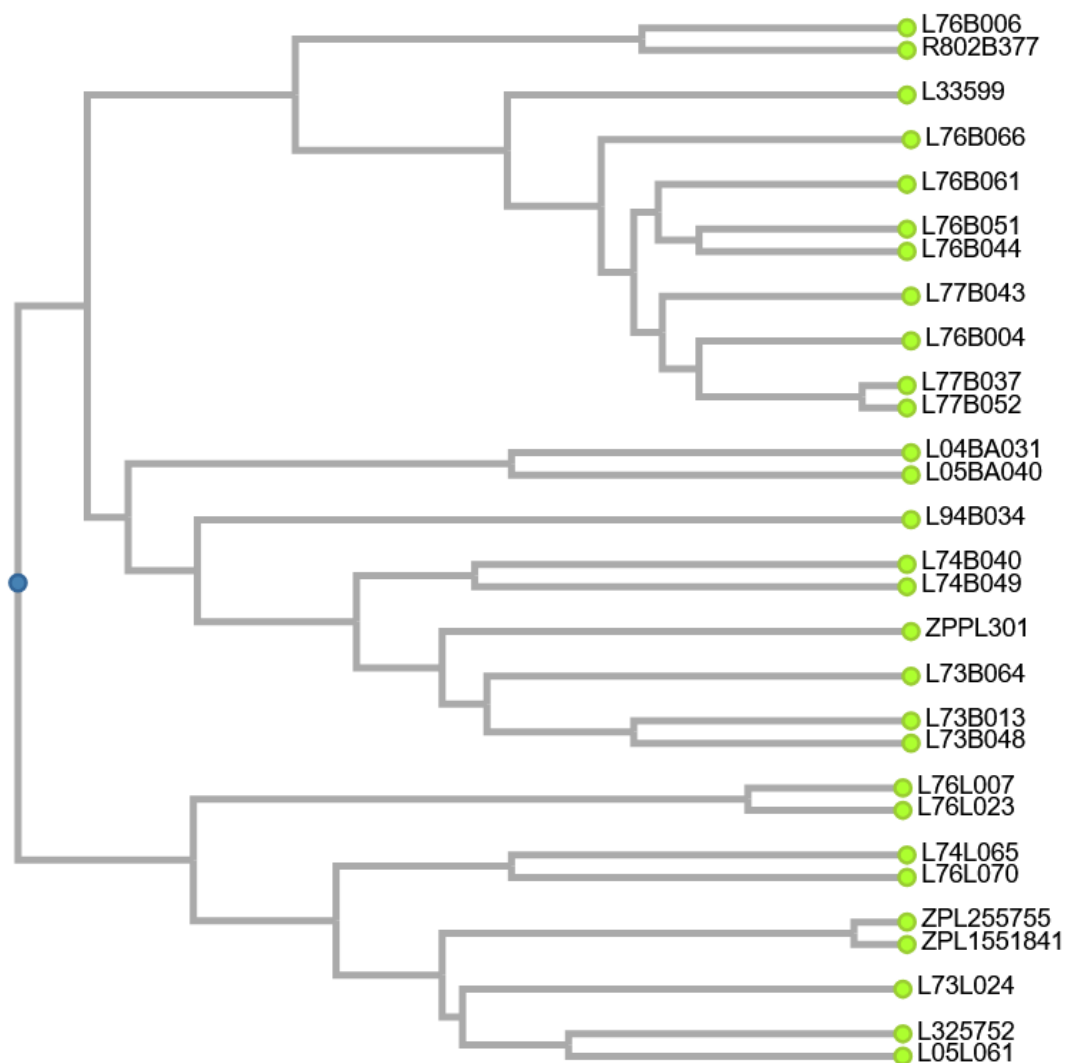
najsuperiornija. Stoga su multilokacijski poljski ogledi i dalje neophodni za oplemenjivanje kukuruza u cilju ostvarivanja visokih i stabilnih prinosa zrna (Čamdžija, et al., 2022).

Tabela 16. Korelacija između GD roditeljskih linija i prosečnog prinosa zrna ispitivanih hibrida

Prosečna GD roditeljskih linija	Prosečan prinos (t ha ⁻¹)	Korelacioni koeficijent (r)
0,45	12,78	0.7

Matrica vrednosti genetičkih distanci koristi se kao ulazna informacija za algoritme klasterovanja koji pružaju grafički prikaz u formi dendrograma (Singh & Singh, 2015). Tehnike klasterovanja se dele na hijerarhijske i nehijerarhijske, mada se upotrebljavaju i tehnike Bajesovog klasterovanja (Belalia, et al., 2019). U studijama genetičkog diverziteta biljnih vrsta, najčešće se upotrebljava hijerarhijsko klasterovanje, i to uglavnom UPGMA (*Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean*) ili Ward metod (Odong, et al., 2011). U sprovedenom istraživanju, upotrebljen je UPGMA metod pomoću DendroUPGMA softvera (Garcia-Vallvé, et al., 1999).

Sa dendrograma napravljenog pomoću vrednosti GD (Grafik 33), otkriveno je da se celokupan materijal može svrstati u nekoliko heterotičnih grupa. LSC predstavlja heterotičnu grupu najčešće korišćenu u vidu očinske komponente u hibridima kasnijih grupa zrenja (FAO 500–800), dok u srednje ranim hibridima (FAO 300–400) učestvuju kao majčinska komponenta u SC ili TC obliku. LSC linije su jasno odvojene u klasteru na dnu dendrograma od linija koje pripadaju drugim heterotičnim grupama. Nasuprot njima, analizom dendrograma otkriva se jedan veliki klaster koji otkriva preklapanje dveju heterotičnih grupa BSSS i ID.



Grafik 33. Dendrogram ispitivanih roditeljskih linija formiran na osnovu izračunatih genetičkih distanci.

Urađena klaster analiza se podudara sa empirijskim podacima na osnovu kojih su formirane heterotične grupe.

Komponente L76B044, L77B043, L77B052, L77B037, L76B004 i L-335/99 su komponente kasne grupe hibrida koja je ostvarila natprosečne rezultate. Njihovom međusobnom analizom se može zaključiti da se radi o genetički sličnom materijalu čije vrednosti genetičke distance variraju od 0,023 do 0,285. Budući da su vrednosti genetičkih distanci ovih linija $<0,3$, one se mogu smatrati sestrinskim linijama (Pavlov, 2013).

Očinsku komponentu svih hibrida kasne grupe zrenja (osim ZP 7777) predstavlja linija L 325/75-2. Rezultati analize pomoću SNP markera i ostvarenih poljskih rezultata ukazuju na vrlo usku prilagodljivost posmatrane genetike za tačno određene rejone gajenja (Bečej, Bačka Topola, Požarevac 2020), odnosno za rejone prve kategorije (Jocković, 2008). Budući programi oplemenjivanja koji bi uključivali izbor pomenutih linija moraju unapred planirati distribuciju dobijenih hibrida na ograničene rejone koji se ističu kvalitetnim uslovima proizvodnje, kvalitetnim zemljištem, stabilnim klimatskim uslovima, tj.

proizvodnju u onim rejonima u kojima je moguće iskazivanje maksimalnog genetičkog potencijala stvorenih hibrida.

Sa druge strane, u agroklimatski manje povoljnim godinama ili rejonima, linije: L94B034, L74L065, L74B049, predstavljaju komponente za stvaranje hibrida ranijih grupa zrenja, te je njihova introdukcija u programe oplemenjivanja obavezna u oplemenjivanju hibrida kukuruza ranije grupe zrenja, za rejone i duže i kraće vegetacije, ili u agroklimatski manje ili više povoljnim rejonima.

7. ZAKLJUČAK

Rezultati sprovedenog istraživanja jasno su potvrdili osnovnu radnu hipotezu da između ispitivanih hibrida kukuruza postoje statistički značajne razlike u pogledu prinosa zrna, kao i da lokalitet i okruženje imaju izražen uticaj na ostvareni prinos.

Analiza varijanse (ANOVA) pokazala je da su genotip, lokalitet i godina, kao i njihove međusobne interakcije, imali veoma značajan uticaj na prinos zrna hibrida, pri čemu je faktor genotipa ostvario najveći doprinos ukupnoj varijabilnosti. Ovi rezultati potvrđuju da genetska osnova hibrida ima presudan značaj u određivanju prinosa, dok uticaji spoljašnje sredine i interakcije dodatno diferenciraju performanse genotipova na različitim lokalitetima i u različitim proizvodnim uslovima.

Analizom parametara stabilnosti po Eberhart & Russell i Francis & Kannenberg metodi potvrđeno je da se hibridi razlikuju ne samo po prosečnom prinosu, već i po stepenu stabilnosti i adaptabilnosti. U ovom istraživanju nijedan hibrid nije ispunio sve kriterijume idealnog genotipa (visok prosečan prinos, stabilnost i široku adaptabilnost), ali su izdvojene grupe hibrida sa specifičnim prednostima. Tako je hibrid ZP 457 identifikovan kao jedini stabilan hibrid prema svim parametrima, dok su hibridi Zombor, ZP 6714, ZP 6715, ZP 6263 i ZP 7072 svrstani u grupu adaptabilnih hibrida. Hibrid ZP 6364 ostvario je najviši prosečan prinos, ali se pokazalo da zavisi od optimalnih uslova proizvodnje, što ga čini pogodnim za rejone sa stabilnijim agroekološkim uslovima.

GGE biplot analiza je pokazala postojanje potencijalne dve megaokoline: prvu čine lokaliteti Pančevo i Požarevac, dok drugu čine Bačka Topola i Bečej. Lokalitet Zemun Polje pokazao je različitu pripadnost u dve posmatrane godine, što ukazuje na potrebu daljih istraživanja pre njegove konačne klasifikacije. Podela na megaokoline bi imala praktičan značaj jer omogućava oplemenjivačima da ciljano preporučuju hibride za specifične agroekološke uslove, čime se smanjuju troškovi postkomisijskih ogleda i poboljšava ulaganje u marketing i proizvodnju.

Analiza okruženja pokazala je da su prinosi u 2020. godini bili viši u poređenju sa 2019. godinom, što se može povezati sa povoljnijim meteorološkim uslovima. Najniži prosečni prinosi zabeleženi su na lokalitetu Pančevo, dok je Požarevac ostvario najviše prinose, naročito u 2020. godini. Korelacije među lokalitetima pokazale su da određeni lokaliteti mogu biti suvišni u budućim ogledima (PO19), čime se otvara mogućnost racionalizacije postavljanja ogleda i smanjenja troškova, što je u direktnoj vezi sa jednim od ciljeva istraživanja.

Rezultati multilokacijskih ogleda i GGE biplot analiza omogućili su davanje preporuka za gajenje pojedinih hibrida u određenim proizvodnim rejonima Srbije:

- Hibrid ZP 6364, koji je ostvario najviši prosečan prinos ($13,58 \text{ t ha}^{-1}$), pokazao je adaptabilnost na različite uslove proizvodnje. Njegova visoka produktivnost opravdava uvođenje u proizvodnju u područjima gde je mehanizacija razvijena i gde se primenjuju intenzivne agrotehničke mere. Pored toga, ovaj hibrid je ostvario i stabilne i visoke prinose zrna u okruženju koje je i informativno i reprezentativno (BC20). Budući da su takva okruženja pogodna za odabir opšte prilagođenih

genotipova, ZP 6364 se usled ovakvih rezultata može preporučiti za prvi i drugi proizvodni rejon po Jockoviću.

- Hibrid ZP 457, koji je jedini izdvojen kao stabilan po svim parametrima, može se preporučiti za široku primenu u različitim proizvodnim rejonima. Njegova sposobnost da ostvaruje stabilan prinos u različitim okruženjima čini ga pogodnim za rejone u kojima se klimatski uslovi i nivo agrotehnike značajno razlikuju, pa se može smatrati sigurnim izborom u proizvodnji. Ovaj hibrid je prepoznat kao idealan hibrid na osnovu GGE biplot analize, jer je ostvario treći po visini prosečan prinos zrna ($13,42 \text{ t ha}^{-1}$) kao i stabilan prinos u najnepovoljnijem okruženju (PO19).
- Hibrid ZP 5090 je, na osnovu analize „Which-Won-Where“, izdvojen kao najbolji genotip za većinu ispitivanih okruženja, a u obe godine za lokalitete Pančevo i Požarevac. Dakle, s obzirom da je određen za najbolji genotip za nešto nepovoljnije uslove proizvodnje, on se može preporučiti za gajenje u drugom proizvodnom rejonu po Jockoviću.
- Pored prethodno navedenih ZP 6364, ZP 5090, i ZP 457, i hibrid ZP 5550 se može smatrati prioriternim za širu proizvodnju i dalje umnožavanje i komercijalizaciju.
- Hibrid ZP 6715 je određen kao najbolji izbor za BT19, BC19, ZP20 i BT20. Stoga se može zaključiti da je ovaj hibrid pogodan za uzgajanje u uslovima Bačke Topole, tj. u optimalnim uslovima proizvodnje. Potencijalno, dobar je izbor i za uslove Zemun Polja i Bečeja, ali na ovim lokalitetima faktor godine može imati značajniji uticaj na njegov performans.
- Hibrid Zombor (FAO 300), istakao se niskim procentom vlage u zrnu u momentu berbe (12,85%), što ga čini posebno pogodnim za berbu u zrnu i za regione gde su troškovi sušenja značajni. Preporučuje se za lokalitete Pančevo i Požarevac, s obzirom da su ovo lokaliteti u kojima proizvodni uslovi više variraju, na šta su hibridi FAO 300 grupe otporniji u poređenju sa hibridima kasnijih grupa zrenja.
- Uopšteno gledajući, rani hibridi (FAO 300–500) pokazali su veću stabilnost u nepovoljnijim uslovima i manju vlagu u zrnu u momentu berbe, te se mogu preporučiti i za rejone centralne Srbije i jugoistočnih delova zemlje, gde agroekološki uslovi variraju i gde je smanjenje troškova sušenja značajna prednost. Kasniji hibridi (FAO 600–800) pokazali su viši prinos u povoljnim uslovima i pogodniji su za prvi i drugi proizvodni rejon po Jockoviću.
- Što se tiče hibrida bele boje zrna, hibrid ZP 552b ostvario je nešto niže prosečne prinose u odnosu na ZP 6006b, ali je pokazao bolju otpornost u nepovoljnijim agroekološkim uslovima, naročito otpornost na poleganje. Usled toga, hibrid ZP 552b se i dalje nalazi u ponudi ZP hibrida, dok je ZP 6006b isključen iz prodaje.

Genetička analiza roditeljskih linija pomoću SNP markera pružila je dodatnu potvrdu u vezi sa potencijalom hibrida. Detektovane su linije koje daju potomstvo široke adaptabilnosti, kao i linije koje vode ka hibridima usko prilagođenim određenim rejonima. Na osnovu ostvarenih rezultata, može se dati preporuka za upotrebu sledećih roditeljskih linija u daljim programima oplemenjivanja:

- L73B048 – podobna za stvaranje hibrida rane FAO 300 grupe zrenja kao očinska linija hibrida sa brzim otpuštanjem vlage u periodu sazrevanja zrna.
- L74B049 – poželjan genotip za dalju upotrebu u programima oplemenjivanja, prvenstveno na svojstva visokog prinosa zrna praćenog visokom stabilnošću prinosa i adaptabilnošću hibrida. Takođe, doprinosi nižem procentu vlage u zrnu u momentu berbe, što je naročito važno sa aspekta berbe u zrnu i čuvanja zrna.
- L94B034 – predstavlja značajno unapređenje postojeće genetike koje rezultira adaptabilnošću i stabilnošću datog hibrida u svim ispitivanim okruženjima (roditeljska komponenta hibrida ZP 5090).
- L74L065 – linija čiji se hibridi karakterišu dobrim performansama, prvenstveno po pitanju visine prinosa, stabilnosti i adaptabilnosti (roditeljska komponenta ZP 5550).
- L76B051 – majčinska linija hibrida ZP 6364 koji je ostvario najviše prinose u istraživanju. Stoga se preporučuje za dalje programe oplemenjivanja.
- L77B037 – tolerantna na abiotički stres, perspektivna linija za dalje programe oplemenjivanja hibrida kasnih FAO grupa zrenja (FAO 700–800).
- L77B043 – pogodna za stvaranje hibrida u cilju proizvodnje kvalitetne silaže.
- L73B013, L-255/75-5, L-335/99, L76B004 – ove linije se preporučuju za zadržavanje u programima oplemenjivanja bilo u kombinaciji sa drugim roditeljskim linijama, ili kao osnova za dalju selekciju i dobijanje boljih genotipova.

Ostvarenim rezultatima proširuje se postojeće znanje o interakciji genotip × spoljašnja sredina i potvrđuje da selekcija mora biti vođena ne samo prosečnim prinosom zrna, već i stabilnošću i adaptabilnošću. Analiza SNP markera dodatno obogaćuje zaključke pružajući uvid u genetičku osnovu roditeljskih linija i omogućavajući preciznije donošenje odluka u daljim oplemenjivačkim programima.

