

Procjena i modeliranje tolerantnosti na klimatske stresove kod genotipova kukuruza u seriji ciljanih okolina

Stepinac, Domagoj

Doctoral thesis / Disertacija

2025

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Agriculture / Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:204:319061>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-04**



Repository / Repozitorij:

[Repository Faculty of Agriculture University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

AGRONOMSKI FAKULTET

Domagoj Stepinac

**PROCJENA I MODELIRANJE
TOLERANTNOSTI NA KLIMATSKE
STRESOVE KOD GENOTIPOVA
KUKURUZA U SERIJI CILJANIH
OKOLINA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF AGRICULTURE

Domagoj Stepinac

**ASSESSMENT AND MODELLING OF
CLIMATE STRESS TOLERANCE IN
MAIZE GENOTYPES IN A SERIES OF
TARGETED ENVIRONMENTS**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2024



Sveučilište u Zagrebu

AGRONOMSKI FAKULTET

Domagoj Stepinac

**PROCJENA I MODELIRANJE
TOLERANTNOSTI NA KLIMATSKE
STRESOVE KOD GENOTIPOVA
KUKURUZA U SERIJI CILJANIH
OKOLINA**

DOKTORSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Ivan Pejić

Naslovni izv. prof. dr. sc. Domagoj Šimić

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF AGRICULTURE

Domagoj Stepinac

**ASSESSMENT AND MODELLING OF
CLIMATE STRESS TOLERANCE IN
MAIZE GENOTYPES IN A SERIES OF
TARGETED ENVIRONMENTS**

DOCTORAL THESIS

Supervisors:

Ivan Pejić, Ph. D., Professor

Domagoj Šimić, Ph. D. Adjunct associate professor

Zagreb, 2024

Bibliografska stranica

Bibliografski podatci:

- Znanstveno područje: Biotehničke znanosti
- Znanstveno polje: Poljoprivreda (agronomija)
- Znanstvena grana: Genetika i oplemenjivanje bilja, životinja i mikroorganizama
- Institucija: Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Zavod za oplemenjivanje bilja, genetiku i biometriku
- Voditelji doktorskog rada: prof. dr. sc. Ivan Pejić i naslovni izv. prof. dr. sc. Domagoj Šimić
- Broj stranica: 133
- Broj slika: 27
- Broj tablica: 13
- Broj literaturnih referenci: 197
- Datum obrane doktorskog rada: 12. 12. 2024.
- Sastav povjerenstva za obranu doktorskog rada:

1. prof. dr. sc. Hrvoje Šarčević

2. prof. dr. sc. Jerko Gunjača

3. dr. sc. Vlatko Galić

Rad je pohranjen u:

Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu, Ulica Hrvatske bratske zajednice 4 p.p. 550, 10 000 Zagreb,

Knjižnici Sveučilišta u Zagrebu Agronomskog Fakulteta, Svetošimunska cesta 25, 10 000 Zagreb.

Tema rada prihvaćena je na sjednici Fakultetskog vijeća Agronomskog Fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, održanoj dana 8. 6. 2021., te odobrena na sjednici Senata Sveučilišta u Zagrebu, održanoj dana 21. 9. 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET

IZJAVA O IZVORNOSTI

Ja, **Domagoj Stepinac**, izjavljujem da sam samostalno izradio doktorski rad pod naslovom:

**PROCJENA I MODELIRANJE TOLERANTNOSTI NA KLIMATSKE STRESOVE KOD
GENOTIPOVA KUKURUZA U SERIJI CILJANIH OKOLINA**

Svojim potpisom jamčim:

- da sam jedini autor ovoga dokorskog rada;
- da je doktorski rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni;
- da sam upoznat s odredbama Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu (Čl. 19).

Zagreb, 22. 10. 2024. godine.

Potpis doktorandice/doktoranda

Ocjena doktorskog rada

Ovu disertaciju ocijenilo je povjerenstvo u sastavu:

1. Prof. dr. sc. Hrvoje Šarčević, _____
Redoviti profesor u trajnom zvanju Agronomskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu
2. Prof. dr. sc. Jerko Gunjača, _____
Redoviti profesor u trajnom zvanju Agronomskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu
3. Dr. sc. Vlatko Galić, _____
Znanstveni suradnik Poljoprivrednog instituta Osijek

Disertacija je obranjena 12. 12. 2024. godine, na Agronomskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu pred povjerenstvom u sastavu:

1. Prof. dr. sc. Hrvoje Šarčević, _____
Redoviti profesor u trajnom zvanju Agronomskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu
2. Prof. dr. sc. Jerko Gunjača, _____
Redoviti profesor u trajnom zvanju Agronomskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu
3. Dr. sc. Vlatko Galić, _____
Znanstveni suradnik Poljoprivrednog instituta Osijek

Informacije o mentorima

Prvi mentor: prof. dr. sc. Ivan Pejić

Dr. sc. Ivan Pejić, redoviti je profesor u trajnom izboru, zaposlen u Zavodu za oplemenjivanje bilja, genetiku i biometriku, Agronomskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Diplomirao je 1986. na Poljoprivrednom fakultetu Sveučilišta „Josip Juraj Strossmayer“ u Osijeku, a magistrirao (1992.) i doktorirao (1996.) na Agronomskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu pred međunarodnim povjerenstvom obranivši disertaciju naslova Identifikacija genotipa i mapiranje lokusa za kvantitativna svojstva kod kukuruza primjenom molekularnih markera. Istraživanja doktorske disertacije dijelom je proveo na Sveučilištu Udine (Italija) i Državnom sveučilištu Sjeverna Karolina (SAD), a poslijedoktorsko usavršavanje na Sveučilištu Hohenheim (Njemačka). Na Sveučilištu u Bologni (Italija) 2013. godine, ostvario je usavršavanje iz područja primjene molekularnih markera u oplemenjivanju voćnih vrsta u okviru slobodne godine - *sabbatical*.

Nositelj je modula Oplemenjivanje bilja na preddiplomskom studiju, Oplemenjivanje voćaka i vinove loze i Molekularno oplemenjivanje bilja na diplomskim studijima, modula Metode molekularnog oplemenjivanja bilja na poslijediplomskom doktorskom studiju te suradnik na više modula poslijediplomskog studija. Bio je mentorom jednog magisterija i 11 disertacija. U znanstveno-istraživačkom radu primarno se bavi genetičkom identifikacijom sorata kultiviranog bilja i mogućnostima primjene molekularnih markera u oplemenjivanju bilja. Kroz više projekata primjenjivao je DNA markere u analizi nastanka autohtonih sorti i srodstva sorata vinove loze, voćaka i ratarskog bilja te proučavao genetsku strukturu populacija poljoprivrednog bilja. Zadnjih godina bavi se istraživanjem otpornosti na sušu i antinutritivnim spojevima u ratarskim kulturama, identifikacijom lokusa koji kontroliraju agronomski važna svojstva metodom genomske selekcije. Bio je koordinator ili suradnik na više znanstveno-istraživačkih projekata i članom radne skupine RS3 Soja u Znanstvenom centru izvrsnosti za bioraznolikost i molekularno oplemenjivanje bilja (CroP-BioDiv). Trenutno je voditelj nacionalnog tima koji sudjeluje u Horizon Europe projektu „Breeding European Legumes for Increased Sustainability - BELIS“ (2023 – 2027). Autor je većeg broja znanstvenih radova od kojih je 59 referirano u ISI WoS (suma citata: 2069, h-index: 19). Također, autor je nekoliko sorata soje i klonova hrvatskih autohtonih sorti vinove loze. Koautor je šest knjiga (nacionalno izdanje) i devet poglavlja u knjizi (nacionalno i inozemno izdanje), dva udžbenika te suurednik dvije monografije. Član je međunarodnih udruga EUCARPIA i ISHS, te Hrvatskog genetičkog društva (HGD), a od 2009. do 2016. bio je hrvatski predstavnik za strukovno obrazovanje pri Međunarodnoj organizaciji za lozu i vino (OIV) sa sjedištem u Parizu. Od 2020. počasni je član Talijanske akademije za vinogradarstvo i vinarstvo.

Dobitnik je državne nagrade za znanost 2003. godine; Priznanja Sveučilišta u Zagrebu (2006) za promicanje međunarodne suradnje u području visokog obrazovanja; Medalje Agronomskog Fakulteta Sveučilišta u Zagrebu 2009. godine, Povelje Agronomskog Fakulteta Sveučilišta u Zagrebu 2016. godine, te "Međunarodne nagrade" za knjigu – kategorija "Monografije" 2009. za knjigu „Vinova loza - ampelografija, ekologija, oplemenjivanje“ (2008), i "Posebnog priznanja" 2017. godine za knjigu "Zelena knjiga: hrvatske izvorne sorte vinove loze" (2015) koju je dodijelila međunarodna organizacija OIV (International Organization for Vine and Wine, Pariz, Francuska). U 2023. dobio je „Priznanje za poseban doprinos razvoju sjemenarstva i rasadničarstva u Republici Hrvatskoj“ od Agencije za poljoprivredu i hranu (HAPIH) u povodu 25 godina postojanja.

Drugi mentor: naslovni izv. prof. dr. sc. Domagoj Šimić

Naslovni izv. prof. dr.sc. Domagoj Šimić je znanstveni savjetnik u trajnom izboru na Odjelu za oplemenjivanje i genetiku kukuruza Poljoprivrednog instituta Osijek. Diplomirao je 1989. na Poljoprivrednom fakultetu Sveučilišta „Josip Juraj Strossmayer“ u Osijeku, a magistrirao 1994. na Agronomskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu pod mentorstvom prof.dr.sc. Đurđice Vasilj. Doktorirao je 1999. godine na Sveučilištu Hohenheim u Stuttgartu, SR Njemačka pod mentorstvom prof.dr.sc. Hartwiga H. Geigera, profesora emeritusa.

Dr. sc. Domagoj Šimić zaposlio se 1989. kao asistent na Odjelu za oplemenjivanje i genetiku kukuruza Poljoprivrednog instituta Osijek gdje radi do 1995. godine. Iste godine odlazi na radno mjesto znanstvenog djelatnika na Sveučilištu Hohenheim u Stuttgartu, SR Njemačka gdje ostaje do 1998. godine. Od 1998. godine do danas neprekidno radi na Poljoprivrednom institutu Osijek, prvo kao asistent, zatim kao viši asistent (1999. – 2003.), znanstveni suradnik (2003. – 2006.), viši znanstveni suradnik (2006. – 2009.), znanstveni savjetnik (2009. – 2018.), te kao znanstveni savjetnik u trajnom izboru (od 2018. do danas). Šestomjesečno stručno usavršavanje obavio je na Iowa State University, SAD, 1994. godine pod vodstvom akademika Arnela R. Hallauera.

U znanstveno-istraživačkom radu primarno se bavi razvojem i primjenom molekularnih, fizioloških i statističkih metoda u analizi kvantitativnih svojstava poljoprivrednog bilja i razvoju novih kultivara kukuruza. Objavio je 68 znanstvenih radova indeksiranih u Current Contents i/ili Web of Science i više od 50 ostalih znanstvenih recenziranih radova, kao i 49 novostvorenih hibrida kukuruza. Sudjelovao je ili sudjeluje kao voditelj ili istraživač u više nacionalnih i inozemnih znanstvenih projekata. Od 2015. do 2019. član je jednog panela za vrednovanje projektnih prijedloga Hrvatske zaklade za znanost (HRZZ), a od 2019. do 2020. bio je koordinator panela PZZ 4, HRZZ-a. Član je Međunarodnog znanstvenog panela za vrednovanje ERA-Net ARIMNET, Pariz, Francuska (2016. – 2017.) i PRIMA, Barcelona, Španjolska (2018. – 2020.) Voditelj je radne skupine RS1 Kukuruz u Znanstvenom centru izvrsnosti (ZCI) za bioraznolikost i molekularno oplemenjivanje bilja (CroP-BioDiv) od 2015. do danas.

Naslovno znanstveno-nastavno zvanje docent stekao je 2008. iz znanstvenog područja biotehničkih znanosti, znanstvenog polja poljoprivreda, znanstvena grana bilinogojstvo na Poljoprivrednom fakultetu Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku; te imao reizbor 2016. na Poslijediplomskom interdisciplinarnom sveučilišnom studiju Molekularne bioznanosti Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku. Naslovno znanstveno-nastavno zvanje izvanredni profesor stječe 2017. na Poslijediplomskom interdisciplinarnom sveučilišnom studiju Molekularne bioznanosti Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku. Nositelj je modula Počela

biostatistike i Analize lokusa kvantitativnih svojstava na Poslijediplomskom interdisciplinarnom sveučilišnom studiju Molekularne bioznanosti Sveučilišta „Josip Juraj Strossmayer“ u Osijeku. Bio je mentorom dviju disertacija, te komentorom jedne disertacije. Godine 2013. vanjski je član povjerenstva za obranu jedne disertacije (viva voce) na School of Biology and Environmental Sciences, University College Dublin, Dublin, Irska.

Zamjenik je ravnatelja i predsjednik Znanstvenog vijeća na Poljoprivrednom institutu Osijek od 2005. do 2009., te predsjednik EUCARPIA sekcije za kukuruz i sirak, (2011. – 2015.). Predsjednik Vijeća za GMO Vlade RH bio je od 2015. do 2017., a član Vijeća za GMO Vlade RH od 2017. do danas. Od 2023. godine član je Nacionalnog vijeća za visoko obrazovanje, znanost i tehnološki razvoj RH. Dobitnik je Državne nagrade za znanost za značajno znanstveno dostignuće u području biotehničkih znanosti za 2012. godinu.

ZAHVALA

Najveću zahvalu upućujem mentorima prof. dr. sc. Ivanu Pejiću i naslovnom izv. prof. dr. sc. Domagoju Šimiću koji su me uspješno vodili tijekom izrade ovog doktorskog rada.

Zahvalnost upućujem i članovima povjerenstva za obranu prof. dr. sc. Hrvoju Šarčeviću, prof. dr. sc. Jerku Gunjači i dr. sc. Vlatku Galiću koji su mi svojim savjetima pomogli da ovaj doktorski rad bude bolji u pogledu statističke analize agronomskih i agroekoloških aspekata agronomske struke.

Zahvalu upućujem i kolegama znanstvenicima s Državnog hidro-meteorološkog zavoda nasl. doc. dr. sc. Kreši Pandžiću i dr. sc. Tanji Likso koji su svojim savjetima pomogli da ovaj doktorski rad bude bolji i s agrometeorološkog aspekta struke.

Zahvaljujem Bc Institutu za oplemenjivanje i proizvodnju bilja što mi je omogućio financijska sredstva te stručnu i znanstvenu podršku za potrebe ovoga istraživanja.

Posebna zahvala kolegama znanstvenicima i tehničarima Zavoda za kukuruz Bc Instituta na savjetima i stručnoj pomoći tijekom provođenja poljskog dijela istraživanja.

Na kraju posebnu zahvalu upućujem svojoj obitelji, supruzi Silviji i kćerkama Leoni i Eni na podršci tijekom izrade doktorskog rada.

Istraživanje za ovu disertaciju provedeno je unutar projekta „Procjena adaptabilnosti hrvatskog sortimenta kukuruza i soje u funkciji oplemenjivanja za tolerantnost na sušu (AGRO-DROUGHT-ADAPT)“ kojeg je financirala Hrvatska zaklada za znanost unutar Programa poticanja istraživačkih i razvojnih aktivnosti u području klimatskih promjena (PKP-06-2016).

SAŽETAK

Tijekom posljednjih nekoliko desetljeća globalne klimatske promjene pred oplemenjivače stavljaju nove izazove u pogledu selekcije genotipova adaptabilnih na sušu i toplinski stres. Ovo istraživanje u prvom koraku istražuje upotrebljivost meteoroloških podataka iz javno dostupnih baza Državnog Hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) i Agri4Cast (A4C) i iz njih izračunatih indeksa suše (scPDSI i VPD) i toplinskog stresa (SDD) u odnosu na podatke prikupljene izravno u pokusu (POK), a u svrhu njihovog korištenja prilikom tipizacije okoline. U narednom koraku istražena je primjena okolinskih indeksa u procesu detekcije tolerantnih genotipova. Pomoću različitih statističkih modela ANOVA-e te AMMI analize dalje je istraženo variranje agronomskih svojstava kao i složenost interakcije genotip \times okolina (G \times E) za 32 genotipa kukuruza različitih skupina zriobe u pogledu učinaka prouzročenih sušom i toplinskim stresom. Kao jedan od novih pristupa istražena je i mogućnost interpretacije G \times E interakcija putem procesnog modeliranja pomoću APSIM programskog paketa temeljenog na višegodišnjim meteorološkim podacima. Vrijednosti prinosa višegodišnjih simulacija validirani su sa stvarnim podacima iz poljskih pokusa kako bi se utvrdila pouzdanost predikcije. U zadnjem koraku istražena je mogućnost implementacije tipizacije okoline u klasični oplemenjivački postupak, tj. detekcija genotipova kukuruza tolerantnih na sušu i toplinski stres temeljem rezultata stresnih i normalnih okolina. Validacija podataka o prosječnim dnevnim temperaturama i relativnoj vlazi zraka provedena u ovom istraživanju pokazala je vrlo visoku usporedivost bez obzira na izvor (POK, DHMZ i A4C) i vremenski interval (dan, dekada), a time i upotrebljivost za izračun indeksa okolinskih stresova koji zahtijevaju ove meteorološke podatke. Vrijednosti količine oborine pokazale su slabiju međusobnu povezanost, stoga je u izračunu indeksa suše koji zahtijevaju količinu oborine, poput scPDSI, uputno njezino mjerenje izravno na lokaciji provedbe pokusa. Unatoč manjim razlikama, svi indeksi slično su identificirali najviše i najmanje stresne okoline i pokazali se učinkovitim u tipizaciji okolina na stres suše i visokih temperatura zraka. Veće vrijednosti intervala između polinacije i svilanja (ASI), te niže vrijednosti visine biljaka na istoku (Beli Manastir, Kutjevo, Osijek i Tovarnik) za razliku od zapada zemlje (Rugvica i Šašincevec), kao i značajno smanjenje mase zrna na klipu i prinosa sugerira da su istočne lokacije tijekom 2017. godine pretrpjele stres prouzročen sušom i visokim temperaturama, dok to nije bio slučaj za lokacije smještene na zapadu zemlje. Modelima trofaktorske i dvofaktorske ANOVA-e te AMMI analizom utvrđena je značajnost utjecaja svih glavnih izvora na variranje prinosa, pri čemu je okolina imala najveći utjecaj, a znatno manji interakcija G \times E i genotip. AMMI2 biplot ukazuje na nestabilnost okolina i značajan interakcijski doprinos genotipova FAO skupine 300. Genotipovi FAO skupine 400 pokazali su se široko adaptabilnima, pri čemu su tri genotipa pokazala značajan doprinos interakcijskim učincima svojom specifičnom adaptabilnošću spram tri različite okoline. Genotipovi FAO skupina 500 i 600 pokazali su široku adaptabilnost prema prinostnijim okolinama. Procesno modeliranje temeljeno na dugoročnim meteorološkim podacima pokazalo se prikladnim za tipizaciju ciljanih okolina i za simulaciju njihovih proizvodnih potencijala, iako nije uočen obrazac razlika prinosa među pojedinim skupinama zriobe. Povezanost analiziranih agronomskih svojstava i jačine stresa bila je najviša kada je okolinski stres procjenjivan VPD i SDD indeksom. Analizom indeksa tolerantnosti temeljenih na redukciji prinosa zrna između kontrastnih okolina u pogledu sušnog stresa, dvije grupe korištenih indeksa različito rangiraju genotipove spram tolerantnosti na sušu i toplinski stres. Prema prvoj grupi indeksa (GMP, STI, MP i HARM) kao tolerantni izdvojeni su genotipovi 29, 30, 31, dok su prema drugoj grupi indeksa (TOL, SSI, RDY) kao tolerantni izdvojeni 3, 11, 6. Ipak, ako se promatraju iznadprosječni genotipovi prema obje grupe indeksa, onda se mogu izdvojiti genotipovi 13, 15, 12, 14 i 21 kao tolerantni prema obje grupe indeksa.

Ključne riječi: kukuruz, tolerantnost na sušu i toplinski stres, samokalibrirajući Palmerov indeks jakosti suše (scPDSI), deficit tlaka para (VPD), sume stresnih jedinica (SDD), G \times E interakcija, procesno modeliranje, tipizacija okoline, indeksi tolerantnosti

EXTENDED ABSTRACT

Assessment and modelling of climate stress tolerance in maize genotypes in a series of targeted environments

Introduction: Over the last few decades, we have witnessed global climate change and challenges for breeding programs to overcome those scenarios and detect and select drought and heat tolerant genotypes. Therefore, following the hypotheses and objectives, this study in the first part deals with the environment evaluation (envirotyping) using meteorological data for mean daily temperature, relative humidity, and precipitation collected directly in the field and from publicly available sources. They are used to compute several drought and heat indices with the purpose of estimation of the severity of drought and heat stress over six locations and two consecutive years (12 environments) and their impact on agronomic traits. The environmental stress level was also analyzed using several statistical models of ANOVA, as well as AMMI analysis. In addition to the genotype×environment (G×E interaction), it is important for crop production to investigate the three-factor interaction of G×E×M between genotype (G), environment (E), and management (M). Therefore, this research also analyzes the possibility of investigating the G×E×M interactions of four maturity groups (FAO300, FAO400, FAO500, and FAO600) through a process-based crop model. In its final stage, this study explores the possibility of implementing envirotyping in the classical breeding programs through application of drought tolerance indices based on grain yield reduction between contrast environments, as a significant factor in the process of detecting drought and heat-stress tolerant genotypes.

Materials and methods: Meteorological data in the daily and decade (10-day) timeframe were collected from three different sources. The first set of meteorological data was collected directly from the trial (POK), while the other two equivalent data sets were collected from the alternative data sources, Croatian Meteorological and Hydrological Service (DHMZ) and Agri4Cast (A4C). Meteorological data and drought indices calculated from those three data sets were validated by the Pearson correlation coefficient to assess their association. The similarity of the data derived from these three sources enables their usage in the breeding programs focused on drought and heat stress envirotyping scenarios. Envirotyping was conducted through drought (scPDSI and VPD) and heat stress (SDD) indices, calculated from three parallel data sets. The scPDSI index was calculated according to the methodology of Pandžić et al. (2022) and relies on the water balance model (WB) within the observed period (Palmer, 1965). The vapor pressure deficit (VPD) was calculated according to the methodology of Allen et al. (1998) and follows the Perfect Grower (2019) VPD level recommendations. The third one, stress degree days (SDD) index, was calculated according to the Idso et al. (1981). SDD index summarizes the impact of temperatures above 30°C, and unlike the previous two related to drought, SDD indicates the intensity and occurrence of heat stress. Initially, individual ANOVA was used to determine the variation of agronomic traits observed in this study (anthesis-silk interval - ASI, grain moisture, plant height, thousand kernel weight, kernel weight per ear, and grain yield) in 12 environments for 32 maize genotypes of different maturity groups regarding the effects caused by drought and heat stress. Further, three-factorial and two-factorial ANOVA models were used to demonstrate the significance of different structure of main and interaction effects. Additionally, an AMMI analysis with the help of methane software packages (Olivoto and Dal'Col Lúcio, 2019; R Core Team, 2023) was applied to explore the complexity of the G×E interaction for grain yield (AMMI2; Gauch et al., 2008; Gauch, 2013) in terms of the stress level derived from environmental effects in the form of drought and heat stress scenarios. A process-based crop model was conducted through the APSIM software package. APSIM model was calibrated according to long-term meteorological data values from the A4C database, while the agroecological aspect of the soil was adjusted according to the soil type of each experimental site according to the ISRIC (International Soil Reference and Information Centre) database with the help of apsimx software

packages (Miguez, 2024; R Core Team, 2023). In the next step, the grain yield derived from simulations were compared with observed values to assess the similarity of the predicted and observed grain yield values. The validation test was made using Pearson's correlation coefficient and root mean square error (RMSE), a commonly used statistical test in terms of process-based crop models (Palsey et al., 2023). The drought and heat stress tolerance detection for 32 maize genotypes of four FAO maturity groups was conducted using the drought tolerance index concept. This study tested seven indices: GMP, STI, MP, HARM, TOL, SSI, and RDY. They are primarily based on measuring the grain yield reduction between stressed and non-stressed conditions. Regarding their interpretation, the panel of 32 genotypes was distributed from the most tolerant to the most sensitive ones according to the growing average values for GMP, STI, MP, and HARM (Fernandez, 1992; Rosielle and Hamblin, 1981; Kristin et al., 1997), and decreasing average values for TOL, SSI, and RDY (Rosielle and Hamblin, 1981; Fischer and Maurer, 1978; Farshadfar et al., 2013).

Results and conclusions: Data validation tests conducted over average daily temperatures and relative humidity values showed high similarity. The data set collected from alternative (DHMZ and A4C) sources show strong relationships with data gathered directly in the POK. Therefore, the study concludes that both alternative data sources can be used to calculate the environmental stress indices that require such meteorological elements as is the case with VPD and SDD. Precipitation values from alternative sources (DHMA and A4C) had a weaker correlation with real values measured directly in the field conditions, especially at the daily timescale, what can limit the reliability of the calculation of indices such as scPDSI. Therefore, to calculate drought indices that require precipitation amount values, it is advisable to provide measurements directly on the field. In 2017 this study observed higher ASI and lower plant height values, as well as significant reduction of kernel weight per ear and grain yield in the eastern (Beli Manastir, Kutjevo, Osijek, and Tovarnik) in contrast to the western part of the country (Rugvica and Šašincevec). This observation suggests that locations in the east part suffered from the stress caused by drought and high temperatures during 2017, while this was not the case for locations in the western part of the country. The models of three-factorial and two-factorial ANOVA and AMMI analysis determined the statistical significance for all major factors of variations to the grain yield. The environment has had the greatest influence, followed by the interaction of G×E and genotype. The AMMI2 biplot indicates environmental diversity and a significant interaction contribution of genotypes gathered in the FAO300. The FAO400 genotypes brought wider adaptability, but it is worth emphasizing that genotypes 9, 11, and 16 show a significant contribution to the interaction effects through their narrow adaptation to specified environments. FAO500 and FAO600 genotypes have shown wide adaptability to more productive environments. The process-based crop model based on long-term meteorological data is a useful tool for characterizing targeted environments and simulating their production potentials, but there was no clear pattern of yield difference among individual maturity groups. The functional association between the analyzed agronomic traits and the intensity of stress was the highest when the environmental stress was assessed by the VPD and SDD index. Through the analysis of drought tolerance indices based on the reduction of grain yield determined between contrasting environments in terms of drought stress, the two groups of indices rank the genotypes differently in terms of tolerance to drought and heat stress. According to the first group of indices (GMP, STI, MP and HARM) genotypes 29, 30, 31 were detected as tolerant, while according to the second group of indices (TOL, SSI, RDY) 3, 11, 6 were detected as tolerant. However, if observed above-average genotypes according to both index groups, then genotypes 13, 15, 12, 14 and 21 can be distinguished as tolerant according to both index groups.

Keywords: drought and heat stress tolerance, scPDSI index, vapor pressure deficit (VPD), stress degree days (SDD), G×E interaction, process-based crop model, envirotyping, tolerance indices

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
1.1.	Hipoteze i ciljevi istraživanja	3
1.1.1.	Hipoteze.....	3
1.1.2.	Ciljevi istraživanja.....	3
2.	PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA	4
2.1.	Oplemenjivanje kukuruza na sušu i toplinski stres	4
2.2.	Suša i toplinski stres	5
2.3.	Indeksi suše	6
2.3.1.	Samokalibrirajući Palmerov indeks jakosti suše (scPDSI).....	7
2.3.2.	Deficit tlaka pare (VPD).....	8
2.3.3.	Suma stresnih jedinica (SDD)	10
2.4.	Interakcijski učinci genotipa i okoline za tolerantnost na sušu i toplinski stres ..	11
2.5.	Procesno modeliranje na osnovi interakcijskih učinaka između genotipa, okoline i upravljanja	13
2.6.	Detekcija germplazme tolerantne na sušu i toplinski stres u seriji ciljanih okolina	15
3.	MATERIJAL I METODE RADA	17
3.1.	Materijal	17
3.2.	Poljski pokusi	18
3.2.1.	Dizajn i agrotehnika pokusa	18
3.2.2.	Opažanje, ocjena i mjerenje svojstava	19
3.2.3.	Meteorološka mjerenja i opažanja.....	20
3.3.	Indeksi suše i toplinskog stresa	21
3.3.1.	Samokalibrirajući Palmerov indeks jakosti suše (scPDSI).....	21
3.3.2.	Deficit tlaka pare (VPD).....	24
3.3.3.	Suma stresnih jedinica (SDD)	26
3.4.	Statistička analiza	26
3.4.1.	Analiza i primjena podataka iz agrometeoroloških mjerenja	26

3.4.2.	Analiza agronomskih svojstava i G×E interakcije	27
3.5.	Procesno modeliranje	28
3.6.	Detekcija germplazme tolerantne na sušu i toplinski stres u seriji ciljanih okolina	29
4.	REZULTATI ISTRAŽIVANJA.....	31
4.1.	Analiza i validacija agrometeoroloških elemenata	31
4.1.1.	Prikaz agrometeoroloških prilika po lokacijama poljskih pokusa.....	31
4.1.2.	Usporedba dnevnih i dekadnih meteoroloških elemenata obzirom na izvor prikupljanja	34
4.2.	Tipizacija okoline indeksima suše i toplinskog stresa.....	37
4.2.1.	Usporedba vrijednosti indeksa suše i toplinskog stresa obzirom na izvor prikupljanja meteoroloških podataka	37
4.2.2.	Korelacije između različitih indeksa suše	39
4.2.3.	Prikaz karakterizacije okolina prema indeksima suše i toplinskog stresa ..	41
4.3.	Analiza agronomskih svojstava i interakcije G×E	44
4.3.1.	Analiza varijance za pojedina svojstva i okoline	44
4.3.2.	Skupna trofaktorska analiza varijance	62
4.3.3.	Analiza G×E interakcije	64
4.4.	Procesno modeliranje	68
4.5.	Detekcija germplazme tolerantne na sušu i toplinski stres u seriji ciljanih okolina	73
4.5.1.	Povezanost agronomskih svojstava s jačinom sušnog i toplinskog stresa	73
4.5.2.	Indeksi tolerantnosti	77
5.	RASPRAVA	80
5.1.	Pouzdanost agrometeoroloških podataka obzirom na izvor prikupljanja i vremenski interval meteoroloških elemenata	80
5.2.	Procjena intenziteta suše i toplinskog stresa scPDSI, VPD i SDD indeksima ...	84
5.3.	Analiza varijance agronomskih svojstava, raščlamba G×E interakcije i AMMI analiza	87
5.4.	Detekcija tolerantnosti modeliranjem i tipizacijom ekofizioloških procesa ciljanih okolina	90

5.5.	Implementacija tipizacije okoline u klasični oplemenjivački postupak detekcije genotipova kukuruza tolerantnih na sušu i toplinski stres	91
6.	ZAKLJUČCI	96
7.	POPIS LITERATURE	98
8.	ŽIVOTOPIS	116
9.	PRILOG	118

POPIS KRATICA

AMMI	Analiza aditivnih glavnih efekata i multiplikativne interakcije (eng. <i>Additive Main effect Multiplicative Interaction</i>)
APSIM	Agricultural Production Systems Simulator
A4C	Agri4Cast
ANOVA	Analiza varijance
ASI	Interval između polinacije i svilanja (vijabilnosti svile na klipu) (eng. <i>Anthesis-silking interval</i>)
DHMZ	Državni Hidrometeorološki zavod
E	Okolina (eng. <i>Environment</i>)
ET	Tipizacije geografskih ciljanih pokusnih lokacija (eng. <i>Envirotyping</i>)
FAO	Organizacija za hranu i poljoprivredu Ujedinjenih naroda (eng. <i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>)
G	Genotip (eng. <i>Genotype</i>)
G×E	Interakcija genotipa i okoline (eng. <i>Genotype × environment interaction</i>)
G×E×M	Interakcija genotipa, okoline i agrotehnike (eng. <i>Genotype × environment × management interaction</i>)
G×L	Interakcija genotipa i lokacije (eng. <i>Genotype × location interaction</i>)
G×Y	Interakcija genotipa i godine (eng. <i>Genotype × year interaction</i>)
G×Y×L	Interakcija genotipa, godine i lokacije (eng. <i>Genotype × year × location interaction</i>)
GDD	Suma aktivne temperature (eng. <i>Growing Degree Day</i>)
GMP	Geometric mean productivity index
HARM	Harmonic mean productivity
ISRIC	International Soil Reference and Information Centre
L	Lokacija (eng. <i>Location</i>)
MP	Mean productivity index

MS	Varijanca (eng. <i>Mean square</i>)
IPCA1	Prva glavna komponenta (eng. <i>First Principal Component</i>)
IPCA2	Druga glavna komponenta (eng. <i>Second Principal Component</i>)
PDSI	Palmerov indeks jakosti suše (eng. <i>Palmer Drought Severity Indeks</i>)
POK	Pokusna lokacija; poljski pokus
RDY	Relative Decrease in Yield
RH	Relativna vlažnost zraka (eng. <i>Relative humidity</i>)
RMSE	Korijen srednje kvadratne pogreške
SAD	Sjedinjene Američke Države
scPDSI	Samokalibrirajući Palmerov indeks jakosti suše (eng. <i>Self-calibrating Palmer Drought Severity Index</i>)
SDD	Suma stresnih jedinica (eng. <i>Stress degree day</i>)
SS	Suma kvadrata (eng. <i>Sum of Squares</i>)
SSI	Stress Susceptibility Index
STI	Stress Tolerance Index
TOL	Stress Tolerance
VCU	Gospodarska vrijednost sorte (eng. <i>Value for Cultivation and Use</i>)
VP	Tlaka pare stvarne zasićenosti zraka (eng. <i>Vapour pressure</i>)
VPD	Deficit tlaka para (eng. <i>Vapour Pressure Deficit</i>)
WS	Deficit vode (eng. <i>Water stress</i>)
Y	Godina (eng. <i>Year</i>)
Y×L	Interakcija godine i lokacije (eng. <i>Year × location interaction</i>)

POPIS TABLICA

- Tablica 3.1. Popis genotipova kukuruza korištenih u poljskim pokusima.
- Tablica 3.2. Popis naziva i skraćenica pokusnih lokacije te referentnih meteoroloških postaja DHMZ-a.
- Tablica 3.3. Popis geografskih lokacija te datumi sjetve i berbe poljskih pokusa.
- Tablica 3.4. Klasifikacija sušnih i vlažnih razdoblja PDSI indeksa (Palmer, 1965).
- Tablica 3.5. Matematički izrazi za indekse tolerantnosti.
- Tablica 4.1. Pearsonovi koeficijenti korelacije između podataka prikupljenih na pokusnoj lokaciji i alternativnih izvora za dekadne vrijednosti srednje dnevne temperature i relativne vlage zraka te količine oborine za 12 okolina.
- Tablica 4.2. Pearsonovi koeficijenti korelacije između vrijednosti pojedinih indeksa suše (scPDSI, VPD i SDD) kada su izračunati iz podataka (dekadnih vrijednosti) prikupljenih na pokusnoj lokaciji i iz dva alternativna izvora (DHMZ i A4C) za 12 promatranih okolina.
- Tablica 4.3. Pearsonovi koeficijenti korelacije između scPDSI, VPD i SDD indeksa temeljem dekadnih vrijednosti POK izvora podataka za 12 promatranih okolina.
- Tablica 4.4. Skupna trofaktorska ANOVA za šest agronomskih svojstava kukuruza.
- Tablica 4.5. Složena dvofaktorska ANOVA za šest svojstava po okolinama uz raščlambu interakcije genotip i okolina ($G \times E$).
- Tablica 4.6. AMMI ANOVA prinosa zrna za 32 genotipa kukuruza na 12 okolina pri čemu su uključene prve dvije glavne komponente (IPCA1 i IPCA2).
- Tablica 4.7. Vrijednosti GMP, STI, MP i HARM indeksa tolerantnosti za 32 genotipa kukuruza.
- Tablica 4.8. Vrijednosti TOL, SSI i RDY indeksa tolerantnosti za 32 genotipa kukuruza.