8. LITERATURA

- Abdipour, Moslem, Behrouz Vaezi, Mehdi Younessi-Hamzekhanlu, Seyyed Hamid Reza Ramazani. 2017. "Nonparametric Phenotypic Stability Analysis in Advanced Barley (*Hordeum vulgare* L.) Genotypes." *Journal of Crop Science and Biotechnology* 20: 305–314. doi:10.1007/s12892-017-0050-0.
- Abed, Amino, Francois Belzile. 2019. "Comparing Single-SNP, Multi-SNP, Haplotype-Based Approaches in Association Studies for Major Traits in Barley." *Plant Genome* 12: 190036. doi:10.3835/plantgenome2019.05.0036.
- Abera, W., M. T. Labuschagne, H. Maartens. 2006. "Evaluation of maize genotypes using parametric and non-parametric stability estimates." *Cereal Research Communications* 34: 925–931. doi:10.1556/CRC.34.2006.2-3.221.
- Aberkane, Hafid, Ahmed Amri, Bouchra Belkadi, Abdelkarim Filali-Maltouf, Jan Valkoun, Zakaria Kehel. 2021. "Contribution of Wild Relatives to Durum Wheat (*Triticum turgidum* subsp. *durum*) Yield Stability across Contrasted Environments." *Agronomy* 11: 1992. doi:10.3390/agronomy11101992.
- Adu, G. B., F. J. Awuku, I. K. Amegbor, A. Haruna, K. A. Manigben, P. A. Abooyadana. 2019. "Genetic characterization and population structure of maize populations using SSR markers." *Annals of Agricultural Sciences* 64: 47–54. doi:10.1016/j.aoas.2019.05.006.
- Ahmadi, Jafar, Behrouz Vaezi, Akbar Shaabani, Karim Khademi, Sedigheh Fabriki Ourang, Alireza Pour-Aboughadareh. 2015. "Non-parametric Measures for Yield Stability in Grass Pea (*Lathyrus sativus* L.) Advanced Lines in Semi Warm Regions." *Journal of Agricultural Science and Technology* 17: 1825–1838.
- Akçura, Mevlüt, Emel Özer, Seyfi Taner. 2004. "Stability analyses for grain yield of triticales genotypes." *Bitkisel Araştırma Dergisi* 1: 25–31.
- Akinwale, R. O., M. A. B. Fakorede, B. Badu-Apraku, A. Oluwaranti. 2014. "Assessing the Usefulness of GGE Biplot as a Statistical Tool for Plant Breeders and Agronomists." *Cereal Research Communications* 42 (3): 534–546. doi:10.1556/crc.42.2014.3.16.
- Aksakal, Ozkan, Filiz Aygun Erturk, Serap Sunar, Sedat Bozari, Guleray Agar. 2013. "Assessment of genotoxic effects of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid on maize by using RAPD analysis." *Industrial Crops and Products* 42: 552–557. doi:10.1016/j.indcrop.2012.06.038.
- Ali, Mohammed Abd El-Hamed. 2009. "Breeding studies on top crosses in white and yellow maize (*Zea mays* L.)." *PhD Thesis*. Zagazig: Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Zagazig University: Zagazig, Egypt.
- Al-Naggar, A. M. M., M. M. Shafik, R. Y. M. Musa. 2020. "AMMI and GGE Biplot Analyses for Yield Stability of Nineteen Maize Genotypes Under Different Nitrogen and Irrigation Levels." *Plant Archives* 20 (2): 4431–4443.
- Andorf, Carson, William D. Beavis, Matthew Huford, Stephen Smith, Walter P. Suza, Kan Wang, Margaret Woodhouse, Jianming Yu, Thomas Lübberstedt. 2019. "Technological advances in maize breeding: past, present and future." *Theoretical and Applied Genetics* 132: 817–849.
- Aniskov, N. I., I. V. Safonova. 2020. "Comparative assessment of plasticity, stability and homeostasis based on '1000 grain weight' in winter rye cultivars developed at VIR." *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding* 181: 56–63. doi:10.30901/2227-8834-2020-3-56-63.

- Annicchiarico, Paolo. 1997. "Joint regression vs AMMI analysis of genotype-environment interactions for cereals in Italy." *Euphytica* 94: 53–62. doi:10.1023/A:1002954824178.
- Antony, B. J., R. M. Kachapur, G. K. Naidu, S. C. Talekar, M. Zerka, S. I. Harlapur. 2024. "Genetic Variability and Character Association among Maize (*Zea mays* L.) Inbred Lines." *Bangladesh Journal of Botany* 53 (1): 57–65. doi:10.3329/bjb.v53i1.72135.
- Aslam, Muhammad, Muhammad Amir Maqbool, Rahime Cengiz. 2015. *Drought Stress in Maize (Zea mays L.)*. Cham, Switzerland: Springer. doi:10.1007/978-3-319-25442-5.
- Aslam, Muhammad, Muhammad Amir Maqbool, Muhammad Yaseen, Qamar-U-Zaman. 2015. "AMMI Biplot Analysis for Comparative Evaluation of Maize (*Zea May* L.) Genotypes under Different Saline Environments." *Pakistan Journal of Agricultural Sciences* 52: 339–347.
- Babić, Milosav, Vojka Babić, Nenad Delić, Slaven Prodanović, Violeta Anđelković. 2011. "Poređenje Parametara Stabilnosti Po Finlay-Wilkinson, Eberhart-Russell I AMMI Modelu." *Selekcija i Semenarstvo* XVII: 35–40.
- Babić, Vlado. 2014. "Procjena stabilnosti kvantitativnih svojstava kukuruza." *Doktorska disertacija*. Osijek, Hrvatska: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek.
- Babić, Vojka, Valentina Nikolić, Milosav Babić, Natalija Kravić, Jovan Pavlov, Slađana Žilić, Zoran Čamdžija, Milomir Filipović. 2024. "Elite Maize Lines Having Variability in Quality Parameters – A Valuable Starting Material for Grain Quality-Oriented Breeding Programs." *Agriculture* 14 (12): 10.3390/agriculture14122122. doi:10.3390/agriculture14122122.
- Badu-Apraku, Baffour, Bamidele Fakorede, Richard Akinwale, Benjamin Annor, Samuel Adewale, Johnson Toyinbo, Samson Akintibu. 2020. "Application of the GGE Biplot as a Statistical Tool in the Breeding and Testing of Early and Extra-Early Maturing Maize in Sub-Saharan Africa." *Crop Breeding, Genetics and Genomics* 2 (3): e200012. doi:10.20900/cbagg20200012.
- Baloch, Nazia, Wanmao Liu, Peng Hou, Bo Ming, Ruizhi Xie, Keru Wang, Yuee Liu, Shaokun Li. 2021. "Effect of latitude on maize kernel weight and grain yield across China." *Agronomy Journal* 113: 1172–1182. doi:10.1002/agj2.20570.
- Barata, C., M. Carena. 2006. "Classification of North Dakota maize inbred lines into heterotic groups based on molecular and testcross data." *Euphytica* 151 (3): 339–349. doi:10.1007/s10681-006-9155-y.
- Baxevanos, Dimitrios, Christos Goulas, Stergios Tzortzios, Athanasios Mavromatis. 2008. "Interrelationship among and repeatability of seven stability indices estimated from commercial cotton (*Gossypium hirsutum* L.) variety evaluation trials in three Mediterranean countries." *Euphytica* 161: 371–382. doi:10.1007/s10681-007-9586-0.
- Becker, H. C. 1981. "Correlations among some statistical measures of phenotypic stability." *Euphytica* 30: 835–840. doi:10.1007/BF00038812.
- Becker, H. C., J. Léon. 1988. "Stability Analysis in Plant Breeding." *Plant Breeding* 101: 1–23. doi:10.1111/j.1439-0523.1988.tb00261.x.
- Belalia, Nawel, Antonio Lupini, Abderrahmane Djemel, Abdelkader Morsli, Antonio Mauceri, Concetta Lotti, Majda Khelifi-Slaoui, Lakhdar Khelifi, Francesco Sunseri. 2019. "Analysis of genetic diversity and population structure in Saharan maize (*Zea mays* L.) populations using phenotypic traits and SSR markers." *Genetic Resources and Crop Evolution* 66: 243–257. doi:10.1007/s10722-018-0709-3.
- Beyene, Yoseph, Kassa Semagn, Stephen Mugo, Amsal Tarekegne, Raman Babu, Barbara Meisel, Pierre Sehabiague, Dan Makumbi, Cosmos Magorokosho, Sylvester Oikeh,

- John Gakunga, Mateo Vargas, Michael Olsen, Boddupalli M. Prasanna, Marianne Banziger, Jose Crossa. 2015. "Genetic Gains in Grain Yield Through Genomic Selection in Eight Bi-parental Maize Populations under Drought Stress." *Crop Science* 55: 154–163. doi:10.2135/cropsci2014.07.0460.
- Bhattacharya, Amitav. 2019. "Water-Use Efficiency Under Changing Climatic Conditions." In *Changing Climate and Resource Use Efficiency in Plants*, 111–180. Cambridge, MA, USA: Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-816209-5.00003-9.
- Bocianowski, Jan, Kamila Nowosad, Barbara Wróbel, Piotr Szulc. 2021. "Identification of Associations between SSR Markers and Quantitative Traits of Maize (*Zea mays* L.)." *Agronomy* 11 (1): 182. doi:10.3390/agronomy11010182.
- Bonkougou, Tégawendé Odette, Tégawendé Odette, Victor Olawale Adetimirin, Kiswendsida Romaric Nanema, Idris Ishola Adejumobi. 2024. "Performance and Stability Analysis of Extra-Early Maturing Orange Maize Hybrids under Drought Stress and Well-Watered Conditions." *Agronomy* 14 (4): 847. doi:10.3390/agronomy14040847.
- Borojević, Slavko. 1981. *Principi i Metodi Oplemenjivanja Bilja*. Novi Sad: Poljoprivredni Fakultet u Novom Sadu.
- Bozari, Sedat, Ozkan Aksakal. 2013. "Application of random amplified polymorphic DNA (RAPD) to detect genotoxic effect of trifluralin on maize (*Zea mays*)." *Drug and Chemical Toxicology* 36: 163–169. doi:10.3109/01480545.2012.660948.
- Božović, Dragan, Tomislav Živanović, Vera Popović, Mladen Tatić, Zagorka Gospavić, Zoran Miloradović, Goran Stanković, Milorad Đokić. 2018. "Assessment stability of maize lines yield by GGE-biplot analysis." *Genetika* 50: 755–770. doi:10.2298/GENSR1803755B.
- Bradbury, Peter J., Zhiwu Zhang, Dallas E. Kroon, Terry M. Casstevens, Yogesh Ramdoss, Edward S. Buckler. 2007. "TASSEL: software for association mapping of complex traits in diverse samples." *Bioinformatics* 23: 2633–2635.
- Branković-Radojčić, Dragana V. 2016. "Interakcija Genotip x Sredina i Stabilnost Prinosa i Komponenata Prinosa Zrna Komercijalnih Hibrida Kukuruzna." Beograd, Srbija: Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni Fakultet.
- Branković-Radojčić, Dragana, Marija Milivojević, Tanja Petrović, Snežana Jovanović, Aleksandar Popović, Snežana Gošić Dondo, Jelena Srđić. 2022. "Study of maize yield stability with nonparametric methods." *Genetika* 54: 871–885. doi:10.2298/GENSR2202871B.
- Branković-Radojčić, Dragana, Vojka Babić, Zdenka Girek, Tomislav Živanović, Aleksandar Radojčić, Milomir Filipović, Jelena Srđić. 2018. "Evaluation of Maize Grain Yield and Yield Stability by AMMI Analysis." *Genetika* 50: 1067–1080. doi:10.2298/GENSR1803067B.
- Buhiniček, Ivica, Dražen Jaučić, Zdravko Kozić, Mirko Jukić, Jerko Gunjača, Hrvoje Šarčević, Domagoj Stepinac, Domagoj Šimić. 2021. "Trends in Maize Grain Yields across Five Maturity Groups in a Long-Term Experiment with Changing Genotypes." *Agriculture* 11: 887. doi:10.3390/agriculture11090887.
- Bujak, Henryk, Kamila Nowosad, Roman Warzecha. 2014. "Evaluation of maize hybrids stability using parametric and non-parametric methods." *Maydica* 59: 170–175.
- Bujak, Henryk, S. Jedyński, Jan Kaczmarek. 2008. "Application of the method of homogeneous group ranks and coefficients of variability to evaluation of yield stability of rye cultivars." *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin* 250: 217–224. doi:10.13080/z-a.2013.100.040.

- Bunjac, Nenad. 2019. "Analiza multilokacijskih test ogleda ZP hibrida kukuruza." Beograd, Srbija: Poljoprivredni Fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Čamdžija, Zoran. 2014. "Kombinacione sposobnosti za prinos zrna i agronomska svojstva ZP inbred linija kukuruza; Doktorska disertacija." Beograd, Srbija.: Poljoprivredni Fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- . 2021. "Lična komunikacija." Beograd, Srbija.
- Čamdžija, Zoran, Milomir Filipović, Milan Stevanović, Snežana Mladenović Drinić, Jelena Vančetović, Milosav Babić. 2012. "Prinos i komponente prinosa komercijalnih ZP hibrida kukuruza različitih grupa zrenja." *Selekcija i Semenarstvo* XVIII (1): 41–48.
- Čamdžija, Zoran, Milomir Filipović, Nenad Delić, Jovan Pavlov, Nikola Grčić, Danijela Ristić, Marija Kostadinović. 2022. "Grain yield predictions of ZP maize hybrids." *4th International Plant Breeding Congress*. Antalya, Türkiye: BİSAB. 200.
- Čamdžija, Zoran, Milomir Filipović, Nenad Delić, Jovan Pavlov, Sofija Božinović, Mile Sečanski, Marko Mladenović. 2023. "Primena novih tehnologija u oplemenjivanju kukuruza u Institutu za kukuruz "Zemun Polje"." Edited by Vesna Perić, Vojka Babić and Sandra Cvejić. *Zbornik apstrakata X simpozijuma Društva selekcionera i semenara Republike Srbije i VII simpozijuma selekcije za oplemenjivanje organizama Društva genetičara Srbije*. Vrnjačka Banja, Srbija: Društvo Genetičara Srbije. 31–32.
- Cargnelutti Filho, Alberto, Dilermando Perecin, Euclides Braga Malheiros, José Paulo Guadagnin. 2007. "Comparison of adaptability and stability methods related to grain yield of maize cultivars." *Melhoramento Genético Vegetal* 66: 571–578. doi:10.1590/S0006-87052007000400006.
- Castiglioni, P., P. Ajmone-Marsan, R. van Wijk, M. Motto. 1999. "AFLP markers in a molecular linkage map of maize: codominant scoring and linkage group distribution." *Theoretical and Applied Genetics* 99: 425–431.
- Castro, Camila Rodrigues, Leandro Simoes Azeredo Goncalves, Ronald Barth Pinto, Carlos Alberto Scapim, Viviane Yumi Baba, Douglas Mariani Zeffa, Mauricio Carlos Kuki. 2022. "Genetic diversity and diallel analysis of elite popcorn lines." *Revista Ciência Agronômica* 53: e20207698. doi:10.5935/1806-6690.20220017.
- Ceccarelli, S. 1989. "Wide adaptation : How wide?" *Euphytica* 197–205. doi:10.1007/BF00024512.
- Challinor, A. J., J. Watson, D. B. Lobell, S. M. Howden, D. R. Smith, N. Chhetri. 2014. "A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation." *Nature Climate Change* 4: 287–291.
- Changizi, Mahdi, Rajab Choukan, Eslam Majidi Heravan, Mohammad Reza Bihamta, Farrokh Darvish. 2014. "Evaluation of genotype×environment interaction and stability of corn hybrids and relationship among univariate parametric methods." *Canadian Journal of Plant Science* 94: 1255–1267. doi:10.4141/cjps2013-386.
- Chávez-Arias, Cristhian Camilo, Gustavo Adolfo Ligarreto-Moreno, Augusto Ramírez-Godoy, Hermann Restrepo-Díaz. 2021. "Maize Responses Challenged by Drought, Elevated Daytime Temperature and Arthropod Herbivory Stresses: A Physiological, Biochemical and Molecular View." *Frontiers in Plant Science* 12: 702841. doi:10.3389/fpls.2021.702841.
- Chen, J., W. Xu, J. Velten, Z. Xin, J. Stout. 2012. "Characterization of maize inbred lines for drought and heat tolerance." *Journal of Soil and Water Conservation* 67: 354–364. doi:10.2489/jswc.67.5.354.

- Chen, Xue-jun, Guang-cai Cao, Qun Sun, Dong-bin Wu, Jing Chen, Ya-xiong Yu, Jie Li, Wei Li. 2013. "Altitude effects on maize growth period and quality traits." *Acta Ecologica Sinica* 33: 233–236. doi:10.1016/j.chnaes.2013.05.002.
- Coe, E. H., D. A. Hoisington, M. G. Neuffer. 1987. "Linkage map of corn (maize) (*Zea mays* L.)." *Maize Genetics Cooperative Newsletter* 61: 116–147.
- Correia, Pedro M. P., Anabela Bernardes da Silva, Margarida Vaz, Elizabete Carmo-Silva, Jorge Marques da Silva. 2021. "Efficient Regulation of CO₂ Assimilation Enables Greater Resilience to High Temperature and Drought in Maize." *Frontiers in Plant Science* 12: 675546. doi:10.3389/fpls.2021.675546.
- Crevar, Miloš, Jelena Vančetović, Milovan Pavlov, Slaven Prodanović, Milan Stevanović, Zoran Čamdžija, Sofija Božinović. 2011. "Yield Stability of New ZP Maize Hybrids." *Selekcija i Semennarstvo* XVII: 49–55.
- Crevar, Miloš, Jelena Vančetović, Milovan Pavlov, Slaven Prodanović, Milan Stevanović, Zoran Čamdžija, Sofija Božinović. 2011. "Yield Stability of New ZP Maize Hybrids." *Selekcija i semennarstvo* XVII (2): 49–55.
- Cui, Dezhou, Dandan Wu, Yamuna Somarathna, Chunyan Xu, Song Li, Peng Li, Hua Zhang, Huabang Chen, Li Zhao. 2015. "QTL mapping for salt tolerance based on SNP markers at the seedling stage in maize (*Zea mays* L.)." *Euphytica* 203: 273–283.
- Čvarković, Radomir, Gordana Branković, Irena Čalić, Nenad Delić, Tomislav Živanović, Gordana Šurlan Momirović. 2009. "Stability of Yield and Yield Components in Maize Hybrids." *Genetika* 41: 215–224. doi:10.2298/GENSR0902215C.
- da Silva, Karla Jorge, Paulo Eduardo Teodoro, Michele Jorge da Silva, Larissa Pereira Ribeiro Teodoro, Milton Jose Cardoso, Vicente de Paulo Campos Godinho, Jose Hortencio Mota, Gustavo André Simon, Flávio Dessaune Tardin, Adelmo Resende da Silva, Fernando Lisboa Guedes, Cicero Beserra de Menezes. 2021. "Identification of mega-environments for grain sorghum in Brazil using GGE biplot methodology." *Agronomy Journal* 113: 3019–3030. doi:10.1002/agj2.20707.
- da Silveira, Diorgenes Leonam Modernel, Tatiane Dalla Nora Montecelli, Glacy Jaqueline da Silva, Ivan Schuster. 2019. "SNP haplotypes for soybean resistance to SCN race 1 and 3." *Euphytica* 215: 143. doi:10.1007/s10681-019-2465-7.
- Đalović, Ivica, Goran Bekavac. 2017. "Rejonizacija, tehnologija gajenja i izbor ranih hibrida kukuruza u brdsko-planinskim područjima." *Simpozij Unapređenje poljoprivrede, šumarstva i vodoprivrede u kraškim, brdskim i planinskim područjima – racionalno korištenje i zaštita*. Sarajevo, Bosna i Hercegovina: Akademija nauka i umjetnosti Bosne i Hercegovine. 61–73.
- Dari, Shorai, John MacRobert, Adre Minnaar-Ontong, Maryke T. Labuschagne. 2018. "SNP-based genetic diversity among few-branched-1 (Fbr1) maize lines and its relationship with heterosis, combining ability and grain yield of testcross hybrids." *Maydica* 63: M15.
- Das, Arpita, Ashok K. Parihar, Deepa Saxena, Deepak Singh, K. D. Singha, K. P. S. Kushwaha, Ramesh Chand, R. S. Bal, Subhash Chandra, Sanjeev Gupta. 2019. "Deciphering Genotype-by- Environment Interaction for Targeting Test Environments and Rust Resistant Genotypes in Field Pea (*Pisum sativum* L.)." *Frontiers in Plant Science* 10: 825. doi:10.3389/fpls.2019.00825.
- De Canditiis, Daniela. 2019. *Statistical Inference Techniques*. Vol. 1, in *Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology*, edited by Shoba Ranganathan, Michael Gribskov, Kenta Nakai and Christian Schönbach, 698–705. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-809633-8.20357-9.