POPIS SLIKA

- Slika 3.1. Mjerna postaja Davis 6250EU i pripadajuća Vantage Vue konzola za prikaz i pohranu meteoroloških podataka; izvor: Weerhuisje.nl, (preuzeto s: <https://weerhuisje.nl/en/davis-professional/davis-6250-vantage-vue-professional-weerstation/a-8731-92>; 6. 12. 2023.).
- Slika 3.2. Prikaz vrste i načina prikupljanja meteoroloških elemenata s platforme „Agri4Cast“ Europske Komisije; izvor: Joint Research Centre (preuzeto s: <https://agri4cast.jrc.ec.europa.eu/DataPortal/Index.aspx?o=d> 3. 11. 2022.).
- Slika 3.3. Grafikon vrijednosti VPD indeksa; izvor: Perfect Grower, (preuzeto s: <https://www.perfectgrower.com/knowledge/knowledge-base/vpd-chart-vapor-pressure-deficit/>; 8. 2. 2024.).
- Slika 4.1. Walterov klimatski dijagram oborine (crtkana linija) i srednje dnevne temperature zraka (puna linija) sa indikacijom sušnih razdoblja (crveno) u vremenskom razdoblju od svibnja do rujna, za sve lokacije istraživanja tijekom 2017. i 2018. godine (a – l, označavaju kombinaciju lokacije i godine).
- Slika 4.2. Poredak 12 promatranih okolina sukladno gradijentu suše i toplinskog stresa, od najstresnijih (crveno) preko graničnih (svjetlo crveno) i normalnih (plavo) okolina, procijenjeno prema „prosječnim vrijednostima indeksa za cijelu vegetaciju“ scPDSI, VPD i SDD (a, b i c; isprekidana linija – granica stresnih i normalnih vrijednosti indeksa).
- Slika 4.3. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2017. godine za interval između polinacije i svilanja (ASI; broj dana). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.
- Slika 4.4. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2018. godine za interval između polinacije i svilanja (ASI; broj dana). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.
- Slika 4.5. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2017. godine za vlagu zrna (%). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.
- Slika 4.6. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2018. godine za vlagu zrna (%). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.

- Slika 4.7. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2017. godine za visinu biljke (cm). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.
- Slika 4.8. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2018. godine za visinu biljke (cm). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.
- Slika 4.9. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2017. godine za masu tisuću zrna (g). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.
- Slika 4.10. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2018. godine za masu tisuću zrna (g). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.
- Slika 4.11. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2017. godine za masu zrna na klipu (g). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.
- Slika 4.12. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2018. godine za masu zrna na klipu (g). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.
- Slika 4.13. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2017. godine za prinos zrna (t/ha). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.
- Slika 4.14. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2018. godine za prinos zrna (t/ha). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.
- Slika 4.15. AMMI2 biplot prikaz prinosa zrna za 32 genotipa kukuruza po skupinama zriobe FAO300 (+; ljubičasto), FAO400 (□; narančasto), FAO500 (△; plavo), FAO600(x; zeleno) uzgajanih u 12 okolina (točke - kombinacija lokacije i godine u 2017. godini, kružnice - kombinacija lokacije i godine u 2018. godini).
- Slika 4.16. Prosječni prinos zrna (x na punoj zelenoj liniji) ± standardna pogreška (SD; vrhovi strelica na punoj zelenoj liniji) po FAO skupinama zriobe izmjeren u pokusima postavljenim na 6 lokacija (a – f) tijekom 2017. godine i prinos zrna procijenjen u simulacijama (puna crta s točkom) prema APSIM modelu rasta usjeva.

- Slika 4.17. Prosječni prinos zrna (× na punoj zelenoj liniji) ± standardna pogreška (SD; vrhovi strelica na punoj zelenoj liniji) po FAO skupinama zriobe izmjeren u pokusima postavljenim na 6 lokacija (a – f) tijekom 2018. godine i prinos zrna procijenjen u simulacijama (puna crta s točkom) prema APSIM modelu rasta usjeva.
- Slika 4.18. Dugoročne simulacije prinosa zrna za razdoblje od 1979. do 2020. godine za lokaciju Šašinovec po skupinama zriobe FAO300 (+), FAO400 (□), FAO500 (△), FAO600 (×; a – d respektivno) predstavljene kao linearne regresije.
- Slika 4.19. Dugoročne simulacije prinosa zrna za razdoblje od 1979. do 2020. godine za lokaciju Rugvica po skupinama zriobe FAO300 (+), FAO400 (□), FAO500 (△), FAO600 (×; a – d respektivno) predstavljene kao linearne regresije.
- Slika 4.20. Dugoročne simulacije prinosa zrna za razdoblje od 1979. do 2020. godine za lokaciju Osijek po skupinama zriobe FAO300 (+), FAO400 (□), FAO500 (△), FAO600 (×; a – d respektivno) predstavljene kao linearne regresije.
- Slika 4.21. Dugoročne simulacije prinosa zrna za razdoblje od 1979. do 2020. godine za lokaciju Beli Manastir po skupinama zriobe FAO300 (+), FAO400 (□), FAO500 (△), FAO600 (×; a – d respektivno) predstavljene kao linearne regresije.
- Slika 4.22. Dugoročne simulacije prinosa zrna za razdoblje od 1979. do 2020. godine za lokaciju Tovarnik po skupinama zriobe FAO300 (+), FAO400 (□), FAO500 (△), FAO600 (×; a – d respektivno) predstavljene kao linearne regresije.
- Slika 4.23. Dugoročne simulacije prinosa zrna za razdoblje od 1979. do 2020. godine za lokaciju Kutjevo po skupinama zriobe FAO300 (+), FAO400 (□), FAO500 (△), FAO600 (×; a – d respektivno) predstavljene kao linearne regresije.
- Slika 4.24. Funkcionalna povezanost (puna linija označava liniju trenda) aritmetičkih sredina promatranih svojstava (□ vlaga zrna, * prinos zrna, + ASI, × visina biljke, ◇ masa tisuću zrna, – masa zrna na klipu) 32 genotipa kukuruza i jačine stresa mjerene pomoću scPDSI (a i b), VPD (c i d) i SDD (e i f) indeksa kroz 12 promatranih okolina.

1. UVOD

Kukuruz (*Zea mays* L.) je proljetna, jednogodišnja kultura iz porodice *Poaceae* koju odlikuje široki areal rasprostranjenosti i adaptabilnosti što ovoj kulturi omogućuje proizvodnju širom svijeta. Kukuruz je prema značaju i proizvodnji uz rižu i pšenicu najvažnija žitarica u svijetu, a uz pšenicu i ječam zauzima najviše proizvodnih površina i u Europi. U konačnici, kukuruz je prema značaju i prinosom koji donosi najznačajnija ratarska kultura Europske Unije i Republike Hrvatske. Stoga svoju namjenu pronalazi u prehrani ljudi i hranidbi životinja. Prisutan je u gotovo svim segmentima ljudskog življenja, tako je zastupljen i u derivatima goriva, mazivima kao i farmaceutskim proizvodima.

Usljed svojeg biološkog ciklusa rasta i razvoja, kukuruz je pod izravnim utjecajem ekstremnih vremenskih nepogoda kao što su suša i toplinski stres. Globalni godišnji gubici prinosa kukuruza prouzročenih sušom i toplinskim stresom iznose oko 15%, što je ekvivalent šteti od oko 36 milijardi USD (Edmeades, 2013). Od svih ekstremnih nepogoda suša ima najveći ekonomski utjecaj na društvo (Spinoni i sur., 2016; DG Environment i European Commission, 2007). Suša je kao posljedica nedovoljne količine oborine prema izvještaju i podacima Europske Komisije u proteklih 30 godina imala izravan štetni utjecaj na 17% europske populacije te je u istom periodu prouzročila ekonomske gubitke od oko 100 milijardi eura. Od ukupno dvadeset i jedne velike suše koje su pogodile Europu u razdoblju od 1950. do 2012. godine, čak njih šest se dogodilo nakon 2000. godine.

Suša je hrvatskoj poljoprivredi u razdoblju 1980. – 1993. godine prouzročila 42% materijalnih troškova od svih ekstremnih vremenskih nepogoda (Sijerković i Čapka, 1994). Također u razdoblju od 1995. – 2014. godine na sušu je otpalo čak 39% ukupnih šteta koje su prouzročene ekstremnim vremenskim nepogodama (Vučetić, 2016). Klimatske promjene u razdoblju od 2013. – 2016. godine prouzrokovale su u Hrvatskoj štetu od ukupno 3 milijarde kuna što iznosi 43% isplaćenih potpora za poljoprivredu u Republici Hrvatskoj tijekom istog razdoblja (SAFU, 2017). Sukladno globalnim i lokalnim scenarijima klimatskih promjena na području jugoistoka Europe i Sredozemlja koje uključuje i Hrvatsku u bližoj budućnosti tijekom vegetacijskog razdoblja očekuje se sve češća pojava suše jačeg intenziteta praćene toplinskim stresom (DHMZ, 2014; IPCC, 2023). Prema nekim procjenama ovakvi klimatski scenariji rezultirat će redukcijom prinosa od 3 – 8% do 2050. godine (MINGOR, 2018). Ekstremna suša najčešći je uzrok niskih i nerentabilnih prinosa poljoprivrednih kultura u Hrvatskoj (Pandžić i sur., 2020).

Stres prouzročen sušom moguće je ublažiti primjenom navodnjavanja, odgovarajuće tehnologije, ali svakako najučinkovitiji i dugoročno najjeftiniji pristup predstavlja razvoj genotipova tolerantnih na sušu. Hrvatska baštini tradiciju i dobre rezultate oplemenjivačkih

programa, posebice oplemenjivanja pšenice, kukuruza i soje gdje su domaće oplemenjivačke i sjemenarske kuće dominantne i drže primat na tržištu sjemena ovih kultura (Kozumplik i Pejić, 2012). Razvoj i postojanje germplazme, a time i domaćih genotipova tolerantnih na klimatske stresove od strateškog je značenja prema Strategiji pametne specijalizacije Republike Hrvatske (MZO, 2016), kao i Strategiji prilagodbe klimatskim promjenama u Republici Hrvatskoj za razdoblje do 2040. godine s pogledom na 2070. godinu (MINGOR, 2020).

Klasični oplemenjivački programi tijekom ciklusa selekcije koriste se uvriježenim metodama detekcije i testiranja germplazme s generalnim ciljem povećanja prinosa zrna. Ciklusi selekcije definirani su populacijom za odabir perspektivne germplazme s jedne strane, te agroekološkim uvjetima okoline u kojim je smještena oplemenjivačka stanica s druge strane (Brkić i sur., 2012). Molekularne metode potpomognute tehnologijama markera te mapiranje genoma kroz zadnja dva desetljeća omogućili su oplemenjivačima da uz fenotipsku karakterizaciju imaju detaljna saznanja i o genomu germplazme za populacije koje se koriste u ciklusima oplemenjivanja (Pejić, 2022). Kako bi se što učinkovitije detektirali genotipovi tolerantni na ekstremne klimatske pojave poput suše i toplinskog stresa i zadovoljili generalni ciljevi povećanja prinosa, uz tipizaciju oplemenjivačke populacije kroz njene fenotipske i genotipske značajke neophodna je i detaljna tipizacija okoline u smislu detekcije klimatskih elemenata neophodnih za tipizaciju ekstremnih uvjeta kojima su genotipovi izloženi (Xu, 2016). U klasičnim oplemenjivačkim programima tipizacija okoline spram suše i toplinskog stresa s ciljem detekcije tolerantnih genotipova nije detaljno definirana, već je iskustveno zadana. Mogućnost procjene i karakteriziranja intenziteta i trajanja suše te toplinskog stresa okolinskim meteorološkim elementima iz javno dostupnih meteoroloških podataka dala bi veliki doprinos oplemenjivačkim programima u njihovom radu na detekciji tolerantne germplazme (Buhiniček i sur., 2021; Pandžić i sur., 2022). Također, karakteriziranje ekstremnih klimatskih pojava kroz indekse suše i toplinskog stresa omogućilo bi kategorizaciju suše i toplinskog stresa *per se*, a posljedično kroz interakciju genotipa i okoline ($G \times E$) i detekciju lokacija pogodnih za selekciju genotipova tolerantnih na ekstremne klimatske pojave kao što su suša i toplinski stres. Ovako detaljno tipiziranje populacije s jedne i okoline s druge strane kroz kreiranje modela i simuliranje prinosa kao primarnog svojstva oplemenjivačkim programima omogućuje sasvim nove pravce u detekciji germplazme tolerantne na sušu i toplinski stres (Gauch i Zobel, 1996). Kreiranje modela temeljenih na višegodišnjim meteorološkim podacima u svrhu simuliranja utjecaja ekstremnih klimatskih pojava na prinos, te interpretabilnost interakcije $G \times E$ otvorile bi nove mogućnosti prilikom izbora germplazme s najvećom tolerantnošću na sušu i toplinski stres (Messina i sur., 2009; Puntel i sur., 2016).

1.1. Hipoteze i ciljevi istraživanja

1.1.1. Hipoteze

- Intenzitet i trajanje suše te toplinski stres moguće je procijeniti i karakterizirati okolinskim meteorološkim elementima iz javno dostupnih meteoroloških podataka.
- Analizom interakcije genotipa i okoline (G×E) moguće je procijeniti razinu stresa pojedinih lokacija te provesti modeliranje i simulacije za predviđanje prinosa, te detektirati germplazmu tolerantnu na sušu i toplinski stres u seriji ciljanih lokacija.

1.1.2. Ciljevi istraživanja

- Izračunati i validirati indekse suše temeljem mikrometeoroloških podataka iz poljskih pokusa i paralelnih podataka s platforme Agri4Cast.
- Utvrditi variranje agronomskih svojstava te interakcije G×E radi selekcije lokacija spram učinka suše.
- Provesti modeliranje i simulacije na osnovi višegodišnjih meteoroloških podataka radi povećanja interpretabilnosti G×E i izbora germplazme s najvećom tolerantnošću na sušu i toplinski stres.

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

2.1. Oplemenjivanje kukuruza na sušu i toplinski stres

Osnovni cilj oplemenjivačkih programa očituje se u detekciji superiorne germplazme u pogledu prinosa kao primarnog agronomskog svojstva, no potreba da se istovremeno selekcionira stabilna germplazma u pogledu suše i toplinskog stresa postaje osnovna pokretačka snaga u odabiru novih genotipova kukuruza (Duvick, 2005). U Hrvatskoj do sada nije bilo istraživanja usmjerenih prema primjeni modela i simulacije podataka s ciljem detekcije tolerantne germplazme na ekstremne vremenske nepogode, posebice sušu i toplinski stres. Vizualni simptomi stresa prouzročnog sušom manifestiraju se uvijanjem i sušenjem lišća odozdo prema gore. Stres u reproduktivnoj fazi tijekom cvatnje produljuje interval između polinacije metlice i vijabilnosti svile na klip (*anthesis-silking interval*, ASI). Produljenjem intervala između polinacije i svilanja nastaje problem prilikom zemetanja zrna pa sušom zahvaćeni klipovi imaju manje zrna koja su ujedno i slabije nalivena. Prilikom suše izrazito jakog intenziteta može doći i do potpunog abortiranja klipova i jalovosti biljke (Edmeades i sur., 2000). Prilikom oplemenjivanja (genetskog poboljšanja) na tolerantnost na sušu najvažnije je postojanje dovoljno velike genetske varijabilnosti za prinos zrna, kao primarnog svojstva, u stresnim i normalnim uvjetima. Isto tako i genetska varijabilnost sekundarnih svojstava kao što su komponente prinosa ili fiziološka svojstva koja sudjeluju u formiranju prinosa u suši, također mogu voditi ka genetskom poboljšanju prinosa (Edmeades, 2013). Sekundarna svojstva koja su u najvećoj mjeri povezana s prinosom zrna kukuruza u uvjetima suše uključuju kraći ASI, veći broj klipova po biljci, veći broj zrna po klip, veću masu zrna, veći postotak krunjenja, uspravniji položaj lista i slično. Smanjenje temperature usjeva i odgođeno starenje lišća jedna su od sekundarnih svojstava koja su također povezana s prinosom zrna u uvjetima suše (Bolanós i Edmeades, 1996; Betrán, 2003). Idući zahtjev za provedbu uspješnog procesa oplemenjivanja na sušu je detekcija i dostupnost okoline (uvjeta ispitivanja) koja udovoljava ciljevima selekcije i nalazi se unutar ciljane populacije okolina, ali u kojoj se intenzitet stresa, uključujući vremenski raspored i njegova frekvencija, mogu kontrolirati radi pouzdanog praćenja genetske varijabilnosti svojstava tijekom oplemenjivačkih ciklusa (Barker i sur., 2005). Selekcija u uvjetima ciljanog stresa može ubrzati oplemenjivanje za takve uvjete (Bänziger i sur., 2004), dok razni ograničavajući faktori u izboru ciljanih okolina mogu ograničiti i onemogućiti identifikaciju superiorne germplazme zbog njezine velike varijabilnosti. Suša uvjetuje smanjenje heritabilnosti svojstava kao posljedica veće interakcije G×E kao i veće eksperimentalne pogreške u uvjetima slučajne suše, a time i uspješnost selekcije kao takve u odnosu na normalne uvjete.

Upravljanje stresom suše korištenjem navodnjavanja u okolinama, u kojima je period suše normalna pojava svake godine te obuhvaća veliki dio vegetacijske sezone, može povećati uspješnost selekcije za ciljane sušne okoline zbog veće heritabilnosti svojstava pod selekcijom u odnosu na slučajne sušne okoline (Bänziger i sur., 2004; Edmeades, 2013). Zbog ograničene dostupnosti ovakvih sustava i okolina u oplemenjivačkim programima većina praktičnih oplemenjivačkih programa fokusirana je na povećanje produktivnosti u povoljnim uvjetima u kojima je uspješnost selekcije na prinos najveća. Uključivanje slučajnih sušnih okolina u multi-okolinske pokuse često je jedini način za povećanje učinkovite detekcije novih genotipova za okoline s čestom pojavom suše (Bänziger i sur., 2004).

2.2. Suša i toplinski stres

Suša i toplinski stres kao ekstremne klimatološke pojave definirane su pojavom relativno suhog vremena i njegovog utjecaja na predmete ljudske aktivnosti kao što su poljoprivreda i upravljanje vodama (Palmer, 1965; Penzar, 1976; Vicente-Serrano i sur., 2010). Nadalje, McKee i sur. (1993) donose nekoliko faktora koje treba uzeti u obzir tijekom analize suše, pri čemu valja istaknuti vremenski interval tijekom kojeg se akumulira deficit oborine te učestalost ponavljanja takvih događaja u promatranoj okolini. Tako Pandžić i sur. (2020) izvještavaju o pojavi i prevladavanju suhих uvjeta tijekom 1940-ih, dok je vlažno razdoblje zapaženo u 1960-im godina prošlog stoljeća. Od 1970-ih do 1990-ih godina vladali su stabilni, manje promjenjivi uvjeti suhog i vlažnog vremena, a veće variranje pojavljuje se opet tijekom prvog desetljeća dvadeset i prvog stoljeća. U razdoblju od 1976. – 1990. te 1991. – 2006. rezultati pokazuju da je prosječni godišnji utjecaj suše u drugom razdoblju udvostručen (Spinoni i sur., 2016). Ovim trendovima u prilog ide i analiza SPI indeksa koju je za 32 meteorološke postaje panonskog dijela Republike Hrvatske izradio Mihajlović (2006) za sušno razdoblje od 2003. – 2004. godine temeljem meteoroloških podataka za razdoblje od 1901. – 2000. godine te zapazio da je suša tijekom 2003. i 2004. godine bila jedna od najjačih zabilježenih do tog vremena. Prema Pandžiću i sur. (2020) vremenski interval od 2000. – 2012. godine karakteriziraju vrlo suhe epizode od 2000. – 2001., 2003., 2007. – 2009. i 2011. – 2012., dok su vlažne epizode zabilježene tijekom 2002., 2005. i 2010. godine. Nastavno na ovakvu pojavnost vrlo suhog i toplog vremena Cindrić i sur. (2016) analizirali su sušu koja se dogodila tijekom 2011. i 2012. godine za područje sjeverne Hrvatske i okarakterizirali je kao najjaču od početka mjerenja davne 1862. godine. Tako u skladu s posljednjim procjenama DHMZ-a, prema (Pandžić i sur., 2020) na području Republike Hrvatske zabilježeni su sve učestaliji, topliji i sušniji periodi u odnosu na ranije procjene. Klimatske projekcije i procjene za jugoistok Europe (Christensen i sur., 2007; Blauhut i sur., 2015) također ukazuju kako se ovakvi i slični trendovi mogu očekivati i u narednim godinama i desetljećima dvadeset i prvog stoljeća.

Prinos kukuruza ima tendenciju pada pojavom učestalijih toplinskih ekstrema, te je još izraženiji u uvjetima ekstremnih vrućina. Jačina i razmjer stresa u prvom redu ovise o dosezanju temperaturnog praga koji aktivira stres u biljci. Temperaturni prag toplinskog stresa razlikuje se od vrste do vrste, te je različit ovisno o fenofazi (Rezaei i sur., 2015; Sánchez i sur., 2014). Lobell i sur. (2013) izlaganje kukuruza toplinskom stresu, iznad 30°C tijekom fenofaza zametanja zrna i formiranja prinosa smatraju značajnijim faktorom na krajnji produkt u vidu prinosa od same suše. Kukuruz je C4 biljka, te je samim time i otporniji na uvjete povišene temperature od C3 biljaka. Kukuruz je osjetljiviji na visoke temperature i toplinski stres tijekom reproduktivnog razvoja (Cheikh i Jones, 1994; Siebers i sur., 2017). Dias i Lidon (2009) povećanje temperature s 25 na 30°C, i skraćivanje perioda nalijevanja zrna smatraju značajnim čimbenikom smanjenja prinosa. Zhu i sur. (2019) ispitivanjem utjecaja toplinskog stresa na faze rasta i razvoja kukuruza ovaj stresor smatraju odgovornim za redukciju polovice prinosa i to uglavnom tijekom razdoblja nalijevanja zrna. Prema Edreira i Otegui (2012) smanjenje broja zrna na klipuzrokovano je toplinskim stresom tijekom svilanja biljke, a ne u fazi polinacije metlice kukuruza. Ako se toplinski stres razloži na izravni stres ekstremnih vrućina i neizravni stres prouzročen utjecajem nedostatka vode (*water stress*, WS), podaci sugeriraju veći utjecaj izravnog toplinskog stresa i to na razini od $-4,6 \pm 1\%/^{\circ}\text{C}$ (Zhu i sur., 2019). Uzmemo li u obzir ranije spomenute činjenice, gdje na sušu otpada čak 39% ukupnih šteta koje su prouzročene ekstremnim vremenskim nepogodama (Vučetić, 2016) i zaključke Perčec Tadić i sur. (2014) koji su utvrdili da su lokacije istočnog dijela Hrvatske osjetljivije na ovakve pojave od središnjeg dijela zemlje, postavlja se pitanje održivosti proizvodnje kukuruza u sustavu suhog ratarenja, koji je dominantan na velikoj većini proizvodnih površina kukuruza u Republici Hrvatskoj.

2.3. Indeksi suše

Uvriježeno je u praksi da oplemenjivači procjenjuju i izabiru nove genotipove u poljskim pokusima prije svega na osnovi ponašanja genotipa – standarda i relativnog odnosa standarda s ostalim genotipovima, a ne na osnovi poznavanja samih okolina bez čega potpuno razumijevanje i interpretacija interakcije G×E nije moguća, pogotovo u stresnim uvjetima. Sve učestalija pojava sušnih perioda uslijed globalnog zatopljenja tijekom posljednjih desetljeća povećava i razlog za zabrinutost (Dai i sur., 2004) i pred oplemenjivače stavlja novi izazov u vidu temeljite karakterizacije, odnosno tipizacije geografskih ciljanih pokusnih lokacija ili okolina kao interakcije između genotipa i lokacije u vegetacijskoj sezoni (*envirotyping*, ET; Xu, 2016). Stoga Xu (2016), kako bi opisao utjecaj okoline na biljku, uz genotipizaciju i fenotipizaciju biljnog organizma predlaže koncept tipizacije okoline, kao treću komponentu oplemenjivačkog procesa. Precizna karakterizacija okoline ključna je za daljnja istraživanja iz nekoliko razloga. Primarni benefit uključivanja

okolinskih čimbenika u oplemenjivačke programe očituje se u boljoj rezoluciji prilikom interpretacije interakcija $G \times E$, dok se sekundarni benefiti tipizacije okoline ogledaju prilikom odabira genotipova tolerantnih na ekstremne vremenske nepogode poput suše i toplinskog stresa. Ovaj pristup moguć je samo uz korištenje i analizu višegodišnjih ili višedesetljetnih meteoroloških podataka. To je pogotovo važno pri definiranju stresa koji se različito manifestira na različitim okolinama/lokacijama zbog specifičnih mikrolokacijskih meteoroloških i klimatskih karakteristika. Stoga je pouzdana procjena intenziteta i trajanja suše na određenoj lokaciji postavljanjem odgovarajućeg indeksa suše neophodna za ispitivanje otpornosti hibrida kukuruza na sušu. Kako bi odgovorili na postavljene izazove i djelovali pravim mjerama, u ovom radu sušu i toplinski stres klasificirat ćemo kroz dva indeksa suše: Samokalibrirajući Palmerov indeks jakosti suše (eng. *Self-calibrating Palmer Drought Severity Index*, scPDSI), Deficit tlaka para (eng. *Vapour Pressure Deficit*, VPD) i jedan indeks toplinskog stresa: Suma stresnih jedinica (eng. *Stress Degree Days*, SDD).

2.3.1. Samokalibrirajući Palmerov indeks jakosti suše (scPDSI)

Samokalibrirajući Palmerov indeks jakosti suše (*Self-calibrating Palmer Drought Severity Index*, scPDSI) izveden je iz originalnog Palmerovog indeksa jakosti suše (*Palmer Drought Severity Index*, PDSI). Glavni nedostatak PDSI-a je nekonzistentnost glede različitih lokacija, a samim time PDSI vrijednosti postaju neusporedive kroz prostorni i vremenski interval (Wells i sur., 2004). Kako bi indeks imao mogućnost i prostorne i vremenske kvantifikacije razmatralo se uvođenje indeksa anomalije vlage (Z) u svrhu što bolje reakcije indeksa na kratkoročan deficit vlage (Karl, 1986). Stoga daljnjim razvojem PDSI indeksa i uzimanjem u obzir varijabilnosti padalina ovisno o lokaciji (Guttman i sur., 1992), te zamjenom empirijskih konstanti u izračunu PDSI-a dinamičnim izvodi se scPDSI u svrhu automatskog kalibriranja indeksa i računanja vrijednosti kvantifikacije suše na bilo kojoj lokaciji (Wells, 2002; Wells i sur., 2004). Nadalje, primjenom scPDSI indeksa van der Schrier i sur. (2006) kvantificiraju sušu za europski kontinent, te jednostavnim modelom bilance vode temeljem nakupljanog i otopljenog snježnog pokrivača procjenjuju sušu u alpskoj regiji za razdoblje od 1800. – 2003. Usporedbom PDSI i scPDSI indeksa utvrđene su prednosti scPDSI indeksa u odnosu na PDSI indeks posebice u aridnim područjima spram onih semiaridnih i to na globalnoj razini (Dai, 2011). Izračun scPDSI-a složen je proces koji obuhvaća ranije spomenutu zamjenu empirijskih konstanti PDSI-a dinamičnim vrijednostima promatrane okoline. Također ovaj indeks podrazumijeva definiranje vremenskog razdoblja procjene suše, a koji je za područje Republike Hrvatske prema Pandžić i sur. (2022) izračunat za dekadne (1 – 36) i mjesečne (1 – 12) intervale. Detaljan opis izračuna scPDSI indeksa nalazi se u poglavlju 3.3.1.

2.3.2. Deficit tlaka pare (VPD)

Drugi indeks koji će se koristiti u svrhu utjecaja suše na kukuruz naziva se deficit tlaka pare – (*Vapour Pressure Deficit*, VPD). Uslijed poteškoća prilikom suočavanja sa složenošću otpornosti na sušu oplemenjivači u svoje programe uvode studije za razotkrivanje genetske i fiziološke osnove otpornosti na sušu ratarskih kultura (Sinclair i sur., 1984; Ludlow i Muchow, 1990; Ribaut, 2006; Cooper i sur., 2009) temeljene na karakterizaciji tipova okolina (Chapman i sur., 2000; Löffler i sur., 2005). Temperatura i VPD indeks dva su važna čimbenika koji utječu na provodljivost puči i transpiraciju. Ograničenje transpiracije pri visokom VPD indeksu obećavajuće je svojstvo koje bi se moglo uključiti u programe oplemenjivanja za poboljšanje otpornosti kukuruza na sušu. VPD indeks oplemenjivačkim programima orijentiranim na otpornost na sušu omogućuje bolje razumijevanje fizioloških procesa biljke i njen odgovor na različite varijable okoline (Yang i sur., 2012). U okolinama u kojima se često javlja nedostatak vode, biljke su razvile nekoliko strategija za adaptaciju stresa prouzročenog sušom (Maroco i sur., 1997; Borrell i sur., 2006; Araus i sur., 2008). Jedna prilagodba koja se čini osobito obećavajućom je konzervativna uporaba vode u ranoj fazi vegetacije kako bi voda bila dostupna za potporu rastu zrna kasnije tijekom vegetacije (Richards i Passioura, 1989; Sinclair i sur., 2005; Kholova i sur., 2010a; Messina i sur., 2011; Zaman-Allah i sur., 2011).