- de Carvalho, Agnaldo D. F., Giovani Olegario da Silva, Arione da S. Pereira, Fernanda Q. Azevedo, Carlos Francisco Ragassi. 2022. "Nonparametric indexes in selecting advanced potato clones." *Horticultura Brasileira* 40: 18–22. doi:10.1590/s0102-0536-20220102.
- de Carvalho, Helio Wilson Lemos, Maria de Lourdes da Silva Leal, Manoel Xavier dos Santos, Milton Jose Cardoso, Antonio Augusto Teixeira Monteiro, Jose Nildo Tabosa. 2000. "Adaptability and stability of corn cultivars in the Brazilian Northeast." *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 35: 1115–1123. doi:10.1590/S0100-204X2000000600007.
- de Franceschi, Lucia, Giovani Benin, Volmir Sérgio Marchioro, Thomas Newton Martin, Raphael Rossi Silva, Cristiano Lemes da Silva. 2010. "Methods for analysis of adaptability and stability of wheat cultivars for Paraná State, Brazil." *Melhoramento Genético Vegetal* 69: 797–805. doi:10.1590/S0006-87052010000400004.
- de Oliveira, Lander Santos, Ivan Schuster, Evandro Novaes, Welison Andrade Pereira. 2021. "SNP genotyping for fast and consistent clustering of maize inbred lines into heterotic groups." *Crop Breeding and Applied Biotechnology* 21: e367121110.
- de Oliveira, Rogério Lunezzo, Renzo Garcia Von Pinho, Márcio Balestre, Denys Vitor Ferreira. 2010. "Evaluation of maize hybrids and environmental stratification by the methods AMMI and GGE biplot." *Crop Breeding and Applied Biotechnology* 10: 247–253. doi:10.1590/S1984-7032010000300010.
- de Oliveira, Tâmara Rebecca Albuquerque, Hélio Wilson Lemos de Carvalho, Emiliano Fernandes Nassau Costa, José Luiz Sandes de Carvalho Filho. 2017. "Correlation among adaptability and stability assessment models in maize cultivars." *Australian Journal of Crop Science* 12: 516–521.
- de Resende, Marcos Deon Vilela. 2007. *Matemática e Estatística na Análise de Experimentos e no Melhoramento Genético*. Colombo, Brazil: Embrapa Florestas.
- de Vasconcelos, Felipe Matheus Teles, Ramom Araújo de Vasconcelos, Lucas Nunes da Luz, Norival Thiago Cabral, João Oscar Lustosa de Oliveira Júnior, Antônio Dias Santiago, Edvaldo Sgrillo, Francisco José Correia Farias, Pérciles de Albuquerque Melo Filho, Roseane Cavalcanti dos Santos. 2015. "Comparison of adaptability and stability estimates in upright peanut genotypes cultivated in Northeast and Midwest regions." *Ciência Rural* 45: 1375–1380. doi:10.1590/0103-8478cr20140414.
- Delić, N., M. Babić, V. Anđelković, G. Stanković, G. Saratlić. 2004. "Primena neparametarske statistike u oceni interakcije genotip x spoljna sredina." Edited by Janoš Berenji and Snežana Mladenović Drinić. *Zbornik abstrakata III kongresa genetičara Srbije*. Subotica, Srbija: Društvo Genetičara Srbije. 175.
- Delić, Nenad, ed. 2021. *Institut za Kukuruz "Zemun Polje": 75 Godina*. Beograd: Institut za Kukuruz "Zemun Polje".
- Delić, Nenad, Goran Stanković, Kosana Konstantinov. 2009. "Use of Non Parametric Statistics in Estimation of Genotypes Stability." *Maydica* 54: 155–160.
- Demelash, Habtamu. 2024. "Genotype by environment interaction, AMMI, GGE biplot, mega environment analysis of elite Sorghum bicolor (L.) Moench genotypes in humid lowland areas of Ethiopia." *Heliyon* 10 (5): e26528. doi:10.1016/j.heliyon.2024.e26528.
- Deng, Changrong, Haidong Liu, Yanmei Yao, Shaomin Guo, Lu Xiao, Zhong Fu, Dezhi Du. 2019. "QTL analysis of four yield-related traits for Brassica napus L. in multiple environments." *Molecular Breeding* 39: 166.
- Dermail, Abil, Bhalang Suriarn, Sompong Chankaew, Jirawat Sanitchon, Kamol Lertrat. 2020. "Hybrid prediction based on SSR-genetic distance, heterosis and combining

- ability on agronomic traits and yields in sweet and waxy corn." *Scientia Horticulturae* 259: 108817. doi:10.1016/j.scienta.2019.108817.
- Di Matteo, J. A., J. M. Ferreyra, A. A. Cerrudo, L. Echarte, F. H. Andrade. 2016. "Yield potential and yield stability of Argentine maize hybrids over 45 years of breeding." *Field Crops Research* 197: 107–116. doi:10.1016/j.fcr.2016.07.023.
- Di, Hong, Xianjun Liu, Qiankun Wang, Jianfeng Weng, Lin Zhang, Xinhai Li, Zhenhua Wang. 2015. "Development of SNP-based dCAPS markers linked to major head smut resistance quantitative trait locus qHS2.09 in maize." *Euphytica* 202: 69–79.
- Dimitrijević, Miodrag, Sofija Petrović. 2000. "Adaptabilnost i stabilnost genotipa." *Selekcija i Semenarstvo* 7: 21–28.
- Dodig, Dejan, Sofija Božinović, Ana Nikolić, Miroslav Zorić, Jelena Vančetović, Dragana Ignjatović-Micić, Nenad Delić, Kathleen Weigelt-Fischer, Astrid Junker, Thomas Altmann. 2019. "Image-Derived Traits Related to Mid-Season Growth Performance of Maize Under Nitrogen and Water Stress." *Frontiers in Plant Science* 10: 814.
- Dong, Qing, Weiguang Wang, Kenneth E. Kunkel, Quanxi Shao, Wanqiu Xing, Jia Wei. 2020. "Heterogeneous response of global precipitation concentration to global warming." *International Journal of Climatology* 41: E2347–E2359. doi:10.1002/joc.6851.
- dos Santos, Diego Coelho, Carlos Henrique Pereira, José Aírton Rodrigues Nunes, André Luiz Lepre. 2019. "Adaptability and stability of maize hybrids in unreplicated multienvironment trials." *Revista Ciência Agronômica* 50: 83–89. doi:10.5935/1806-6690.20190010.
- Dragičević, Vesna, Snežana Mladenović Drinić, Milena Simić, Milan Brankov, Zoran Dumanović, Mile Sečanski, Milena Milenković. 2020. "Variability of Maize Inbred Lines in Nitrogen Use Efficiency." *Genetika* 52 (2): 585–596. doi:10.2298/GENSR2002585D.
- Drašković, Bojan, Veselinka Zečević, Zdravko Hojka, Milomir Filipović, Jelena Srđić, Natalija Kravić, Vojka Babić. 2021. "Application of AMMI model in zoning of FAO 400–500 maize hybrids." *Selekcija i Semenarstvo* XXVII (1): 41–49. doi:10.5937/SelSem2101041D.
- Dražić, Slobodan. 1999. "Selekcija i semenarstvo." In *Žalfija (Salvia officinalis L.)*, 43–57. Beograd, Srbija: Institut za proučavanje lekovitog bilja "Dr Josif Pančić".
- Du, Hewei, Jianxiong Zhu, Hang Su, Ming Huang, Hongwei Wang, Shuangcheng Ding, Binglin Zhang, An Luo, Shudong Wei, Xiaohai Tian, Yunbi Xu. 2017. "Bulked Segregant RNA-seq Reveals Differential Expression and SNPs of Candidate Genes Associated with Waterlogging Tolerance in Maize." *Frontiers in Plant Science* 8: 1022. doi:10.3389/fpls.2017.01022.
- Dudley, J. W., M. A. Saghai Maroof, G. K. Rufener. 1991. "Molecular Markers and Grouping of Parents in Maize Breeding Programs." *Crop Science* 31: 718–723. doi:10.2135/cropsci1991.0011183X003100030036x.
- Đurić, Milenko. 2023. *Kako odabrati FAO grupu hibrida kukuruza za setvu na gazdinstvu*. Accessed 23, 2025. <https://www.psss.rs/forums/topic/kako-odabrati-fao-grupu-hibrida-kukuruza-za-setvu-na-gazdinstvu/>.
- Đurović, Dragan S., Milomirka R. Madić, Nikola R. Bokan, Vladeta I. Stevović, Dalibor D. Tomić, Snežana T. Tanasković. 2014. "Stability Parameters for Grain Yield and its Component Traits in Maize Hybrids of Different FAO Maturity Groups." *Journal of Central European Agriculture* 15 (4): 199–212. doi:10.5513/jcea01/15.4.1530.
- East, Edward Murray. 1908. "Inbreeding in corn." *Reports of the Connecticut Agricultural Experiments Station for 1907*, 419–428.

- Eberhart, S. A., W. A. Russell. 1966. "Stability Parameters for Comparing Varieties." *Crop Science* 6: 36–40. doi:10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x.
- Edmeades, G. O., J. Bolaños, A. Elings, J.-M. Ribaut, M. Bänziger, M. E. Westgate. 2000. "The Role and Regulation of the Anthesis-Silking Interval in Maize." In *Physiology and Modeling Kernel Set in Maize*, edited by Mark Westgate, Ken Boote, Dan Knievel and Jim Kiniry, 43–73. Madison, WI, USA: Crop Science Society of America and the American Society of Agronomy. doi:10.2135/cssaspecpub29.c4.
- Edwards, David, John W. Forster, David Chagné, Jacqueline Batley. 2007. "What Are SNPs?" In *Association Mapping in Plants*, edited by Nnadozie C. Oraguzie, Erik H.A. Rikkerink, Susan E. Gardiner and H. Nihal De Silva, 41–52. New York, NY: Springer.
- El-Hosary, Ahmed. 2020. "Estimation of Genetic Variability Using Line X Tester Technic in Yellow Maize and Stability Analysis for Superior Hybrids Using Different Stability Procedures." *Journal of Plant Production* 11: 847–854. doi:10.21608/JPP.2020.118047.
- Emerson, R. A., E. M. East. 1913. "The Inheritance of Quantitative Characters in Maize." *Bulletin of the Agricultural Experiment Station of Nebraska*, 5–118.
- Erturk, Filiz Aygun, Guleray Agar, Esra Arslan, Gokce Nardemir, Zehra Sahin. 2014. "Determination of genomic instability and DNA methylation effects of Cr on maize (*Zea mays* L.) using RAPD and CRED-RA analysis." *Acta Physiologiae Plantarum* 36: 1529–1537. doi:10.1007/s11738-014-1529-5.
- Erturk, Filiz Aygun, Hilal Ay, Gokce Nardemir, Guleray Agar. 2013. "Molecular determination of genotoxic effects of cobalt and nickel on maize (*Zea mays* L.) by RAPD and protein analyses." *Toxicology and Industrial Health* 29: 662–671. doi:10.1177/0748233712442709.
- Fan, Xing-Ming, Manjit S. Kang, Hongmei Chen, Yudong Zhang, Jing Tan, Chuxia Xu. 2007. "Yield Stability of Maize Hybrids Evaluated in Multi-Environment Trials in Yunnan, China." *Agronomy Journal* 99: 220–228. doi:10.2134/agronj2006.0144.
- FAOSTAT. 2024. FAOSTAT. Accessed 1 26, 2025. <https://www.fao.org/faostat>.
- Fareghi, Sharareh, Aghafakhr Mirlohi, Ghodratollah Saeidi. 2019. "Relationship among combining ability, heterosis and genetic distance in maize (*Zea mays* L.) inbred lines under water-deficit conditions using line x tester and molecular analysis." *Bioscience Biotechnology Research Communications* 11: 216–223. doi:10.21786/bbrc/11.2/4.
- Farouk, Issame, Ahmad Alsaleh, Jihan Motowaj, Fatima Gaboun, Bouchra Belkadi, Abdelkarim Filali Maltouf, Zakaria Kehel, Ismahane Elouafi, Nasserelhaq Nsarellah, M. Miloudi Nachit. 2021. "Detection of grain yield QTLs in the durum population Lahn/Chaml tested in contrasting environments." *Turkish Journal of Biology* 45: 65–78.
- Farshadfar, E. 2008. "Incorporation of AMMI Stability Value and Grain Yield in a Single Non-Parametric Index (GSI) in Bread Wheat." *Pakistan Journal of Biological Sciences* 11: 1791–1796.
- Finlay, K. W., G. N. Wilkinson. 1963. "The analysis of adaptation in a plant-breeding programme." *Australian Journal of Agricultural Research* 14: 742–754. doi:10.1071/AR9630742.
- Flores, F., M. T. Moreno, J. I. Cubero. 1998. "A comparison of univariate and multivariate methods to analyze G×E interaction." *Field Crops Research* 56: 271–286. doi:10.1016/S0378-4290(97)00095-6.
- Fox, P. N., B. Skovmand, B. K. Thompson, H.-J. Braun, R. Cormier. 1990. "Yield and adaptation of hexaploid spring triticale." *Euphytica* 47: 57–64. doi:10.1007/BF00040364.

- Francis, T. R., L. W. Kannenberg. 1978. "Yield Stability Studies in Short-Season Maize. I. A Descriptive Method for Grouping Genotypes." *Canadian Journal of Plant Science* 58: 1029–1034. doi:10.4141/cjps78-157.
- Frutos, Elisa, M. Purificación Galindo, Víctor Leiva. 2013. "An interactive biplot implementation in R for modeling genotype-by-environment interaction." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 28: 1629–1641. doi:10.1007/s00477-013-0821-z.
- Fu, Donghui, Meili Xiao, Alice Hayward, Ying Fu, Gui Liu, Guanjie Jiang, Haihuan Zhang. 2014. "Utilization of crop heterosis: a review." *Euphytica* 197: 161–173. doi:10.1007/s10681-014-1103-7.
- Fujimoto, Ryo, Kosuke Uezono, Sonoko Ishikura, Kenji Osabe, W. James Peacock, Elizabeth S. Dennis. 2018. "Recent research on the mechanism of heterosis is important for crop and vegetable breeding systems." *Breeding Science* 68 (2): 145–158. doi:10.1270/jsbbs.17155.
- Gabaldón-Leal, C., H. Webber, M. E. Otegui, G. A. Slafer, R. A. Ordóñez, T. Gaiser, I. J. Lorite, M. Ruiz-Ramos, F. Ewert. 2016. "Modelling the impact of heat stress on maize yield formation." *Field Crops Research* 198: 226–237.
- Gabriel, K. R. 1971. "The biplotgraphic display of matrices with application to principal component analysis." *Biometrika* 58: 453–467. doi:10.2307/2334381.
- Ganal, Martin W., Gregor Durstewitz, Andreas Polley, Aurélie Bérard, Edward S. Buckler, Alain Charcosset, Joseph D. Clarke, Eva-Maria Graner, Mark Hansen, Johann Joets, Marie-Christine Le Paslier, Michael D. McMullen, Pierre Montalent, Mark Rose, Chris-Carolin Schön, Qi Sun, Hildrun Walter, Olivier C. Martin, Matthieu Falque. 2011. "A Large Maize (*Zea mays* L.) SNP Genotyping Array: Development and Germplasm Genotyping, Genetic Mapping to Compare with the B73 Reference Genome." *PLoS ONE* 6: e28334. doi:10.1371/journal.pone.0028334.
- Garcia-Vallvé, S., J. Palau, A. Romeu. 1999. "Horizontal gene transfer in glycosyl hydrolases inferred from codon usage in *Escherichia coli* and *Bacillus subtilis*." *Molecular Biology and Evolution* 16 (9): 1125–1134. doi:10.1093/oxfordjournals.molbev.a026203.
- Gauch, H. G. Jr. 1992. *AMMI analysis on yield trials*. El Batán, Mexico: CIMMYT.
- Gauch, Hugh G. 2013. "A Simple Protocol for AMMI Analysis of Yield Trials." *Crop Science* 53: 1860–1869. doi:10.2135/cropsci2013.04.0241.
- Gauch, Hugh G. Jr, Hans-Peter Piepho, Paolo Annicchiarico. 2008. "Statistical Analysis of Yield Trials by AMMI and GGE: Further Considerations." *Crop Science* 48: 866–889. doi:10.2135/cropsci2007.09.0513.
- Gauch, Hugh G. 2006. "Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE." *Crop Science* 46: 1488–1500. doi:10.2135/cropsci2005.07-0193.
- Gemechu, Getachew Etana, Tewodros Mulualem, Neim Semman. 2022. "Genotype by environment interaction effect on some selected traits of orange-fleshed sweet potato (*Ipomoea batatas* [L.] Lam)." *Heliyon* 8 (12): e12395. doi:10.1016/j.heliyon.2022.e12395.
- Ghaffari, Mehdi, Amir Gholizadeh, Seyed Abbasali Andarkhor, Asadollah Zareei Siahbidi, Seyed Ahmad Kalantar Ahmadi, Farnaz Shariati, Abbas Rezaeizad. 2021. "Stability and genotype $\times$ environment analysis of oil yield of sunflower single cross hybrids in diverse environments of Iran." *Euphytica* 217: 187. doi:10.1007/s10681-021-02921-w.
- Giauffret, C., J. Lothrop, D. Dorvillez, B. Gouesnard, M. Derieux. 2000. "Genotype $\times$ Environment Interactions in Maize Hybrids from Temperate or Highland Tropical Origin." *Crop Science* 40: 1004–1012. doi:10.2135/cropsci2000.4041004x.