Kako navode Hirasawa i Hsiao (1999) i Ray i sur. (2002) kukuruz u poljskim pokusima pokazuje smanjenu fotosintezu i rast tijekom dijelova dana s visokim VPD indeksom, čak i kod tretmana navodnjavanjem gdje je vlažnost tla relativno visoka. Iako procesi fotosinteze kod C4 biljaka imaju tendenciju biti zasićeni s obzirom na asimilirani CO₂ te su manje osjetljivi na varijacije provodljivosti u pučima od C3 vrsta (Leakey, 2009), pad razine fotosinteze u uvjetima iznad 30°C ipak je zamjetan dok stanično disanje nastavlja rasti (Crafts-Brandner i Salvucci, 2002). Osim što su komponente fotosustava osjetljive na toplinski stres, zatvaranje puči rezultira ograničenjem premještanja molekula CO₂ na mjesta karboksilacije u stromi kloroplasta, te izravno ograničava brzinu fotosinteze (Perdomo i sur., 2016). Zatvaranje puči i ograničenje transpiracije kod vrijednosti visokog VPD indeksa može povećati dnevnu učinkovitost transpiracije, a zatim povećati udio vode koja se koristi tijekom reproduktivnih faza razvoja usjeva, što je ključno prilikom formiranja prinosa u uvjetima nedostatka vode (Sinclair, 2012; Cooper i sur., 2014; Vadez i sur., 2014) Kako donose Yang i sur. (2012) neki hibridi kukuruza pokazali su ograničenje povećanja stope transpiracije pri visokom VPD indeksu iznad granične točke, što je u suglasju s uvjetima transpiracije i uvjetima okoline koje usjev može doživjeti u polju. Podnevna restrikcija izmjene plinova u listu (kada se očekuje maksimalni VPD indeks) uzrokuje smanjenu fotosintetsku aktivnost, a posljedično i smanjeni dnevni rast usjeva (Gholipour i sur., 2013). Millet i sur. (2016) kao

najbolju vezu između učinka QTL-a za prinos zrna kukuruza i okoline opažaju maksimalni VPD indeks VPD_{max} pri deficitu tlaka para većem od 3 kPa, dok su učinci bili zanemarivi kod niskih VPD_{max} vrijednosti. Kako donose, ova okolinska varijabla utjecala je na prinos i broj zrna, ali ne i na veličinu zrna. Ovaj podatak ukazuje na djelovanje učinka suše tijekom vegetacije ili u vrijeme cvatnje, ali ne i u vrijeme nalijevanja zrna. Prema Parent i sur. (2009) korijenov sustav također stvara otpornosti prilikom apsorpcije otopine hranjivih tvari u provodne snopove. Abscizinska kiselina uključena je u posredovanje odgovora vodljivosti u odnosu na razine VPD indeksa (Bunce, 1997; Thompson i sur., 2007; Kholova i sur., 2010b). Proteini vodenih kanala, akvaporini, odgovorni su za trans-membransko kretanje vode i kao takvi imaju važnu ulogu u regulaciji ekstra vaskularnog transporta vode (Nardini i sur., 2005; Tyree i sur., 2005; Parent i sur., 2009; Ionenko i sur., 2010). Razina i aktivnost akvaporina može utjecati na hidrauličku vodljivost i rezultirati ograničenom transpiracijom prilikom visokih razina VPD indeksa. Zatvaranje puči kao odgovor na visoki VPD dovodi u ravnotežu gubitak vodene pare transpiracijom i protok vode u stanice kožnog tkiva epiderma i parenhima. Također zabilježene su značajne intra i inter-specifične varijacije u osjetljivosti odgovora stomatalnog aparata na promjene VPD-a (Forde i sur., 1977; Maroco i sur., 1997; Franks i Farquhar, 1999; Oren i sur., 1999).

Prema Gholipooru i sur. (2010) u dvofazno provedenom pokusu u kojem su sudjelovala 34 hibrida kukuruza primijećen je transpiracijski odgovor kod njih 11 s pragom razine VPD indeksa iznad kojeg je brzina transpiracije bila ograničena. Prag VPD indeksa varirao je od 1,7 do 2,5 kPa. VPD indeks iznad kojeg je brzina transpiracije bila ograničena primijećen je na osam hibrida u oba pokusa što ukazuje da je ekspresija svojstva bila dosljedna. Nadalje oni hibridi koju pokazuju niske stope transpiracije iznad prijelomne vrijednosti VPD indeksa imaju tendenciju očuvanja vode u tlu za razliku od hibrida koji nisu pokazali tendenciju pada stope transpiracije iznad prijelomne vrijednosti VPD indeksa (Gholipoor i sur., 2010). Prema Yangu i sur. (2012) ovo svojstvo očituje se u smanjenju efektivnog prosječnog dnevnog VPD za transpiraciju omogućujući učinkovitiju upotrebu dostupne vode. Također voda se čuva za korištenje kasnije u vegetacijskoj sezoni. Choudhary i sur. (2019) su u istraživanju provedenom s dva roka sjetve kukuruza (travanj i prosinac) i dvije razine VPD indeksa (umjeren i visok VPD) tijekom podnevnih sati izmjerili vrijednosti VPD indeksa koje su se kretale u rasponima od 3,9 – 4,5 kPa i 2,4 – 2,8 kPa. Prijelomna vrijednost VPD indeksa prilikom koje je došlo do smanjenja stope transpiracije u ovom slučaju je iznosila 3 kPa za obje promatrane okoline.

2.3.3. Suma stresnih jedinica (SDD)

Sukladno potrebama za razvojem i upotrebom indeksa suše usmjerenim detekciji i poznavanju sušnih okolina kao značajnog faktora u odabiru tolerantnih genotipova, suma stresnih jedinica (*Stress Degree Days*, SDD) indeks koristi se za opis i detekciju okoline pod utjecajem toplinskog stresa. Utjecaj toplinskog stresa računat je prema jednadžbi SDD indeksa prikazanoj u poglavlju 3.3.3. Lobell i sur. (2013) svojim istraživanjem provedenim u Sjedinjenim Američkim Državama pokazali su da toplinski stres uzrokovan ekstremnom vrućinom ima bitniju ulogu za proizvodnju kukuruza od suše. Kako su i ranija istraživanja pokazala akumulacija toplinskih jedinica u periodima s visokim temperaturama zraka (iznad 30°C) imale su snažan negativan utjecaj na prinos unatoč dovoljnoj količini oborine u vrijeme vegetacije.

Slično izračunu sume aktivnih temperatura (*Growing Degree Days*, GDD) potrebnih biljci za napredak i prelazak iz jedne fenofaze u drugu računa se i suma stresnih jedinica, no u ovom slučaju kvantificira se izloženost biljke ili usjeva stresu prouzročenom visokom temperaturom. U većem broju istraživanja (Idso i sur., 1977; Idso i sur., 1978a; Jackson i sur., 1977; Walker i Hatfield, 1979) SDD indeks se pokazao vrlo korisnim prilikom procjene toplinskog stresa i deficita vode te predikcije prinosa uzrokovane utjecajem visokih temperatura. Također daljnjim razmatranjima uočeno je da na SDD indeks osim dostupnosti vode u tlu značajan utjecaj mogu imati i neki drugi okolinski čimbenici poput tlaka pare zraka, neto radijacije i brzine vjetra (Gates, 1968). Prema (Idso i Ehrler, 1976; Ehrler i sur., 1978a; Ehrler i sur., 1978b; Idso i sur., 1978b; Idso i sur., 1979a; Idso i sur., 1979b; Idso i sur., 1980; Reginato i sur., 1978) stres nedostatka vode i jedinica toplinskog stresa kvantificiranih SSD indeksom temelji se na razlici temperature lišća i zraka, mjerenoj u vremenu oko sat i pol nakon sunčevog podneva. Sukladno ranijim istraživanjima Zhu i sur. (2019) također temperaturu od 30°C smatraju pragom za procjenu jedinica toplinskog stresa kako bi kvantificirali stres prouzročen visokim temperaturama. Analizom utjecaja toplinskog stresa na komponentama prinosa kukuruza Zhu i sur. (2019) potvrđuju najveću osjetljivost formiranja prinosa na jedinice toplinskog stresa tijekom perioda nalijevanja zrna i to po stopi od $0,46 \pm 0,07\%/^{\circ}\text{C}$. Stopa redukcije i osjetljivost prinosa na jedinice toplinskog stresa u fazi polinacije iznosi $-0,33 \pm 0,11\%/^{\circ}\text{C}$, dok je izloženost visokim temperaturama prilikom perioda vegetacije okarakterizirana redukcijom prinosa po stopi od $-0,30 \pm 0,12\%/^{\circ}\text{C}$. Usporedno s tipizacijom okoline temeljene na indeksima suše i toplinskog stresa razvijaju se i populacije tolerantne na toplinski stres. Buhiniček i sur. (2021) proveli su usporedbu indeksa toplinskog stresa i rezultata prinosa predkomisijskih pokusa te donijeli zaključke glede indeksa prikladnih za detekciju okolina pod utjecajem toplinskog stresa. Analiza je pokazala najjaču negativnu vezu između prinosa i SDD indeksa toplinskog stresa

kod ranih skupina zriobe, te ona slabi prilikom sve većih zahtjeva za toplinskim jedinicama u kasnijim skupinama zriobe. Buhiniček i sur. (2021) također zapažaju jaku povezanost vrijednosti SDD indeksa i prinosa zrna u fenofazi nalijevanja zrna kao i tijekom cjelokupne vegetacije kukuruza, što nije slučaj s drugim analiziranim klimatskim varijablama.

2.4. Interakcijski učinci genotipa i okoline za tolerantnost na sušu i toplinski stres

Primarni cilj svakog oplemenjivačkog programa očituje se u detekciji germplazme superiorne u pogledu prinosa ili bilo kojeg drugog svojstva od interesa. Kako bi uspjeli u tom naumu i ostvarili dobit od svakog ciklusa selekcije, potrebno je također pobliže razumjeti i prirodu interakcijskih odnosa između okoline i genotipa. Bustos-Korts i sur. (2019) u svom radu donose nekoliko statističkih metoda koje su pogodne za interpretaciju G×E interakcija u pogledu oplemenjivanja bilja. Kako bi opisali utjecaj G×E interakcije oplemenjivači se služe osnovnim linearnim modelima kao što su ANOVA ili model linearne regresije (poznatiji kao Finlay-Wilkinsonova regresija) kao i linearno-bilinearnim AMMI i GGE modelima.

Poznato je također da je aditivne učinke genotipova kroz okolinu moguće procijeniti samo ako G×E interakcija nije prisutna ili je njezina varijabilnost pravilno opisana. U slučaju kada je G×E interakcija prisutna govorimo o neaditivnim učincima (Bustos-Korts i sur., 2019). Pregled literature pokazuje da zbog značajne heterogenosti genotipa ili okoline nije uvijek moguće provesti ANOVA-u za učinak G×E interakcije (Jambrović, 2001). Stoga se uvodi Tukeyev test neaditivnosti (Tukey, 1949) kako bi se provjerio multiplikativni učinak G×E interakcije za agronomska svojstva od interesa.

Nadalje za pravilnu interpretaciju interakcijskih odnosa genotipa i okoline te uspješnu detekciju germplazme tolerantne na sušu i toplinski stres oplemenjivači uz ciljanu germplazmu također trebaju izabrati odgovarajuće (ciljane) okoline za testiranje genotipova od interesa. Ciljana okolina definirana je fiksnim i slučajnim učincima, pri čemu fiksni učinci podrazumijevaju ponovljive abiotske i biotske učinke, dok slučajni učinci s druge strane nisu predvidljivi ili se ne mogu vezati uz određenu lokaciju (Atlin i sur., 2011). Ovdje svakako treba imati na umu da se G×E interakcijski učinak može podijeliti na (G×L), (G×Y) i (G×Y×L) interakcije. Ovakvo razlaganje G×E interakcije također omogućuje procjenu prostorne i vremenske adaptabilnosti genotipova. Ako G×L učinak dominira nad preostala dva (G×Y i G×Y×L) možemo govoriti o adaptabilnosti na fiksne lokacijske učinke definirane kao regije ili mega-okoline. S druge strane ako prevladavaju G×Y i G×Y×L učinci tada je potrebno njihove fiksne učinke što detaljnije opisati i procijeniti, jer su oni glavni izvor varijabilnosti u

G×E interakciji (Atlin i sur., 2000; Atlin i sur., 2011; 186, Pankin i sur., 2014.; Windhausen i sur., 2012).

U razumijevanju aditivnih i neaditivnih (multiplikativnih) učinaka najboljom se pokazala analiza aditivnih glavnih efekata i multiplikativne interakcije (*Additive Main effect Multiplicative Interaction*, AMMI), poznatija kao AMMI analiza (Gauch i sur., 2008).

AMMI analiza oplemenjivačima omogućuje uvid u interakcijske odnose genotipa i okoline, te procjenjuje koja sastavnica ima najveći učinak na agronomsko svojstvo od interesa. Gauch i Zobel (1996) u svom radu naglašavaju važnost AMMI analize u istraživačke svrhe te ističu njenu korisnost u donošenju odluka prilikom istraživanja adaptabilnosti na sušu, niske temperature ili bolesti. Vargas i sur. (2001) u svom radu naglašavaju prednosti AMMI analize u interpretaciji G×E interakcije spram ANOVA-e ili nekih drugih regresijskih analiza. Prednost AMMI analize očituje se kroz objašnjenje većeg udjela varijabilnosti, te dvodimenzionalnog prikaza interakcijskih odnosa u pogledu grafičkih biplot prikaza. Sukladno zaključcima Yana i Hunta (2003) genotipovi koji imaju manji doprinos interakcijskim odnosima posljedično su i manje osjetljivi na promjene okoline, a samim time i stabilniji. Gauch (2013) u svom istraživanju provedenom na primjeni AMMI modela u analizi pokusa za prinos zrna naglašava prednost ove analize u pogledu podjele varijabilnosti na tri glavna učinka (G, E i G×E) te naknadnoj interpretaciji multiplikativnih učinaka u G×E interakciji.

Prema Gauchu (2013) glavni ciljevi AMMI analize očituju se u razumijevanju G×E interakcije, te grupiranju lokacija u mega-okoline što dovodi do detekcije genotipova specifično adaptabilnih na biotske i abiotske stresove kao što su suša i toplinski stres. Idući benefit AMMI analize okrenut je povećanju točnosti analiziranih svojstava, njihovoj ponovljivosti, te selekciji i genetskom doprinosu. Kako bi detektirali genotipove tolerantne na sušu i toplinski stres oplemenjivači testiraju veliki broj genotipova. Prema van Eeuwijk i sur. (2016) genotip koji je ostvario veći prinos od prosjeka ciljane okoline smatra se adaptabilnim u toj okolini. Također genotip koji je ostvario prinos veći od prosjeka više ciljanih okolina smatra se široko adaptabilnim za veći broj okolina (mega-okolinu). Nasuprot tome specifično adaptabilni genotipovi pokazuju bolji prinos u manjem broju ciljanih okolina (Ceccarelli 1989; Braun i sur., 1996; Cooper i Hammer 1996).

Interpretacija interakcijskih odnosa genotipa i okoline AMMI analizom omogućena je kroz grafički prikaz biplota pod nazivom AMMI1 i AMMI2 biplot. Multiplikativnost G×E učinaka teško je u potpunosti raščlaniti stoga se u literaturi dijele na interakcijski G×E signal ($G \times E_S$) koji opisuje interakcijske učinke i G×E šum ($G \times E_N$) koji ne pridonosi njihovu razumijevanju. AMMI1 biplot prikazuje odnos prosječne vrijednosti prinosa zrna koji je projiciran na osi

apscise (x) u odnosu na skorove glavne sastavnice (IPCA1) koja prikazuje najveći udio varijabilnosti učinaka na osi ordinate (y). Kod AMMI1 biplota učinci interakcije mogu se procijeniti iz pozicioniranja genotipa ili okoline u odnosu na os apscise (Onofri i Ciricifolo, 2007). Na temelju AMMI1 biplota može se rekonstruirati procjena vrijednosti nekog genotipa u nekoj okolini kao zbroj prosjeka genotipa i okoline, umanjen za ukupni prosjek, kojem se pribraja produkt skorova tog genotipa i te okoline. AMMI2 biplot prikazuje isključivo interakcijske učinke temeljene na odnosu skorova glavne sastavnice IPCA1 čiji se vrijednosti prikazuju na osi apscise (x) te skorove glavne sastavnice IPCA2 čije vrijednosti se projiciraju na osi ordinate (y). Ovaj grafički prikaz donosi prikaz učinaka interakcije genotipa i okoline prema AMMI2 modelu te kada uključuje najveći udio $G \times E$ interakcija može biti vrlo koristan u razumijevanju njihovih učinaka. Udaljenost genotipa ili okoline od sredine biplota proporcionalna je $G \times E$ interakciji nastaloj učincima promatranog genotipa ili okoline. Genotipovi koji su pozicionirani bliže jedan drugome pokazuju sličnu adaptabilnost, također okoline pozicionirane bliže jedna drugoj izazivaju slične $G \times E$ interakcije (Bustos-Korts i sur., 2019). Gauch i sur. (2008) u svom radu donose interpretaciju $G \times E$ interakcije temeljem AMMI2 biplota pri čemu vrijedi pravilo da su učinci interakcije slabiji, što je genotip ili okolina bliže pozicioniran sredini biplota.

2.5. Procesno modeliranje na osnovi interakcijskih učinaka između genotipa, okoline i upravljanja

Pored interakcije $G \times E$ koja je od presudne važnosti za oplemenjivače bilja, za ratarsku proizvodnju još je važnije istraživanje trofaktorske interakcije $G \times E \times M$ između genotipa, okoline i agrotehnike (ili upravljanja - management) (Messina i sur., 2009). Istraživanjem interakcije $G \times E \times M$ obuhvaća se cijeli spektar činitelja u biljnoj proizvodnji pogotovo u kontekstu klimatskih promjena. Tradicionalni odvojeni pristupi s jedne strane oplemenjivača koji istražuju interakciju $G \times E$, a s druge strane agronoma koji istražuju prije svega interakciju $E \times M$, integriraju se u široki $G \times E \times M$ okvir koji omogućuje statističko i matematičko modeliranje u seriji (ne)stresnih okolina za karakterizaciju ciljanih proizvodnih regija. Posljednjih dvadesetak godina, koriste se simulacijski modeli usjeva koji su matematički prikazi procesa rasta biljaka pod utjecajem $G \times E \times M$ interakcije. Za razliku od klasičnih statističkih modela u oplemenjivanju bilja temeljenih na statičkom (nedinamičkom) pristupu analize *post festum*, odnosno analize agronomskih svojstava koji su već ostvareni, ovakve simulacije pripadaju u procesna modeliranja i postali su nezamjenjiv alat za podršku znanstvenim istraživanjima, upravljanju usjevima i analizi poljoprivrednih politika (Fischer i sur., 2001; Hammer i sur., 2002; Hansen, 2002). Ovi modeli rasta usjeva (*crop growth*

models) simuliraju rast i razvoj biljaka, raspodjelu biomase među organima (lišće, stabljika, korijen i reproduktivne strukture) i formiranje prinosa. Točnost simulacije ishoda ovih procesa u širokom rasponu okruženja ovisi o osnovnom razumijevanju ključnih ekofizioloških procesa i uključivanju tog znanja u matematičke formulacije koje čine model.

Sposobnost modela da simulira prinos unutar neke okoline ovisi i o danim inputima kao što su podaci o tlu, kretanju vode u tlu kao i detaljan agrometeorološki profil lokacije. Kako navode Puntel i sur. (2016) model je toliko dobar koliko vjerno predstavlja stvarnost okoline koja se pokretanjem simulacije interpretira. Svaki model s primjenom u oplemenjivanju kukuruza na tolerantnost na sušu (kao jednim od ciljeva oplemenjivanja) kao sastavnicu modela mora uzeti u obzir i dovoljno veliku genetsku varijabilnost za prinos zrna kao primarno svojstvo. Genetska varijabilnost sekundarnih svojstava kao što su komponente prinosa ili fiziološka svojstva koja sudjeluju u formiranju prinosa u suši, mogu voditi ka genetskom poboljšanju prinosa (Edmeades, 2013) i modela.

Kod kukuruza se koriste vrlo različiti pristupi za simulaciju rasta i razvoja (Yang i sur., 2004), no u posljednje vrijeme najrašireniji simulacijski program je APSIM (Archontoulis i sur., 2014; Morel i sur., 2020; Stepinac i sur., 2021). *Agricultural Production Systems Simulator* (APSIM) je programski paket koji pruža modularni okvir za simulacijsko modeliranje, a razvijen je od strane Australске institucije pod nazivom „*Agricultural Production Systems Research Unit*“. APSIM je razvijen za simulaciju biofizičkih procesa u poljoprivrednim sustavima, posebno tamo gdje postoji interes za ekonomskim i ekološkim napretkom u upravljanju klimatskim rizicima (Holzworth i sur., 2014). Kao i većina alata za simulaciju, APSIM simulira procese rasta i razvoja genotipa kao odgovor na zadane varijable okoline. U ovom simulacijskom alatu, genotip je definiran skupom parametara povezanih s algoritmima koji opisuju fiziološke procese poput razvoja lišća, apsorpcije sunčevog zračenja, unosa vode, biomasa i akumulaciju dušika. Tijekom posljednjih 20 godina APSIM je opsežno testiran u širokom rasponu uvjeta (Chenu i sur., 2009) te se pokazao pouzdanim u interpretaciji G×E i G×E×M interakcija.

APSIM se sastoji od nekolicine glavnih modula 1) skup biofizičkih modula koji simuliraju biološke i fizikalne procese u poljoprivrednim sustavima, 2) skup upravljačkih modula koji korisniku omogućuju određivanje pravila koja karakteriziraju scenarij koji se simulira te koji kontroliraju provođenje simulacije, 3) razne module za olakšavanje unosa i prikaza simuliranih podataka i 4) simulacijski mehanizam koji pokreće proces simulacije i kontrolira sve poruke koje prolaze između neovisnih modula. Holzworth i sur. (2014) donose dodatnu podjelu biofizičkog modula u četiri kategorije biljni i životinjski moduli, modul za tlo i klimatološki modul te naglašavaju njihovu pouzdanost i stabilnost opisanu od strane Keating

i sur. (2003). Moduli okupljeni u APSIM sustavu simuliraju ključne temeljne fiziološke procese i rade na osnovi dnevnog vremenskog razdoblja kao odgovor na unos dnevnih vremenskih podataka, karakteristika tla i kulture uključenih u model za simulaciju. Moduli za svaku pojedinu kulturu razvili su se iz ranijih verzija koji su bili fokusirani samo na pojedinačne kulture. Modul za kukuruz razvijen je prema Carberry i Abrechtu (1991).

APSIM je sustav otvorenog tipa koji daje okvir za modeliranje i mogućnost uključivanja ili izuzimanja svakog pojedinačnog modula uključenog u simulaciju (McCown i sur., 1996). Ovakav modularni pristup omogućuje primjenu simulacijskih modela u razne svrhe od osnovnog upravljanja poljoprivrednom proizvodnjom pa sve do uključivanja u oplemenjivačke programe kao što je oplemenjivanje na tolerantnost na sušu i toplinski stres.

2.6. Detekcija germplazme tolerantne na sušu i toplinski stres u seriji ciljanih okolina

Prema Hallu (1993), tolerantnost na sušu podrazumijeva relativni odnos promatranog svojstva (najčešće prinosa) svakog pojedinog genotipa u odnosu na ostale genotipove koji su izloženi istom stresoru. Ovako postavljen koncept tolerantnosti čini se poprilično trivijalnim no interakcijska $G \times E$ povezanost i nedostatak znanja o funkcioniranju samih mehanizama tolerantnosti ograničavaju detekciju genotipova tolerantnih na sušu i toplinski stres (Messmer, 2006). Aghaei-Sarbarze i sur. (2009) su proveli istraživanje na toplinski stres i zapazili da su hibridi s većim prinosom u normalnim okolinama tolerantniji i u stresnim okolinama.

Kroz povijest oplemenjivanja kukuruza primjenjivane su razne metode detekcije tolerantnosti kako bi oplemenjivači selekcionirali genotipove od interesa. Sukladno cilju ovog rada okrenutog detekciji genotipova tolerantnih na sušu i toplinski stres odabrana metoda mora razdijeliti hibride koji su superiorniji u normalnim i stresnim okolinama od genotipova koji favoriziraju samo specifične uvjete okoline bez obzira bile one normalne ili sušne. Prema Grzesiak i sur. (2019) i Zhao i sur. (2019) najbolja metoda detekcije genotipova tolerantnih na sušu i toplinski stres uključuje kombiniranje više različitih indeksa tolerantnosti koji imaju jaku povezanost s prinosom u normalnim i sušnim okolinama. Prema istraživanjima koje je proveo Fernandez (1992) *Geometric mean productivity index* (GMP) često se koristi prilikom procjene tolerantnosti u varijabilnim okolinama, dok je *Stress Tolerance Index* (STI) vrlo koristan u detekciji visokog prinosa i potencijala tolerantnosti ispitivanih genotipova. Sedri i sur. (2019) prema istraživanju koje su proveli smatraju da je STI najbolji indeks za detekciju tolerantnih genotipova kukuruza. *Mean productivity index* (MP) predstavlja ukupni prosječni prinos normalnih i sušnih okolina te se hibridi s višim vrijednostima ovog indeksa smatraju tolerantnijima. *Harmonic mean productivity* (HARM)

indeks slično kao i MP indeks tolerantne hibride detektira temeljem viših vrijednosti ovog indeksa. Rosielle i Hamblin (1981) u svom istraživanju *Stress Tolerance* (TOL) indeks definiraju kao razliku u prinosu između sušnih i navodnjavanih okolina. Istraživanje koje su Rahman i sur. (2022) proveli u svrhu detekcije genotipova kukuruza tolerantnih na toplinski stres donosi zaključak da je TOL indeks prikladan za detekciju visokoprinosa genotipova ali samo u stresnim uvjetima, ovaj indeks ne razdvaja genotipove i u normalnim okolinama. *Stress Susceptibility Index* (SSI) predložili su Fischer i Maurer (1978) u svrhu detekcije stabilnosti prinosa te valorizacije njegovog potencijala kroz okoline. Ograničenje SSI indeksa ogleda se u problemu detekcije genotipova s većim prinosom u sušnim okolinama za razliku od normalnih okolina gdje su prinosi manji. *Relative Decrease in Yield* (RDY) indeks predstavlja relativno smanjenje prinosa u odnosu na prosjek svih promatranih okolina. Pogodan je kao i MP i HARM indeksi prilikom brzog rangiranja genotipova temeljem prinosa kroz okoline.

Unatoč velikom broju indeksa vrlo je važno odabrati indekse koji će omogućiti najbolju povezanost između vrijednosti indeksa i prinosa opaženog u pokusu. Kamrani i sur. (2018) u svom radu GMP, STI, MP i HARMS indekse ističu kao najpogodnije prilikom detekcije visokoprinosa i tolerantnih genotipova kukuruza. Slične zaključke donose i Shahrokhi i sur. (2020) koji uz GMP, STI, MP i HARM ističu još i RDY. Farshadfar i sur. (2013) u svom radu na pšenici istražuju 16 indeksa tolerantnosti (istraživanje uključuje svih 7 indeksa), te su kao najprikladnije u detekciji tolerantnosti izabrali GMP i STI indeks. Isti indeksi smatraju se najboljim odabirom prilikom detekcije genotipova tolerantnih na sušu i toplinski stres i u nekoliko ostalih istraživanja provedenih na grahu (Darkwa i sur., 2016), suncokretu (Gholinezhad i sur., 2014) i kukuruzu (Naghavi i sur., 2013).

3. MATERIJAL I METODE RADA

3.1. Materijal

Ovo istraživanje uključivalo je 32 genotipa kukuruza (Tablica 3.1.). Genotipovi kukuruza uključeni u istraživanje su službeno priznati domaći ili strani hibridi kukuruza iz FAO skupina 300, 400, 500 i 600. Svaka FAO skupina zastupljena je sa osam komercijalno uspješnih F1 hibrida.

Tablica 3.1. Popis genotipova kukuruza korištenih u poljskim pokusima.

Šifra genotipa	Naziv genotipa	FAO skupina zriobe	Oplemenjivačka kuća
1	BC344	300	Bc Institut, d.d.
2	BC306	300	Bc Institut, d.d.
3	BC323	300	Bc Institut, d.d.
4	TRIANGLE	300	Bc Institut, d.d.
5	P9903	300	Pioneer Hi-Bred Services GmbH Industriegelände; Corteva Agriscience Croatia d.o.o.
6	Os378	300	Poljoprivredni institut Osijek
7	Os398	300	Poljoprivredni institut Osijek
8	Os3617	300	Poljoprivredni institut Osijek
9	OS444	400	Poljoprivredni institut Osijek
10	BC406	400	Bc Institut, d.d.
11	BC424	400	Bc Institut, d.d.
12	BC482	400	Bc Institut, d.d.
13	DKC4608	400	Bayer Seeds SAS; Bayer d.o.o.
14	Kulak	400	Poljoprivredni institut Osijek
15	Tomasov	400	Poljoprivredni institut Osijek
16	Drava404	400	Poljoprivredni institut Osijek
17	OS552	500	Poljoprivredni institut Osijek
18	BC525	500	Bc Institut, d.d.
19	BC575	500	Bc Institut, d.d.
20	KLIPAN	500	Bc Institut, d.d.
21	DKC5830	500	Bayer Seeds SAS; Bayer d.o.o.
22	Velimir	500	Poljoprivredni institut Osijek
23	Os5922	500	Poljoprivredni institut Osijek
24	OS515	500	Poljoprivredni institut Osijek
25	BC682	600	Bc Institut, d.d.
26	BC616	600	Bc Institut, d.d.
27	BC626	600	Bc Institut, d.d.
28	RIDAN	600	Bc Institut, d.d.
29	P1535	600	Pioneer Hi-Bred Services GmbH Industriegelände; Corteva Agriscience Croatia d.o.o.
30	Rudolf	600	Poljoprivredni institut Osijek
31	Os6217	600	Poljoprivredni institut Osijek
32	Os635	600	Poljoprivredni institut Osijek

3.2. Poljski pokusi

3.2.1. Dizajn i agrotehnika pokusa

Istraživanje je provedeno u dvije uzastopne vegetacijske sezone tijekom 2017. i 2018. godine, na šest lokacija od čega se dvije nalaze u zapadnom dijelu Republike Hrvatske, dok su četiri smještene u istočnom dijelu zemlje. Na zapadnom dijelu zemlje istraživanje je provedeno na lokacijama Šašinovec i Rugvica, dok su u istočnom dijelu zemlje kao lokacije provedbe istraživanja odabrani Osijek, Beli Manastir, Tovarnik i Kutjevo (Tablica 3.2.).

Tablica 3.2. Popis naziva i skraćenica pokusnih lokacije te referentnih meteoroloških postaja DHMZ-a.

Redni broj	Naziv pokusne lokacije	Skraćenica pokusne lokacije	Referentna meteorološka DHMZ postaja	Referentni <i>Agri4Cast</i> raster broj	Zračna udaljenost pokusne lokacije i DHMZ postaje (m)
1	Šašinovec	L2	Zelina ^b	80129	14.570
2	Rugvica	L3	Zagreb-Maksimir ^a	79129	17.590
3	Osijek	L5	Osijek ^a	79136	14.510
4	Beli Manastir	L8	Osijek ^a	80136	34.100
5	Tovarnik	L9	Gradište ^a	78138	34.270
6	Kutjevo	L10	Našice ^b	78134	17.310

a – označava 1. klasu meteoroloških postaja, glavne meteorološke postaje sukladno klasifikaciji Svjetske meteorološke organizacije (SMO)

b – označava 2. klasu meteoroloških postaja, klimatološke meteorološke postaje sukladno klasifikaciji Svjetske meteorološke organizacije (SMO)

Pokus je postavljen prema redno-stupčanom dizajnu u četiri ponavljanja na površini od $P = 1.792,00 \text{ m}^2$. Osnovna parcela svakog ispitivanog člana (genotipa) sadržavala je četiri reda duljine 4,00 m, međurednog razmaka od 0,70 m što daje površinu osnovne parcele od $P = 11,20 \text{ m}^2$. Obračunska parcela člana u pokusu na kojoj su se provela sva opažanja i mjerenja obuhvaća dva unutarnja reda osnovne parcele, te iznosi $P = 5,6 \text{ m}^2$. Pokus je proveden prema preporukama visokog intenziteta agrotehnike, u optimalnim rokovima sjetve (Tablica 3.3.) uz preporuke gnojidbe u rasponu od 200 do 250 kg N/ha, 100 – 150 kg P_2O_5 /ha i od 120 do 180 kg K_2O /ha temeljene na uzorkovanju tla, te provedene analize strukture i sadržaja hranjiva u tlu. Sjetva je obavljena strojno uz povećanu gustoću sklopa te je definirana željenim sklopom biljaka za FAO skupine obuhvaćene istraživanjem. Genotipovi FAO skupina 300 i 400 sijani su na razmak biljaka unutar reda od 0,18 m, dok je razmak biljaka u redu prilikom sjetve genotipova FAO skupina 500 i 600 iznosio 0,22 m.

Zadana gustoća sklopa postignuta je brojanjem i odstranjivanjem prekobrojnih biljaka unutar osnovne parcele pokusa u fenofazi V4. Završni sklop bio je 81.000 biljaka/ha (FAO300), 71.000 biljaka/ha (FAO400), 64.000 biljaka/ha (FAO500) i 57.000 biljaka/ha (FAO600).

Tablica 3.3. Popis geografskih lokacija te datumi sjetve i berbe poljskih pokusa.

Skraćenica pokusne lokacije	Geografska lokacija pokusa	FAO skupina zriobe	Datum sjetve 2017. g.	Datum berbe 2017. g.	Datum sjetve 2018. g.	Datum berbe 2018. g.
L2	45°51'09.7"N 16°10'49.4"E	300 – 600	3. svibanj	17. listopad	30. travanj	21. rujan
L3	45°45'13.4"N 16°14'31.8"E	300 – 400	27. travanj	2. listopad	11. svibanj	11. listopad
L3	45°45'13.4"N 16°14'31.8"E	500 – 600	27. travanj	13. listopad	11. svibanj	11. listopad
L5	45°32'11.7"N 18°44'28.1"E	300 – 600	3. svibanj	19. listopad	23. travanj	9. listopad
L8	45°48'09.4"N 18°39'08.9"E	300 – 600	28. travanj	27. rujan	23. travanj	28. rujan
L9	45°10'17.0"N 19°08'25.6"E	300 – 400	11. travanj	12. rujan	17. travanj	20. rujan
L9	45°10'17.0"N 19°08'25.6"E	500 – 600	27. travanj	9. listopad	17. travanj	20. rujan
L10	45°24'28.0"N 17°53'18.1"E	300 – 600	26. travanj	12. listopad	24. travanj	3. listopad

3.2.2. Opažanje, ocjena i mjerenje svojstava

Poljskim pokusima i laboratorijskom analizom biljnog materijala mjerena su biološka i agronomska svojstva genotipova uključenih u istraživanje. Biološka svojstva obuhvaćena istraživanjem opažana su tijekom vegetacije kukuruza bilježenjem 1) datuma sjetve, nicanja, svilanja, polinacije, nalijevanja i zriobe zrna, 2) mjerenjem visine biljke (cm; od razine tla do baze metlice) i visine do klipa (cm; od razine tla do nodija primarnog klipa) nakon mliječne zriobe. Agronomska svojstva obuhvaćena istraživanjem izmjerena su laboratorijskom analizom klipa i strojnom berbom kukuruza u polju. Izuzimanjem 10 uzastopnih klipova s vanjskih redova osnovne parcele 1) laboratorijskom analizom izmjerena je masa tisuću zrna (g) i masa zrna na klip (g). Specijaliziranim kombajnima u

vrijeme tehnološke zriobe sukladno FAO skupinama zriobe (Tablica 3.3.) provedena je 2) strojna berba čime je određen prinos (t/ha) i vlaga zrna (%) svakog člana u pokusu.

3.2.3. Meteorološka mjerenja i opažanja

Meteorološki podaci na svakoj pokusnoj lokaciji prikupljeni su meteorološkom mjernom postajom Davis 6250EU, pohranjeni automatskom Vantage Vue konzolom (Slika 3.1.) te standardizirani WeatherLink programskim paketom. Mikrometeorološkim mjerenjem svakog punog sata na visini od 1 m iznad tla prikupljeni su podaci minimalne, maksimalne i srednje temperature zraka (°C), relativna vlažnost (%) i tlak zraka (hPa) kao i količina i distribucije oborine (mm/m²) te brzine (m/s) i smjera vjetra.

Za potrebe ove disertacije korišteni su i ekvivalentni službeni podaci DHMZ-a sa profesionalnih meteoroloških postaja, a koje su bile najbliže poljskim pokusima (Tablica 3.2.). Službene podatke DHMZ-a moguće je dobiti besplatno za potrebe znanstvenih istraživanja putem rutinskog formalnog zahtjeva objavljenog na njihovim internet stranicama (DHMZ, 2023).



Slika 3.1. Mjerna postaja Davis 6250EU i pripadajuća Vantage Vue konzola za prikaz i pohranu meteoroloških podataka; izvor: Weerhuisje.nl, (preuzeto s: <https://weerhuisje.nl/en/davis-professional/davis-6250-vantage-vue-professional-weerstation/a-8731-92>; 6. 12. 2023.).

Meteorološki podaci zabilježeni izravno u poljskim pokusima uspoređeni su s ekvivalentnim podacima najbližih meteoroloških postaja DHMZ-a i sukladnim podacima s platforme Agri4Cast (A4C) Europske Komisije.

Slika 3.2. Prikaz vrste i načina prikupljanja meteoroloških elemenata s platforme „Agri4Cast“ Europske Komisije; izvor: Joint Research Centre (preuzeto s: <https://agri4cast.jrc.ec.europa.eu/DataPortal/Index.aspx?o=d> 3. 11. 2022.).

3.3. Indeksi suše i toplinskog stresa

Prikupljene serije podataka korištene su za izračun dva indeksa suše i jednog indeksa toplinskog stresa.

3.3.1. Samokalibrirajući Palmerov indeks jakosti suše (scPDSI)

Prvi indeks suše samokalibrirajući Palmerov indeks jakosti suše (*Self-calibrating Palmer Drought Severity Index*, scPDSI) izračunat je prema metodici (Pandžić i sur., 2022) iz sljedećeg izraza

$$X_i = pX_{i-1} + qZ_i \quad (1)$$

pri čemu X_{i-1} predstavlja vrijednost indeksa prethodnog perioda, budući je ovaj indeks akumulirajućeg karaktera. Nadalje p i q predstavljaju vrijednosti faktora trajanja, a Z_i predstavlja vrijednosti anomalije vlage i -tog perioda (dekada 1 – 36 ili mjesec 1 – 12) u promatranoj okolini.

Vrijednosti faktora trajanja (*duration factors*, p i q) za svaku pokusnu lokaciju računaju se prema metodici (Wells, 2002) sljedećim izrazima

$$p = \left(1 - \frac{m}{m+b}\right) \quad (2)$$

$$q = \left(\frac{c}{m+b}\right) \quad (3)$$

varijabla c u izrazu faktora trajanja predstavlja bilo koju vrijednost kategorije sušnog ili vlažnog stanja klime (Tablica 3.4.; Palmer, 1965), dok varijable m i b su procijenjene

vrijednosti suhog i vlažnog vremena sukladno metodi najmanjih kvadrata prema (Wells, 2002).

Vrijednosti anomalije vlage (Z) računa se sljedećim izrazom

$$Z = K_j d \quad (4)$$

pri čemu K_j predstavlja klimatološke čimbenike j -tog perioda (dekada 1 – 36 ili mjesec 1 – 12) u promatranoj okolini, a d bilancu vlažnosti ili suše – *moisture departure*. Klimatološki čimbenik računa se sukladno metodici (Wells i sur., 2004)

$$K_j = \begin{cases} K'_j \left(-\frac{4,00}{2.\text{percentil}} \right) & \text{ako je } d < 0 \\ K'_j \left(-\frac{4,00}{98.\text{percentil}} \right) & \text{ako je } d \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

gdje K'_j predstavlja višegodišnje prosječne vrijednosti klimatoloških čimbenika j -tog perioda (dekada 1 – 36 ili mjesec 1 – 12) u promatranoj okolini sukladno metodici (Palmer, 1965)

$$K'_j = \log_{10} \left[\frac{\frac{\overline{ET}_j + R_j + \overline{RO}_j}{\bar{P}_j + L_j} + 2,8}{\bar{D}_j} \right] + 0,5 \quad (6)$$

pri čemu ET_j predstavlja stvarnu evapotranspiraciju, R_j vrijednost vlage apsorbirane od strane tla, RO_j vlagu koja je izgubljena površinskim otjecanjem pale oborine, P_j količinu oborine, L_j vlagu izgubljenu iz tla i D_j predstavlja apsolutnu vrijednost bilance vlažnosti ili suše (*Moisture departure, d*) j -tog perioda u promatranoj okolini.

Bilanca vlažnosti i suše (d) računa se prema izrazu

$$d = P - \hat{P} \quad (7)$$

pri čemu P predstavlja količinu oborine u promatranom periodu za promatranu okolinu, a \hat{P} količinu oborine koja je potrebna za održavanje normalne razine vlage u tlu.

Količina oborine (P) oslanja se na model bilance vode – *water balance model* (WB) prema Palmeru (1965)

$$P = ET + RO + \Delta S \quad (8)$$

gdje ET predstavlja stvarnu evapotranspiraciju, RO vlagu koja je izgubljena površinskim otjecanjem pale oborine, a ΔS promjenu vlage u tlu, izračunatu sljedećim izrazom

$$\Delta S \approx R - L \quad (9)$$

gdje R označava vrijednost vlage apsorbirane od strane tla, L vlagu izgubljenu iz tla. Varijable uključene u model bilance vode za područje Republike Hrvatske određene su sukladno metodici prema (Pandžić i sur., 2009).

Količina oborine koja je potrebna za održavanje normalne razine vlage u tlu \hat{P} računa se prema izrazu

$$\hat{P} = \alpha_j PET + \beta_j PR + \gamma_j PRO + \delta_j PL \quad (10)$$

PET označava potencijalnu evapotranspiraciju računatu prema metodici (Eagleman, 1967), PR potencijal apsorpcije vlage od strane tla, PRO potencijal vlage koja je izgubljena površinskim otjecanjem pale oborine, a PL potencijal gubitaka vlage u tlu. Pripadajući koeficijenti bilance vode ($\alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \delta_j$) za j -ti period (dekada 1 – 36 ili mjesec 1 – 12) računaju se prema sljedećim izrazima

$$\alpha_j = \frac{\overline{ET_j}}{\overline{PET_j}} \quad \beta_j = \frac{\overline{R_j}}{\overline{PR_j}} \quad \gamma_j = \frac{\overline{RO_j}}{\overline{PRO_j}} \quad \delta_j = \frac{\overline{L_j}}{\overline{PL_j}} \quad (11)$$

Vrijednosti scPDSI indeksa karakteriziraju klimatske uvjete određenog područja temeljem skale podijeljene u jedanaest kategorija. Vrijednosti ovog indeksa kreću se u rasponu od – 4,00 (ekstremna suša) pa do + 4,00 (ekstremna vlažnost), a detaljna klasifikacija predočena je Tablica 3.4.

Tablica 3.4. Klasifikacija sušnih i vlažnih razdoblja PDSI indeksa (Palmer, 1965).

PDSI	Klasa
$\geq 4,00$	Ekstremna vlažnost
3,00 do 3,99	Velika vlažnost
2,00 do 2,99	Umjerena vlažnost
1,00 do 1,99	Lagana vlažnost
0,50 do 0,99	Početak vlažnog razdoblja
0,49 do – 0,49	U granicama normalnog
– 0,50 do – 0,99	Početak sušnog perioda
– 1,00 do – 1,99	Srednje jaka suša
– 2,00 do – 2,99	Umjerena suša
– 3,00 do – 3,99	Vrlo jaka suša
$\leq - 4,00$	Ekstremna suša

3.3.2. Deficit tlaka pare (VPD)

Drugi indeks suše deficit tlaka pare (*Vapour Pressure Deficit*, VPD) definiran je kao funkcija vlažnosti zraka i temperature svake promatrane okoline te je izračunat prema metodici (Allen i sur., 1998) iz sljedećeg izraza

$$VPD = e_s - e_a \quad (12)$$

Vrijednost VPD indeksa za neko vremensko razdoblje kao što je dekada, mjesec ili godina ovisno od dostupnosti ulaznih podataka računa se prosjekom tlaka pare zasićenog zraka (e_s) prema jednom od sljedećih izraza

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{max}) + e^\circ(T_{min})}{2} \quad (13)$$

ili

$$e_s = \frac{e^\circ(T_7) + e^\circ(T_{14}) + 2 e^\circ(T_{21})}{4} \quad (14)$$

pri čemu se tlak pare zasićenog zraka pri dnevnoj minimalnoj i maksimalnoj temperaturi zraka ($e^\circ(T)$) računa izrazom

$$e^\circ(T) = 0,6108 \left[\frac{7,5 \times T}{237,3 + T} \right] \quad (15)$$

pri čemu T označava minimalnu ili maksimalnu temperaturu zraka zavisno od toga računa li se minimalna, maksimalna ili prosječna vrijednost VPD indeksa.

Tlak pare stvarne zasićenosti zraka (e_a) moguće je računati na nekoliko načina, ovisno o vrsti prikupljenih meteorološki podataka. U ovom istraživanju prikupljeni su podaci prosječne relativne vlage zraka (RH) stoga je tlak pare stvarne zasićenosti zraka (e_a) računat sljedećim izrazom

$$e_a = \frac{RH}{100} \left[\frac{e^\circ(T_{max}) + e^\circ(T_{min})}{2} \right] \quad (16)$$

pri čemu T označava minimalnu ili maksimalnu temperaturu zraka kao i u prethodnom slučaju prilikom računanja tlaka pare zasićenog zraka (e_s). Također prilikom računanja VPD indeksa iz podataka prikupljenih s A4C platforme valja napomenuti da se pod nazivom meteorološkog elementa (*vapour pressure (hPa)*, VP; Slika 3.2.) zapravo nalazi vrijednost tlaka pare stvarne zasićenosti zraka (e_a) te stoga nije potrebno dodatno računanje ovog elementa. Također iz vrijednosti elementa VP-a preuzetih s platforme A4C moguće je izračunati vrijednosti relativne vlažnosti zraka (RH) prema sljedećem izrazu


$$RH = \frac{e_a}{e_s} \times 100 \quad (17)$$

pri čemu e_a označava već ranije spomenuti tlak pare stvarne zasićenosti zraka.

Općenito tlak kao fizikalnu veličinu opisuje se s nekoliko mjernih jedinica od kojih je najčešće korišten paskal (Pa). U literaturi koja je usmjerena istraživanju na kukuruзу kao mjerna jedinica za iskazivanje vrijednosti VPD indeksa navodi se kilopaskal (kPa), stoga će se kilopaskal kao mjerna jedinica VPD indeksa koristiti i u ovom radu. Vrijednosti VPD indeksa definiraju razliku između količine stvarne vlage u zraku i vrijednosti vlage koju zrak sadrži kada je potpuno zasićen. Vrijednosti koje su važne za fiziološke procese i životni ciklus kukuruza u rasponu su od 0,00 – 4,00 kPa.

Deficit tlaka para je široko korišten indeks te su sukladno tome već osmišljeni intuitivni grafikoni koji definiraju kritične, granične i optimalne vrijednosti ovog indeksa (Slika 3.3.). Vrijednosti VPD indeksa kako je ranije već istaknuto u funkciji su temperature i relativne vlage zraka, stoga njegove vrijednosti mogu varirati ovisno od vremenskih prilika. Prema grafu (Slika 3.3.) optimalne vrijednosti ovog indeksa očekuju se kod relativne vlage zraka od 65% te ona nikako ne bi smjela pasti ispod 50%, dok je očekivana dnevna temperatura zraka između 24 i 26°C, a noćna između 20 i 21°C (Perfect Grower, 2019).

Perfect Grower Vapor Pressure Deficit Recommendations (kPa)															
TEMPERATURE		Relative Humidity													
°C	°F	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
15	59	1.11	1.02	0.94	0.85	0.77	0.68	0.60	0.51	0.43	0.34	0.26	0.17	0.09	0
16	61	1.18	1.09	1.00	0.91	0.82	0.73	0.64	0.55	0.45	0.36	0.27	0.18	0.09	0
17	63	1.26	1.16	1.06	0.97	0.87	0.77	0.68	0.58	0.48	0.39	0.29	0.19	0.10	0
18	64	1.34	1.24	1.13	1.03	0.93	0.83	0.72	0.62	0.52	0.41	0.31	0.21	0.10	0
19	66	1.43	1.32	1.21	1.10	0.99	0.88	0.77	0.66	0.55	0.44	0.33	0.22	0.11	0
20	68	1.52	1.40	1.29	1.17	1.05	0.93	0.82	0.70	0.58	0.47	0.35	0.23	0.12	0
21	70	1.62	1.49	1.37	1.24	1.12	0.99	0.87	0.75	0.62	0.50	0.37	0.25	0.12	0
22	72	1.72	1.59	1.45	1.32	1.19	1.06	0.92	0.79	0.66	0.53	0.40	0.26	0.13	0
23	73	1.82	1.68	1.54	1.40	1.26	1.12	0.98	0.84	0.70	0.56	0.42	0.28	0.14	0
24	75	1.94	1.79	1.64	1.49	1.34	1.19	1.04	0.89	0.75	0.60	0.45	0.30	0.15	0
25	77	2.06	1.90	1.74	1.58	1.42	1.27	1.11	0.95	0.79	0.63	0.47	0.32	0.16	0
26	79	2.18	2.02	1.85	1.68	1.51	1.34	1.18	1.01	0.84	0.67	0.50	0.34	0.17	0
27	81	2.32	2.14	1.96	1.78	1.60	1.43	1.25	1.07	0.89	0.71	0.53	0.36	0.18	0
28	82	2.46	2.27	2.08	1.89	1.70	1.51	1.32	1.13	0.94	0.76	0.57	0.38	0.19	0
29	84	2.60	2.40	2.20	2.00	1.80	1.60	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20	0
30	86	2.76	2.54	2.33	2.12	1.91	1.70	1.48	1.27	1.06	0.85	0.64	0.42	0.21	0
31	88	2.92	2.69	2.47	2.24	2.02	1.80	1.57	1.35	1.12	0.90	0.67	0.45	0.22	0
32	90	3.09	2.85	2.61	2.38	2.14	1.90	1.66	1.43	1.19	0.95	0.71	0.48	0.24	0
33	91	3.27	3.02	2.76	2.51	2.26	2.01	1.76	1.51	1.26	1.01	0.75	0.50	0.25	0
34	93	3.46	3.19	2.92	2.66	2.39	2.13	1.86	1.59	1.33	1.06	0.80	0.53	0.27	0
35	95	3.65	3.37	3.09	2.81	2.53	2.25	1.97	1.69	1.40	1.12	0.84	0.56	0.28	0



- Green - Optimal
- Yellow - Borderline
- Red - Too high / too low

Slika 3.3. Grafikon vrijednosti VPD indeksa; izvor: Perfect Grower, (preuzeto s: <https://www.perfectgrower.com/knowledge/knowledge-base/vpd-chart-vapor-pressure-deficit/>; 8. 2. 2024.).

3.3.3. Suma stresnih jedinica (SDD)

Treći indeks suma stresnih jedinica (*Stress Degree Days*, SDD) sumira utjecaj temperatura iznad 30°C, te za razliku od prethodna dva ukazuje na intenzitet i pojavnost toplinskog stresa. SDD indeks izračunat je prema Idso i sur. (1981), sljedećim izrazom

$$SDD_{30}^{\infty} = \sum_{t=1}^N DD_t \quad (18)$$

gdje se DD_t procjenjuje na ovaj način:

$$DD_t = \begin{cases} 0, & \text{pri } Ta < 30 \\ Ta - 30, & \text{pri } Ta \geq 30 \end{cases} \quad (19)$$

pri čemu t predstavlja dnevni vremenski interval, N je ukupan broj dana svake pojedine vegetacijske sezone, DD predstavlja toplinske jedinice, a Ta temperaturu okolnog zraka. Funkcija SDD indeksa koristi temperaturu zraka kako bi definirao pojavu toplinskog stresa u usjevu. Sukladno izrazu (18) što je vrijednost sume stresnih jedinica SDD indeksa veća stres izazvan visokim temperaturama postaje izraženiji.

3.4. Statistička analiza

Podaci prikupljeni tijekom dvije godine poljskih pokusa analizirani su primjenom uobičajenog linearnog modela za balansirane i ortogonalne podatke provedbom pojedinačnih i kombiniranih analiza varijanci i regresija agronomskih i meteoroloških podataka.

3.4.1. Analiza i primjena podataka iz agrometeoroloških mjerenja

Meteorološki podaci korišteni u ovom radu prije upotrebe analizirani su deskriptivnim i grafičkim usporedbama obzirom na podrijetlo, izravno prikupljanje u poljskim pokusima (POK) ili preuzimanje s alternativnih izvora, meteoroloških postaja DHMZ-a i platforme A4C-a. Usporedbe i validacija srednjih dnevnih i dekadnih vrijednosti temperature i relativne vlage zraka te količine oborine izmjerenih izravno u pokusima i njima odgovarajućih vrijednosti iz alternativnih izvora provedene su pomoću Pearsonovog koeficijenta korelacije. Posljedično usporedbi meteoroloških elemenata različitog podrijetla i iz njih izračunate vrijednosti indeksa suše i toplinskog stresa također su uspoređene primjenom Pearsonovog koeficijenta korelacije. Pretpostavka koeficijenta korelacije koja se testira polazi od hipoteze $r = 0$ te je prilikom usporedbe dnevnih vrijednosti izvedena na temelju $n = 153$ (broj promatranih dana), dok je za dekadne vrijednosti izvedena za $n = 15$ (broj promatranih dekada). Koeficijent korelacije za dnevne vrijednosti $r > 0,16$ je najmanja značajna

vrijednost za $p \leq 0,05$, a $r > 0,21$ najmanja značajna vrijednost za $p \leq 0,01$. Što se tiče dekadnih vrijednosti koeficijent korelacije $r > 0,51$ je najmanja značajna vrijednost za $p \leq 0,05$, a $r > 0,64$ najmanja značajna vrijednost za $p \leq 0,01$. Sezonski hod temperature zraka i oborine za dvije godine istraživanja na svih šest lokacija prikazan je Walterovim klimatskim dijagramima temeljem prosječnih mjesečnih temperatura zraka i sume oborine u omjeru 1:3 (Penzar i Penzar, 2000). Walterov klimatski dijagram na jednostavan i u agronomskoj praksi široko prihvaćen način prikazuje razdoblje manjka oborine što posljedično svaku promatranu lokaciju definira više ili manje suhom.

3.4.2. Analiza agronomskih svojstava i G×E interakcije

Za statističku analizu agronomskih svojstava korišten je računalni program PLABSTAT i podrazumijeva dvofazni pristup analize. Prva faza je analiza varijanci (ANOVA) pojedinačnih poljskih pokusa, a druga faza su skupne (kombinirane) ANOVA-e za 1) detekciju učinaka genotipa, lokacije, godine i njihovih pripadajućih interakcija (trofaktorski model), kao i za 2) detekciju učinka genotipa i okoline i njihove interakcije (dvofaktorski model) u kombinaciji lokacije i godine odnosno 12 "okolina" (Utz, 2003). Detekcija atipičnih podataka provedena je testom Anscombe i Tukey (1963).

Izračunato je ukupno 12 pojedinačnih analiza varijanci (ANOVA) za svako svojstvo prema modelu

$$y_{ij} = \mu + G_i + REP_j + e_{ij} \quad (20)$$

gdje je y_{ij} prosječna vrijednost i-tog genotipa u j-toj repeticiji, μ ukupni prosjek pokusa, G_i učinak i-tog genotipa, REP_j učinak j-te repeticije, a e_{ij} pogreška pokusa.

Trofaktorska ANOVA provedena je prema modelu

$$y_{ijk} = \mu + G_i + L_j + Y_k + GL_{ij} + GY_{ik} + LY_{jk} + GLY_{ijk} + e_{ijk} \quad (21)$$

gdje je y_{ijk} prosječna vrijednost i-tog genotipa na j-toj lokaciji k-te godine, μ ukupni prosjek pokusa, G_i učinak i-tog genotipa, L_j učinak j-te lokacije, Y_k učinak k-te godine, GL_{ij} , GY_{ik} , LY_{jk} , GLY_{ijk} interakcijski učinci, a e_{ijk} je ostatak, odnosno pogreška pokusa.

Dvofaktorska ANOVA provedena je prema modelu

$$y_{ij} = \mu + G_i + E_j + GE_{ij} + e_{ij} \quad (22)$$

gdje je y_{ij} prosječna vrijednost i-tog genotipa na j-toj lokaciji, μ ukupni prosjek pokusa, G_i učinak i-tog genotipa, E_j učinak j-te okoline, GE_{ij} , interakcijski učinak, a e_{ij} je pogreška pokusa.

Analiza aditivnih glavnih efekata i multiplikativne interakcije (AMMI), provedena je u R okruženju (R Core Team, 2023), uz pomoć grafičkog korisničkog sučelja RStudio (Posit team, 2024) te dodatnog programskog paketa za R *metan* (*Multi Environment Trials Analysis, metan*; Olivoto i Dal'Col Lúcio, 2019). Kao ulazni podaci korišteni su izvorni rezultati pokusa za prinos. Učinci interakcije G×E korišteni su za izračun glavnih sastavnica. Analiza je provedena prema modelu AMMI2 (Gauch i sur., 2008), korištenjem prve dvije glavne sastavnice (IPCA). Odabir prikladnog AMMI modela za interpretaciju G×E interakcije ovisi o zbroju sume kvadrata (SS) glavnih sastavnica (IPCA) koja nije veća od sume kvadrata interakcijskog G×E signala ($G \times E_S$), jer bi se u protivnom učinci interakcije izgubili u interakcijskom G×E šumu ($G \times E_N$; Gauch, 2013). Značajnost glavnih sastavnica za analizu multiplikativnih učinaka G×E interakcije testirana je prema (Gauch, 2013) te ukazuje na specifične reakcije hibrida na okolinu.

3.5. Procesno modeliranje

Procesno modeliranje i predviđanje prinosa provedeno je u programskom paketu APSIM Next Generation korištenjem više simulacijskih modula namijenjenih kukuruzu (Holzworth i sur., 2014; Archontoulis i sur., 2014; Holzworth i sur., 2018). Osnovni input za modeliranje su višedesetljetni agrometeorološki podatci u razdoblju od 1979. do 2020. godine preuzeti s A4C platforme (Joint Research Centre, 2020). Agroekološke značajke tla podešene su sukladno tipu tla svake pokusne lokacije prema ISRIC (*International Soil Reference and Information Centre*) bazi podataka u R okruženju (R Core Team, 2023), uz pomoć grafičkog korisničkog sučelja RStudio (Posit team, 2024) te dodatnog programskog paketa za R *apsimx* (Miguez, 2024). Simulacijski model kukuruza za predikciju prinosa podešen je prema parametrima sjetve korištenim u poljskim pokusima. Dok je završni sklop bio definiran stvarnim vrijednostima opisanim u potpoglavlju Dizajn i agrotehnika pokusa koji je varirao kroz različite FAO skupine, ostali su parametri u sjetvi za sve FAO skupine bili identični. Najtočniji rezultati simulacija dobiveni su kada je zadani okvir (window) za mogući početak sjetve bio 10. travnja, a završetak 5. svibnja, kada je minimalna ekstrakcijska količina vode u tlu podešena na 10 mm, potrebna akumulirana količina oborine na 10 mm, dubina sjetve 3 cm i međuredni razmak od 75 cm, te količina ukupnog N postavljena na 220 kg/ha za sve pokuse. Prema dokumentaciji APSIM Maize modula (Brown i sur., 2014) različite FAO skupine najviše se razlikuju prema prikupljenim toplinskim jedinicama (GDD) u juvenilnoj fazi, te je prema tome korigirana specifična fenologija svake FAO skupine iz poljskih pokusa. Korekcija je izvršena prema stvarnim sumama toplinskih jedinica prosjeka svih genotipova u pojedinoj FAO skupini izmjerenih i izračunatih u poljskom pokusu u Rugvici. Sume toplinskih jedinica u juvenilnoj fazi koje su iznosile 210 (FAO300), 230

(FAO400), 246 (FAO500), 253 (FAO600) uvrštene su kao novi parametri u glavni „okvir modeliranja biljaka“ (Plant Modelling Framework – PMF).

Validacija APSIM modela izvršena je usporedbom s podacima opaženim u poljskim pokusima izračunom Pearsonovog koeficijenta korelacije i korijena prosječnog kvadrata pogreške (RMSE) prema formuli

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (23)$$

gdje \hat{y}_i označava opažene prosječne vrijednosti prinosa zrna u pokusu, a y_i označava predviđene vrijednosti dobivene APSIM simulacijama. RMSE je uobičajeno statističko mjerilo za procesna modeliranja (Palsey i sur., 2023) koji ima veliku praktičnu vrijednost, jer je izražen u jedinicama samoga svojstva. Od velikog broja učinjenih simulacija, u disertaciji će biti prikazane, one koje su istovremeno imale najveći korelacijski koeficijent (0,6) i najmanji RMSE od samo 0,02 t/ha ukazujući na visoku točnost odabranoga modela.

3.6. Detekcija germplazme tolerantne na sušu i toplinski stres u seriji ciljanih okolina

Detekcija germplazme tolerantne na sušu i toplinski stres provedena je usporedbom reakcije vrijednosti agronomskih svojstava pojedinih genotipova u uvjetima ekstremno različitih okolina procijenjenih indeksima suše i toplinskog stresa. Općenito, karakterizacija okolina provedena je temeljem rastućih ili padajućih prosječnih vrijednosti pojedinih indeksa, tako da čine gradijent okoline u smislu jačine stresa prouzročenog sušom i/ili toplinom. Temeljem ovoga, odabrane su tri stresne i tri povoljne okoline, a za svaki ispitivani genotip izračunati su prosjeci prinosa zrna ove dvije skupine. Za analizu tolerantnosti promatranih genotipova izračunato je više različitih indeksa tolerantnosti koji se koriste u ovakvim istraživanjima (Tablica 3.5.), a izvode se iz vrijednosti prinosa zrna izmjerenih u gore navedenim kontrastnim uvjetima. Vrijednosti indeksa tolerantnosti na različite načine izražavaju razlike prinosa u normalnoj (povoljnoj) (Y_p) i sušnoj (Y_s) okolini uvažavajući pri tome i razinu prosječne vrijednosti, prema izrazima iz Tablica 3.5.

Prema literaturi, veće vrijednosti GMP, STI, MP i HARM indeksa ukazuju na superiorne genotipove u prinosu zrna i u normalnoj (Y_p) i u sušnoj (Y_s) okolini te se oni smatraju tolerantnijima na sušu. S druge strane što su vrijednosti TOL indeksa bliže nuli to su genotipovi stabilniji u sušnoj okolini, što ne mora biti slučaj i u normalnoj okolini. SSI vrijednosti manje od 1 detektiraju tolerantniji genotip u sušnoj okolini te kao i TOL ne garantiraju superiornost tih genotipova i u normalnoj okolini. Vrijednosti RDY indeksa bliže

nuli detektiraju stabilne genotipove u sušnoj i normalnoj okolini, ali ujedno ne garantiraju superiornost u pogledu prinosa.

Tablica 3.5. Matematički izrazi za indekse tolerantnosti.

Indeks	Puni naziv indeksa	Referenca	
$GMP = \sqrt{Y_S \times Y_P}$	Geometric mean productivity index	(Fernandez, 1992)	(24)
$STI = \frac{(Y_S \times Y_P)}{(\overline{Y_P})^2}$	Stress Tolerance Index	(Fernandez, 1992)	(25)
$MP = \frac{(Y_S + Y_P)}{2}$	Mean productivity index	(Rosielle i Hamblin, 1981)	(26)
$HARM = \frac{2(Y_S)(Y_P)}{(Y_S + Y_P)}$	Harmonic mean productivity	(Kristin i sur., 1997)	(27)
$TOL = Y_P - Y_S$	Stress Tolerance Index	(Rosielle i Hamblin, 1981)	(28)
$SSI = \frac{1 - (\frac{Y_S}{Y_P})}{SI}$; $SI = 1 - (\frac{Y_S}{Y_P})$	Stress Susceptibility Index	(Fischer i Maurer, 1978)	(29)
$RDY = 100 - \left(\frac{Y_S}{Y_P} \times 100\right)$	Relative Decrease in Yield	(Farshadfar i sur., 2013)	(30)

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Procjena i modeliranje tolerantnosti na klimatske stresove kod genotipova kukuruza u seriji ciljanih okolina primarno se zasniva na dostupnosti i preciznosti izmjerenih vrijednosti meteoroloških varijabli koje određuju karakter pojedinih okolina. Pojednostavljeno, vremenske prilike određene okoline, pored značajki tla, ključni su element interakcije genotipa i okoline. Stoga, za procjenu i modeliranje tolerantnosti hibrida kukuruza na okolinske stresove, kao što su suša i toplinski stres, potrebno je prikupiti precizne podatke za ključne meteorološke elemente koje određuju rast i razvoj – temperaturu zraka, količinu i dinamiku oborine te vlažnost zraka. Iz ovih meteoroloških elemenata moguće je izračunati parametre suše i toplinskog stresa koji su funkcionalno povezani sa rastom i razvojem biljke kukuruza te većom ili manjom tolerantnošću na ove stresove kod pojedinih genotipova.