- Glamočlija, Đorđe N. 2012. *Posebno Ratarstvo: Žita i Zrnene Mahunarke*. Beograd: Poljoprivredni Fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Gonçalves, Gabriel de Moraes Cunha, Regina Lucia Ferreira-Gomes , Ângela Celis de Almeida Lopes , Paulo Fernando de Melo Jorge Vieira. 2020. "Adaptability and yield stability of soybean genotypes by REML/BLUP and GGE Biplot." *Crop Breeding and Applied Biotechnology* 20: e282920217. doi:10.1590/1984-70332020v20n2a33.
- Grčić, Nikola M. 2016. *Genetička Analiza Nasleđivanja Kvantitativnih Osobina Kukuruzna Primenom Metoda Dialela i Generacijskih Proseka*. Doktorska Disertacija, Beograd, Srbija: Poljoprivredni Fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- Grčić, Nikola, Nenad Delić, Milan Stevanović, Jovan Pavlov, Miloš Crevar, Marko Mladenović, Nemanja Nišavić. 2018. "Genetic distance of maize inbred lines based on SSR markers for prediction of heterosis and combining ability." *Genetika* 50: 359–368. doi:10.2298/GENSR1802359G.
- Greveniotis, Vasileios, Elisavet Bouloupasi, Stylianos Zotis, Athanasios Korkovelos, Dimitrios Kantas, Constantinos G. Ipsilandis. 2023. "Stability Dynamics of Main Qualitative Traits in Maize Cultivations across Diverse Environments regarding Soil Characteristics and Climate." *Agriculture* 13 (5): 1033. doi:10.3390/agriculture13051033.
- Guan, Panfeng, Lahu Lu, Lijia Jia, Muhammad Rezaul Kabir, Jinbo Zhang, Tianyu Lan, Yue Zhao, Mingming Xin, Zhaorong Hu, Yingyin Yao, Zhongfu Ni, Qixin Sun, Huiru Peng. 2018. "Global QTL Analysis Identifies Genomic Regions on Chromosomes 4A and 4B Harboring Stable Loci for Yield-Related Traits Across Different Environments in Wheat (*Triticum aestivum* L.)." *Frontiers in Plant Science* 9: 529.
- Guimaraes, Claudia T., Christiano C. Simoes, Maria Marta Pastina, Lyza G. Maron, Jurandir V. Magalhaes, Renato C.C. Vasconcellos, Lauro J.M. Guimaraes, Ubiraci G.P. Lana, Carlos F.S. Tinoco, Roberto W. Noda, Silvia N. Jardim-Belicuas, Leon V. Kochian, Vera M.C. Alves, Sidney N. Parentoni. 2014. "Genetic dissection of Al tolerance QTLs in the maize genome by high density SNP scan." *BMC Genomics* 15: 153.
- Habila, Susinya, Nopphakhun Khunpolwattana, Thanin Chantarachot,, Teerapong Buaboocha, Luca Comai, Supachitra Chadchawan, Monnat Pongpanich. 2022. "Salt stress responses and SNP-based phylogenetic analysis of Thai rice cultivars." *Plant Genome* e20189. doi:10.1002/tpg2.20189.
- Habtegebriel, Mesfin Hailemariam. 2022. "Adaptability and stability for soybean yield by AMMI and GGE models in Ethiopia." *Frontiers in Plant Science* 13: 950992. doi:10.3389/fpls.2022.950992.
- Hall, Bradford D., Richard Fox, Qu Zhang, Andy Baumgarten, Barry Nelson, Joe Cummings, Ben Drake, Debora Phillips, Kevin Hayes, Mary Beatty, Gina Zastrow-Hayes, Brian Zeka, Jan Hazebroek, Stephen Smith. 2016. "Comparison of Genotypic and Expression Data to Determine Distinctness among Inbred Lines of Maize for Granting of Plant Variety Protection." *Crop Science* 56: 1443–1459. doi:10.2135/cropsci2015.03.0185.
- Hallauer, A. R., J. B. Miranda. 1988. *Quantitative Genetics in Maize Breeding*. Ames, IA, USA: Iowa State University Press.
- Hallauer, Arnel R. , W. A. Russell, O. S. Smith. 1983. "Quantitative Analysis of Iowa Stiff Stalk Synthetic." In *Stadler Genetics Symposium*, 83–104. Columbia, MO: University of Missouri.
- Hallauer, Arnel R., Marcelo J. Carena. 2009. *Maize*. Vol. 3, in *Cereals*, edited by Marcelo J. Carena, 3–98. New York, NY, USA: Springer.

- Hao, Derong, Zhenliang Zhang, Yujing Cheng, Guoqing Chen, Huhua Lu, Yuxiang Mao, Mingliang Shi, Xiaolan Huang, Guangfei Zhou, Lin Xue. 2015. "Identification of Genetic Differentiation between Waxy and Common Maize by SNP Genotyping." *PLOS One* 10: e0142585.
- Hassan, M. A. A. 2015. "Stability Parameters for Grain Yield and Other Agronomic Traits of Promising White Maize Hybrids." *Alexandria Journal of Agricultural Sciences* 60: 17–23.
- He, Kunhui, Shutu Xu, Xinghua Zhang, Yanan Li, Liguang Chang, Yahui Wang, Yaqin Shi, Tingting Cui, Yuan Dong, Tianru Lan, Xueyan Liu, Yutang Du, Renhe Zhang, Jianchao Liu, Jiquan Xue. 2020. "Mining of candidate genes for nitrogen use efficiency in maize based on genome-wide association study." *Molecular Breeding* 40: 83. doi:10.1007/s11032-020-01163-3.
- Heiniger, Ronnie W. 2018. *The Impact of Early Drought on Corn Yield*. Accessed Jul 30, 2022. <https://corn.ces.ncsu.edu/corn-production-information/the-impact-of-early-drought-on-corn-yield/>.
- Hocaoğlu, O., K. Akan, M. Akçura. 2020. "Evaluating leaf rust reactions of pure bread wheat landrace lines using non-parametric statistics." *Phytoparasitica* 48: 261–271. doi:10.1007/s12600-019-00782-7.
- Holland, James B., Wyman E. Nyquist, Cuauhtemoc T. Cervantes-Martínez. 2002. *Estimating and Interpreting Heritability for Plant Breeding: An Update*. Vol. 22, in *Plant Breeding Reviews*, edited by Jules Janick, 9–112. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/9780470650202.ch2.
- Hopkins, Andrew A., K. P. Vogel, K. J. Moore, K. D. Johnson, I. T. Carlson. 1995. "Genotype Effects and Genotype by Environment Interactions for Traits of Elite Switchgrass Populations." *Crop Science* 35: 125–132. doi:10.2135/cropsci1995.0011183X003500010023x.
- Hou, Peng, Yuee Liu, Ruizhi Xie, Bo Ming, Daling Ma, Shaokun Li, Xurong Mei. 2014. "Temporal and spatial variation in accumulated temperature requirements of maize." *Field Crops Research* 158: 55–64. doi:10.1016/j.fcr.2013.12.021.
- Hu, Xinmin, Guihua Wang, Xuemei Du, Hongwei Zhang, Zhenxiang Xu, Jie Wang, Guo Chen, Bo Wang, Xuhui Li, Xunji Chen, Junjie Fu, Jun Zheng, Jianhua Wang, Riliang Gu, Guoying Wang. 2021. "QTL analysis across multiple environments reveals promising chromosome regions associated with yield-related traits in maize under drought conditions." *The Crop Journal* 9: 759–766.
- Hühn, M. 1996. "Nonparametric Analysis of Genotype-by-Environment Interactions by Ranks." In *Genotype-by-Environment Interaction*, edited by Manjit S. Kang and Jr. Gauch, 235–271. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Hühn, Manfred. 1979. "Beitrage zur erfassung der phanotypischen stabilitat." *EDV in Medizin und Biologie* 10: 112–117.
- Hühn, Manfred. 1990. "Nonparametric measures of phenotypic stability. Part 1: Theory." *Euphytica* 47: 189–194. doi:10.1007/BF00024241.
- Hühn, Manfred, Jens Léon. 1995. "Nonparametric Analysis of Cultivar Performance Trials: Experimental Results and Comparison of Different Procedures Based on Ranks." *Agronomy Journal* 87: 627–632. doi:10.2134/agronj1995.00021962008700040004x.
- Hussain, Hafiz Athar, Shengnan Men, Saddam Hussain, Yinlong Chen, Shafaqat Ali, Sai Zhang, Kangping Zhang, Yan Li, Qiwen Xu, Changqing Liao, Longchang Wang. 2019. "Interactive effects of drought and heat stresses on morpho-physiological attributes, yield, nutrient uptake and oxidative status in maize hybrids." *Scientific Reports* 9: 3890. doi:10.1038/s41598-019-40362-7.

- Institut za kukuruz "Zemun Polje". 2000. *Kukuruz na pragu trećeg milenijuma - Sećanja, kazivanja i predviđanja*. Beograd, Srbija: Institut za kukuruz "Zemun Polje".
- International Maize and Wheat Improvement Center. 1997. *White maize: a traditional food grain in developing countries*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Ivan, Jelena, Zoran Boca, Vladimir Sabadoš. 2023. "The Effects of Agricultural Technology on Maize Yield in Sombor Region in Serbia in 2013-2022 Period." *Agriculture & Food* 213–218. doi:10.62991/AF1996304024 .
- Ivanović, Mile, Aleksandra Nastasić, Milisav Stojaković, Đorđe Jocković. 2007. "Rejonizacija hibrida kukuruza." *Zbornik radova Instituta za ratarstvo i povrtarstvo*, 89–94.
- Ivanović, Mile, Nenad Vasić, Goran Bekavac. 2003. "Stabilnost prinosa zrna hibrida kukuruza različitih FAO grupa zrenja." *Zbornik radova Instituta za ratarstvo i povrtarstvo* 38: 101–108.
- Jha, Ambuj B., Krishna K. Gali, Sabine Banniza, Thomas D. Warkentin. 2019. "Validation of SNP markers associated with ascochyta blight resistance in pea." *Canadian Journal of Plant Science* 99: 243–249. doi:10.1139/cjps-2018-0211.
- Jocković, Đorđe. 2008. *Preporuka NS hibrida kukuruza za setvu*. Accessed 05 25, 2024. https://www.poljoberza.net/tekstovi/9401/820/preporuka-ns-hibrida-kukuruza-za-setvu#google_vignette.
- Jones, Donald F. 1917. "Dominance of Linked Factors as a Means of Accounting for Heterosis." *Genetics* 2: 466–479. doi:10.1093/genetics/2.5.466.
- Joo, Eva, Marcelo Zeri, Mir Zaman Hussain, Evan H. Delucia, Carl J. Bernacchi. 2017. "Enhanced evapotranspiration was observed during extreme drought from Miscanthus, opposite of other crops." *Global Change Biology Bioenergy* 9: 1306–1319. doi:10.1111/gcbb.12448.
- Josia, Chimwemwe, Kingstone Mashingaidze, Assefa B. Amelework, Aleck Kondwakwenda, Cousin Musvosvi, Julia Sibiya. 2021. "SNP-based assessment of genetic purity and diversity in maize hybrid breeding." *PLOS One* 16: e0249505.
- Jovanović, Života, Branka Kresović, Miodrag Tolimir, Milomir Filipović, Zoran Dumanović, Dragiša Lopandić. 2014. "Rejonizacija najnovije generacije ZP hibrida kukuruza metodom sume toplotnih jedinica." *Radovi sa XXVIII savetovanja agronoma, veterinara, tehnologa i agroekonomista*. Padinska skela, Srbija: Institut PKB Agroekonomik, Beograd, Srbija.
- Jovanović, Života, Miodrag Tolimir, Željko Kaitović. 2007. "ZP hibridi kukuruza u proizvodnim ogledima 2006. godine." *Zbornik naučnih radova Instituta PKB Agroekonomik*, 53–60.
- Jovanović, Života, Željko Kaitović, Miodrag Tolimir, Milomir Filipović, S. Milenković, N. Lazarević. 2011. "Rejonizacija najnovije generacije ZP hibrida kukuruza u agroekološkim uslovima Srbije." *XVI savetovanje o biotehnologiji sa međunarodnim učešćem*. Čačak, Srbija: Univerzitet u Kragujevcu, Agronomski fakultet u Čačku. 13–18.
- Jovin, P., M. Mirić, V. B. Trifunović, M. Mišović, R. Pavlović, Ž. Kaitović, Z. Vidojković, M. Vesković, Ž. Jovanović, M. Pavlov. 2000. "Rejonizacija Zemunpoljskih Hibrida Kukuruz." *Selekcija i Semenarstvo* VII: 51–55.
- Kang, M. S. 1988. "A Rank-Sum Method for Selecting High-Yielding, Stable Corn Genotypes." *Cereal Research Communications* 16: 113–115.

- Kang, M. S., D. P. Gorman, H. N. Pham. 1991. "Application of a stability statistic to international maize yield trials." *Theoretical and Applied Genetics* 81: 162–165. doi:10.1007/BF00215718.
- Kang, Manjit S. 1993. "Simultaneous Selection for Yield and Stability in Crop Performance Trials: Consequences for Growers." *Agronomy Journal* 85: 754–757. doi:10.2134/agronj1993.00021962008500030042x.
- Kang, Manjit S. 1997. "Using Genotype-by-Environment Interaction for Crop Cultivar Development." *Advances in Agronomy* 62: 199–252. doi:10.1016/S0065-2113(08)60569-6.
- Kang, Manjit S., J. D. Miller, L. L. Darrah. 1987. "A note on relationship between stability variance and ecovalence." *Journal of Heredity* 78: 107. doi:10.1093/oxfordjournals.jhered.a110322.
- Karimizadeh, Rahmatollah, Mohtasham Mohammadi, Naser Sabaghni, Ali Akbar Mahmoodi, Barzo Roustami, Faramarz Seyyedi, Fariba Akbari. 2013. "GGE Biplot Analysis of Yield Stability in Multi-environment Trials of Lentil Genotypes under Rainfed Condition." *Notulae Scientia Biologicae* 5: 256–262. doi:10.15835/nsb529067.
- Karimizadeh, Rahmatollah, Mohtasham Mohammadi, Naser Sabaghnia, Mohammad Kazem Shefazadeh, Jaleh Pouralhossini. 2012. "Univariate stability analysis methods for determining genotype $\times$ environment interaction of durum wheat grain yield." *African Journal of Biotechnology* 11: 2563–2573. doi:10.5897/AJB11.3093.
- Karuniawan, Agung, Haris Maulana, Putri Ardyana Anindita, Andrew Yoel, Debby Ustari, Tarkus Suganda, Vergel Concibido. 2021. "Storage root yield and sweetness level selection for new honey sweet potato (*Ipomoea batatas* [L.] Lam)." *Open Agriculture* 6: 329–345. doi:10.1515/opag-2021-0219.
- Karuniawan, Agung, Haris Maulana, Debby Ustari, Sitaresmi Dewayani, Eso Solihin, M. Amir Solihin, Suseno Amien, Mahfud Arifin. 2021. "Yield stability analysis of orange - Fleshed sweet potato in Indonesia using AMMI and GGE biplot." *Heliyon* 7: e06881. doi:10.1016/j.heliyon.2021.e06881.
- Keane, Jodie, Sheila Page, Alpha Kergna, Jane Kennan. 2009. *Climate Change and Developing Country Agriculture: An Overview of Expected Impacts, Adaptation and Mitigation Challenges, Funding Requirements*. Geneva, Switzerland/Washington, DC, USA: International Centre for Trade and Sustainable Development/International Food & Agricultural Trade Policy Council.
- Kebede, Gezahagn, Walelign Worku, Habte Jifar, Fekede Feyissa. 2023. "GGE biplot analysis of genotype by environment interaction and grain yield stability of oat (*Avena sativa* L.) in Ethiopia." *Agrosystems, Geosciences & Environment* 6 (3): e20410. doi:10.1002/agg2.20410.
- Kermicle, J. L. 1970. "Dependence of the R-mottled Aleurone Phenotype in Maize on Mode of Sexual Transmission." *Genetics* 66: 69–85. doi:10.1093/genetics/66.1.69.
- Killi, Dilek, Filippo Bussotti, Antonio Raschi, Matthew Haworth. 2016. "Adaptation to high temperature mitigates the impact of water deficit during combined heat and drought stress in C3 sunflower and C4 maize varieties with contrasting drought tolerance." *Physiologia Plantarum* 159: 130–147. doi:10.1111/ppl.12490.
- Kim, Hae Ri, Kyu Jin Sa, Min Nam-Gung, Ki Jin Park, Si-Hwan Ryu, Chang Yeun Mo, Ju Kyong Lee. 2021. "Genetic characterization and association mapping in near-isogenic lines of waxy maize using seed characteristics and SSR markers." *Genes & Genomics* 43: 79–90. doi:10.1007/s13258-020-01030-7.

- Koizumi, Emiko, Toshiya Igarashi, Mutsuo Tsuyama, Keiichi Ogawa, Kenji Asano, Akira Kobayashi, Rena Sanetomo, Kazuyoshi Hosaka. 2021. "Association of Genome-Wide SNP Markers with Resistance to Common Scab of Potato." *American Journal of Potato Research* 98: 149–156. doi:10.1007/s12230-021-09827-2.
- Kona, Praveen, B. C. Ajay, K. Gangadhara, Narendra Kumar, Raja Ram Choudhary, M. K. Mahatma, Sushmita Singh, Kiran K. Reddy, S. K. Bera, Chandramohan Sangh, Kirti Rani, Zarana Chavada, K. D. Solanki. 2024. "AMMI and GGE biplot analysis of genotype by environment interaction for yield and yield contributing traits in confectionery groundnut." *Scientific Reports* 14: 2943. doi:10.1038/s41598-024-52938-z.
- Konate, Laban, Baffour Badu-Apraku, Mamadou Coulibaly, Abebe Menkir, M. Nasser Laouali, Silvestro Meseka, Wende Mengesha. 2023. "Agronomic performance and yield stability of extra-early maturing maize hybrids in multiple environments in the Sahel." *Heliyon* 9 (11): e21659. doi:10.1016/j.heliyon.2023.e21659.
- Konstantinov, Kosana, Janko Dumanović, Dragoslav Marinković, Miloje Denić, Snežana Mladenović Drinić, Dražen Jelovac. 2004. *Rečnik genetike i biotehnologije*. Beograd, Srbija: Unija bioloških naučnih društava Jugoslavije.
- Koundinya, A. V.V., B. R. Ajeesh, Vivek Hegde, M.N. Sheela, C. Mohan, K. I. Asha. 2021. "Genetic parameters, stability and selection of cassava genotypes between rainy and water stress conditions using AMMI, WAAS, BLUP and MTSI." *Scientia Horticulturae* 281: 109949. doi:10.1016/j.scienta.2021.109949.
- Kovačević, Aleksandar D. 2024. *Selekcija genotipova kukuruza sa ubrzanim otpuštanjem vlage iz zrna*. Doktorska disertacija. Beograd, Srbija: Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni Fakultet.
- Kravić, Natalija, Vojka Babić, Danijela Ristić, Jelena Srđić, Violeta Anđelković. 2015. "Prinos i fenotipske karakteristike inbred linija kukuruza u promenljivim uslovima spoljašnje sredine." *Selekcija i Semenarstvo* 21: 1–10.
- Kumar, A., A. Bhatt, S. Ravichandran, V. Kumar, S. Dobhal. 2012. "Genotype × environmental interactions for analyzing adaptability and stability in different clones of *Dalbergia sissoo* Roxb." *Journal of Forestry Research* 23 (1): 65–74. doi:10.1007/s11676-012-0234-8.
- LaFramboise, Thomas. 2009. "Single nucleotide polymorphism arrays: a decade of biological, computational and technological advances." *Nucleic Acids Research* 37: 4181–4193. doi:10.1093/nar/gkp552.
- Lamaoui, Mouna, Martin Jemo, Raju Datla, Faouzi Bekkaoui. 2018. "Heat and Drought Stresses in Crops and Approaches for Their Mitigation." *Frontiers in Chemistry* 6: 26. doi:10.3389/fchem.2018.00026.
- Lanza, L.L.B., C.L. Jr. de Souza, L.M.M. Ottoboni, M.L.C. Vieira, A. P. de Souza. 1997. "Genetic distance of inbred lines and prediction of maize single-cross." *Theoretical and Applied Genetics* 94: 1023–1030.
- Leitao, Susana Trindade, Maria Catarina Bicho, Priscila Pereira, Maria Joao Paulo, Marcos Malosetti, Susana de Sousa Araujo, Fred van Eeuwijk, Maria Carlota Vaz Patto. 2021. "Common bean SNP alleles and candidate genes affecting photosynthesis under contrasting water regimes." *Horticulture Research* 8: 4. doi:10.1038/s41438-020-00434-6.
- Léon, J. 1985. "Beiträge zur Erfassung der phänotypischen Stabilität unter besonderer Berücksichtigung unterschiedlicher Heterogenitäts- und Heterozygotiegrade sowie

- einer zusammenfassenden Beurteilung von Ertragshöhe und Ertragssicherheit." *Dissertation*. Kiel, Germany: Christian-Albrechts-Universität.
- Li, Dongdong, Zhiqiang Zhou, Xiaohuan Lu, Yong Jiang, Guoliang Li, Junhui Li, Haoying Wang, Shaojiang Chen, Xinhai Li, Tobias Wurschum, Jochen C. Reif, Shizhong Xu, Mingshun Li, Wenxin Liu. 2021. "Genetic Dissection of Hybrid Performance and Heterosis for Yield-Related Traits in Maize." *Frontiers in Plant Science* 12: 774478. doi:10.3389/fpls.2021.774478.
- Li, Pengcheng, Yingying Zhang, Shuangyi Yin, Pengfei Zhu, Ting Pan, Yang Xu, Jieyu Wang, Derong Hao, Huimin Fang, Chenwu Xu, Zefen Yang. 2018. "QTL-By-Environment Interaction in the Response of Maize Root and Shoot Traits to Different Water Regimes." *Frontiers in Plant Science* 9: 229. doi:10.3389/fpls.2018.00229.
- Li, Zhimin, Jiafa Chen, Liping Han, Jingjing Wen, Gengshen Chen, Huimin Li, Yongxia Wang, Rongbing Zhao, Xuecai Zhang, Zongliang Xia, Jianbing Yan, Jianyu Wu, Junqiang Ding. 2016. "Association mapping resolving the major loci Scmv2 conferring resistance to sugarcane mosaic virus in maize." *European Journal of Plant Pathology* 145: 385–391. doi:10.1007/s10658-015-0852-z.
- Lin, C. S., M. R. Binns. 1988. "A Superiority Measure of Cultivar Performance for Cultivar $\times$ Location Data." *Canadian Journal of Plant Science* 68: 193–198. doi:10.4141/cjps88-018.
- Liu, Chaorui, Chenyu Ma, Jianguo Lü, Zhilan Ye. 2022. "Yield Stability Analysis in Maize Hybrids of Southwest China under Genotype by Environment Interaction Using GGE Biplot." *Agronomy* 12: 1189. doi:10.3390/agronomy12051189.
- Liu, Yong-jian, Bing Wei, Er-liang Hu, Yuan-qi Wu, Yu-bi Huang. 2011. "Yield Stability of Maize Hybrids Evaluated in National Maize Cultivar Regional Trials in Southwestern China Using Parametric Methods." *Agricultural Sciences in China* 10: 1323–1335. doi:10.1016/S1671-2927(11)60125-9.
- Liu, Yong-jian, Chuan Duan, Meng-liang Tian, Er-liang Hu, Yu-bi Huang. 2010. "Yield Stability of Maize Hybrids Evaluated in Maize Regional Trials in Southwestern China Using Nonparametric Methods." *Agricultural Sciences in China* 9: 1413–1422. doi:10.1016/S1671-2927(09)60232-7.
- Lu, Shi, Mu Li, Ming Lu, Xinqi Wan, Piwu Wang, Wenguo Liu. 2020. "Genome-Wide Association Study of Plant and Ear Height in Maize." *Tropical Plant Biology* 13: 262–273. doi:10.1007/s12042-020-09258-z.
- Ludke, Willian Hytalo, Ivan Schuster, Felipe Lopes da Silva, Tatiane Dalla Nora Montecelli, Bruno de Almeida Soares, Aloizio Borem de Oliveira, Leonardo Volpato. 2019. "SNP markers associated with soybean partial resistance to *Phytophthora sojae*." *Crop Breeding and Applied Biotechnology* 19: 31–39. doi:10.1590/1984-70332019v19n1a05.
- Luo, Meijie, Yanxin Zhao, Ruyang Zhang, Jinfeng Xing, Minxiao Duan, Jingna Li, Naishun Wang, Wenguang Wang, Shasha Zhang, Zhihui Chen, Huasheng Zhang, Zi Shi, Wei Song, Jiuran Zhao. 2017. "Mapping of a major QTL for salt tolerance of mature field-grown maize plants based on SNP markers." *BMC Plant Biology* 17: 140.
- Ma, Chenyu, Chaorui Liu, Zhilan Ye. 2024. "Influence of Genotype $\times$ Environment Interaction on Yield Stability of Maize Hybrids with AMMI Model and GGE Biplot." *Agronomy* 14 (5): 1000. doi:10.3390/agronomy14051000.
- Madembo, Connie, Blessing Mhlanga, Christian Thierfelder. 2020. "Productivity or stability? Exploring maize-legume intercropping strategies for smallholder Conservation Agriculture farmers in Zimbabwe." *Agricultural Systems* 185: 102921. doi:10.1016/j.agsy.2020.102921.

- Madić, Milomirka, Dalibor Tomić, Aleksandar Paunović, Vladeta Stevović, Dragan Đurović. 2021. "Prinos zrna hibrida kukuruza različitih FAO grupa zrenja." *XXVI Savetovanje o biotehnologiji sa međunarodnim učešćem*. Čačak, Srbija: Univerzitet u Kragujevcu, Agronomski fakultet. 93–100. doi:10.46793/SBT26.093M.
- Madić, Milomirka, Dalibor Tomić, Aleksandar Paunović, Vladeta Stevović, Milan Biberdžić, Dragan Đurović, Miloš Marjanović. 2023. "Grain Yields of Maize Hybrids in Different Locations in Central Serbia." Edited by Pavle Mašković, Vesna Milovanović and Dušan Marković. *Proceedings of the 1st International Symposium On Biotechnology*. Čačak, Serbia: Faculty of Agronomy in Čačak, University of Kragujevac. 115–123. doi:10.46793/SBT28.115M.
- Madić, Milomirka, Dragan Đurović, Vladeta Stevović, Nikola Bokan. 2010. "Stability Parameters for Grain Yield of Maize Hybrids (*Zea mays* L.)." *Genetika* 42: 137–144. doi:10.2298/GENSR1001137M.
- Madić, Milomirka, Dragan Đurović, Vladeta Stevović, Dalibor Tomić, Milan Biberdžić, Aleksandar Paunović. 2021. "Grain Yield in Maize Hybrids of Different FAO Maturity Groups." Edited by Dušan Kovačević. *Proceedings of XII International Scientific Agriculture Symposium „AGROSYM 2021“*. Jahorina, Bosnia and Herzegovina: University of East Sarajevo, Faculty of Agriculture, Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina. 254.
- Magari, Robert, Manjit S. Kang. 1993. "Genotype selection via a new yield-stability statistic in maize yield trials." *Euphytica* 70: 105–111. doi:10.1007/BF00029647.
- Malik, Waqas Ahmed, Hans-Peter Piepho. 2018. "Biplots: Do Not Stretch Them!" *Crop Science* 58 (3): 1061–1069. doi:10.2135/cropsci2017.12.0747.
- Manjubala, M., R. Vasanthi, Patil Santosh Ganapati, R. Pushpam. 2018. "Comparative study on different nonparametric stability measures in soybean." *Electronic Journal of Plant Breeding* 9: 551–557.
- Maqbool, Muhammad Amir, Muhammad Aslam, Abdurahman Beshir, Muhammad Sarwar Khan, Muhammad Tariq Saeed. 2019. "Studying Selection Criteria and Genetic Variability for Improvement of Indigenous Maize in Pakistan." *Pakistan Journal of Agricultural Sciences* 56 (4): 819–827. doi:10.21162/PAKJAS/19.5765.
- Mare, M., P. Manjeru, B. Ncube, G. Sisito. 2017. "GGE biplot analysis of genotypes by environment interaction on Sorghum bicolor L. (Moench) in Zimbabwe." *African Journal of Plant Science* 11 (7): 308–319. doi:10.5897/AJPS2017.1538.
- Matongera, Nakai, Thokozile Ndhlela, Angeline van Biljon, Maryke Labuschagne. 2023. "Genotype x environment interaction and yield stability of normal and biofortified maize inbred lines in stress and non-stress environments." *Cogent Food & Agriculture* 9: 2163868. doi:10.1080/23311932.2022.2163868.
- Mazaheri, Mona, Marlies Heckwolf, Brieanne Vaillancourt, Joseph L. Gage, Brett Burdo, Sven Heckwolf, Kerrie Barry, Anna Lipzen, Camila Bastos Ribeiro, Thomas J. Y. Kono, Heidi F. Kaeppler, Edgar P. Spalding, Candice N. Hirsch, C. Robin Buell, Natalia de Leon, Shawn M. Kaeppler. 2019. "Genome-wide association analysis of stalk biomass and anatomical traits in maize." *BMC Plant Biology* 19: 45.
- McClintock, Barbara. 1930. "A Cytological Demonstration of the Location of an Interchange between Two Non-homologous Chromosomes of *Zea mays*." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 16: 791–796. doi:10.1073/pnas.16.12.791.

- McClintock, Barbara. 1950. "The origin and behavior of mutable loci in maize." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 36: 344–355. doi:10.1073/pnas.36.6.344.
- Melchinger, Albrecht E., Ramesh K. Gumber. 1998. *Overview of Heterosis and Heterotic Groups in Agronomic Crops*. Vol. 25, in *Concepts and Breeding of Heterosis in Crop Plants*, edited by Kendall R. Larnkey and Jack E. Staub, 29–44. Madison, WI: Crop Science Society of America. doi:10.2135/cssaspecpub25.c3.
- Mendes, Flávia Ferreira, Lauro José Moreira Guimarães, João Cândido Souza, Paulo Evaristo Oliveira Guimarães, Cleso Antônio Patto Pacheco, Jane Rodrigues de Assis Machado, Walter Fernandes Meirelles, Adelmo Resende da Silva, Sidney Netto Parentoni. 2012. "Adaptability and stability of maize varieties using mixed model methodology." *Crop Breeding and Applied Biotechnology* 12: 111–117.
- Mengesha, Wende Abera, Abebe Menkir, Nnanna Unakchukwu, Silvestro Meseka, Adetutu Farinola, Gezahegn Girma, Melaku Gedil. 2017. "Genetic diversity of tropical maize inbred lines combining resistance to *Striga hermonthica* with drought tolerance using SNP markers." *Plant Breeding* 136: 338–343.
- Mengistu, Girma, Hussein Shimelis, Mark Laing, Dagnachew Lule, Ermias Assefa, Isack Mathew. 2020. "Genetic diversity assessment of sorghum (*Sorghum bicolor*(L.) Moench) landraces using SNP markers." *South African Journal of Plant and Soil* 37: 220–226. doi:10.1080/02571862.2020.1736346.
- Milovanović, Danka, Beka Sarić, Valentina Nikolić, Marijana Simić, Slađana Žilić. 2024. "Quality Parameters of Silage Maize Hybrids for Ruminant Feed." Edited by Vladimir Kurćubić, Pavle Mašković, Marija Gavrilović and Dušan Marković. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Biotechnology – SYMBIOTECH*. Čačak, Serbia: Faculty of Agronomy in Čačak, University of Kragujevac. 439–445. doi:10.46793/SBT29.56DM.
- Mirosavljević, Milan, Novo Pržulj, Petar Čanak. 2014. "Analysis of New Experimental Barley Genotype Performance for Grain Yield Using AMMI Biplot." *Selekcija i Semenarstvo* 20: 27–36.
- Mitrović, Bojan M. 2013. *Genetička Varijabilnost i Multivarijaciona Analiza Važnijih Agronomskih Osobina Populacije Kukuruzna Uske Genetičke Osnove*. PhD Thesis, Beograd, Srbija: Poljoprivredni Fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- Mitrović, Bojan, Dušan Stanisavljević, Sanja Treskić, Milisav Stojaković, Goran Bekavac, Aleksandra Nastasić, Mile Ivanović. 2011. "GGE biplot analiza multilokacijskih ogleda NS hibrida kukuruza." *Ratarstvo i povrtarstvo* 48: 77–82.
- Mitrović, Bojan, Dušan Stanisavljević, Sanja Treskić, Milisav Stojaković, Mile Ivanović, Goran Bekavac, Miloš Rajković. 2012. "Evaluation of Experimental Maize Hybrids Tested in Multi-Location Trials using AMMI and GGE Biplot Analyses." *Turkish Journal of Field Crops* 17: 35–40.
- Mladenović, Marko, Zoran Čamdžija, Aleksandar Kovačević, Sanja Perić, Milan Stevanović, Olivera Đorđević Melnik, Nikola Grčić. 2021. "The grain yield stability analysis of the ZP commercial maize hybrids based on multi-environmental testing." Edited by Dušan Kovačević. *Proceedings of XII International Scientific Agriculture Symposium „AGROSYM 2021“*. Jahorina, Bosnia and Herzegovina: University of East Sarajevo, Faculty of Agriculture, Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina. 427–431.
- Mohammadi, Mohtasham, Rahmatollah Karimizadeh, Naser Sabaghnia, Mohammad Kazem Shefazadeh. 2012. "Genotype × Environment Interaction and Yield Stability

- Analysis of New Improved Bread Wheat Genotypes." *Turkish Journal of Field Crops* 17: 67–73.
- Mohammadi, Reza, Abdolvahab Abdulahi, Reza Haghpars, Mohammad Armion . 2007. "Interpreting genotype × environment interactions for durum wheat grain yields using nonparametric methods." *Euphytica* 157: 239–251. doi:10.1007/s10681-007-9417-3.
- Mokrienko, Volodymyr, Taras Kornienko. 2024. "Formation of productivity of maize hybrids of different ripening groups in the Forest-Steppe region." *Plant and Soil Science* 15 (1): 52–62. doi:10.31548/plant1.2024.52.
- Moll, R. H., J. H. Lonnquist, J. Velez Fortuno, E. C. Johnson. 1965. "The Relationship of Heterosis and Genetic Divergence in Maize." *Genetics* 52 (1): 139–144. doi:10.1093/genetics/52.1.139.
- Monteverde, Eliana, Lucía Gutierrez, Pedro Blanco, Fernando Pérez de Vida, Juan E. Rosas, Victoria Bonnacarrère, Gastón Quero, Susan McCouch. 2019. "Integrating Molecular Markers and Environmental Covariates To Interpret Genotype by Environment Interaction in Rice (*Oryza sativa* L.) Grown in Subtropical Areas." *G3 Genes Genomes Genetics* 9: 1519–1531.
- Mortazavian, S. M. Mahdi, Shiva Azizi-Nia. 2014. "Nonparametric Stability Analysis in Multi-Environment Trial of Canola." *Turkish Journal of Field Crops* 19: 108–117. doi:10.17557/tjfc.41390.
1991. *MSTAT-C: A Software Program for the Design, Management and Analysis of Agronomic Research Experiments*. East Lansing, MI, USA: Michigan State University.
- Müller, Christoph, Joshua Elliott, Thomas A. M. Pugh, Alex C. Ruane, Philippe Ciais, Juraj Balkovic, Delphine Deryng, Christian Folberth, R. Cesar Izaurralde, Curtis D. Jones, Nikolay Khabarov, Peter Lawrence, Wenfeng Liu, Ashwan D. Reddy, Erwin Schmid, Xuhui Wang. 2018. "Global patterns of crop yield stability under additional nutrient and water inputs." *PLoS ONE* 13: e0198748. doi:10.1371/journal.pone.0198748.
- Mut, Zeki, Nevzat Aydin, Hasan Orhan Bayramoglu, Hasan Ozcan. 2009. "Interpreting Genotype × Environment Interaction in Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes Using Nonparametric Measures." *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 33: 127–137. doi:10.3906/tar-0803-28.
- Mutlu, Fatma, Fusun Yurekli, Birol Mutlu, Fatma Bilge Emre, Funda Okusluk, Onur Ozgul. 2018. "Assessment of Phytotoxic and Genotoxic Effects of Anatase TiO₂ Nanoparticles on Maize Cultivar by Using Rapd Analysis." *Fresenius Environmental Bulletin* 27: 436–445.
- Mylonas, Ioannis, Evaggelia Sinapidou, Emmanouel Remountakis, Iosif Sistanis, Chrysanthi Pankou, Elissavet Ninou, Ioannis Papadopoulos, Fokion Papathanasiou, Anastasios Lithourgidis, Fotakis Gekas, Christos Dordas, Constantinos Tzantarmas, Anastasia Kargiotidou, Maria Tokamani, Raphael Sandaltzopoulos, Ioannis S. Tokatlidis. 2020. "Improved plant yield efficiency alleviates the erratic optimum density in maize." *Agronomy Journal* 112: 1690–1701. doi:10.1002/agj2.20187.
- Nagy, János, L. Honti. 2005. "Results of comparative farm trials on new Hungarian-bred maize hybrids and recommendations to farmers." *Acta Agronomica Hungarica* 53 (1): 1–7. doi:10.1556/aagr.53.2005.1.1.
- Najafi, Ehsan, Naresh Devineni, Reza M. Khanbilvardi, Felix Kogan. 2018. "Understanding the Changes in Global Crop Yields Through Changes in Climate and Technology." *Earth's Future* 6: 410–427. doi:10.1002/2017EF000690.