Za potrebe ovog istraživanja, tijekom dvije uzastopne godine, ispitivano je 32 hibrida kukuruza iz četiri skupine zriobe (FAO300 – FAO600) na šest različitih lokacija u Hrvatskoj. Tijekom vegetacije, na svakoj lokaciji istovjetnom metodikom mjereno je više agronomskih svojstava za svaki pojedini hibrid (genotip). Usporedno, unutar svake pokusne lokacije (POK) mjereni su i gore navedeni meteorološki elementi potrebni za izračun parametara okolinskih stresova. Osim podataka o vremenskim prilikama na pojedinim lokacijama i godinama istraživanja, prikupljenim automatskim vremenskim stanicama unutar POK-a, za potrebe ovog istraživanja, pribavljeni su i usporedni podaci s najbližih profesionalnih vremenskih postaja DHMZ-a te sa platforme A4C (Tablica 3.2.).

U narednim poglavljima analizira se međusobna sličnost podataka iz različitih izvora promatranih meteoroloških elemenata za pojedine lokacije u istom vremenu, a sa svrhom procjene upotrebljivosti i pouzdanosti korištenja javno dostupnih podataka za procjenu intenziteta i dinamike suše i toplinskog stresa putem određenih indeksa.

4.1. Analiza i validacija agrometeoroloških elemenata

4.1.1. Prikaz agrometeoroloških prilika po lokacijama poljskih pokusa

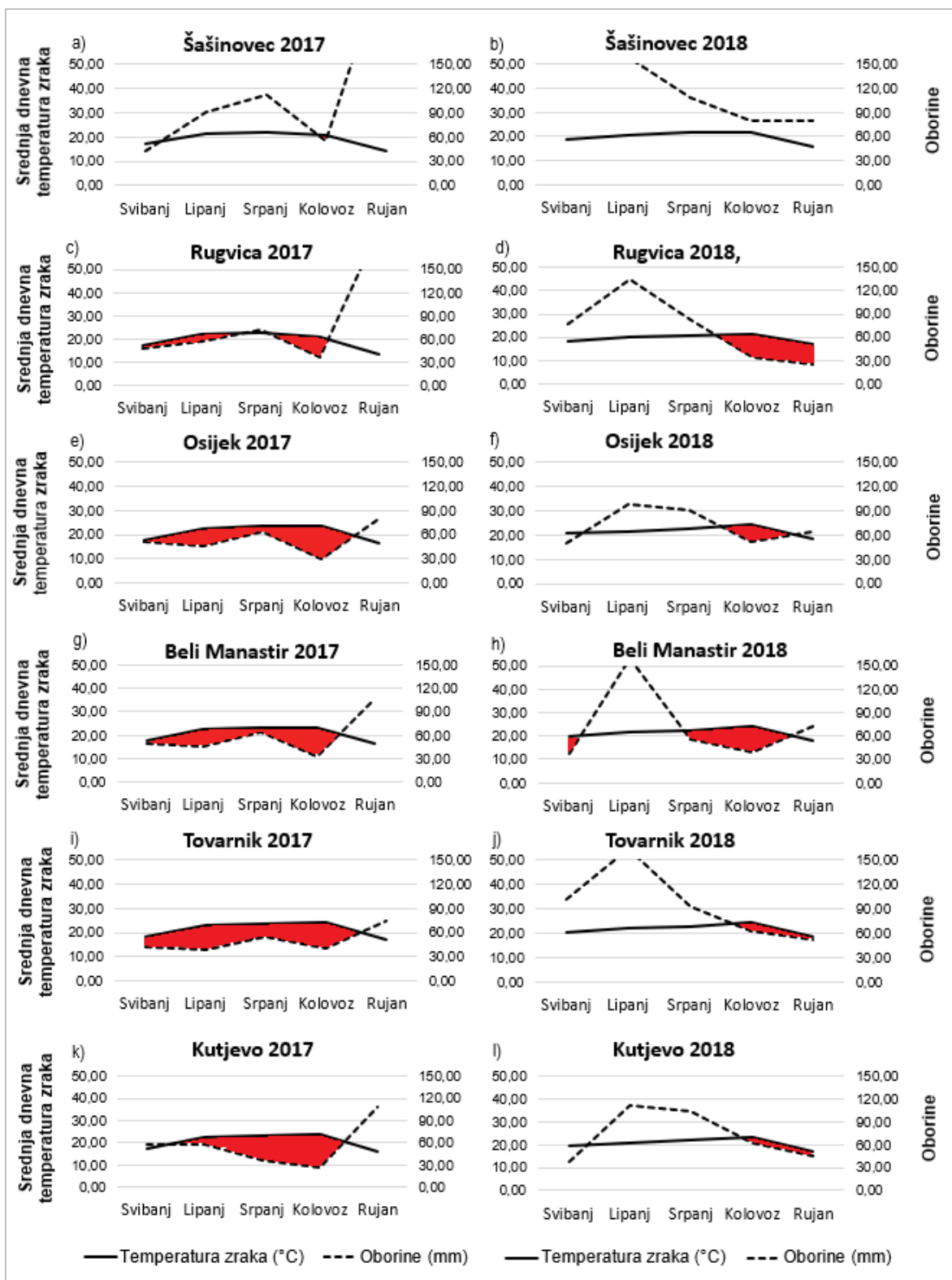
Prosječna vrijednost mjesečne temperature zraka tijekom vegetacijskog perioda od svibnja do rujna 2017. godine iznosila je 20,29°C, a tijekom 2018. bila je 20,61°C. Najmanja prosječna vrijednost temperature zraka između 12 promatranih okolina (6 lokacija tijekom 2017. i 2018. godine) zabilježena je za okolinu Šašinovec 2017 (19,18°C), a najveća za okolinu Tovarnik 2018 (21,56°C; Prilog 1.).

Prosječna vrijednost relativne vlage zraka za isto vegetacijsko razdoblje (svibanj – rujna) tijekom 2017. godine bila je 66,63%, dok je u 2018. godini prosječna vrijednost relativne

vlage zraka iznosila 70,83%. Najniža vrijednost relativne vlage zraka od 59,29% zabilježena je za okolinu Kutjevo 2017, a najviša od 78,72% za okolinu Šašincev 2018 (Prilog 2.).

Mjerenjem oborine u razdoblju od svibnja – rujna 2017. godine zabilježena je prosječna količina oborine od 350,52 mm po lokaciji, dok je prosječna količina oborine u 2018. godini iznosila 413,84 mm po lokaciji. Najniža suma oborine zabilježena je za okolinu Tovarnik 2017 (251,70 mm), a najviše kiše palo je u okolini Šašincev 2017 u količini od 581,11 mm (Prilog 3.).

Walterovi klimatski dijagrami (Slika 4.1. a – l) prikazuju odnos mjesečnih suma oborine i prosječnih mjesečnih temperatura zraka, indicirajući sušna razdoblja za svaku od 12 promatranih okolina. Jasan deficit oborine vidljiv je tijekom 2017. godine u svim okolinama osim za Šašincev, pri čemu valja napomenuti rekordnu mjesečnu količinu oborine od 280 mm koja je zabilježena tijekom mjeseca rujna (Prilog 3.). Kako je spomenuto u uvodu ovog poglavlja, najmanja količina oborine od 251,70 mm kao i najveća prosječna mjesečna temperatura zraka od 24,30°C zabilježena je za Tovarnik 2017 (Prilog 1.; Prilog 3.). Tijekom 2018. godine vidljiva je znatno povoljnija situacija glede odnosa sume oborine i temperature zraka u odnosu na 2017. godinu. Tijekom svibnja i lipnja 2018. godine zabilježena je značajna količina oborine pri čemu je najmanje oborine zabilježeno za okolinu Beli Manastir 2018 (37,4 mm) tijekom svibnja, dok je najveća količina oborine od 164,40 mm zabilježena za Tovarnik 2018 tijekom lipnja (Prilog 3.). Oborinski deficiti zabilježeni su kasnije u sezoni. Tijekom kolovoza deficit oborine zabilježen je u okolinama Rugvica 2018, Osijek 2018, Tovarnik 2018 i Kutjevo 2018, dok je dulji deficit oborine već od srpnja zabilježen u okolini Beli Manastir 2018. Iz Walterovih klimatskih dijagrama vidljivo je zadržavanje povoljnog odnosa količine oborine i temperature zraka na lokaciji Šašincev tijekom obje godine istraživanja (Šašincev 2017 i Šašincev 2018; Slika 4.1. a – b), dok to nije bio slučaj za ostale promatrane okoline. Također prema ovim dijagramima značajnija razina suše i toplinskog stresa zabilježena je u pet od šest promatranih okolina tijekom 2017. godine (Slika 4.1. grafovi c, e, g, i, k), dok su povoljni proizvodni uvjeti za kukuruz zabilježeni u svim okolinama tijekom 2018. godine (Slika 4.1. grafovi b, d, f, h, j, l).



Slika 4.1. Walterov klimatski dijagram oborine (crtkana linija) i srednje dnevne temperature zraka (puna linija) sa indikacijom sušnih razdoblja (crveno) u vremenskom razdoblju od svibnja do rujna, za sve lokacije istraživanja tijekom 2017. i 2018. godine (a – l, označavaju kombinaciju lokacije i godine).

4.1.2. Usporedba dnevnih i dekadnih meteoroloških elemenata obzirom na izvor prikupljanja

U ovom radu istražuje se preciznost, a time i upotrebljivost, alternativnih meteoroloških podataka koji su dostupni bez plaćanja. Konkretno, u ovom poglavlju ispituje se razina odstupanja istovjetnih podataka obzirom na izvor prikupljanja (POK, DHMZ i A4C) i njihova pouzdanost obzirom na vremenski interval (dan, dekada). Validacija vrijednosti srednje dnevne temperature i relativne vlage zraka te sume oborine provedena je usporedbom podataka mjerenih direktno u POK-u, sa onima prikupljenim s najbližih DHMZ postaja i interpoliranih podataka prikupljenih s platforme A4C (vidi Tablica 3.2.). Podudaranje istovjetnih meteoroloških elemenata (temperature i relativne vlage zraka) iz tri izvora podataka za istu lokaciju istraženo je pomoću Pearsonovog koeficijenta korelacije (r) i dijagrama rasipanja.

Temperatura zraka

Usporedbe prosječnih vrijednosti srednjih dnevnih temperatura zraka između POK i DHMZ te POK i A4C izvora podataka u 12 promatranih okolina prikazane su dijagramima rasipanja u prilogu ovog rada (Prilog 4. i Prilog 5.). Alternativni izvori podataka (DHMZ i A4C) pokazali su visoku sličnost sa podacima prikupljenim izravno u pokusima (POK). Vrijednosti koeficijenta korelacije bile su statistički značajne u svih 12 promatranih okolina. Prilikom usporedbe POK i DHMZ izvora podataka korelacije su pokazale vrlo dobru do izvrsnu povezanost ($r =$ od 0,90 – 0,99; Prilog 4.). Vrijednosti korelacije prilikom usporedbe POK i A4C slično kao prilikom usporedbe POK i DHMZ izvora podataka pokazale su vrlo dobru do izvrsnu povezanost iako su u ovom slučaju bile nešto slabije ($r =$ 0,86 – 0,97; Prilog 5.). Više vrijednosti korelacije zabilježene su tijekom 2017. godine u odnosu na 2018. godinu za sve promatrane lokacije i za oba alternativna izvora podataka. Najmanja vrijednost koeficijenta korelacije zabilježena je za okolinu Rugvica 2018 i iznosila je 0,86 prilikom usporedbe POK i A4C izvora podataka (Prilog 5.), dok je izvrsna povezanost podataka ($r =$ 0,99) zabilježena između POK i DHMZ izvora podataka kod četiri istočne okoline (Osijek 2017, Beli Manastir 2017, Beli Manastir 2018 i Tovarnik 2017; Prilog 4.), pri čemu treba primijetiti da su u nekim slučajevima udaljenosti mjernih postaja veće od 30 km (Tablica 3.2.).

Pearsonov koeficijent korelacije između prosječnih dekadnih vrijednosti srednje dnevne temperature zraka pokazao je vrlo dobru do izvrsnu povezanost podataka. Vrijednosti korelacije bile su statistički značajne na svim lokacijama prilikom usporedbe oba alternativna izvora podataka (DHMZ i A4C) s POK podacima prikupljenim u polju prilikom provedbe pokusa (Tablica 4.1.). Vrijednosti koeficijenta korelacije prilikom usporedbe POK

i DHMZ izvora podataka bile su u rasponu od 0,92 za Rugvicu 2018, pa do 1,00 u pet istočnih okolina (Osijek 2017, Beli Manastir 2017, Tovarnik 2017, Osijek 2018 i Beli Manastir 2018). Koeficijent korelacije kod usporedbe POK i A4C izvora podataka dekadnih vrijednosti srednje dnevne temperature zraka pokazao je neznatno slabiju povezanost za razliku od POK i DHMZ usporedbe, no niti na jednoj okolini vrijednost korelacije nije bila manja od 0,91. Usporede li se prosječne dekadne vrijednosti (Tablica 4.1.) s analognim dnevnim vrijednostima temperature zraka (Prilog 4. i Prilog 5.) vidljiva je jača povezanost podataka iskazanih u dekadnom vremenskom razdoblju neovisno od izvora podataka.

Relativna vlaga zraka

Vrijednosti Pearsonovog koeficijenta korelacije prilikom usporedbe dnevnih vrijednosti relativne vlage zraka bile su statistički značajne za sve promatrane okoline. Koeficijenti korelacije pokazali su umjerenu do vrlo dobru povezanost podataka kako prilikom usporedbe POK i DHMZ izvora podataka (Prilog 6.), tako i kod usporedbe POK i A4C izvora podataka (Prilog 7.). Vrijednosti koeficijenta korelacije između POK i DHMZ izvora pokazivale su umjerenu povezanost podataka za okoline Šašincevec 2018 ($r = 0,77$) i Rugvica 2018 ($r = 0,67$), što je ujedno i najmanja zabilježena vrijednost. Povezanost podataka na ostalim okolinama bila je vrlo dobra do izvrsna te je u ovom slučaju najviša vrijednost koeficijenta korelacije zabilježena za okolinu Rugvica 2017, a iznosila je $r = 0,91$. Vrijednosti korelacija relativne vlage zraka bile su nešto slabije tijekom 2017. godine na svim lokacijama provedbe pokusa osim na lokaciji Beli Manastir gdje je bila obrnuta situacija (Prilog 6.). Vrijednosti koeficijenta korelacije prilikom usporedbe POK i A4C izvora bile su u rasponu od $r = 0,74$ za okolinu Beli Manastir 2017, pa do $r = 0,94$ za okolinu Osijek 2018 (Prilog 7.) što upućuje na vrlo dobru povezanost podataka između ova dva izvora kao i konzistentnost s DHMZ izvorom.

Koeficijenti korelacije dekadnih vrijednosti relativne vlage zraka općenito su pokazale statističku značajnost na razini $p \leq 0,01$ prilikom usporedbe oba izvora podataka s POK izvorom, osim na lokaciji Rugvica tijekom 2018. godine ($r = 0,42$) gdje je uočena slaba povezanost podataka (Tablica 4.1.). Vrijednosti korelacija između POK i DHMZ izvora podataka ukazuje na jaču povezanost dekadnih podataka tijekom 2017. godine ($r = 0,71 - 0,97$), u odnosu na 2018. godinu ($r = 0,42 - 0,94$). Usporedba dekadnih vrijednosti relativne vlage zraka proizašlih iz POK i A4C izvora pokazuje vrlo dobru do izvrsnu povezanost podataka u 10 od 12 promatranih okolina. Koeficijent korelacije u ovom slučaju bio je u rasponu od $r = 0,82$ za okolinu Beli Manastir 2017, pa do $r = 0,96$ za okolinu Kutjevo 2017. Rugvica 2018 i Osijek 2018 pokazali su dobru povezanost podataka, no u ovom slučaju koeficijent korelacije iznosio je $r = 0,65$ i $r = 0,73$ (Tablica 4.1.). Usporede li se prosječne

dekadne vrijednosti (Tablica 4.1.) s analognim dnevnim vrijednostima (Prilog 6. i Prilog 7.) relativne vlage zraka razvidna je konzistentnost pouzdanosti podataka bez obzira na izvor ili vremenski interval korištenja podataka.

Oborine

Usporedbe prosječne vrijednosti za dnevnu količinu oborine između pokusnih lokacija i alternativnih izvora (DHMZ i A4C) podataka u 12 promatranih okolina prikazane su dijagramima rasipanja u prilogu (Prilog 8. i Prilog 9.). Vrijednosti Pearsonovog koeficijenta korelacije između POK i DHMZ izvora podataka bile su statistički značajne na razini $p \leq 0,01$ za sve promatrane okoline (Prilog 8.). Prilikom usporedbe POK i DHMZ izvora podataka korelacije su pokazale umjerenu do izvrsnu povezanost ($r =$ od 0,59 – 1,00; $p \leq 0,01$) tijekom obje godine istraživanja. U 2017. godini zabilježene su više vrijednosti korelacije ($r =$ od 0,74 – 1,00; $p \leq 0,01$) u odnosu na 2018. godinu ($r =$ od 0,59 – 0,84; $p \leq 0,01$) za sve promatrane lokacije (Prilog 8.). Korelacije dnevnih vrijednosti količine oborine proizašlih iz POK i A4C izvora podataka bile su vrlo slabe, te su pokazale statističku značajnost u šest od dvanaest promatranih okolina (Prilog 9.). Usporedba POK i A4C izvora podataka pokazala je potpunu nepovezanost podataka u okolinama Osijek 2017, Beli Manastir 2017, Tovarnik 2017, Kutjevo 2017, Šašincevec 2018 i Osijek 2018 ($r =$ od 0,01 – 0,14). Slaba no statistički značajna povezanost podataka zabilježena je za okoline Šašincevec 2017 ($r = 0,28$; $p \leq 0,01$), Rugvica 2017 ($r = 0,20$; $p \leq 0,05$), Rugvica 2018 ($r = 0,30$; $p \leq 0,01$), Beli Manastir 2018 ($r = 0,36$; $p \leq 0,01$), Tovarnik 2018 ($r = 0,16$; $p \leq 0,05$) i Kutjevo 2018 ($r = 0,25$; $p \leq 0,01$; Prilog 9.).

Koeficijenti korelacije između prosječnih dekadnih vrijednosti za količinu oborine pokazali su vrlo dobru povezanost podataka. DHMZ izvor je općenito za razliku od A4C izvora pokazao jače korelacije tijekom obje godine istraživanja (Tablica 4.1.). Vrijednosti koeficijenta korelacije prilikom usporedbe POK i DHMZ izvora podataka bili su statistički značajni na razini $p \leq 0,01$ u svim okolinama ($r =$ od 0,65 – 1,00) osim u okolini Osijek 2018 ($r = 0,62$; $p \leq 0,05$), gdje je zabilježena slabija povezanost podataka. Najviše vrijednosti korelacije zabilježene su u okolinama Osijek 2017 ($r = 1,00$), Kutjevo 2017 ($r = 0,99$) i Šašincevec 2017 ($r = 0,98$; Tablica 4.1.). Usporedbe dekadnih vrijednosti proizašlih iz POK i A4C izvora također pokazuju vrlo dobru povezanost podataka u svim okolinama ($r = 0,51$ – 0,99; $p \leq 0,05$), s iznimkom okoline Kutjevo 2017 gdje su podaci nešto slabije povezani ($r = 0,35$; Tablica 4.1.) Najviše vrijednosti korelacije zabilježene su u okolinama Rugvica 2017 ($r = 0,99$), Šašincevec 2017 ($r = 0,94$) i Tovarnik 2018 ($r = 0,76$; Tablica 4.1.).

Tablica 4.1. Pearsonovi koeficijenti korelacije između podataka prikupljenih na pokusnoj lokaciji i alternativnih izvora za dekadne vrijednosti srednje dnevne temperature i relativne vlage zraka te količine oborine za 12 okolina.

POK	Temperatura zraka		Relativna vlaga zraka		Oborine	
	DHMZ	A4C	DHMZ	A4C	DHMZ	A4C
Šaštinovec 2017	0,97 **	0,98 **	0,91**	0,82**	0,98**	0,94**
Rugvica 2017	0,98 **	0,95 **	0,97**	0,93**	0,96**	0,99**
Osijek 2017	1,00 **	0,99 **	0,88**	0,84**	1,00**	0,67**
Beli Manastir 2017	1,00 **	0,99 **	0,71**	0,82**	0,94**	0,71**
Tovarnik 2017	1,00 **	0,99 **	0,87**	0,85**	0,66**	0,55*
Kutjevo 2017	0,99 **	0,99 **	0,89**	0,96**	0,99**	0,35
Šaštinovec 2018	0,96 **	0,97 **	0,82**	0,87**	0,65**	0,51*
Rugvica 2018	0,92 **	0,91 **	0,42	0,65**	0,83**	0,66**
Osijek 2018	1,00 **	0,99 **	0,90**	0,73**	0,62*	0,72**
Beli Manastir 2018	1,00 **	0,99 **	0,75**	0,87**	0,85**	0,73**
Tovarnik 2018	0,99 **	0,98 **	0,94**	0,93**	0,73**	0,76**
Kutjevo 2018	0,99 **	0,99 **	0,82**	0,84**	0,75**	0,69**

** koeficijent korelacije (r) značajan na razini $p \leq 0,01$

* koeficijent korelacije (r) značajan na razini $p \leq 0,05$

4.2. Tipizacija okoline indeksima suše i toplinskog stresa

4.2.1. Usporedba vrijednosti indeksa suše i toplinskog stresa obzirom na izvor prikupljanja meteoroloških podataka

Usporedba indeksa suše i toplinskog stresa izračunatih iz ranije navedena tri izvora podataka provodi se u cilju pronalaska veza između ekstremnih klimatskih pojava i agronomskih svojstava genotipova kukuruza promatranih ovim istraživanjem. Indeksi suše i toplinskog stresa (scPDSI, VPD i SDD) računati su iz dekadnih vrijednosti prethodno prikupljenih i validiranih meteoroloških elemenata temperature i relativne vlage zraka te

količine oborine. Analizom korelacija za svaku okolinu provedena je validacija (usporedivost) vrijednosti indeksa ovisno o izvoru podataka.

scPDSI

Usporedba vrijednosti scPDSI indeksa temeljem koeficijenata korelacije pokazala je jaku funkcionalnu povezanost podataka proizašlih iz POK i DHMZ izvora tijekom obje godine istraživanja (Tablica 4.2.). Validacija scPDSI indeksa izračunatog iz A4C izvora i podataka prikupljenih izravno u poljskom pokusu ukazuju na nešto slabiju funkcionalnu povezanost od vrijednosti proizašlih iz DHMZ-ove baze. Vrijednosti korelacije proizašle iz POK i A4C izvora podataka pokazale su vrlo dobru povezanost vrijednosti scPDSI indeksa u svim okolinama ($r = 0,59 - 0,97$) osim u okolini Rugvica 2018 ($r = 0,10$) i Kutjevo 2018 ($r = 0,44$) gdje je razvidna slabija povezanost vrijednosti ovog indeksa suše (Tablica 4.2.).

VPD

Koeficijenti korelacije za vrijednosti VPD indeksa tijekom 2017. i 2018. godine pokazali su visoku povezanost kada su izračunati iz DHMZ ili A4C izvora podataka sa vrijednostima indeksa izračunatih iz podataka prikupljenih izravno u poljskom pokusu. Vrijednosti korelacije pokazale su izvrsnu povezanost podataka napose tijekom 2017. godine te su iznosile od $r = 0,84 - 0,98$, dok su tijekom 2018. godine bile u rasponu od $r = 0,69 - 0,95$ (Tablica 4.2.). Vrijednosti VPD indeksa temelje se na izmjerenim vrijednostima temperature i relativne vlage zraka za koje je već ranije utvrđena značajna pouzdanost bez obzira na izvor, stoga se i računanje VPD indeksa također smatra opravdano bez obzira na izbor podataka.

SDD

Tablica 4.2 prikazuje i usporedbe vrijednosti SDD indeksa izračunate iz dekadnih vrijednosti temperature zraka. Sukladno ranijim rezultatima vrlo dobre povezanosti srednje dnevne temperature zraka (vidi poglavlje 4.1.2.) validacija SDD vrijednosti pokazala je također izvrsnu povezanost bez obzira na izvor podataka korištenih u računanju ovog indeksa. Vrijednosti Pearsonovog koeficijenta korelacije bile su u rasponu od $r = 0,99 - 1,00$ prilikom usporedbe obje serije podataka (POK – DHMZ i POK – A4C), te potvrdile opravdanost korištenja podataka o temperaturi zraka iz alternativnih izvora (Tablica 4.2.).

Tablica 4.2. Pearsonovi koeficijenti korelacije između vrijednosti pojedinih indeksa suše (scPDSI, VPD i SDD) kada su izračunati iz podataka (dekadnih vrijednosti) prikupljenih na pokusnoj lokaciji i iz dva alternativna izvora (DHMZ i A4C) za 12 promatranih okolina.

POK	scPDSI		VPD		SDD	
	DHMZ	A4C	DHMZ	A4C	DHMZ	A4C
Šašिनovec 2017	1,00**	0,64**	0,90**	0,84**	0,99**	0,99**
Rugvica 2017	1,00**	0,83**	0,97**	0,93**	0,99**	0,99**
Osijek 2017	1,00**	0,86**	0,96**	0,93**	1,00**	1,00**
Beli Manastir 2017	1,00**	0,59*	0,92**	0,95**	0,99**	1,00**
Tovarnik 2017	1,00**	0,97**	0,96**	0,94**	0,99**	0,99**
Kutjevo 2017	1,00**	0,92**	0,96**	0,98**	0,99**	0,99**
Šašिनovec 2018	1,00**	0,73**	0,84**	0,89**	0,99**	0,99**
Rugvica 2018	1,00**	0,10	0,69**	0,70**	0,99**	0,99**
Osijek 2018	1,00**	0,71**	0,90**	0,75**	1,00**	1,00**
Beli Manastir 2018	1,00**	0,73**	0,90**	0,95**	0,99**	1,00**
Tovarnik 2018	0,91**	0,64**	0,92**	0,89**	0,99**	0,99**
Kutjevo 2018	0,98**	0,44	0,82**	0,94**	0,99**	0,99**

** koeficijent korelacije (r) značajan na razini $p \leq 0,01$

* koeficijent korelacije (r) značajan na razini $p \leq 0,05$

4.2.2. Korelacije između različitih indeksa suše

Validacijom sličnosti tri različita indeksa, analizira se njihova sposobnost identifikacije sušnih razdoblja i intenziteta sušnog ili toplinskog stresa u pokusnim okolinama. U svrhu ove analize vrijednosti indeksa suše i toplinskog stresa izračunate su iz dekadnih vrijednosti meteoroloških elemenata mjerenih unutar pokusa (POK).

Prema rezultatima analize može se primijetiti značajna povezanost vrijednosti VPD i SDD indeksa kroz sve okoline, iako jačina korelacija dosta varira između okolina (Tablica 4.3.). Međutim, analiza korelacije ova dva indeksa sa scPDSI ukazuje na veliko variranje u vrijednostima koeficijenta korelacije između pojedinih okolina (Tablica 4.3.). Prilikom usporedbe scPDSI i VPD indeksa zabilježena je vrlo dobra povezanost ova dva indeksa u

vidu negativnih vrijednosti koeficijenta korelacije za okoline Šašincev 2017 ($r = - 0,82$), Rugvica 2017 ($r = - 0,90$) i Beli Manastir 2017 ($r = - 0,92$), dok za ostale okoline nisu zabilježene statistički značajne vrijednosti Pearsonovog koeficijenta korelacije (Tablica 4.3.). Koeficijent korelacije između scPDSI i SDD indeksa pokazao je vrlo dobru povezanost vrijednosti ova dva indeksa u vidu negativnih vrijednosti za okoline Rugvica 2017 ($r = - 0,83$) i Beli Manastir 2017 ($r = - 0,91$), dok u ostalim okolinama nisu zabilježene statistički značajne vrijednosti Pearsonovog koeficijenta korelacije kao i prilikom usporedbe scPDSI i VPD indeksa (Tablica 4.3.). S druge strane koeficijenti korelacije između VPD i SDD indeksa pokazali su statističku značajnost u svim okolinama. Ova povezanost još je jača za sve okoline tijekom 2017. godine. Ostalih šest okolina tijekom 2018. godine također je pokazalo dobru povezanost ova dva indeksa uz nešto slabije vrijednosti koeficijenta korelacije ($r = 0,58 - 0,87$), pri čemu treba istaknuti vrlo dobru povezanost u okolini Kutjevo 2018 ($r = 0,92$; Tablica 4.3.).

Tablica 4.3. Pearsonovi koeficijenti korelacije između scPDSI, VPD i SDD indeksa temeljem dekadnih vrijednosti POK izvora podataka za 12 promatranih okolina.

POK	scPDSI – VPD	scPDSI – SDD	VPD – SDD
Šašincev 2017	- 0,82**	- 0,51	0,75**
Rugvica 2017	- 0,90**	- 0,83**	0,93**
Osijek 2017	- 0,41	- 0,51	0,94**
Beli Manastir 2017	- 0,92**	- 0,91**	0,95**
Tovarnik 2017	- 0,40	- 0,50	0,93**
Kutjevo 2017	- 0,40	- 0,46	0,97**
Šašincev 2018	0,10	- 0,19	0,58*
Rugvica 2018	0,24	0,06	0,72**
Osijek 2018	- 0,21	0,21	0,61*
Beli Manastir 2018	- 0,28	- 0,004	0,87**
Tovarnik 2018	- 0,24	0,28	0,63*
Kutjevo 2018	0,26	0,30	0,92**

** koeficijent korelacije (r) značajan na razini $p \leq 0,01$

* koeficijent korelacije (r) značajan na razini $p \leq 0,05$

Heterogenost rezultata između okolina može biti posljedica nedovoljne količine podataka za međusobnu usporedbu, ali i suštinske različitosti pojedinih indeksa, tj. da pojedini indeksi mjere okolinski stres na različite načine i time međusobno i nisu usporedivi. Stoga će se u nastavku u analizi tolerantnosti genotipova kukuruza na sušu koristiti sva tri indeksa.

4.2.3. Prikaz karakterizacije okolina prema indeksima suše i toplinskog stresa

U ovom poglavlju prikazuju se prosječne vrijednosti scPDSI, VPD i SDD indeksa, izračunatih isključivo iz POK podataka, a koje su upotrijebljene za procjenu intenziteta i trajanja suše i toplinskog stresa u pojedinim okolinama. Na ovaj način provede će se karakterizacija okolina, a što će u narednim poglavljima poslužiti kao podloga za procjenu variranja pojedinih agronomskih svojstava kroz okoline te u konačnici pomoći u detekciji genotipova kukuruza koji pokazuju tolerantnost na sušu i toplinski stres.

Okoline prema scPDSI indeksu

Prema vrijednostima scPDSI indeksa vidljiva je vrlo jasna podjela okolina (Slika 4.2. graf a) obzirom na razinu suše (gradijent okoline) prikazane Tablica 3.4. U okolini Tovarnik 2017 (- 2,07) temeljem scPDSI indeksa zabilježena je umjerena suša dok je za Kutjevo 2017 (- 1,97) zabilježena srednje jaka suša, što je ove dvije okoline u provedbi ovog istraživanja apostrofiralo kao najsušnije prema scPDSI skali. S druge strane Rugvica 2018 (0,91) je bila okolina s povećanom količinom vlažnosti te se našla na suprotnom djelu scPDSI spektra i prema scPDSI konceptu okarakterizirana je kao lagano vlažna okolina (Slika 4.2. graf a). Srednje jaka suša također je zabilježena i u okolinama Rugvica 2017 (- 1,55), Kutjevo 2018 (- 1,42), Osijek 2017 (- 1,04), dok je početak sušnog perioda prema scPDSI indeksu zamijećen za okolinu Šašincevec 2017 (- 0,88; Slika 4.2. graf a). Normalnim okolinama prema scPDSI indeksu smatraju se redom okoline Beli Manastir 2017 (- 0,49), Šašincevec 2018 (- 0,37), Osijek 2018 (- 0,28), Beli Manastir 2018 (- 0,24) i Tovarnik 2018 (0,43; Slika 4.2. graf a; pogledati Tablica 3.4.).

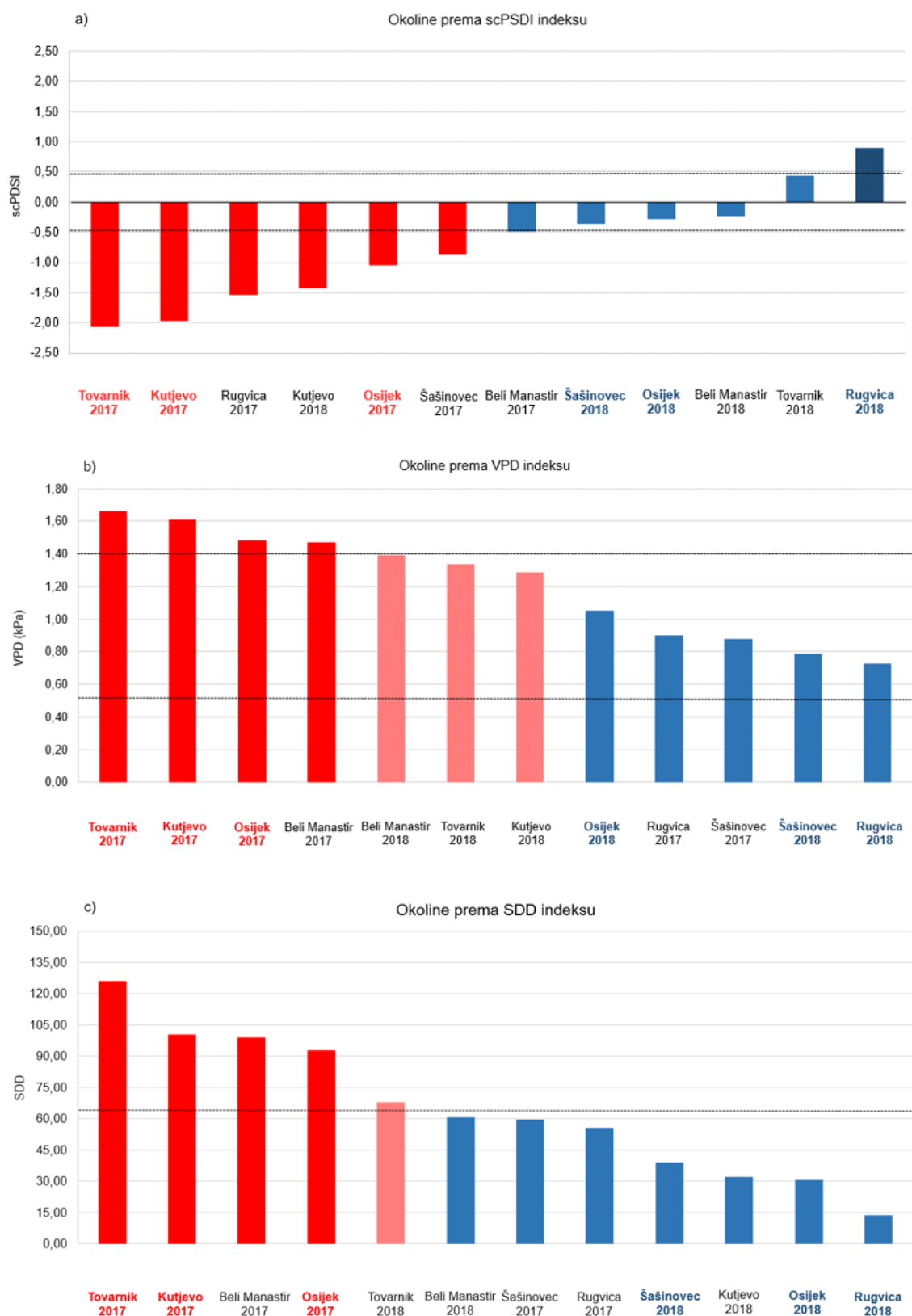
Okoline prema VPD indeksu

Za razliku od scPDSI indeksa koji se prvenstveno bazira na vrijednostima količina oborine, vrijednosti VPD indeksa u funkciji su temperature i relativne vlage zraka. Nadalje, VPD indeks nema jasnu klasifikaciju razine stresa kao što je to slučaj za scPDSI indeks (Tablica 3.4.), međutim, određena proizvodna iskustva klasifikacije suše ipak postoje (Perfect Grower, 2019). Sukladno grafu VPD vrijednosti (Slika 3.3.), temperaturi (Prilog 1.) i

relativnoj vlazi zraka (Prilog 2.) okoline Tovarnik 2017, Kutjevo 2017, Osijek 2017 i Beli Manastir 2017 okarakterizirane su kao najstresnije (VPD = 1,66 – 1,47 kPa; Slika 4.2. graf b). Beli Manastir 2018, Tovarnik 2018 i Kutjevo 2018 su okoline koje su sukladno interpretaciji vrijednosti VPD indeksa također bile zahvaćene sušom, ali nešto manjeg intenziteta (VPD = 1,39 – 1,28 kPa; Slika 4.2. graf b). Okoline na desnom dijelu grafa (Slika 4.2. graf b), Osijek 2018, Rugvica 2017, Šašincevec 2017, Šašincevec 2018 i Rugvica 2018 sukladno vrijednostima VPD indeksa smatraju se okolinama s normalnim evapotranspiracijskim zahtjevima te se u ovom kontekstu mogu smatrati poželjnim (normalnim; VPD = 1,05 – 0,73 kPa) okolinama za proizvodnju kukuruza.

Okoline prema SDD indeksu

SDD indeks temeljem prosječne vrijednosti (64,79) kroz svih 12 okolina detektira četiri stresne, jednu graničnu i sedam normalnih okolina. Baš kao scPDSI i VPD, okoline Tovarnik 2017, Kutjevo 2017 i Osijek 2017 karakterizira kao stresne (Slika 4.2. graf c). Najekstremnijom vrijednošću SDD indeksa istaknula se okolina Tovarnik 2017 (126,25), a slijede ju okoline Kutjevo 2017 (100,30), Beli Manastir 2017 (99,00) i Osijek 2017 (93,00) koje su također znatno nadmašile prosječnu vrijednost indeksa i bile zahvaćene toplinskim stresom (Slika 4.2. graf c). U odnosu na ove četiri okoline, okolina Tovarnik 2018 prema SDD indeksu (67,80) smještena je na sredini spektra te se može smatrati manje rizičnom u pogledu stresa izazvanog toplinom. Prema vrijednostima SDD indeksa okoline Beli Manastir 2018 (60,75), Šašincevec 2017 (59,60) i Rugvica 2017 (55,50) mogu se smatrati okolinama s manjim rizikom spram toplinskog stresa, u odnosu na ranije navedene stresne okoline (Slika 4.2. c). Pogodnim okolinama u pogledu toplinskog stresa procijenjenog SDD indeksom smatraju se okoline Šašincevec 2018 (39,05), Kutjevo 2018 (32,05), Osijek 2018 (30,55) i Rugvica 2018 (13,60; Slika 4.2. c).



Slika 4.2. Poredak 12 promatranih okolina sukladno gradijentu suše i toplinskog stresa, od najstresnijih (crveno) preko graničnih (svjetlo crveno) i normalnih (plavo) okolina, procijenjeno prema „prosječnim vrijednostima indeksa za cijelu vegetaciju“ scPDSI, VPD i SDD (a, b i c; isprekidana linija – granica stresnih i normalnih vrijednosti indeksa).

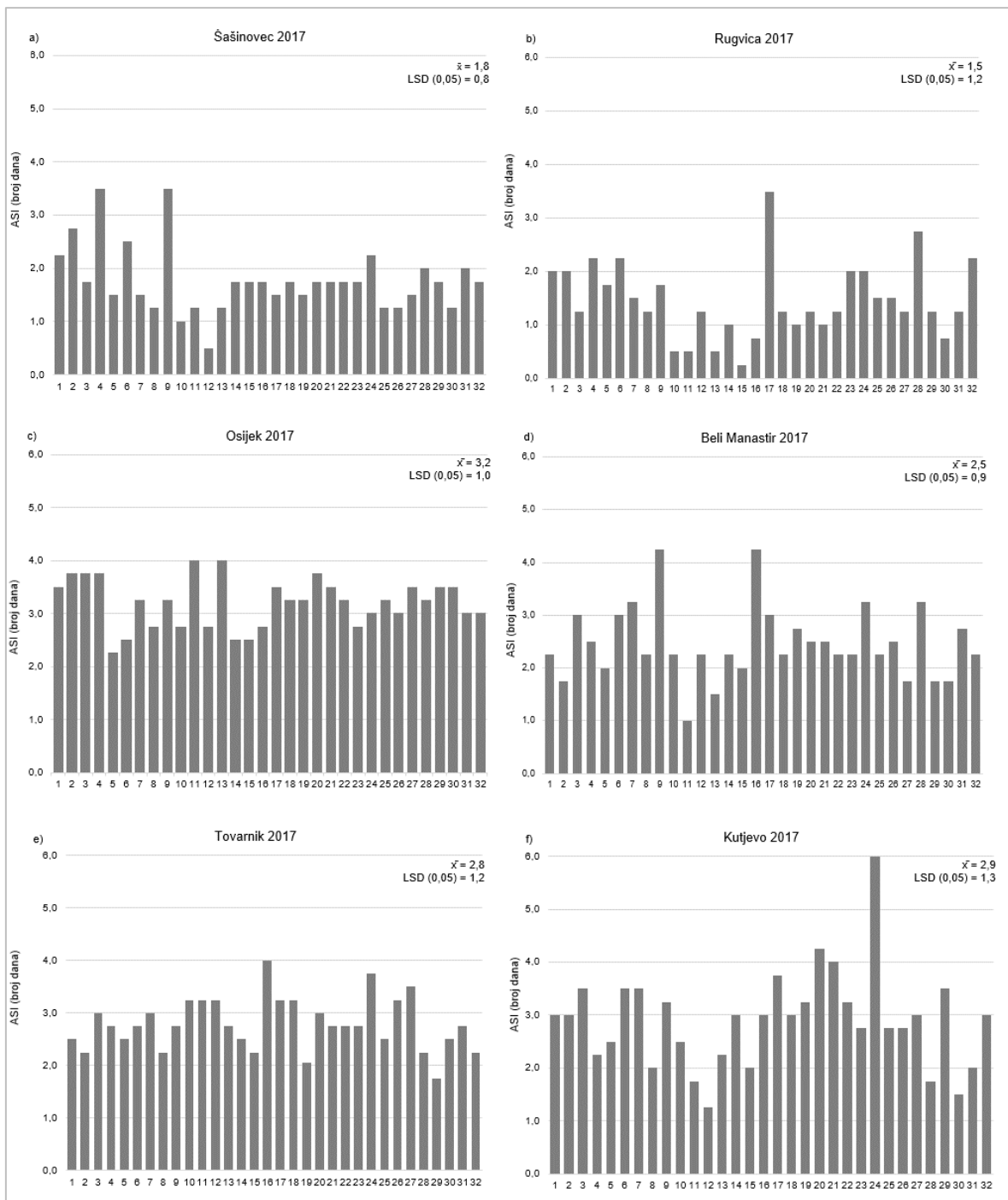
4.3. Analiza agronomskih svojstava i interakcije G×E

4.3.1. Analiza varijance za pojedina svojstva i okoline

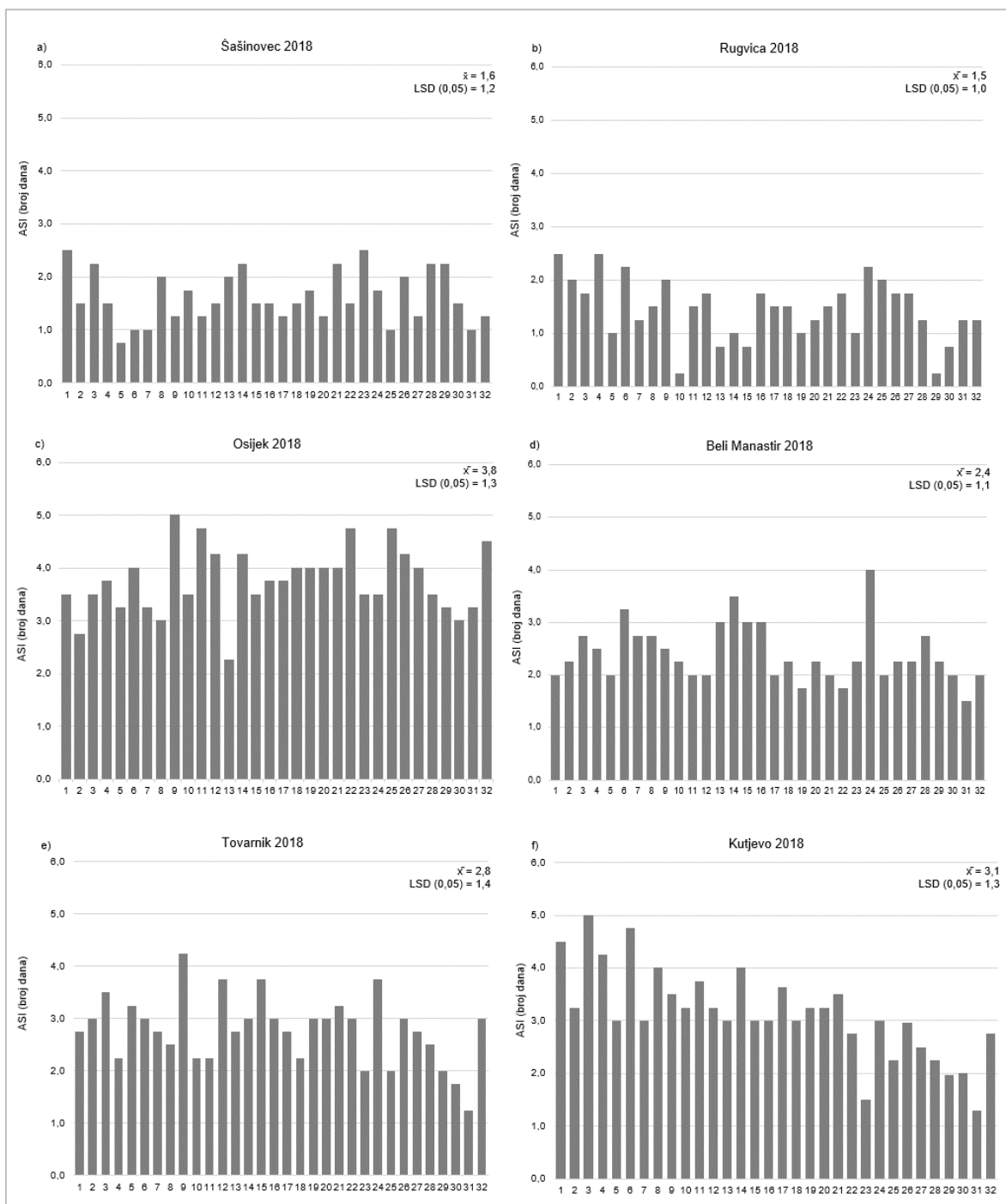
Učinak genotipa za ASI bio je statistički značajan u svim okolinama osim u Tovarniku 2017 i Šašinovcu 2018 (Prilog 10. i Prilog 11.). Na ostalim okolinama, učinak je bio uglavnom vrlo značajan (F-test značajan na razini $p \leq 0,01$), dok su izuzeci bili Osijek 2017 i Tovarnik 2018 gdje je ovaj učinak bio statistički značajan na razini $p \leq 0,05$. Statistički značajni učinci genotipa za vlagu zrna zabilježeni su na svih 12 promatranih okolina (Prilog 12. i Prilog 13.) pri čemu je i statistička značajnost F-testa u svim okolinama bila na razini $p \leq 0,01$. ANOVA za visinu biljke također je ukazala na visoku značajnost učinka genotipa (F-test značajan na razini $p \leq 0,01$) u svim promatranim okolinama (Prilog 14. i Prilog 15.). Učinak genotipa na masu tisuću zrna baš kao i vlagu pokazao je statističku značajnost na razini $p \leq 0,01$ u svih 12 promatranih okolina (Prilog 16. i Prilog 17.). Učinak genotipa bio je statistički značajan na razini $p \leq 0,01$ i za masu zrna na klip u svim promatranim okolinama (Prilog 18. i Prilog 19.). Učinak genotipa na prinos zrna baš kao i prethodna svojstva bio je statistički značajan u svim promatranim okolinama (Prilog 20. i Prilog 21.). Visoko značajan ($p \leq 0,01$) učinak genotipa na prinos zrna tijekom obje promatrane godine zabilježen je u svim okolinama osim za Kutjevo 2018 gdje je ovaj učinak bio statistički značajan na razini $p \leq 0,05$.

Interval između polinacije i svilanja (ASI)

Prosječna vrijednosti ASI-a u 2017. godini bile su od 1,5 dana u okolini Rugvica 2017, pa do 3,2 dana za okolinu Osijek 2017 s prosjekom od 2,4 dana za svih 6 okolina. Tijekom 2018. godine prosječna vrijednosti ASI-a bila je od 1,5 dana u okolini Rugvica 2018 do 3,8 dana za Osijek 2018 s prosjekom od 2,5 dana kroz sve okoline (Prilog 22.). Prosječno najnižu vrijednost u 2017. godini ostvarila su dva genotipa FAO skupine 400, genotip 15 (1,8 dana) i 12 (1,9 dana) te jedan genotip FAO skupine 600, 30 (1,9 dana). Najviše prosječne vrijednosti ostvarili su genotipovi FAO skupina 400 i 500, 24 (3,4 dana), 9 (3,1 dan) i 17 (3,1 dan; Slika 4.3.). Tijekom 2018. godine najniža prosječna vrijednost ASI-a zabilježena je za tri hibrida FAO skupine 600, 31 (1,6 dana), 30 (1,8 dana) i 29 (2,0 dana). Najviše prosječne vrijednosti ovog svojstva tijekom 2018. godine zabilježene su za hibride FAO skupina 300, 400 i 500, 3 (3,1 dan), 9 (3,1 dan) i 24 (3,0 dana; Slika 4.4.). Općenito tijekom obje godine provedbe pokusa najniža vrijednost ASI-a zabilježena je za Rugvicu 2017 (1,5 dana), a najviša vrijednost zabilježena je za okolinu Osijek 2018 (3,8 dana). Istočne lokacije generalno bilježe viši ASI u odnosu na lokacije smještene na zapadu zemlje (Prilog 22.).



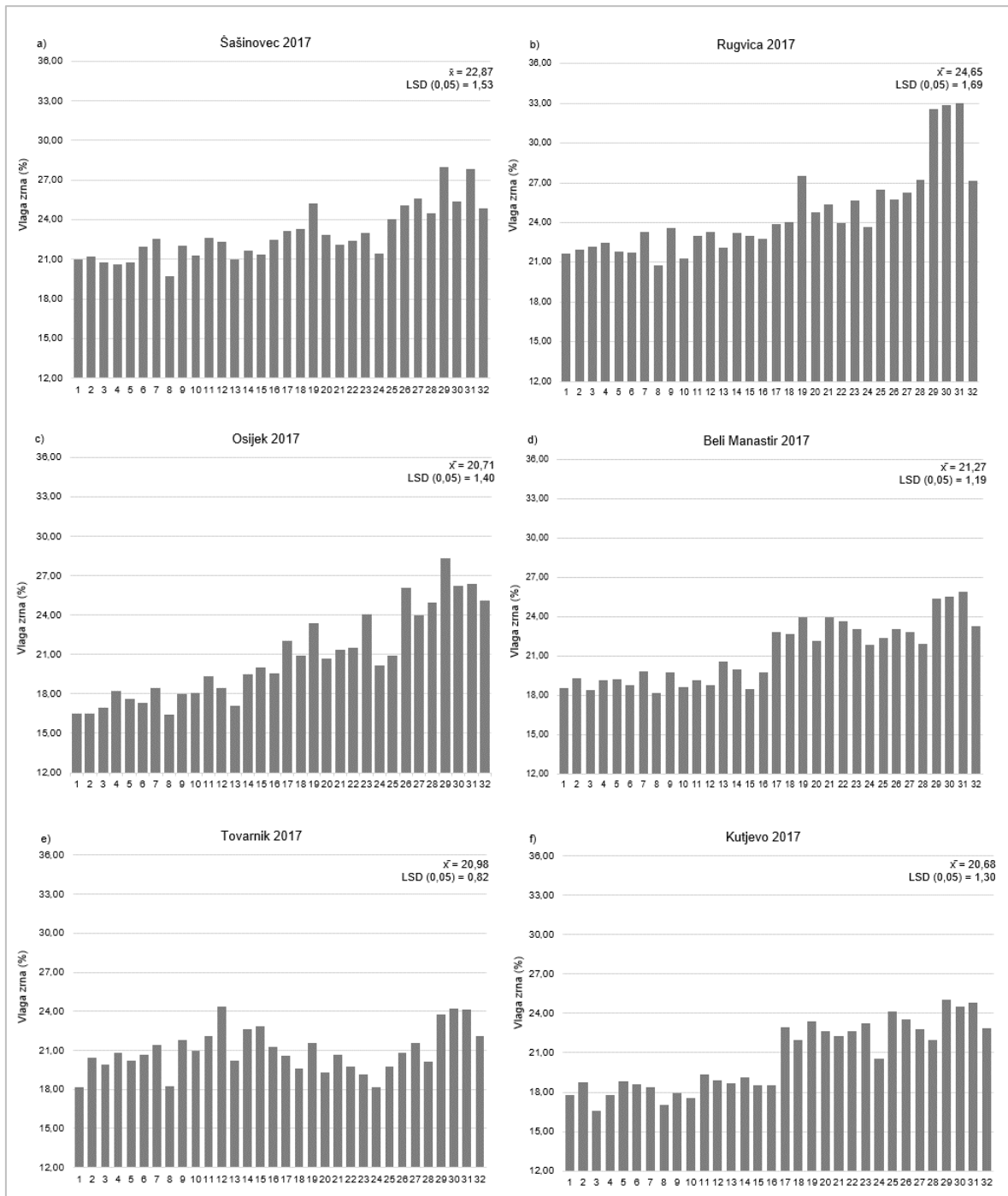
Slika 4.3. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2017. godine za interval između polinacije i svilanja (ASI; broj dana). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.



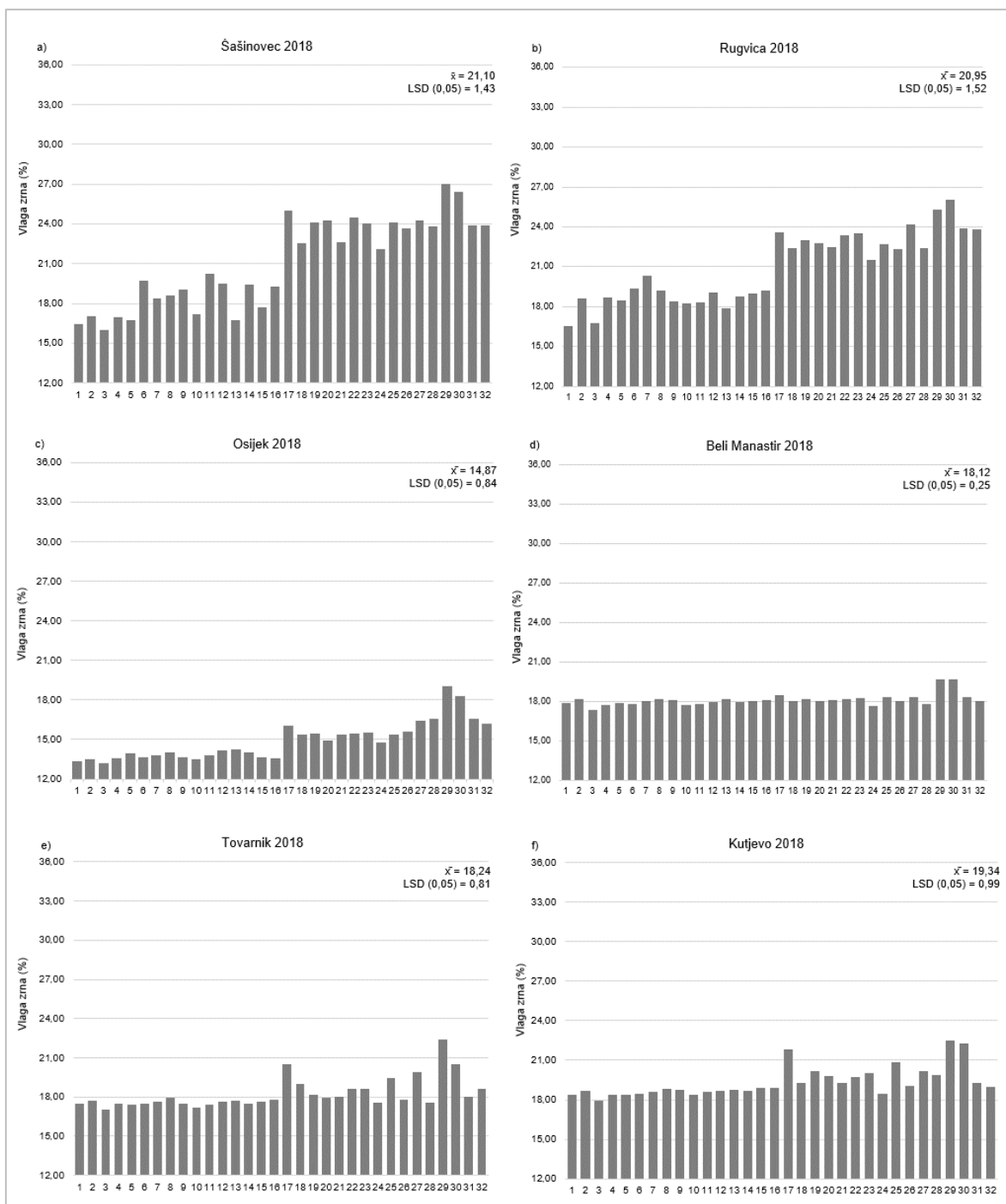
Slika 4.4. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2018. godine za interval između polinacije i svilanja (ASI; broj dana). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.

Vlaga zrna u berbi

Ukupne prosječne vrijednosti za vlagu zrna tijekom 2017. godine bile su u rasponu od 20,68% za okolinu Kutjevo 2017, pa do 24,65% u okolini Rugvica 2017. Pogleda li se vlaga zrna unutar svake okoline pojedinačno vidljiva je njezina gradacija sukladno skupinama zriobe te ranozrelosti genotipova testiranih u istraživanju (Tablica 3.1.). Iznimka je uočena kod okoline Tovarnik 2017 gdje su FAO skupine 300 i 500 ostvarile vrlo sličnu prosječnu vlagu zrna (19,99% i 19,86%), dok je s druge strane vlaga FAO skupina 400 i 600 bila 22,02% odnosno 22,06%. Najmanju vlagu zrna kroz svih 6 okolina u 2017. godini ostvario je genotip 8 s prosječnom vrijednosti 18,39%, osim na lokaciji Tovarnik 2017 gdje je imao neznatno višu vlagu zrna (18,25%) u odnosu na genotipove 24 (18,17%) i 1 (18,20%). Tijekom 2017. godine prosječno niskom vlagom istaknuli su se također genotipovi 1 (18,95%), 3 (19,11%) koji kao i genotip 8 pripadaju FAO skupini 300, te genotip 10 (19,60%) koji pripada FAO skupini 400. Kao najkasniji genotipovi tijekom 2017. godine pokazali su se hibridi FAO skupine 600 (30, 31, 29; Slika 4.5.). Tijekom 2018. godine vlaga zrna bila je u rasponu od 14,87% za okolinu Osijek 2018, pa do 21,10% u okolini Šašincevec 2018. Vlaga zrna ostvarena kroz sve okoline u 2018. godini prati gradaciju ranozrelosti FAO skupina zriobe s iznimkama pojedinih genotipova. Genotip 3 ostvario je prosječno najnižu vlagu zrna (16,38%) kroz svih 6 okolina u 2018. godini, a prate ga genotipovi 1 i 10 s vlagama zrna od 16,68% i 17,04%. Najkasnijim genotipovima u 2018. godini kroz sve okoline pokazali su se genotipovi 29, 30 i 17 s vlagama zrna od 22,63%, 22,21% i 20,90% (Slika 4.6.). Tijekom obje promatrane godine četiri istočne lokacije (Kutjevo, Beli Manastir, Osijek i Tovarnik) bilježe prosječno niže vrijednosti vlage zrna u odnosu na dvije zapadne lokacije (Šašincevec i Rugvica; Prilog 22.).



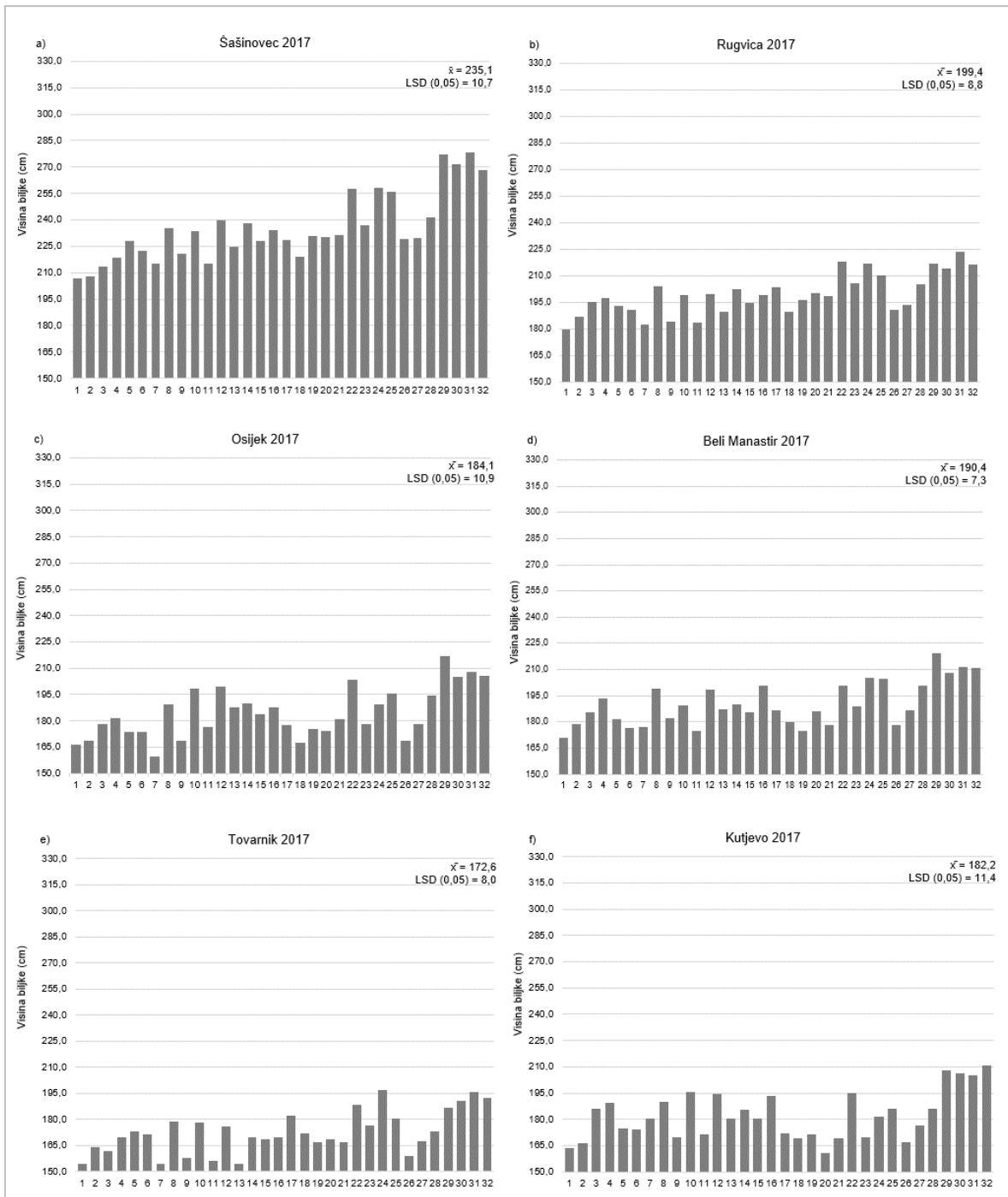
Slika 4.5. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2017. godine za vlagu zrna (%). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.