- Nassar, R., M. Huehn. 1987. "Studies on Estimation of Phenotypic Stability: Tests of Significance for Nonparametric Measures of Phenotypic Stability." *Biometrics* 43: 45–53. doi:10.2307/2531947.
- Nataraj, Vennampally, Anuradha Bhartiya, Chandra Pratap Singh, Heisnam Nanita Devi, Milind Panjabrao Deshmukh, Philips Verghese, Kamendra Singh, Shivaji Pandurang Mehtre, Vedna Kumari, Shivakumar Maranna, Giriraj Kumawat, Milind B Ratnaparkhe, Gyanesh K Satpute, Vangala Rajesh, Subhash Chandra, Rajkumar Ramteke, Nita Khandekar, Sanjay Gupta. 2021. "WAASB-based stability analysis and simultaneous selection for grain yield and early maturity in soybean." *Agronomy Journal* 113: 3089–3099. doi:10.1002/agj2.20750.
- Naves Pinto, Jeeder Fernando, Willame dos Santos Candido, Jefferson Fernando Naves Pinto, Edésio Fialho dos Reis. 2019. "Adaptability and Stability in Maize Populations." *Journal of Agricultural Science* 11: 23–31.
- Nikolić, Ana, Marija Kostadinović, Jelena Vančetović, Goran Stanković, Dragana Ignjatović-Micić. 2017. "Comparison of Statistical Methods for Genetic Similarity Evaluation of Maize Inbred Lines." *Ratarstvo i Povrtarstvo* 54: 25–30. doi:10.5937/ratpov54-12174.
- Nikolić, Ana, Natalija Kravić, Jelena Srđić, Dragan Kovačević, Violeta Anđelković, Milomir Filipović, Snežana Mladenović-Drinić. 2019. "Divergence among maize genotypes with different kernel types according to SSR marker analysis." *Genetika* 51: 237–249. doi:10.2298/GENSR1901237N.
- Nikolić, Valentina, Slađana Žilić, Marijana Simić, Vesna Kandić, Vesna Perić, Jelena Srđić, Natalija Kravić. 2022. "Nutritional Quality and Digestibility of Maize Hybrid Plants for Silage." Edited by Maria Duca, Steliana Clapco and Maricela Severin. *Abstract Book National Conference with international participation „Life sciences in the dialogue of generations: Connections between Universities, Academia and Business Community”*. Chisinau, Moldova: Moldova State University. 53.
- Nišavić, Nemanja, Zoran Čamdžija, Tomislav Živanović, Sofija Božinović, Nikola Grčić, Irena Radinović, Dragan Božović. 2025. "Impact of Genotype × Environment Interactions on the Yield and Stability of Maize Hybrids in Serbia." *Romanian Agricultural Research* 42: 233–245.
- Odong, T. L., J. van Heerwaarden, J. Jansen, T. J. L. van Hintum, F. A. van Eeuwijk. 2011. "Determination of genetic structure of germplasm collections: are traditional hierarchical clustering methods appropriate for molecular marker data?" *Theoretical and Applied Genetics* 123: 195–205. doi:10.1007/s00122-011-1576-x.
- Olivoto, Tiago, Alessandro D.C. Lúcio, Jose A.G. da Silva, Bruno G. Sari, Maria I. Diel. 2019. "Mean Performance and Stability in Multi-Environment Trials II: Selection Based on Multiple Traits." *Agronomy Journal* 111: 2961–2969. doi:10.2134/agronj2019.03.0221.
- Omar, Mohamed, Hassan A. Rabie, Saber A. Mowafi, Hisham T. Othman, Diaa Abd El-Moneim, Khadiga Alhrabi, Elsayed Mansour, Mohamed M.A. Ali. 2022. "Multivariate Analysis of Agronomic Traits in Newly Developed Maize Hybrids Grown under Different Agro-Environments." *Plants* 11: 1187. doi:10.3390/plants11091187.
- Oral, Erol. 2018. "Effect of Nitrogen Fertilization Levels on Grain Yield and Yield Components in Triticale Based on AMMI and GGE Biplot Analysis." *Applied Ecology and Environmental Research* 16 (4): 4865–4878. doi:0.15666/aeer/1604_48654878.
- Pacheco, Ángela, Mateo Vargas, Gregorio Alvarado, Francisco Rodríguez, José Crossa, Juan Burgueño. 2015. "GEA-R (Genotype x Environment Analysis with R for Windows)

- Version 4.1." CIMMYT Research Data & Software Repository Network, V16. Accessed 02 20, 2023. <https://hdl.handle.net/11529/10203>.
- Pavlov, Jovan. 2013. *Uticaj sestrinskih ukrštanja na prinos i agronomske osobine kukuruza (Zea mays L.)*. Doktorska disertacija, Beograd, Srbija: Poljoprivredni Fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- . 2013. "Uticaj sestrinskih ukrštanja na prinos i agronomske osobine kukuruza (Zea mays L.). Doktorska disertacija." Beograd, Srbija: Poljoprivredni Fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- Pavlov, Jovan, Nenad Delić, Milan Stevanović, Zoran Čamdžija, Nikola Grčić, Miloš Crevar. 2011. "Grain yield of ZP maize hybrids in the maize growing areas in Serbia." Edited by M. Pospišil. *Proceedings. 46th Croatian and 6th International Symposium on Agriculture*. Zagreb, Croatia: University of Zagreb, Faculty of Agriculture. 395–398.
- Pavlov, Jovan, Nenad Delić, Srbojub Živanov, Zoran Čamdžija, Nikola Grčić, Danijela Ristić, Marija Kostadinović. 2022. "Stability analysis of different maize hybrids grown in Serbia." *4th International Plant Breeding Congress*. Antalya, Türkiye: BİSAB.
- Pavlov, Jovan, Nenad Delić, Tomislav Živanović, Danijela Ristić, Zoran Čamdžija, Milan Stevanović, Miodrag Tolimir. 2016. "Relationship between Genetic Distance, Specific Combining Abilities and Heterosis in Maize (Zea mays L.)." *Genetika* 48: 165–172. doi:10.2298/GENSR1601165P.
- Pavlov, Jovan, Nenad Delić, Zoran Čamdžija, Gordana Branković, Nataša Milosavljević, Nikola Grčić, Sofija Božinović. 2024. "Modelling of Genotype × Environment interaction for grain yield of late maturity maize hybrids in Serbia by climate variables." *Chilean journal of agricultural research* 84 (2): 144–153. doi:10.4067/s0718-58392024000200144.
- Pejic, I., P. Ajmone-Marsan, M. Morgante, V. Kozumplick, P. Castiglioni, G. Taramino, M. Motto. 1998. "Comparative analysis of genetic similarity among maize inbred lines detected by RFLPs, RAPDs, SSRs, AFLPs." *Theoretical and Applied Genetics* 97: pages1248–1255. doi:10.1007/s001220051017.
- Perić, Sanja, Milan Stevanović, Slaven Prodanović, Snežana Mladenović-Drinić, Nikola Grčić, Vesna Kandić, Jovan Pavlov. 2021. "Genetic distance of maize inbreds for prediction of heterosis and combining ability." *Genetika* 53: 1219–1228. doi:10.2298/GENSR2103219P.
- Perkins, Jean M., J. L. Jinks. 1968. "Environmental and genotype-environmental components of variability III. Multiple lines and crosses." *Heredity* 23: 339–356. doi:10.1038/hdy.1968.48.
- Peterson, C. J., R. A. Graybosch, P. S. Baenziger, A. W. Grombacher. 1992. "Genotype and Environment Effects on Quality Characteristics of Hard Red Winter Wheat." *Crop Science* 32: 98–103. doi:10.2135/cropsci1992.0011183X003200010022x.
- Piepho, H.-P. 1998. "Methods for Comparing the Yield Stability of Cropping Systems." *Journal of Agronomy and Crop Science* 180: 193–213. doi:10.1111/j.1439-037X.1998.tb00526.x.
- Pinthus, Moshe J. 1973. "Estimate of genotypic value: A proposed method." *Euphytica* 22: 121–123. doi:10.1007/BF00021563.
- Plaisted, R. L. 1960. "A shorter method for evaluating the ability of selections to yield consistently over locations." *American Potato Journal* 37: 166–172. doi:10.1007/BF02855271.

- Plaisted, R. L., L. C. Peterson. 1959. "A technique for evaluating the ability of selections to yield consistently in different locations or seasons." *American Potato Journal* 36: 381–385. doi:10.1007/BF02852735.
- Popović, Aleksandar S. 2020. *Procena oplemenjivačke vrednosti i molekularna karakterizacija lokalnih populacija kukuruza Zapadnog Balkana*. Beograd, Srbija: Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet.
- Popović, Aleksandar, Natalija Kravić, Milosav Babić, Slaven Prodanović, Mile Sečanski, Vojka Babić. 2020. "Breeding potential of maize landraces evaluated by their testcross performance." *Zemdirbyste-Agriculture* 107 (2): 153–160. doi:10.13080/z-a.2020.107.020.
- Popović, Aleksandar, Slaven Prodanović, Jelena Golijanin Pantović, Nikola Grčić, Sanja Perić, Milan Ugrinović, Vojka Babić. 2024. "Efekat lokalnih populacija i testera na varijabilnost mase 1000 semena i prinos test cross hibrida kukuruza." Edited by Kristina Luković, Biljana Šević and Ivana Živković. *Biotehnologija i savremeni pristup u gajenju i oplemenjivanju bilja*. Smederevska Palanka, Srbija: Institut za povrtarstvo Smederevska Palanka.
- Pour-Aboughadareh, Alireza, Marouf Khalili, Peter Poczai, Tiago Olivoto. 2022. "Stability Indices to Deciphering the Genotype-by-Environment Interaction (GEI) Effect: An Applicable Review for Use in Plant Breeding Programs." *Plants* 11: 414. doi:10.3390/plants11030414.
- Pour-Aboughadareh, Alireza, Mohsen Yousefian, Hoda Moradkhani, Peter Poczai, Kadambot H.M. Siddique. 2019. "STABILITYSOFT: A new online program to calculate parametric and non-parametric stability statistics for crop traits." *Applications in Plant Sciences* 7: e01211. doi:10.1002/aps3.1211.
- Prasad, P. V. V., S. A. Staggenborg, Z. Ristic. 2008. *Impacts of Drought and/or Heat Stress on Physiological, Developmental, Growth, Yield Processes of Crop Plants*. Vol. Volume 1, in *Response of Crops to Limited Water: Understanding and Modeling Water Stress Effects on Plant Growth Processes*, edited by L. R. Ahuja, V. R. Reddy, S. A. Saseendran and Qiang Yu, 301–355. Wiley. doi:10.2134/advagricsystmodel1.c11.
- Prasanna, B. M., Kevin Pixley, Marilyn L. Warburton, Chuan-Xiao Xie. 2010. "Molecular marker-assisted breeding options for maize improvement in Asia." *Molecular Breeding* 26: 339–356. doi:10.1007/s11032-009-9387-3.
- Pritchard, Jonathan K., Matthew Stephens, Peter Donnelly. 2000. "Inference of Population Structure Using Multilocus Genotype Data." *Genetics* 155: 945–959.
- Prodanović, Slaven, Gordana Šurlan Momirović, Dragica Zorić, Mila Savić. 2017. *Biološki i Molekularni Markeri u Oplemenjivanju*. Beograd: Poljoprivredni Fakultet Univerziteta u Beogradu.
- PSS Sombor. 2023. *Godišnji izveštaj o atestiranim količinama semena i sadnog materijala u sezoni 2021/2022. godine*. Sombor, Srbija: Poljoprivredna Stručna Služba Sombor.
- Punya, V. K. Sharma, P. Kumar, A. Kumar. 2019. "Agronomic characters and genomic markers based assessment of genetic divergence and its relation to heterotic performance in maize." *Journal of Environmental Biology* 40: 1094–1101. doi:10.22438/jeb/40/5/MRN-988.
- Purchase, J.L., Hesta Hatting, C. S. van Deventer. 2000. "Genotype × environment interaction of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in South Africa: II. Stability analysis of yield performance." *South African Journal of Plant and Soil* 17: 101–107. doi:10.1080/02571862.2000.10634878.

- Radan, Zvonko. 2016. "Adaptibilnost Hibrida Kukuruz u Različitim Megaokolinama." Osijek, Hrvatska: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Poljoprivredni Fakultet u Osijeku.
- Radičević, Zorica, Ljiljana Džingalašević, Jelica Bojović, Srđan Milakara, Slobodan Radević. 2019. *Agrometeorološki uslovi u proizvodnoj 2018/2019. godini na teritoriji republike Srbije*. Beograd: Republički Hidrometeorološki Zavod, Odeljenje za Primenjenu Klimatologiju i Agrometeorologiju.
- . 2020. *Agrometeorološki uslovi u proizvodnoj 2019/2020. godini na teritoriji Republike Srbije*. Beograd: Republički Hidrometeorološki Zavod, Odeljenje za Primenjenu Klimatologiju i Agrometeorologiju.
- Radojčić, Aleksandar, Milomir Filipović, Jelena Vančetović, Dragana V. Branković-Radojčić, Jovan Pavlov. 2008. "Maturing groups and grain yield potential of ZP maize hybrids." *Zbornik naučnih radova Instituta PKB Agroekonomik* 14 (1-2): 43–47.
- Rajičić, Vera, Jelena Stojiljković, Nenad Đurić, Ivan Tupajić, Biljana Šević, Vesna Perišić, Dragan Terzić. 2024. "Influence of year and soil type on the yield of different maize hybrids." *Acta Agriculturae Serbica* 29 (58): 75–83. doi:10.5937/AASer2458075R.
- Ranković, Dejan, Goran Todorović, Marijenka Tabaković, Slaven Prodanović, Jan Boćanski, Nenad Delić. 2021. "Direct and Joint Effects of Genotype, Defoliation and Crop Density on the Yield of Three Inbred Maize Lines." *Agriculture* 11 (6): 509. doi:10.3390/agriculture11060509.
- Ravi, Samathmika, Giovanni Campagna, Maria Cristina Della Lucia, Chiara Broccanello, Giovanni Bertoldo, Claudia Chiodi, Laura Maretto, Matteo Moro, Azam Sadat Eslami, Subhashini Srinivasan, Andrea Squartini, Giuseppe Concheri, Piergiorgio Stevanato. 2021. "SNP Alleles Associated With Low Bolting Tendency in Sugar Beet." *Frontiers in Plant Science* 12: 693285. doi:10.3389/fpls.2021.693285.
- Ravindra, Babu S., J. Gokulakrishnan, S. Ramakrishna. 2017. "Stability analysis using various parametric and non-parametric methods in single and three-way cross hybrids of maize (*Zea mays* L.)." *International Journal of Botany Studies* 2: 58–64.
- Rea, Ramón, Orlando De Sousa-Vieira, Alida Díaz, Miguel Ramón, Rosaura Briceño. 2017. "Genotype by environment interaction and yield stability in sugarcane." *Revista Facultad Nacional de Agronomía* 70: 8129. doi:10.15446/rfna.v70n2.61790.
- Reckling, Moritz, Hella Ahrends, Tsu-Wei Chen, Werner Eugster, Steffen Hadasch, Samuel Knapp, Friedrich Laidig, Anja Linstädter, Janna Macholdt, Hans-Peter Piepho, Katja Schiffers, Thomas F. Döring. 2021. "Methods of yield stability analysis in long-term field experiments. A review." *Agronomy for Sustainable Development* 41: 27. doi:10.1007/s13593-021-00681-4.
- Republički hidrometeorološki Zavod Republike Srbije. 2020. *Meteorološki Godišnjak 1: Klimatološki Podaci 2019*. Beograd, Srbija: Republički hidrometeorološki Zavod Republike Srbije.
- Republički hidrometeorološki Zavod Republike Srbije. 2021. *Meteorološki Godišnjak 1: Klimatološki Podaci 2020*. Beograd, Srbija: Republički hidrometeorološki Zavod Republike Srbije.
- Republički Hidrometeorološki Zavod Srbije. 2021. *RHMZ - Republički Hidrometeorološki Zavod Srbije*. Accessed 11 19, 2021. <http://www.hidmet.gov.rs/>.
- Rhoades, Marcus M. 1931. "Cytoplasmic Inheritance of Male Sterility in *Zea mays*." *Science* 73: 340–341. doi:10.1126/science.73.1891.340.
- Ribeiro, P. F., B. Badu-Apraku, V. E. Gracen, E. Y. Danquah, A. L. Garcia-Oliveira, M. D. Asante, C. Afriyie-Debrah, M. Gedil. 2018. "Identification of Quantitative Trait Loci

- for Grain Yield and Other Traits in Tropical Maize Under High and Low Soil-Nitrogen Environments." *Crop Science* 58: 321–331. doi:10.2135/cropsci2017.02.0117.
- Roemer, J. 1917. "Sinde die ertagdreichen Sorten ertagissicherer." *DLG-Mitteilungen* 32: 87–89.
- Roemer, T. 1917. "Sind die ertragsreichen Sorten ertragssicherer?" *Mitteilung Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft* 32: 87–89.
- Rose, Gillian, Tom Osborne, Helen Greatrex, Tim Wheeler. 2016. "Impact of progressive global warming on the global-scale yield of maize and soybean." *Climatic Change* 134: 417–428.
- Rosegrant, Mark W., Claudia Ringler, Timothy B. Sulser, Mandy Ewing, Amanda Palazzo, Tingju Zhu, Gerald C. Nelson, Jawoo Koo, Richard Robertson, Siwa Msangi, Miroslav Batka. 2009. *Agriculture and Food Security under Global Change: Prospects for 2025/2050*. Washington, DC: International Food Policy Research Institute.
- Ruswandi, Dedi, Elia Azizah, Haris Maulana, Mira Ariyanti, Anne Nuraini, Nyimas Poppy Indriani, Yuyun Yuwariah. 2022. "Selection of high-yield maize hybrid under different cropping systems based on stability and adaptability parameters." *Open Agriculture* 7: 161–170. doi:10.1515/opag-2022-0073.
- Ruswandi, Dedi, Muhammad Syafii, Nolahdi Wicaksana, Haris Maulana, Mira Ariyanti, Nyimas Poppy Indriani, Edy Suryadi, Jajang Supriatna, Yuyun Yuwariah. 2022. "Evaluation of High Yielding Maize Hybrids Based on Combined Stability Analysis, Sustainability Index, GGE Biplot." *BioMed Research International* 2022: 3963850. doi:10.1155/2022/3963850.
- Sabaghnia, Naser. 2016. "Nonparametric statistical methods for analysis of genotype $\times$ environment interactions in plant pathology." *Australasian Plant Pathology* 45: 571–580. doi:10.1007/s13313-016-0453-0.
- Sabaghnia, Naser, Rahmatollah Karimizadeh, Mahya Mohammadi. 2012. "The use of corrected and uncorrected nonparametric stability measurements in durum wheat multi-environmental trials." *Spanish Journal of Agricultural Research* 10: 722–730. doi:10.5424/sjar/2012103-384-11.
- Saeidnia, Fatemeh, Majid Taherian, Seyed Mahmoud Nazari. 2023. "Graphical analysis of multi-environmental trials for wheat grain yield based on GGE-biplot analysis under diverse sowing dates." *BMC Plant Biology* 23: 198. doi:10.1186/s12870-023-04197-9.
- Said, A. A., M. H. Motawea, M. S. Hassan, R. Roshdy. 2020. "Mean performance and stability parameters for comparing some bread wheat cultivars under different environments." *SVU-International Journal of Agricultural Science* 2: 484–497. doi:10.21608/svuijas.2020.47432.1047.
- Scapim, Carlos Alberto, Valter Rodrigues Oliveira, Alessandro de Lucca e Braccini, Cosme Damiao Cruz, Carlos Alberto de Bastos Andrade, Maria Celeste Gonçalves Vidigal. 2000. "Yield stability in maize (*Zea mays* L.) and correlations among the parameters of the Eberhart and Russell, Lin and Binns and Huehn models." *Genetics and Molecular Biology* 23: 387–393. doi:10.1590/S1415-47572000000200025.
- Seboksa, Gelana, Mandefro Nigussie, Gezahegne Bogale. 2001. "Stability of Drought Tolerant Maize Genotypes in the Drought Stressed Areas of Ethiopia." *Seventh Eastern and Southern Africa Regional Maize Conference*. Nairobi, Kenya: CIMMYT. 301–304.
- Senior, M. Lynn, Manfred Heun. 1993. "Mapping maize microsatellites and polymerase chain reaction confirmation of the targeted repeats using a CT primer." *Genome* 36: 884–889.