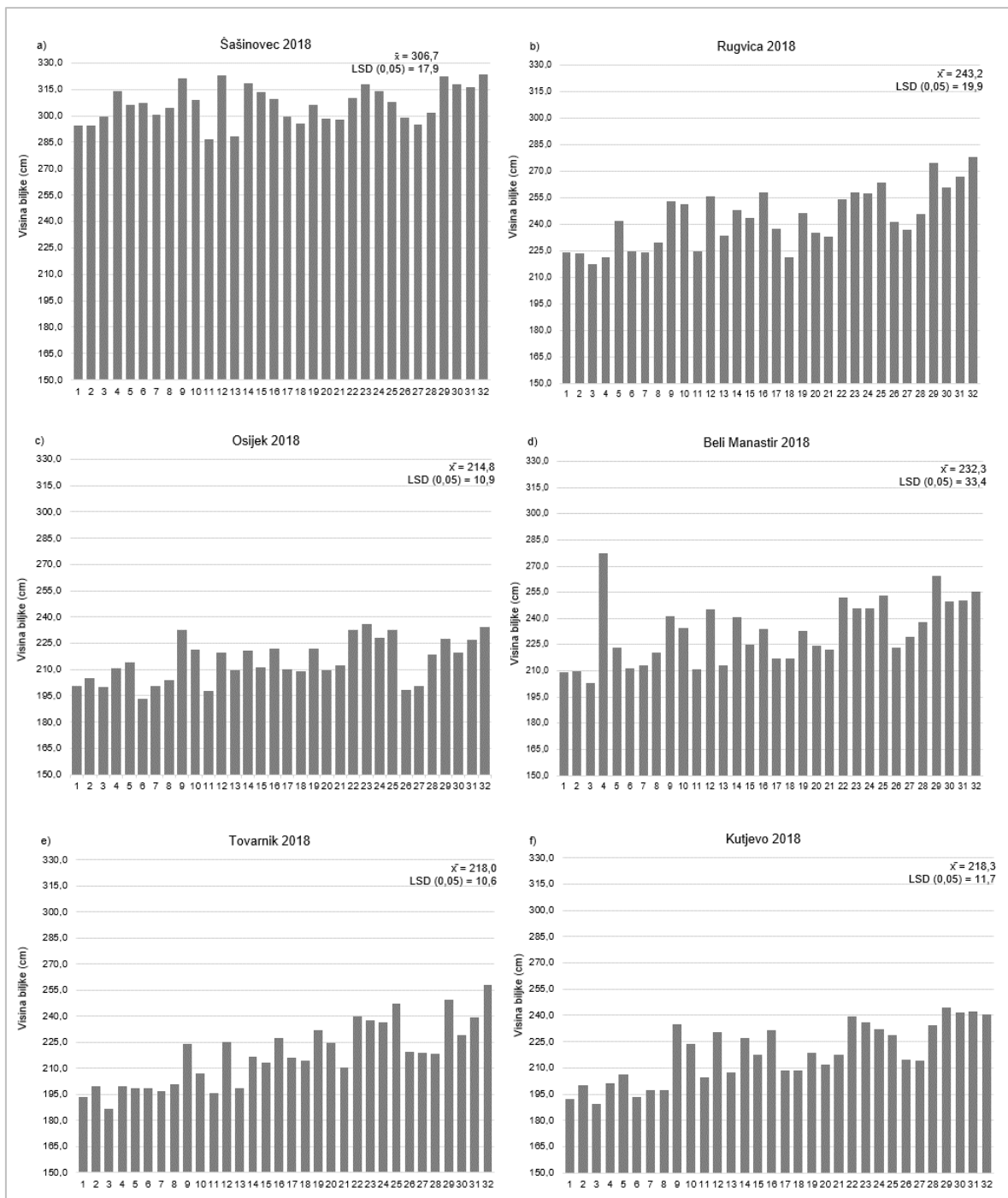
Slika 4.6. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2018. godine za vlagu zrna (%). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.

Visina biljke

Prosječna vrijednost visine biljaka za svih 12 okolina bila je 216,4 cm, dok je u 2017. godini iznosila 193,7 cm, a u 2018. godini 238,9 cm (Prilog 22.). Tijekom 2017. godine najviša prosječna vrijednost ovog svojstva zabilježena je za okolinu Šašincevec 2017 (235,1 cm), a najniža prosječna vrijednost za visinu biljke zabilježena je za Tovarnik 2017 (172,6 cm; Prilog 22.). Prosječno najnižu vrijednost u 2017. godini ostvarili su genotipovi FAO skupine 300, genotip 8 (173,5 cm) te genotipovi 3 i 1 s prosječnom visinom biljke od 178,1 i 178,7 cm. Najviše prosječne vrijednosti visine biljke ostvarili su genotipovi FAO skupine 600, 32 (220,8 cm), 31 (220,2 cm) i 29 (217,3 cm; Slika 4.7.). U 2018. godini najviša prosječna vrijednost za visinu biljke bila je u okolini Šašincevec 2018 (306,7 cm), dok je najniža vrijednost zabilježena za Osijek 2018 (214,8 cm; Prilog 22.). Najnižu prosječnu vrijednost za visinu biljke u 2018. godini ostvarili su dva genotipa iz FAO skupine 300 (3 i 1) s prosječnim visinama 216,0 i 219,1 cm te jedan hibrid FAO skupine 400 (11) s prosječnom visinom od 219,9 cm. Najviše prosječne vrijednosti ostvarili su genotipovi FAO skupine 600, 32 (264,9 cm), 29 (263,8 cm) i 31 (256,9 cm; Slika 4.8.). Tijekom obje promatrane godine istočne lokacije bilježe niže vrijednosti za visinu biljke (od 172,6 – 232,3 cm) u odnosu na zapadne lokacije (od 199,4 – 306,7 cm; Prilog 22.).



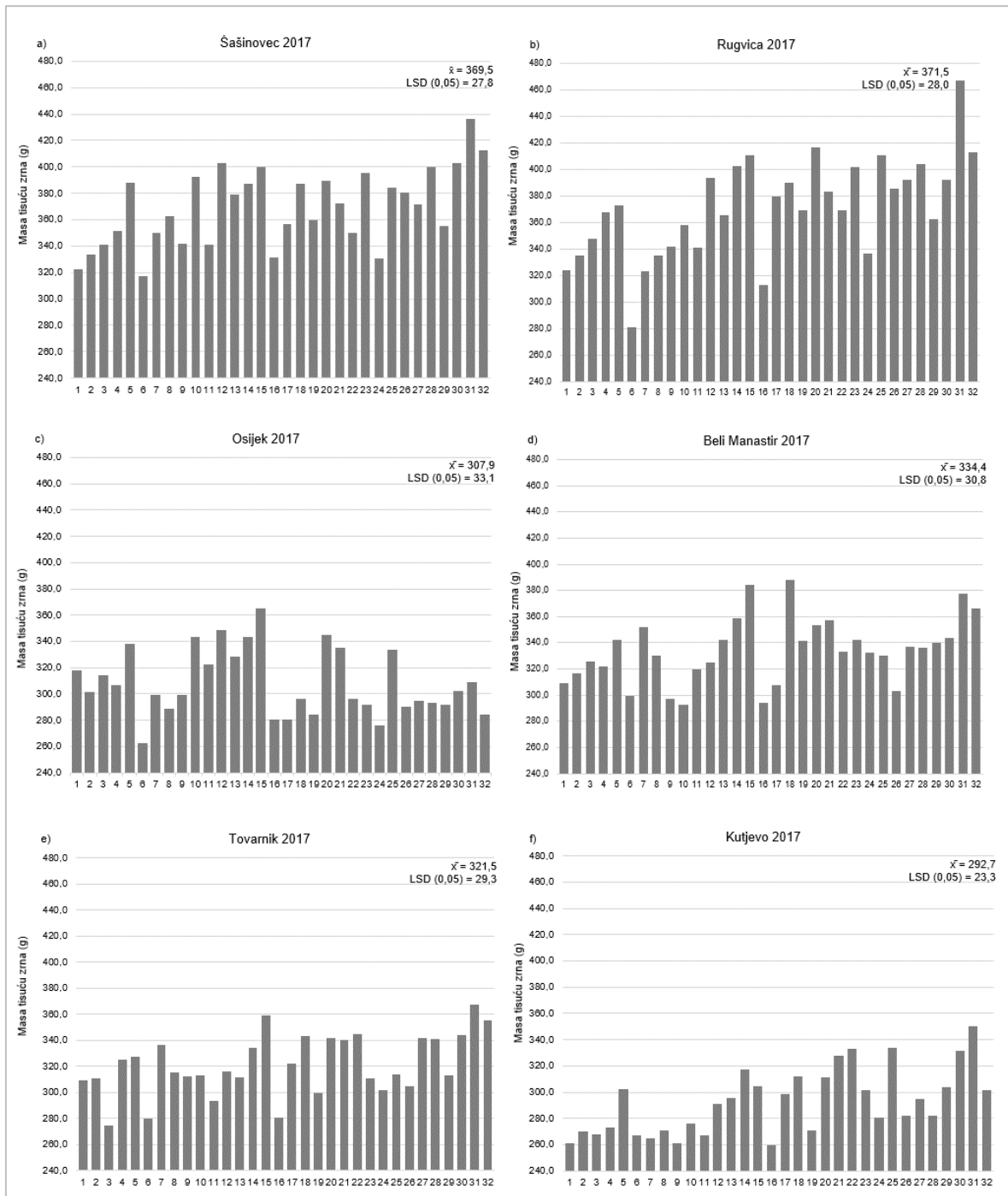
Slika 4.7. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2017. godine za visinu biljke (cm). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.



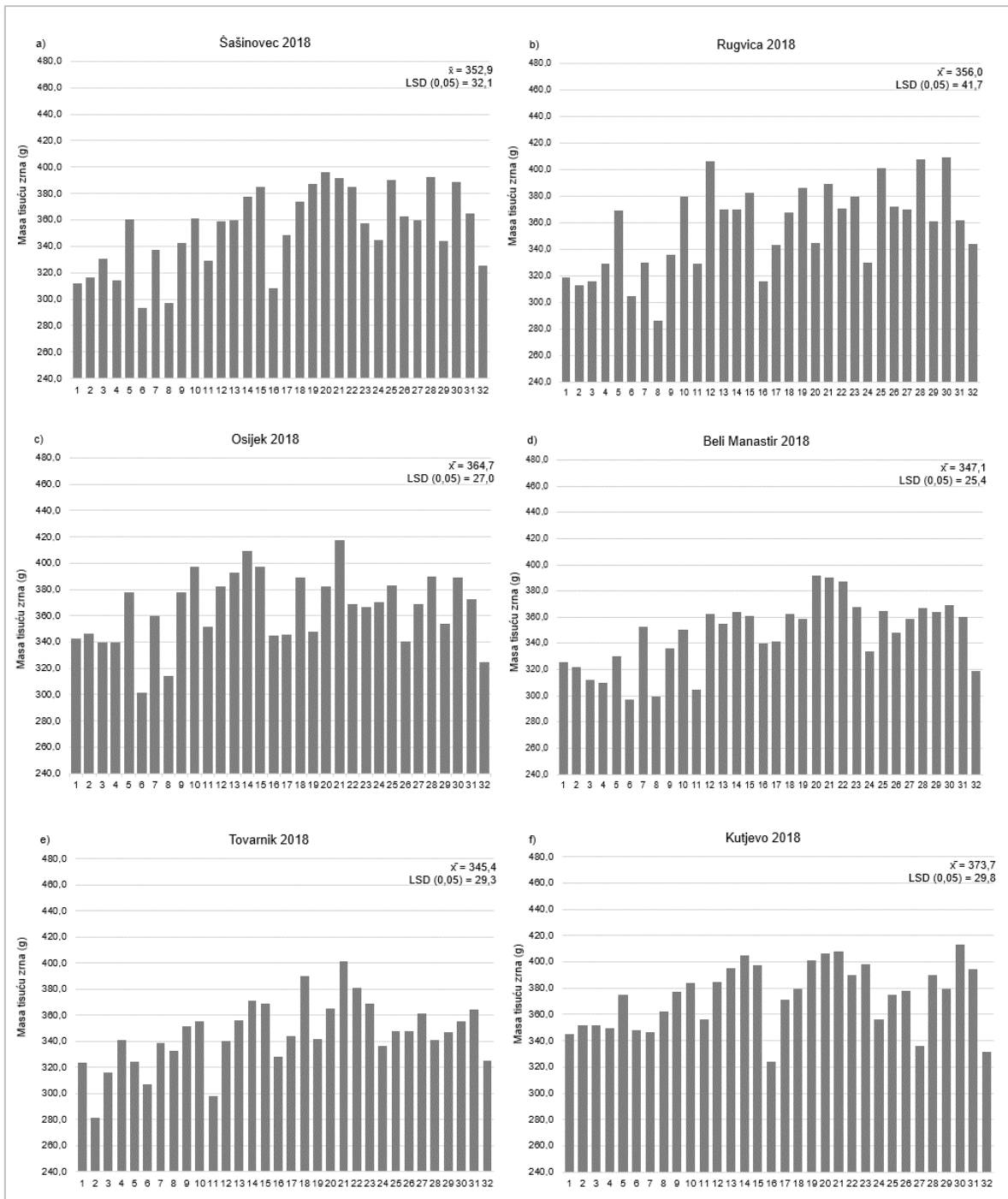
Slika 4.8. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2018. godine za visinu biljke (cm). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.

Masa tisuću zrna

Prosječna vrijednost mase tisuću zrna za 32 genotipa kukuruza u 12 okolina bila je 344,8 g, pri čemu je najniža vrijednost zabilježena u okolini Kutjevo 2017 (292,7 g), dok je najviša vrijednost ostvarena u okolini Kutjevo 2018 (373,7 g). Tijekom 2017. godine najviša prosječna vrijednost zabilježena je za Rugvicu 2017 (371,5 g), prosječna masa tisuću zrna u 2017. godini iznosila je 332,9 g (Prilog 22.). Najnižu prosječnu vrijednost mase tisuću zrna u 2017. godini ostvarila su dva genotipa FAO skupine 300 (6 i 1) s vrijednošću od 284,2 i 307,2 g, te jedan genotip FAO skupine 400 (16) s prosječnom vrijednošću mase tisuću zrna od 293,1 g. Najvišu prosječnu vrijednost mase tisuću zrna ostvario je genotip FAO skupine 600, 31 (384,5 g), a slijede ga genotipovi FAO skupine 400, 15 i 20 s vrijednošću mase tisuću zrna od 370,5 i 359,4 grama (Slika 4.9.). U 2018. godini raspon prosječnih vrijednosti ovog svojstva bio je od 345,4 g za Tovarnik 2018, pa do 373,7 g za Kutjevo 2018, a prosječna vrijednost kroz svih šest lokacija tijekom 2018. godine iznosila je 356,7 g (Prilog 22.). Najnižu prosječnu vrijednost ostvarila su tri genotipa FAO skupine 300, 6, 8 i 2 s vrijednošću mase tisuću zrna od 308,5, 315,2 i 321,7 grama. Najvišu prosječnu vrijednost mase tisuću zrna u 2018. godini ostvarili su dva genotipa FAO skupine 400, 21 i 14 s vrijednošću mase tisuću zrna od 399,5 i 382,8 g, te jedan genotip FAO skupine 600 (30) koji je ostvario prosječnu vrijednost od 387,5 grama (Slika 4.10.).



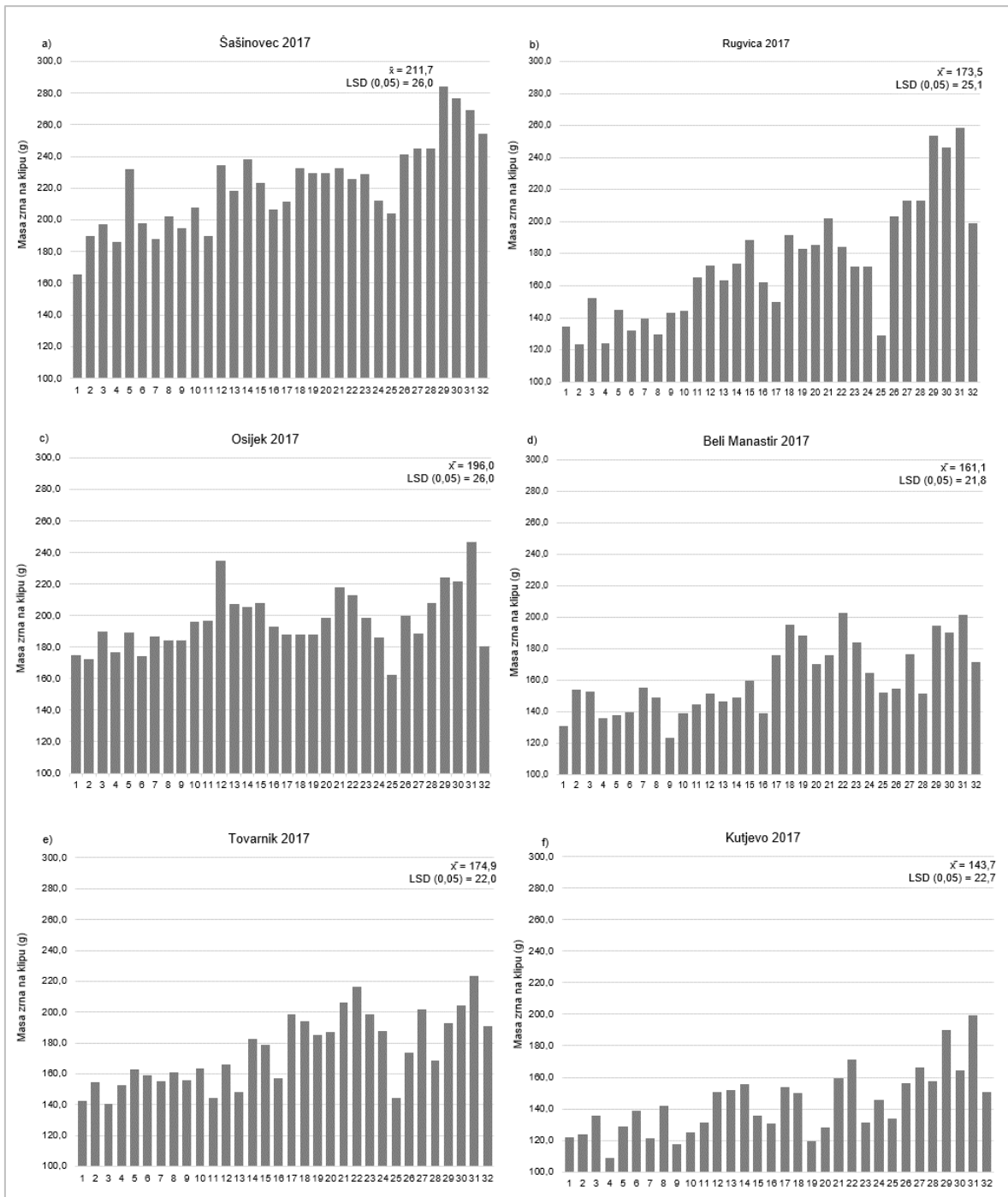
Slika 4.9. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2017. godine za masu tisuću zrna (g). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.



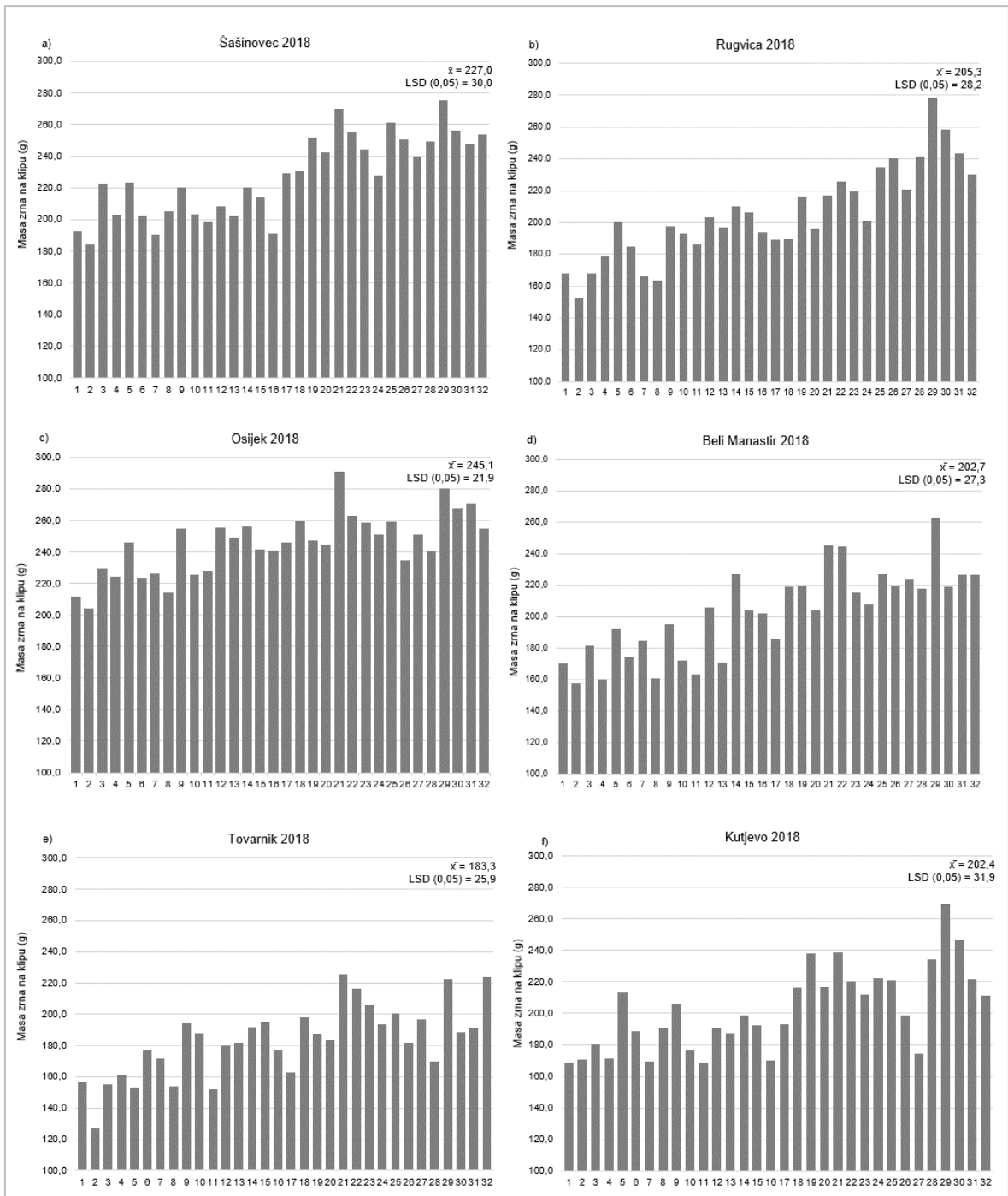
Slika 4.10. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2018. godine za masu tisuću zrna (g). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.

Masa zrna na klipu

Prosječna masa zrna na klipu kroz svih 12 okolina bila je 194,7 g, pri čemu je najniža vrijednost zabilježena za Kutjevo 2017 (143,7 g), dok je najviša vrijednost ostvarena u okolini Osijek 2018 (245,1 g). Prosječne vrijednosti mase zrna na klipu tijekom 2017. godine bile su od 143,7 g za Kutjevo 2017, pa do 221,7 g za Šašincevec 2017, s prosječnom vrijednosti od 178,5 g kroz svih šest promatranih lokacija (Prilog 22.). Najnižu vrijednost mase zrna na klipu u 2017. godini ostvarila su tri genotipa FAO skupine 300, 1, 4 i 2 s vrijednošću od 144,9, 147,3 i 153,0 g, dok su najvišu prosječnu vrijednost ostvarili genotipovi FAO skupine 600, 31, 29 i 30 s prosjekom mase zrna na klipu od 233,0, 223,2 i 217,2 grama (Slika 4.11.). U 2018. godini prosječne vrijednosti mase zrna na klipu bile su u rasponu od 183,3 g za Tovarnik 2018 do 245,1 g za Osijek 2018, te prosječnom vrijednošću od 211,0 g za svih 6 okolina (Prilog 22.). Najnižu vrijednost u 2018. godini ostvarila su također tri genotipa FAO skupine 300, 2, 1 i 8 s vrijednošću od 166,1, 178,0 i 181,3 g, a najvišu vrijednost mase zrna na klipu ostvarila su dva genotipa FAO skupine 600 (29 i 30) s prosjekom mase zrna na klipu od 264,7 i 239,4 grama te jedan genotip FAO skupine 400 (21) s vrijednošću od 247,9 grama (Slika 4.12.). Općenito po lokacijama, tijekom 2017. godine zabilježene su niže prosječne vrijednosti mase zrna na klipu u odnosu na 2018. godinu (Prilog 22.).



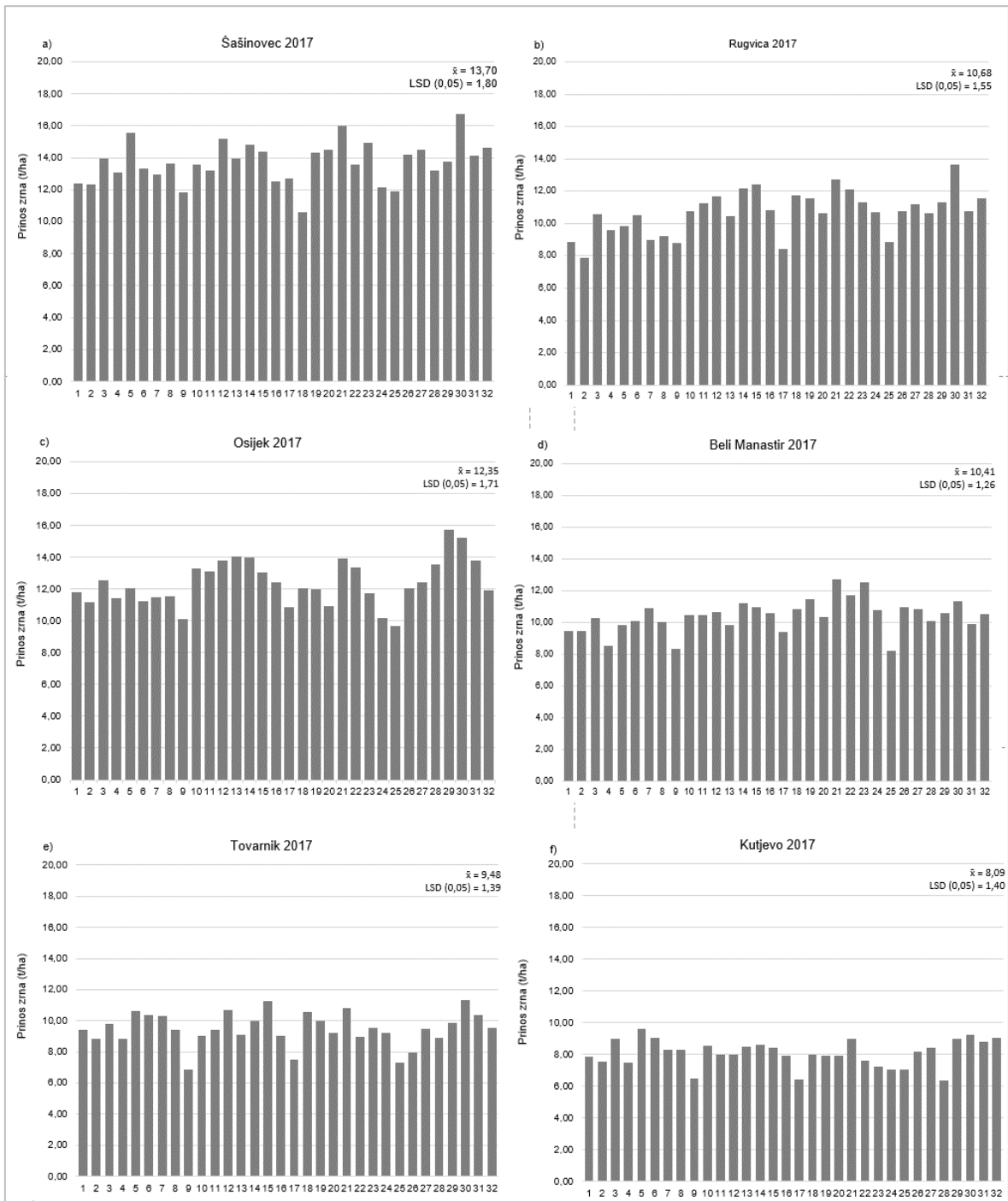
Slika 4.11. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2017. godine za masu zrna na klipu (g). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.



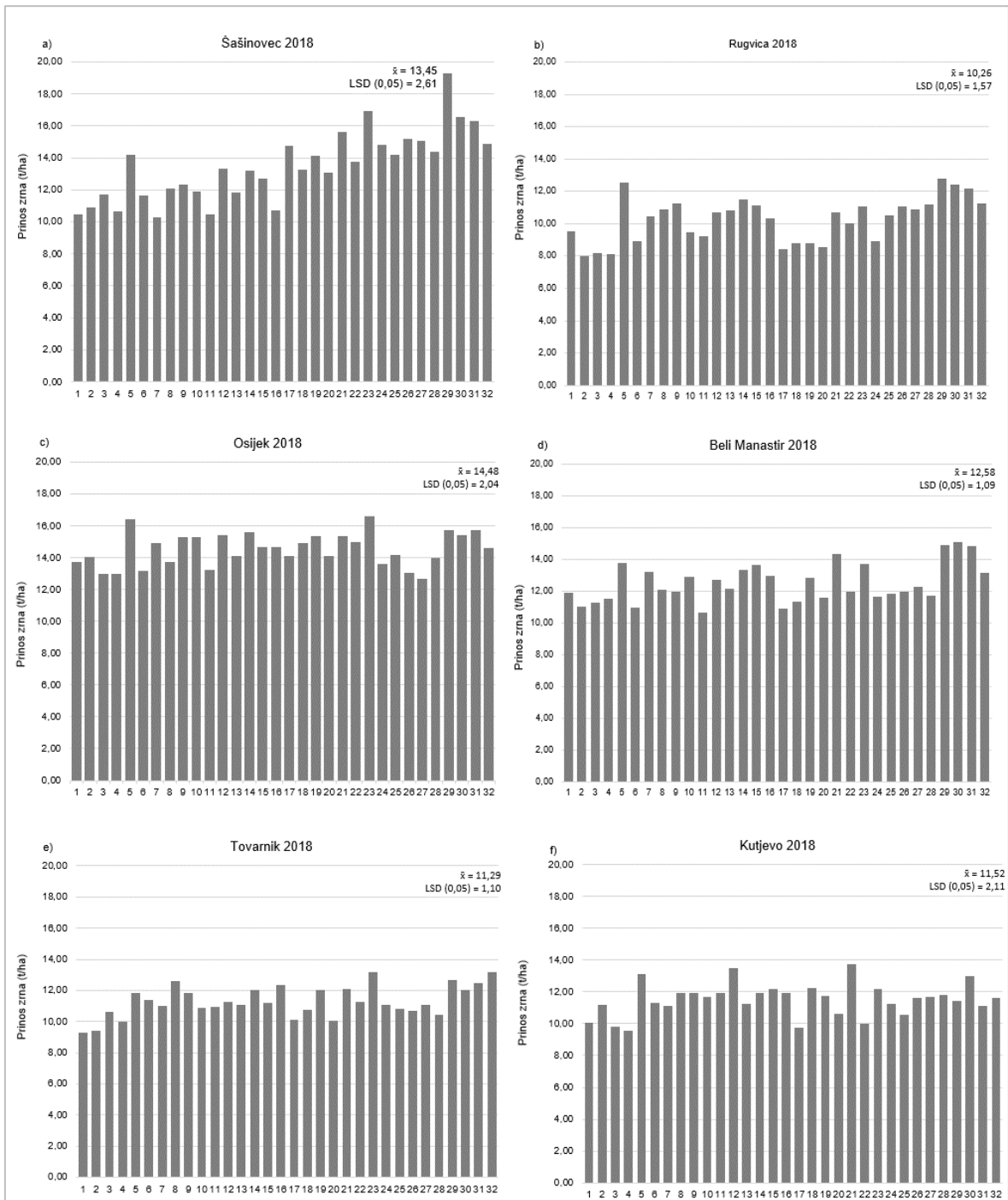
Slika 4.12. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2018. godine za masu zrna na klipu (g). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.

Prinos zrna

Prosječna vrijednost prinosa zrna u 2017. godini iznosila je 10,78 t/ha, a u 2018. je bila 12,25 t/ha, dok je prosječna vrijednost svih 12 okolina iznosila je 11,52 t/ha. Ukupni najniži prinos u istraživanju ostvaren je u okolini Kutjevo 2017 (8,09 t/ha), dok je najviši prinos zabilježen u okolini Osijek 2018 (14,48 t/ha). Prosječne vrijednosti prinosa zrna u 2017. godini bile su u rasponu od 8,09 t/ha za okolinu Kutjevo 2017 do 13,70 t/ha za Šašincevec 2017 (Prilog 22.). Najnižu vrijednost prinosa u 2017. godini ostvario je jedan genotip FAO skupine 400 (9), jedan genotip FAO skupine 600 (25) i jedan genotip FAO skupine 500 (17) s prosjekom od 8,73, 8,82 i 9,21 t/ha. Prosječno najviši prinos zrna u 2017. godini ostvario je jedan genotip FAO skupine 600 (30), jedan genotip FAO skupine 500 (21) i jedan genotip FAO skupine 400 (14) s vrijednošću prinosa od 12,92, 12,52 i 11,79 t/ha (Slika 4.13.). Tijekom 2018. godine prosječna vrijednost prinosa bila je nešto viša u odnosu na 2017. godinu, te je za okolinu Rugvica 2018 iznosila 10,26 t/ha, a u okolini Osijek 2018 zabilježena je prosječna vrijednost prinosa od 14,48 t/ha. (Prilog 22.). Najniži prinos u 2018. godini zabilježen je za genotipove FAO skupine 300 (4, 3 i 2) s vrijednošću prinosa od 10,48, 10,75 i 10,75 t/ha. Najviši prinos tijekom 2018. godine ostvarila su dva genotipa FAO skupine 600 (29 i 30) te jedan genotip FAO skupine 500 (23) s prosjekom prinosa zrna od 14,45, 14,07 i 13,93 t/ha (Slika 4.14.). Generalno na četiri istočne lokacije tijekom 2018. godine ostvaren je viši prinos u odnosu na 2017. godinu, dok to nije bio slučaj za preostale dvije zapadne lokacije (Prilog 22.).



Slika 4.13. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2017. godine za prinos zrna (t/ha). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.



Slika 4.14. Prosječne vrijednosti 32 genotipa kukuruza svih promatranih FAO skupina zriobe na 6 lokacija (a – f) 2018. godine za prinos zrna (t/ha). LSD (0,05) označuje najmanju značajnu razliku na razini $p \leq 0,05$.