- Seo, Eunju, Kipoong Kim, Tae-Hwan Jun, Jinsil Choi, Seong-Hoon Kim, Maria Munoz-Amatriain, Hokeun Sun, Bo-Keun Ha. 2020. "Population Structure and Genetic Diversity in Korean Cowpea Germplasm Based on SNP Markers." *Plants* 9: 1190. doi:10.3390/plants9091190.
- Sharifi, Peyman, Abdolrahman Erfani, Abouzar Abbasian, Ali Mohaddesi. 2020. "Stability of some of rice genotypes based on WAASB and MTSI indices." *Iranian Journal of Genetics and Plant Breeding* 9: 1–11. doi:10.30479/ijgpb.2021.14432.1283.
- Shepherd, Andrew W. 2010. *A Guide to Maize Marketing for Extension Officers*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Shiferaw, Bekele, Boddupalli M. Prasanna, Jonathan Hellin, Marianne Bänziger. 2011. "Crops that feed the world 6. Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security." *Food Security* 3: 307. doi:10.1007/s12571-011-0140-5.
- Shojaei, Seyed Habib, Khodadad Mostafavi, Amirparviz Lak, Ali Omrani, Saeed Omrani, Seyed Mohammad Nasir Mousavi, Árpád Illés, Csaba Bojtor, János Nagy. 2021. "Evaluation of stability in maize hybrids using univariate parametric methods." *Journal of Crop Science and Biotechnology* 25: 269–276. doi:10.1007/s12892-021-00129-x.
- Shojaei, Seyed Habib, Khodadad Mostafavi, Mohammad Reza Bihamta, Ali Omrani, Seyed Mohammad Nasir Mousavi, Árpád Illés, Csaba Bojtor, Janos Nagy. 2022. "Stability on Maize Hybrids Based on GGE Biplot Graphical Technique." *Agronomy* 12: 394. doi:10.3390/agronomy12020394.
- Shojaei, Seyed Habib, Khodadad Mostafavi, Mohammad Reza Bihamta, Ali Omrani, Seyed Mohammad Nasir Mousavi, Árpád Illés, Csaba Bojtor, Janos Nagy. 2022. "Stability on Maize Hybrids Based on GGE Biplot Graphical Technique." *Agronomy* 12 (2): 394. doi:10.3390/agronomy12020394.
- Shukla, G. 1972. "Some statistical aspects of partitioning genotype-environmental components of variability." *Heredity* 29: 237–245. doi:10.1038/hdy.1972.87.
- Shull, George H. 1908. "The Composition of a Field of Maize." *Journal of Heredity* 4 (1): 296–301. doi:10.1093/jhered/os-4.1.296.
- Silva, Karla Jorge, Claudia Teixeira Guimaraes, Jose Henrique Soler Guilhen, Paulo Evaristo de Oliveira Guimaraes, Sidney Netto Parentoni, Roberto dos Santos Trindade, Amanda Avelar de Oliveira, Karine da Costa Bernardino, Marcos de Oliveira Pinto, Kaio Olímpio das Graças Dias, Carolina de Oliveira Bernardes, Luiz Antônio dos Santos Dias, Lauro José Moreira Guimarães, Maria Marta Pastina. 2020. "High-density SNP-based genetic diversity and heterotic patterns of tropical maize breeding lines." *Crop Science* 10: 779–787.
- Singamsetti, Ashok, J. P. Shahi, P. H. Zaidi, K. Seetharam, M. T. Vinayan, Munnesh Kumar, Saurav Singla, Kumari Shikha, Kartik Madankar. 2021. "Genotype × environment interaction and selection of maize (*Zea mays* L.) hybrids across moisture regimes." *Field Crops Research* 270: 108224. doi:10.1016/j.fcr.2021.108224.
- Singh, Bansa, Arpita Das, A. K. Parihar, B. Bhagawati, Deepak Singh, K. N. Pathak, Kusum Dwivedi, Niranjana Das, Nishi Keshari, R. L. Midha, Raju Kumar, Aditya Pratap, Vaibhav Kumar, Sanjeev Gupta. 2020. "Delineation of Genotype-by-Environment interactions for identification and validation of resistant genotypes in mungbean to root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*) using GGE biplot." *Scientific Reports* 10: 4108. doi:10.1038/s41598-020-60820-x.
- Singh, Brahma Deo, Ashok Kumar Singh. 2015. *Marker-Assisted Plant Breeding: Principles and Practices*. New Delhi, India: Springer.

- Smith, A. B., B. R. Cullis, R. Thompson. 2005. "The analysis of crop cultivar breeding and evaluation trials: an overview of current mixed model approaches." *The Journal of Agricultural Science* 143: 449–462. doi:10.1017/S0021859605005587.
- Smith, O. S., J. S. C. Smith, S. L. Bowen, R. A. Tenborg, S. J. Wall. 1990. "Similarities among a group of elite maize inbreds as measured by pedigree, F1 grain yield, grain yield, heterosis, RFLPs." *Theoretical and Applied Genetics* 80: 833–840. doi:10.1007/BF00224201.
- Sneller, C. H., L. Kilgore-Norquest, D. Dombek. 1997. "Repeatability of Yield Stability Statistics in Soybean." *Crop Science* 37: 383–390. doi:10.2135/cropsci1997.0011183X003700020013x.
- Song, Yanling, Hans W. Linderholm, Yi Luo, Jinxia Xu, Guangsheng Zhou. 2020. "Climatic Causes of Maize Production Loss under Global Warming in Northeast China." *Sustainability* 12: 7829. doi:10.3390/su12187829.
- Sprague, G. F., Loyd A. Tatum. 1942. "General vs. Specific Combining Ability in Single Crosses of Corn." *Agronomy Journal* 34: 932. doi:10.2134/agronj1942.00021962003400100008x.
- Srivastava, A. K., D. R. Saxena, P. R. Saabale, K. S. Raghuvanshi, V. P. Anandani, R. K. Singh, O. P. Sharma, A.R. Wasinikar, Sangita Sahni, R.K. Varshney, N.P. Singh, G.P. Dixit. 2021. "Delineation of genotype-by-environment interactions for identification and validation of resistant genotypes in chickpea to fusarium wilt using GGE biplot." *Crop Protection* 144: 105571. doi:10.1016/j.cropro.2021.105571.
- Staller, John E. 2016. "High Altitude Maize (*Zea mays* L.) Cultivation and Endemism in the Lake Titicaca Basin." *Journal of Botany Research* 1: 8–21. doi:10.36959/771/556.
- Stanisavljević, Dušan. 2014. "Genetička analiza i adaptabilnost važnijih agronomskih osobina dve grupe polusrodника kukuruza." *Doktorska disertacija*. Beograd, Srbija: Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet.
- Stevanović, Milan, Aleksandar Kovačević, Slaven Prodanović, Milica Nikolić, Marko Mladenović, Snežana Mladenović Drinić, Sanja Perić. 2021. "The evaluation of the stability of some ZP maize hybrids based on the genotype $\times$ environment interaction." Edited by Dušan Kovačević. *Proceedings of the XII International Scientific Agricultural Symposium "Agrosym 2021"*. Jahorina, Bosnia and Herzegovina: University of East Sarajevo, Faculty of Agriculture, Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina. 244–253.
- Stevanović, Milan, Jovan Pavlov, Goran Stanković, Zoran Čamdžija, Nikola Grčić, Sofija Božinović, Snežana Mladenović Drinić. 2014. "Regional distribution of ZP maize hybrids in Vojvodina." Edited by Mirjana Baban and Boris Đurđević. *Agriculture in Nature and Environment Protection: Proceedings & abstracts 7th international scientific/professional conference*. Vukovar, Croatia: Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Osijek, Croatia. 155–159.
- Stojaković, M., M. Ivanović, G. Bekavac, Đ. Jocković, N. Vasić, Božana Purar. 2002. "Fenotipska Plastičnost i Rejonizacija Hibrida Kukuza." *Zbornik radova Instituta za ratarstvo i povrtarstvo*, 311–316.
- Stojaković, Milisav, Mile Ivanović, Đorđe Jocković, Goran Bekavac, Božana Purar, Aleksandra Nastasić, Dušan Stanisavljević, Bojan Mitrović, Sanja Treskić, Rajko Laišić. 2011. "Izbor hibrida kukuruza na osnovu multilokacijskih oglada." *Zbornik referata sa 45. Savetovanja agronoma Srbije*. Zlatibor, Serbia: Institut za ratarstvo i povrtarstvo, Novi Sad, Serbia. 103–112.

- Stojaković, Milisav, Mile Ivanović, Đorđe Jocković, Goran Bekavac, Božana Purar, Aleksandra Nastasić, Dušan Stanisavljević, Bojan Mitrović, Sanja Treskić, Rajko Laišić. 2010. "NS hibridi kukuruza u proizvodnim rejonima Srbije." *Ratarstvo i povrtarstvo* 47: 93–102.
- Tadesse, W., S. Suleiman, I. Tahir, M. Sanchez-Garcia, A. Jighly, A. Hagra, Sh. Thabet, M. Baum. 2019. "Heat-Tolerant QTLs Associated with Grain Yield and Its Components in Spring Bread Wheat under Heat-Stressed Environments of Sudan and Egypt." *Crop Science* 59: 199–211.
- Tai, George C.C. 1971. "Genotypic Stability Analysis and Its Application to Potato Regional Trials." *Crop Science* 11: 184–190. doi:10.2135/cropsci1971.0011183X001100020006x.
- Tareke Woldegiorgis, Samuel, Shaobo Wang, Yiruo He, Zhenhua Xu, Lijuan Chen, Huan Tao, Yu Zhang, Yang Zou, Andrew Harrison, Lina Zhang, Yufang Ai, Wei Liu, Huaqin He. 2019. "Rice Stress-Resistant SNP Database." *Rice* 12: 97. doi:10.1186/s12284-019-0356-0.
- Tarinejad, A., M. S. Abedi. 2015. "Investigation on the Grain Yield Stability of Promising Cold Region Bread Wheat Cultivars and Lines by Using Different Stability Statistics." *Journal of Crop Ecophysiology* 9: 275–292.
- Thayil, Vinayan Madhumal, Pervez H. Zaidi, Kaliyamoorthy Seetharam, Reshmi Rani Das, Sudarsanam Viswanadh, Salahuddin Ahmed, Mohammad Alamgir Miah, Kesab B. Koirala, Mahendra Prasad Tripathi, Mohammad Arshad, Kamal Pandey, Ramesh Chaurasia, Prakash H. Kuchanur, Ayyagouda Patil, Shyam S. Mandal. 2020. "Genotype-by-Environment Interaction Effects under Heat Stress in Tropical Maize." *Agronomy* 10: 1998. doi:10.3390/agronomy10121998.
- Thennarasu, K. 1995. "On Certain Non-parametric Procedures for Studying Genotype-Environment Interactions and Yield Stability." *Doctoral Dissertation*. New Delhi, India: IARI, Division of Agricultural Statistics.
- Tian, Hong-Li, Feng-Ge Wang, Jiu-Ran Zhao, Hong-Mei Yi, Lu Wang, Rui Wang, Yang Yang, Wei Song. 2015. "Development of maizeSNP3072, a high-throughput compatible SNP array, for DNA fingerprinting identification of Chinese maize varieties." *Molecular Breeding* 35: 136. doi:10.1007/s11032-015-0335-0.
- Tigchelaar, Michelle, David S. Battisti, Rosamond L. Naylor, Deepak K. Ray. 2018. "Future warming increases probability of globally synchronized maize production shocks." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115: 6644–6649. doi:10.1073/pnas.1718031115.
- Tiwari, Yogesh Kumar, Sushil Kumar Yadav. 2019. "High Temperature Stress Tolerance in Maize (*Zea mays* L.): Physiological and Molecular Mechanisms." *Journal of Plant Biology* 63: 93–102. doi:10.1007/s12374-018-0350-x.
- Tollenaar, M., E. A. Lee. 2002. "Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize." *Field Crops Research* 75: 161–169. doi:10.1016/S0378-4290(02)00024-2.
- Tomkowiak, Agnieszka, Jan Bocianowski, Michal Kwiatek, Przemyslaw Lukasz Kowalczewski. 2020. "Dependence of the heterosis effect on genetic distance, determined using various molecular markers." *Open Life Sciences* 15: 1–11. doi:10.1515/biol-2020-0001.
- Torres Flores, José Luis, Beatriz Mendoza García, B. M. Prasanna, Gregorio Alvarado, Félix M. San Vicente, José Crossa. 2017. "Grain Yield and Stability of White Early Maize Hybrids in the Highland Valleys of Mexico." *Crop Science* 57: 3002–3015. doi:10.2135/cropsci2017.03.0145.

- Tričković, Nikola, Vukašin Rončević, Nikola Živanović, Tara Grujić, Luka Stefanović, Nikola Jovanović, Miodrag Zlatić. 2023. "Ecological and Economic Effects of Applying the Future Agricultural Production Structure Model (FAPSMS): The Case Study of the Barička River Basin." *Sustainability* 15 (10): 8434. doi:10.3390/su15108434.
- Troyer, A. Forrest. 2004. "Background of U.S. Hybrid Corn II." *Crop Science* 44: 370–380. doi:10.2135/cropsci2004.3700.
- Tura, Habtamu, James Edwards, Vijay Gahlaut, Melissa Garcia, Beata Sznajder, Ute Baumann, Fahimeh Shahinnia, Matthew Reynolds, Peter Langridge, Harindra Singh Balyan, Pushpendra K. Gupta, Thorsten Schnurbusch, Delphine Fleury. 2019. "QTL analysis and fine mapping of a QTL for yield-related traits in wheat grown in dry and hot environments." *Theoretical and Applied Genetics* 133: 239–257.
- Unterseer, Sandra, Eva Bauer, Georg Haberer, Michael Seidel, Carsten Knaak, Milena Ouzunova, Thomas Meitinger, Tim M Strom, Ruedi Fries, Hubert Pausch, Christofer Bertani, Alessandro Davassi, Klaus FX Mayer, Chris-Carolin Schön. 2014. "A powerful tool for genome analysis in maize: development and evaluation of the high density 600 k SNP genotyping array." *BMC Genomics* 15: 823. doi:10.1186/1471-2164-15-823.
- UPOV. 2014. *The Use of Molecular Markers (SNP) for Maize DUS Testing*. Geneva, Switzerland: UPOV, BMT/14/10. Accessed March 2, 2022. https://www.upov.int/edocs/mdocs/upov/en/bmt_14/bmt_14_10.pdf.
- Urruty, Nicolas, Delphine Tailliez-Lefebvre, Christian Huyghe. 2016. "Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review." *Agronomy for Sustainable Development* 36: 15. doi:10.1007/s13593-015-0347-5.
- Vaezi, Behrouz, Alireza Pour-Aboughadareh, Rahmatolah Mohammadi, Asghar Mehraban, Tahmasb Hossein-Pour, Ehsan Koohkan, Soraya Ghasemi, Hoda Moradkhani, Kadambot H. M. Siddique. 2019. "Integrating different stability models to investigate genotype × environment interactions and identify stable and high-yielding barley genotypes." *Euphytica* 215: 63. doi:10.1007/s10681-019-2386-5.
- Vaezi, Behrouz, Naser Sabgahnia, Asghar Mehraban, Hamid Hatami-Maleki. 2022. "Nonparametric Analysis of Genotype Grain Yield Performance of Barley Trials Based on Ranks." *Romanian Agricultural Research* 39: 1–9.
- van Eeuwijk, Fred A., Daniela V. Bustos-Korts, Marcos Malosetti. 2016. "What Should Students in Plant Breeding Know About the Statistical Aspects of Genotype × Environment Interactions?" *Crop Science* 56: 2119–2140. doi:10.2135/cropsci2015.06.0375.
- Van Inghelandt, Delphine, Albrecht E. Melchinger, Claude Lebreton, Benjamin Stich. 2010. "Population structure and genetic diversity in a commercial maize breeding program assessed with SSR and SNP markers." *Theoretical and Applied Genetics* 120: 1289–1299. doi:10.1007/s00122-009-1256-2.
- Vančetović, Jelena, Marija Kostadinović, Sofija Božinović, Ana Nikolić, Jelena Vukadinović, Ksenija Marković, Dragana Ignjatović-Micić. 2020. "Agronomic, biochemical and genetic attributes of maize high grain quality accessions." *Genetika* 52: 273–289. doi:10.2298/GENSR2001273V.
- Verma, Ajay, Gyanendra Pratap Singh. 2020. "Simultaneous Use of AMMI Model and Yield for Stability Analysis of Wheat Genotypes Evaluated Under Central Zone of the India." *European Journal of Agriculture and Food Science* 2: 1–7. doi:10.24018/ejfood.2020.2.6.167.

- Vignal, Alain, Denis Milan, Magali SanCristobal, André Eggen. 2002. "A review on SNP and other types of molecular markers and their use in animal genetics." *Genetics Selection Evolution* 34: 275. doi:10.1186/1297-9686-34-3-275.
- Vineeth, T. V., Indivar Prasad, Anil R. Chinchmalatpure, B. M. Lokeshkumar, Shravan Kumar, K. T. Ravikiran, Parbodh Chander Sharma. 2022. "Weighted average absolute scores of BLUPs (WAASB) based selection of stable Asiatic cotton genotypes for the salt affected Vertisols of India." *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding* 82: 104–108. doi:10.31742/IJGPB.82.1.15 .
- Vos, Pieter, Rene Hogers, Marjo Bleeker, Martin Reijans, Theo van de Lee, Miranda Hornes, Adrie Friters, Jerina Pot, Johan Paleman, Martin Kuiper, Marc Zabeau. 1995. "AFLP: a new technique for DNA fingerprinting." *Nucleic Acids Research* 23: 4407–4414. doi:10.1093/nar/23.21.4407.
- Vulchinkov, Stefan, L. Reseleshka, P. Vulchinkova, M. Ilchovska, N. Petrovska, V. Valkova. 2021. "Stability assessment of maize hybrids by different methods in relation to their zoning." *Agricultural Sciences* 13: 65–76. doi:10.22620/agrisci.2021.29.008.
- Wallace, J. G., S. J. Larsson, E. S. Buckler. 2014. "Entering the second century of maize quantitative genetics." *Heredity* 112: 30–38. doi:10.1038/hdy.2013.6.
- Wang, Chunyi, Hans W. Linderholm, Yanling Song, Fang Wang, Yanju Liu, Jinfeng Tian, Jinxia Xu, Yingbo Song, Guoyu Ren. 2020. "Impacts of Drought on Maize and Soybean Production in Northeast China During the Past Five Decades." *International Journal of Environmental Research Public Health* 17: 2459. doi:10.3390/ijerph17072459.
- Wang, Qing-Jun, Yibing Yuan, Zhengqiao Liao, Yi Jiang, Qi Wang, Litian Zhang, Shibin Gao, Fengkai Wu, Menglu Li, Wubing Xie, Tianhong Liu, Jie Xu, Yaxi Liu, Xuanjun Feng, Yanli Lu. 2019. "Genome-Wide Association Study of 13 Traits in Maize Seedlings under Low Phosphorus Stress." *10.3835/plantgenome2019.06.0039* 20: 190039. doi:10.3835/plantgenome2019.06.0039.
- Wang, Shaoqiang, Xuwen Jiang, Shudong Wang, Junzhou Bu, Jianwei Wei, Shuping Chen, Haicheng Peng, Junliang Xie, Haiwang Yue, Haishan Li. 2019. "Genotype by Environment Interaction Analysis in Summer Maize Hybrids for Grain Yield under Multi-Environment Trials in Huang-Huai-Hai Area, China." *International Journal of Agriculture and Biology* 22: 1573–1580. doi:10.17957/IJAB/15.1237.
- Warburton, M. L., J. M. Ribaut, J. Franco, J. Crossa, P. Dubreuil, F. J. Betran. 2005. "Genetic characterization of 218 elite CIMMYT maize inbred lines using RFLP markers." *Euphytica* 142: 97–106. doi:10.1007/s10681-005-0817-y.
- Weatherspoon, J. H. 1970. "Comparative yields of single, three-way and double crosses of maize." *Crop Science* 10: 157–159. doi:10.2135/cropsci1970.0011183X001000020011x.
- Wei, Xinzhu, Jianzhi Zhang. 2018. "The optimal mating distance resulting from heterosis and genetic incompatibility." *Science Advances* 4 (11): eaau5518. doi:10.1126/sciadv.aau5518.
- Wicaksana, Noladhi, Haris Maulana, Yuyun Yuwariah, Ade Ismail, Yasmin Anissa Robles Ruswandi, Dedi Ruswandi. 2022. "Selection of High Yield and Stable Maize Hybrids in Mega-Environments of Java Island, Indonesia." *Agronomy* 12: 2923. doi:10.3390/agronomy12122923.
- World Water Assessment Programme. 2009. *The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World*. Paris, France/London, UK: UNESCO/Earthscan.
- Wricke, G. 1962. "Übereine Methode zur Erfassung der ökologischen Streubreite in Feldversuchen." *Zeitschrift für Pflanzenzüchtung* 47: 92–96.

- Würschum, Tobias, Xintian Zhu, Yusheng Zhao, Yong Jiang, Jochen C. Reif, Hans Peter Maurer. 2023. "Maximization through optimization? On the relationship between hybrid performance and parental genetic distance." *Theoretical and Applied Genetics* 136: 186. doi:10.1007/s00122-023-04436-5.
- Xie, Yanning, Xinqi Wang, Xiaoci Ren, Xiangyu Yang, Rengui Zhao. 2019. "A SNP-Based High-Density Genetic Map Reveals Reproducible QTLs for Tassel-Related Traits in Maize (*Zea mays* L.)." *Tropical Plant Biology* 12: 244–254.
- Xie, Yanping, Jinsong Xu, Gang Tian, Lingli Xie, Benbo Xu, Kede Liu, Xuekun Zhang. 2020. "Unraveling yield-related traits with QTL analysis and dissection of QTL $\times$ environment interaction using a high-density bin map in rapeseed (*Brassica napus* L.)." *Euphytica* 216: 171.
- Xie, Yonghong, Yan Feng, Qi Chen, Feike Zhao, Shuijuan Zhou, Ying Ding, Xianliang Song, Ping Li, Baohua Wang. 2019. "Genome-wide association analysis of salt tolerance QTLs with SNP markers in maize (*Zea mays* L.)." *Genes & Genomics* 41: 1135–1145.
- Xu, Cheng, Yonghong Ren, Yinqiao Jian, Zifeng Guo, Yan Zhang, Chuanxiao Xie, Junjie Fu, Hongwu Wang, Guoying Wang, Yunbi Xu, Ping Li, Cheng Zou. 2017. "Development of a maize 55 K SNP array with improved genome coverage for molecular breeding." *Molecular Breeding* 27: 20. doi:10.1007/s11032-017-0622-z.
- Yan, Weikai. 2001. "GGEbiplot—A Windows Application for Graphical Analysis of Multienvironment Trial Data and Other Types of Two-Way Data." *Agronomy Journal* 93: 1111–1118. doi:10.2134/agronj2001.9351111x.
- Yan, Weikai. 2002. "Singular-Value Partitioning in Biplot Analysis of Multienvironment Trial Data." *Agronomy Journal* 94: 990–996. doi:10.2134/agronj2002.0990.
- Yan, Weikai, Istvan Rajcan. 2002. "Biplot Analysis of Test Sites and Trait Relations of Soybean in Ontario." *Crop Science* 42 (1): 11–20. doi:10.2135/cropsci2002.1100.
- Yan, Weikai, L. A. Hunt. 2001. "Interpretation of Genotype $\times$ Environment Interaction for Winter Wheat Yield in Ontario." *Crop Science* 41: 19–25. doi:10.2135/cropsci2001.41119x.
- Yan, Weikai, Manjit S. Kang. 2003. *GGE Biplot Analysis: A Graphical Tool for Breeders, Geneticists, Agronomists*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Yan, Weikai, Nicholas A. Tinker. 2005. "An Integrated Biplot Analysis System for Displaying, Interpreting, Exploring Genotype $\times$ Environment Interaction." *Crop Science* 45 (3): 1004–1016. doi:10.2135/cropsci2004.0076.
- Yan, Weikai, Nicholas A. Tinker. 2006. "Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications." *Canadian Journal of Plant Science* 86: 623–645. doi:10.4141/P05-169.
- Yan, Weikai, L. A. Hunt, Qinglai Sheng, Zorka Szlavnic. 2000. "Cultivar Evaluation and Mega-Environment Investigation Based on the GGE Biplot." *Crop Science* 40: 597–605. doi:10.2135/cropsci2000.403597x.
- Yan, Weikai, Manjit S. Kang, Baoluo Ma, Sheila Woods, Paul L. Cornelius. 2007. "GGE Biplot vs. AMMI Analysis of Genotype-by-Environment Data." *Crop Science* 47: 643–653. doi:10.2135/cropsci2006.06.0374.
- Yan, Weikai, Paul L. Cornelius, Jose Crossa, L. A. Hunt. 2001. "Two Types of GGE Biplots for Analyzing Multi-Environment Trial Data." *Crop Science* 41: 656–663. doi:10.2135/cropsci2001.413656x.
- Yang, Jiwei, Zonghua Liu, Qiong Chen, Yanzhi Qu, Jihua Tang, Thomas Lübberstedt, Haochuan Li. 2020. "Mapping of QTL for Grain Yield Components Based on a DH Population in Maize." *Scientific Reports* 10: 7086. doi:10.1038/s41598-020-63960-2.

- Yang, Rong-Cai, Jose Crossa, Paul L. Cornelius, Juan Burgueño. 2009. "Biplot Analysis of Genotype $\times$ Environment Interaction: Proceed with Caution." *Crop Science* 49 (5): 1564–1576. doi:10.2135/cropsci2008.11.0665.
- Yates, F., W. G. Cochran. 1938. "The analysis of groups of experiments." *The Journal of Agricultural Science* 28: 556–580. doi:10.1017/S0021859600050978.
- Yi, Hongyang, Caibo Zhang, Chuan Li, Jing Wang, Tao Yu, Yongming Liu, Moju Cao. 2021. "Identification and genetic analysis of two maize CMS-T mutants obtained from out-space-flighted seeds." *Genetic Resources and Crop Evolution* 68: 1937–1947. doi:10.1007/s10722-021-01107-6.
- Yu, Kanchao, Hui Wang, Xiaogang Liu, Cheng Xu, Zhiwei Li, Xiaojie Xu, Jiacheng Liu, Zhenhua Wang, Yunbi Xu. 2020. "Large-Scale Analysis of Combining Ability and Heterosis for Development of Hybrid Maize Breeding Strategies Using Diverse Germplasm Resources." *Frontiers in Plant Science* 11: 660. doi:10.3389/fpls.2020.00660.
- Yue, H. W., Y. B. Wang, J. W. Wei, Q. M. Meng, B. L. Yang, S. P. Chen, J. L. Xie, H. C. Peng, X. W. Jiang. 2020. "Effects of Genotype-by-Environment Interaction on the Main Agronomic Traits of Maize Hybrids." *Applied Ecology and Environmental Research* 18: 1437–1458. doi:10.15666/aer/1801_14371458.
- Yue, Haiwang, Hugh G. Gauch, Jianwei Wei, Junliang Xie, Shuping Chen, Haicheng Peng, Junzhou Bu, Xuwen Jiang. 2022. "Genotype by Environment Interaction Analysis for Grain Yield and Yield Components of Summer Maize Hybrids across the Huanghuaihai Region in China." *Agriculture* 12: 602. doi:10.3390/agriculture12050602.
- Yue, Haiwang, Jianwei Wei, Junzhou Bu, Jie Li, Xiuguo Wang, Shuhong Zheng, Juexue Xie, Shuping Chen, Haicheng Peng, Xuwen Jiang, Junliang Xie. 2019. "Comprehensive Analysis of Genotype by Environment Interaction of Maize Cultivars under Multi-Environment Conditions in North China." *International Journal of Agriculture and Biology* 21: 289–299. doi:10.17957/IJAB/15.0893.
2010. *Zakon o priznavanju sorti poljoprivrednog bilja*. Beograd, Srbija: Službeni Glasnik RS 30/2010.
- Zali, Hassan, Ezatollah Farshadfar, Sayed Hosein Sabaghpour, Rahmatollah Karimizadeh. 2012. "Evaluation of genotype $\times$ environment interaction in chickpea using measures of stability from AMMI model." *Annals of Biological Research* 3: 3126–3136.
- Zdunić, Zvonimir. 1998. "Stabilnost i adaptabilnost prinosa novih OS hibrida kukuruza." Zagreb, Croatia: Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- Zhang, Yinchao, Peng Liu, Chen Wang, Na Zhang, Yuxiao Zhu, Chaoying Zou, Guangsheng Yuan, Cong Yang, Shibin Gao, Guangtang Pan, Langlang Ma, Yaou Shen. 2021. "Genome-wide association study uncovers new genetic loci and candidate genes underlying seed chilling-germination in maize." *PeerJ* 9: e11707. doi:10.7717/peerj.11707.
- Zhang, Yu, Jiawu Zhou, Ying Yang, Walid Hassan Elgamal, Peng Xu, Jing Li, Yasser Z. El-Refaei, Suding Hao, Dayun Tao. 2019. "Two SNP Mutations Turned off Seed Shattering in Rice." *Plants* 8: 475. doi:10.3390/plants8110475.
- Zhao, Chuang, Bing Liu, Shilong Piao, Xuhui Wang, David B. Lobell, Yao Huang, Mengtian Huang, Yitong Yao, Simona Bassu, Philippe Ciais, Jean-Louis Durand, Joshua Elliott, Frank Ewert, Ivan A. Janssens, Tao Li, Erda Lin, Qiang Liu, Pierre Martre, Christoph Müller, Shushi Peng, Josep Peñuelas, Alex C. Ruane, Daniel Wallach, Tao Wang, Donghai Wu, Zhuo Liu, Yan Zhu, Zaichun Zhu, Senthold Asseng. 2017. "Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent

- estimates." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114: 9326–9331. doi:10.1073/pnas.1701762114.
- Zhao, Jin, Xiaoguang Yang, Shuang Sun. 2018. "Constraints on maize yield and yield stability in the main cropping regions in China." *European Journal of Agronomy* 99: 106–115.
- Zhao, Xiaoqiang, Peng Fang, Jinwen Zhang, Yunling Peng. 2017. "QTL mapping for six ear leaf architecture traits under water-stressed and well-watered conditions in maize (*Zea mays* L.)." *Plant Breeding* 137: 30–72. doi:10.1111/pbr.12559.
- Zhu, Weihong, Yikun Zhao, Jingbao Liu, Lu Huang, Xiaomin Lu, Dingming Kand. 2019. "QTL mapping analysis of maize plant type based on SNP molecular marker." *Cellular and Molecular Biology* 65: 18–27.
- Živanović, Tomislav, Gordana Branković, Miroslav Zorić, Gordana Šurlan Momirović, Snežana Janković, Sanja Vasiljević, Jovan Pavlov. 2012. "Effect of recombination in the maize breeding population with exotic germplasm on the yield stability." *Euphytica* 185: 407–417. doi:10.1007/s10681-011-0600-1.
- Zobel, Richard W., Madison J. Wright, Hugh G. Jr Gauch. 1988. "Statistical Analysis of a Yield Trial." *Agronomy Journal* 80: 388–393. doi:10.2134/agronj1988.00021962008000030002x.
- Zorić, M., Jerko Gunjača, Domagoj Šimić. 2017. "Genotypic and environmental variability of yield from seven different crops in Croatian official variety trials and comparison with on-farm trends." *The Journal of Agricultural Science* 155 (5): 804–811. doi:10.1017/S0021859616000903.

9. BIOGRAFIJA

Nemanja Nišavić rođen je 21.05.1990. godine u Lazarevcu, SFR Jugoslavija (danas Republika Srbija). Srednju poljoprivrednu školu završio je u Valjevu 2009. godine. Iste godine upisuje osnovne akademske studije na Poljoprivrednom fakultetu Univerziteta u Beogradu, studijski program: Biljna proizvodnja, modul: Ratarstvo i povrtarstvo. Osnovne akademske studije završava 2013. godine sa prosečnom ocenom 8,82 i odbranjenim završnim radom na temu „Tehnologija proizvodnje kantariona (*Hypericum perforatum* L.)“ i ocenom 10. Time stiče zvanje diplomirani inženjer poljoprivrede. Odmah nakon završenih osnovnih akademskih studija upisuje master akademske studije na istom fakultetu, studijski program: Poljoprivreda, modul: Ratarstvo i povrtarstvo. Master akademske studije uspešno završava 2014. godine odbranom master rada na temu „Uticaj supstrata na kvalitet rasada bosiljka (*Ocimum basilicum* L. cv. *Genovese*)“ (ocena 10), i sa prosečnom ocenom 9,63. Na taj način stiče zvanje master inženjer poljoprivrede. Iste godine upisuje doktorske akademske studije na istom fakultetu, studijski program: Poljoprivredne nauke, modul: Ratarstvo i povrtarstvo. Uspešno je položio sve ispite predviđene planom i programom, sa prosečnom ocenom 9.25.

Stipendista je Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije za 2014/2015 školsku godinu, na osnovu čega je bio uključen na projekat „Poboljšanje svojstava kukuruza i soje molekularnim i konvencionalnim oplemenjivanjem“ (TR31068) pri Institutu za kukuruz „Zemun Polje“.

Izjava o autorstvu

Ime i prezime autora: **Nemanja J. Nišavić**

Broj indeksa: **140020**

Izjavljujem

Da je doktorska disertacija pod naslovom

„Asocijativnost molekularnih karakteristika roditeljskih linija kukuruza i stabilnost prinosa zrna njihovih hibrida“

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za sticanje druge diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova;
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis autora

U Beogradu, _____

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora: **Nemanja J. Nišavić**

Broj indeksa: **140020**

Studijski program: Poljoprivredne nauke, modul Ratarstvo i povrtarstvo

Naslov rada: **„Asocijativnost molekularnih karakteristika roditeljskih linija kukuruza i stabilnost prinosa zrna njihovih hibrida“**

Mentori: dr Tomislav Živanović, red. profesor, Poljoprivrednog Fakulteta u Zemunu i dr Zoran Čamdžija, viši naučni saradnik, Institut za kukuruz “Zemun Polje”

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao radi pohranjenja u **Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis autora

U Beogradu, _____

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku "Svetozar Marković" da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom: "Asocijativnost molekularnih karakteristika roditeljskih linija kukuruza i stabilnost prinosa zrna njihovih hibrida" koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim prilogima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu i dostupnu u otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
- ☒ 3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerada (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

Potpis autora

U Beogradu, _____

1. **Autorstvo.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. **Autorstvo – nekomercijalno.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. **Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. **Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. **Autorstvo – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. **Autorstvo – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.