4.3.2. Skupna trofaktorska analiza varijance

Općenito, skupna trofaktorska analiza varijance pokazala je statističku značajnost F-testa za većinu izvora variranja promatranih svojstava. Godina (Y) nije bila izvor variranja za vrijednosti ASI-a, dok lokacija (L) nije bila značajan izvor variranja za masu tisuću zrna, masu zrna na klipu i prinos. Također učinci genotipa i godine (G×Y) nisu bili značajni u analizi ASI vrijednosti, dok učinci genotipa i lokacije (G×L) nisu bili izvor variranja ASI-a, vlage zrna, visine biljke i prinosa (Tablica 4.4.).

Trofaktorska ANOVA detektirala je značajan utjecaj godine (Y) na razini $p \leq 0,01$ za vlagu zrna, visinu biljke, masu tisuću zrna, masu zrna na klipu i prinos. Značajnost utjecaja lokacije (L) na razini $p \leq 0,01$ utvrđena je za ASI i visinu biljke, dok je značajnost na razini $p \leq 0,05$ detektirana za vlagu zrna. Utjecaj genotipa (G) kao i interakcije godine i lokacije (Y×L) značajan je na razini od $p \leq 0,01$ za sva promatrana svojstva u pokusu. Interakcija genotip i godina (G×Y) ima značajan utjecaj na razini $p \leq 0,01$ za vlagu zrna, visinu biljke, masu tisuću zrna, masu zrna na klipu i prinos, dok interakcija genotip i lokacija (G×L) ima značajan utjecaj na razini $p \leq 0,01$ samo za masu tisuću zrna i masu zrna na klipu. Analizom varijance utvrđen je statistički značajan utjecaj interakcija genotipa, godine i lokacije (G×Y×L) na razini $p \leq 0,01$ za sva promatrana svojstva (Tablica 4.4.).

Tablica 4.4. Skupna trofaktorska ANOVA za šest agronomskih svojstava kukuruza.

Izvor variranja	Stupnjevi slobode	Suma kvadrata (SS)					
		ASI	Vlaga zrna	Visina biljke	Masa tisuću zrna	Masa zrna na klipu	Prinos
Godina (Y)	1	0,9	917,79**	193641,2**	54245,5**	101489,1**	207,01**
Lokacija (L)	5	195,6**	1043,74*	256914,4**	62825,8	157030,0	841,89
Genotip (G)	31	37,7**	1348,41**	61379,2**	178537,1**	169180,1**	294,76**
Godina × Lokacija (Y×L)	5	5,5**	206,13**	15952,0**	122494,0**	37817,9**	181,01**
Genotip × Godina (G×Y)	31	13,9	114,67**	6460,4**	27019,0**	18092,7**	70,04**
Genotip × Lokacija (G×L)	155	55,9	291,03	6224,1	53422,3**	34663,5**	120,88
Genotip × Godina × Lokacija (G×Y×L)	155	50,6**	251,52**	9322,2**	30444,1**	20137,3**	123,94**
Pogreška	1116	182,0	207,40	32552,0	128311,8	95064,3	405,01

** F test značajan na razini $p \leq 0,01$

* F test značajan na razini $p \leq 0,05$

4.3.3. Analiza G×E interakcije

Provedbom složene dvofaktorske analize varijance uočena je visoka značajnost na razini $p \leq 0,01$ za sve glavne izvore variranja, okolina (E), genotip (G) te njihovu interakciju (G×E) za sva promatrana svojstva u pokusu. Daljnjom raščlambom interakcije G×E detektirana je visoka značajnost ($p \leq 0,01$) Tukeyevog testa neaditivnosti za vlagu zrna, masu tisuću zrna i prinos zrna, dok za ostala svojstva (ASI, visinu biljke, masu zrna na klipu) Tukeyev test neaditivnosti nije bio značajan (Tablica 4.5.).

Tablica 4.5. Složena dvofaktorska ANOVA za šest svojstava po okolinama uz raščlambu interakcije genotip i okolina (G×E).

Izvor variranja	Stupnjevi slobode	Suma kvadrata (SS)					
		ASI	Vlaga zrna	Visina biljke	Masa tisuću zrna	Masa zrna na klipu	Prinos
Okolina (E)	11	202,0**	2167,65**	466507,6**	239565,4**	296337,0**	1229,91**
Genotip (G)	31	37,7**	1348,41**	61379,2**	178537,1**	169180,1**	294,76**
Genotip × Okolina (G×E)	341	120,4**	657,22**	22006,6**	110885,5**	72893,6**	314,86**
Tukeyev test neaditivnosti	1	0,0	112,73**	11,6	3246,3**	119,8	6,19**
Pogreška	1116	182,0	207,40	32552,0	128311,8	95064,3	405,01

** F test značajan na razini $p \leq 0,01$

* F test značajan na razini $p \leq 0,05$

Provedbom AMMI analize varijance za prinos zrna utvrđen je statistički značajan učinak ($p \leq 0,01$) za sve glavne izvore variranja, okolinu (E), repeticiju u okolini (R:E), genotip (G) te interakciju G×E (Tablica 4.6.). Okolina je imala najveći udio u ukupnoj sumi kvadrata (65,77%), dok su interakcija G×E, genotip i repeticija u okolini sudjelovali sa 16,76%, 15,73% odnosno 1,74%.

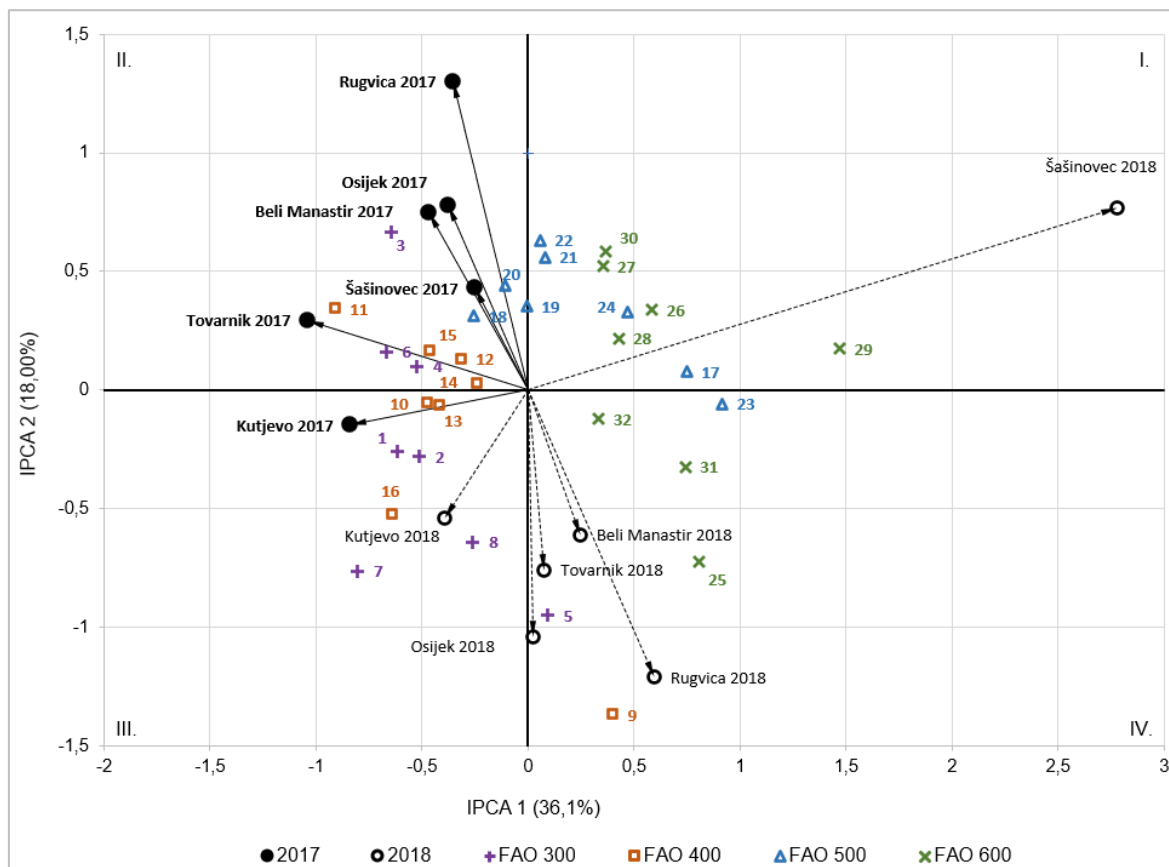
Tablica 4.6. AMMI ANOVA prinosa zrna za 32 genotipa kukuruza na 12 okolina pri čemu su uključene prve dvije glavne komponente (IPCA1 i IPCA2).

Izvor variranja	Stupnjevi slobode	Suma kvadrata (SS)	%
Okolina (E)	11	4919,92**	65,77
Repeticija u okolini (R:E)	36	130,47**	1,74
Genotip (G)	31	1176,72**	15,73
Genotip × Okolna (G×E)	341	1253,87**	16,76
IPCA1	41	453,02**	36,10
IPCA2	39	225,93**	18,00
Pogreška	1116	1613,88	

** F test značajan na razini $p \leq 0,01$

Prva glavna komponenta (IPCA1) objašnjava 36,10% G×E interakcija, dok druga glavna komponenta (IPCA2) objašnjava 18,00% G×E interakcija (Tablica 4.6.). Prve dvije glavne komponente zajedno objašnjavaju 54,10% interakcija G×E. AMMI analiza upućuje na relativno mali postotak IPCA1 u sumi kvadrata koji opisuje interakciju G×E, stoga se AMMI2 biplot koji kombinira IPCA1 i IPCA2 vrijednosti pokazao kao prikladniji prikaz interakcije G×E za prinos zrna (Slika 4.15.). Prema AMMI2 biplotu, genotipovi bliže ishodištu smatraju se manje osjetljivima na promjene uvjeta okoline te su stoga široko adaptabilni. S druge strane oni smješteni bliže određenoj okolini smatraju se specifično adaptabilnima i prilagođeni samo tim okolinama. Pozicioniranjem okolina i duljinom njihovih vektora može se procijeniti gradijent suše i toplinskog stresa. Stoga se okoline Šašincevec 2018, Rugvica 2018 i Osijek 2018 mogu smatrati relativno vlažnijim okolinama od okolina Rugvica 2017, Tovarnik 2017 i Kutjevo 2017. Ostale okoline pozicionirane bliže sredini biplota mogu se smatrati normalnim (prosječnim) okolinama (Slika 4.15.). AMMI2 biplot prikazom variranja prinosa za 32 genotipa kroz dvanaest okolina ukazuje na značajnu varijabilnost genotipova FAO skupine 300. Također je zamjetno da su genotipovi 3, 7, 8, 11 i 16 istaknuli svoju specifičnu adaptabilnost prema sušnim okolinama, dok su genotipovi 5, 9 i 29 istaknuli svoju

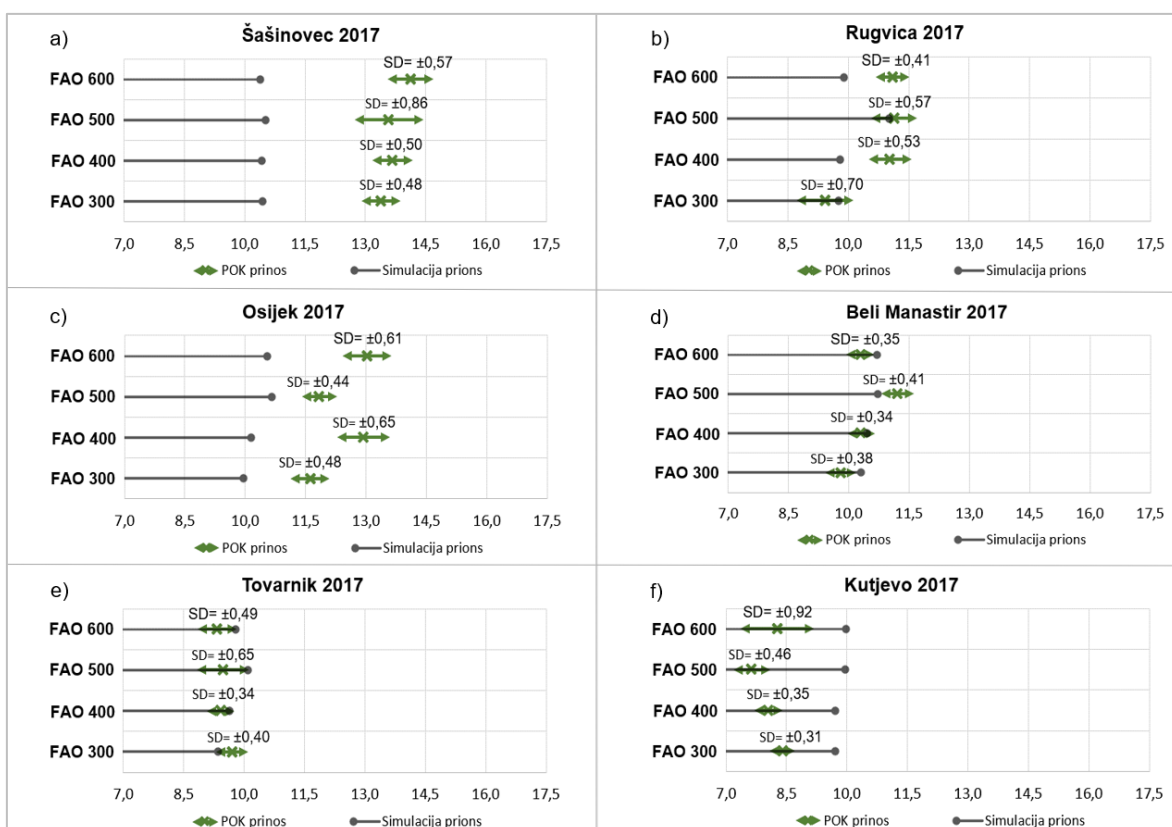
specifičnu adaptabilnost u vlažnim okolinama. S druge strane genotipovi FAO skupine 400 (10, 12, 13, 14 i 15), genotipovi FAO skupine 500 (19, 20 i 24) i genotipovi FAO skupine 600 (28, 32) pokazali su se kao široko adaptabilni i manje osjetljivi na promjene okolinskih učinaka. Ostali genotipovi FAO skupine 500 i genotipovi FAO skupine 600 smješteni su u I. i IV. kvadrant, što ukazuje na njihov specifičan potencijal prinosa zrna u uvjetima proizvodnje kukuruza kao što su bili u 2018. godini, s iznimkom Kutjeva 2018 (Slika 4.15.).



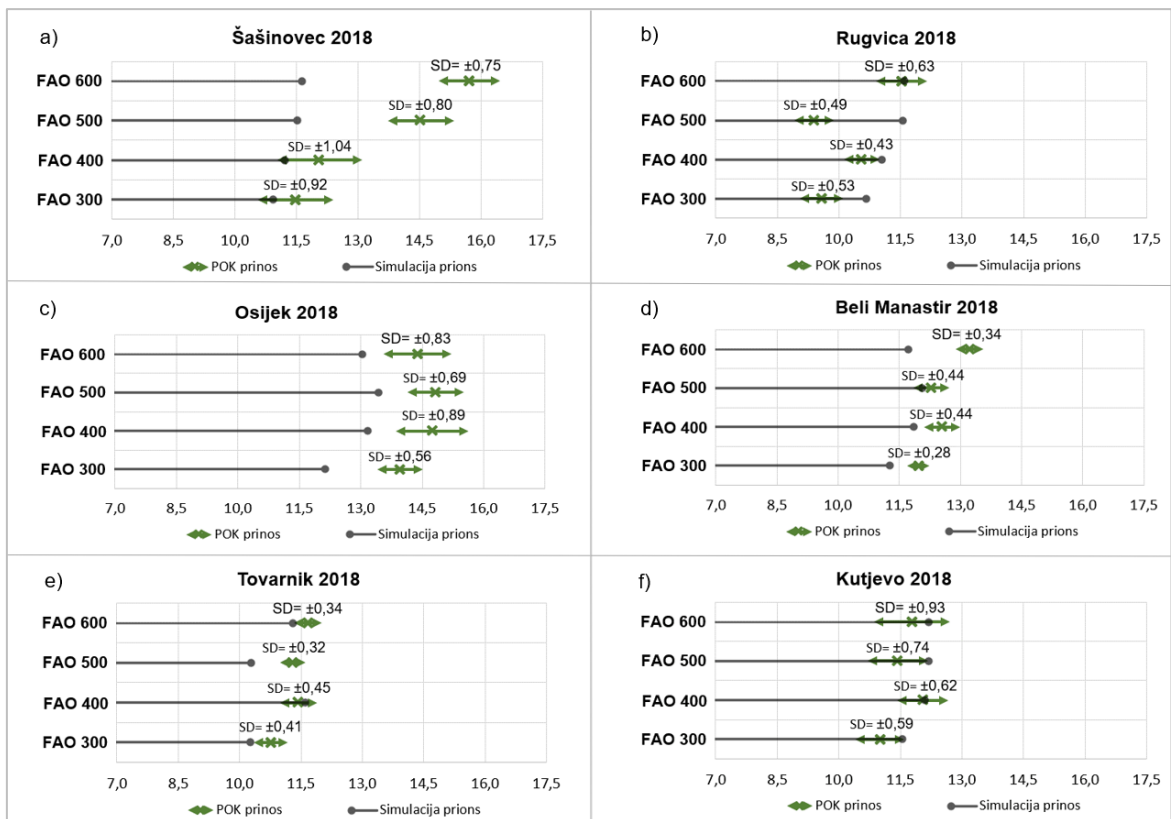
Slika 4.15. AMMI2 biplot prikaz prinosa zrna za 32 genotipa kukuruza po skupinama zriobe FAO300 (+; ljubičasto), FAO400 (□; narančasto), FAO500 (△; plavo), FAO600(x; zeleno) uzgajanih u 12 okolina (točke - kombinacija lokacije i godine u 2017. godini, kružnice - kombinacija lokacije i godine u 2018. godini).

4.4. Procesno modeliranje

Uspoređujući prosječne vrijednosti prinosa zrna po FAO skupinama izmjerene u 12 okolina i najtočnije predviđene prinose u simulacijama prema korijenu prosječnog kvadrata pogreške (RMSE) od 0,02 t/ha, uočava se da su pojedine međusobne razlike varirale od okoline do okoline i znatno manje među FAO skupinama unutar pojedine okoline (Slika 4.16. i Slika 4.17). Najveće razlike bile su u Šašinovcu 2017 za sve FAO skupine (oko 3 t/ha; Slika 4.16. graf a), kao i u Šašinovcu 2018 za FAO500 (3,02 t/ha) i najveća razlika u cjelokupnom setu pokusa za FAO600 od 4,08 t/ha (Slika 4.17 graf a). Slijede razlike u Osijeku u obje godine gdje su svi simulirani prinosi bili značajno niži u odnosu na vrijednosti izmjerene u poljskim pokusima za sve FAO skupine. Najmanje razlike između izmjerenih i procijenjenih vrijednosti za prinos zrna utvrđene su za sve FAO skupine u okolinama Beli Manastir 2017, Tovarnik 2017 i Kutjevo 2018 varirajući u rasponu od 0,04 do 0,75 t/ha (Slika 4.16. grafovi d, e i Slika 4.17 graf f). Ukupno 19 od 48 procijenjenih vrijednosti prinosa u simulacijama bile su unutar statističke pogreške izmjerenih prosječnih vrijednosti u pokusima.

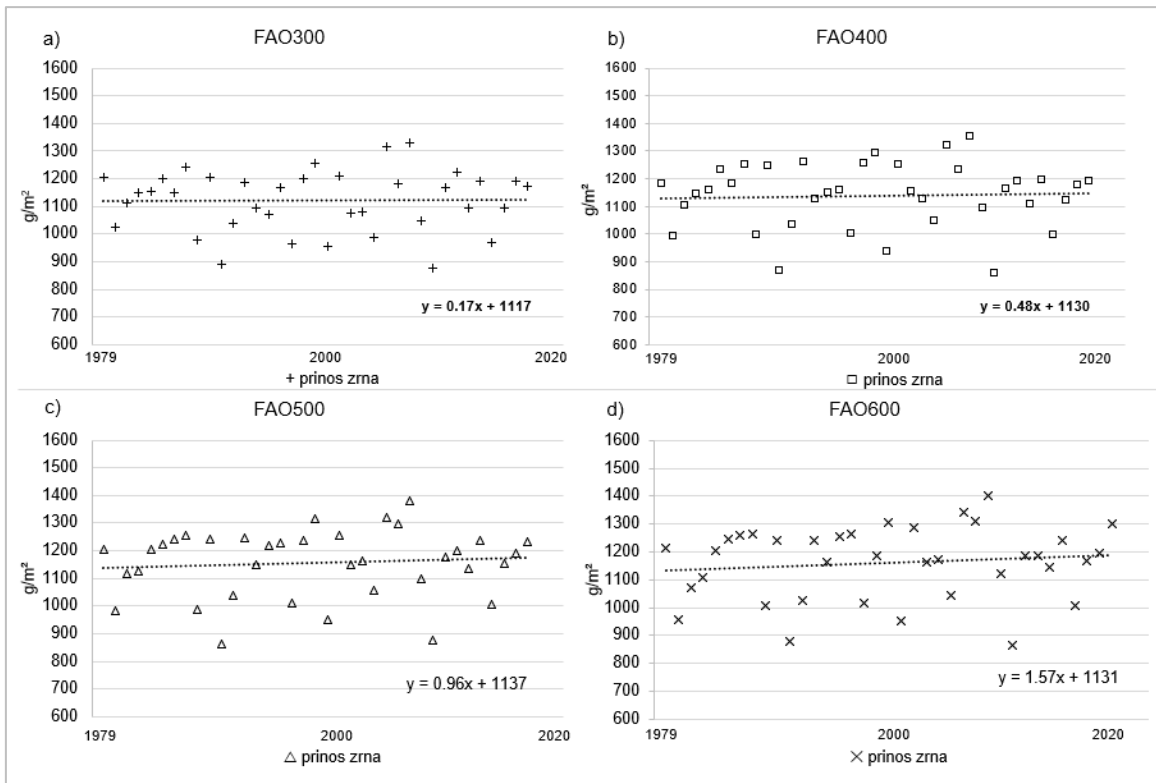


Slika 4.16. Prosječni prinos zrna (× na punoj zelenoj liniji) ± standardna pogreška (SD; vrhovi strelica na punoj zelenoj liniji) po FAO skupinama zriobe izmjeren u pokusima postavljenim na 6 lokacija (a – f) tijekom 2017. godine i prinos zrna procijenjen u simulacijama (puna crta s točkom) prema APSIM modelu rasta usjeva.

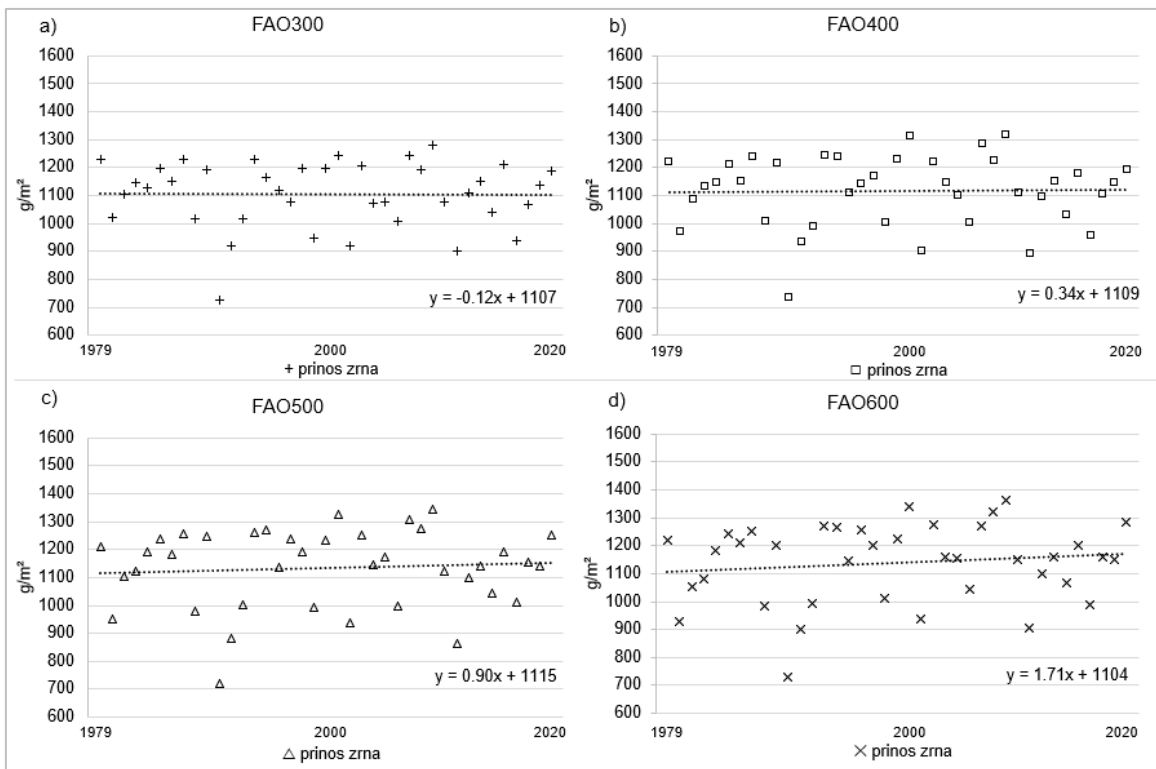


Slika 4.17 Prosječni prinos zrna (x na punoj zelenoj liniji) ± standardna pogreška (SD; vrhovi strelica na punoj zelenoj liniji) po FAO skupinama zriobe izmjereno u pokusima postavljenim na 6 lokacija (a – f) tijekom 2018. godine i prinos zrna procijenjen u simulacijama (puna crta s točkom) prema APSIM modelu rasta usjeva.

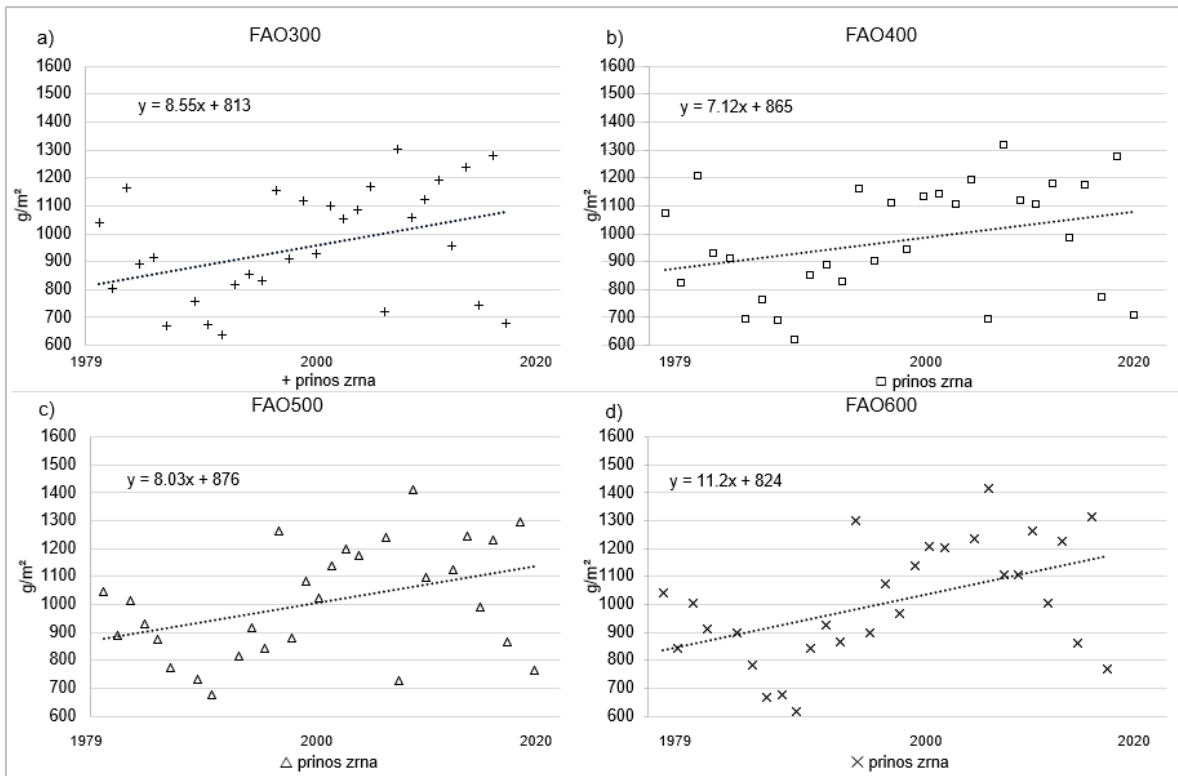
Na osnovi uglavnom vrlo jakih korelacija meteoroloških podataka prikupljenih *in situ* i A4C baze podataka (Tablica 4.1.), izvršene su višedesetljetne simulacije prinosa zrna na šest odabranih lokacija koristeći podatke baze A4C za dnevne temperature zraka i oborine kroz četiri različite FAO skupine (Slika 4.18. – Slika 4.23.). Porast prinosa zrna tijekom zadnjih 40 godina na lokacijama na zapadu Hrvatske (Šašincev i Rugvica, Slika 4.18. i Slika 4.19.) ili je izostao ili je bio najmanji u svim FAO skupinama u odnosu na ostale lokacije. Iako neznatno, porast prinosa bio je dosljedno veći u kasnijim FAO skupinama. Porast prinosa po FAO skupinama bio je izraženiji u istočnijem Kutjevu (Slika 4.23.), a najizraženiji na tri istočne lokacije Osijek, Beli Manastir i Tovarnik (Slika 4.20., Slika 4.21., Slika 4.22.). Na svim istočnim lokacijama veći porast prinosa uglavnom nije bio povezan s kasnijom FAO skupinom.



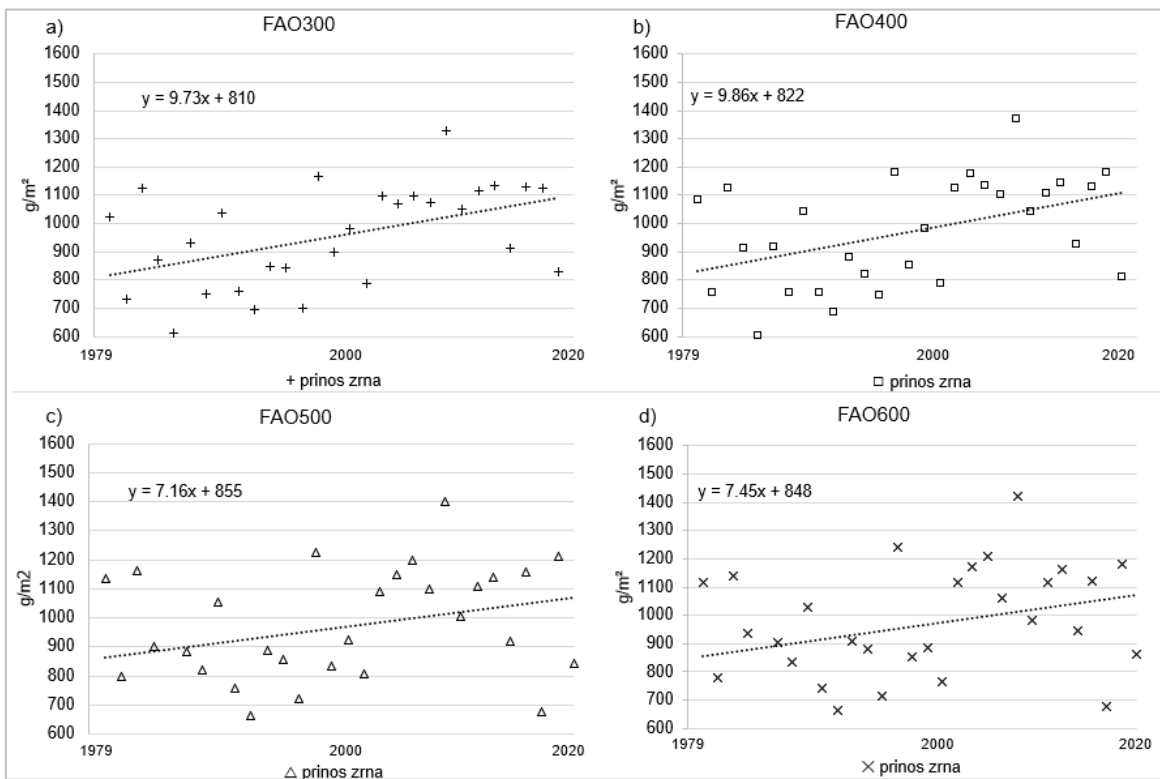
Slika 4.18. Dugoročne simulacije prinosa zrna za razdoblje od 1979. do 2020. godine za lokaciju Šašinovac po skupinama zriobe FAO300 (+), FAO400 (□), FAO500 (△), FAO600 (×; a – d respektivno) predstavljene kao linearne regresije.



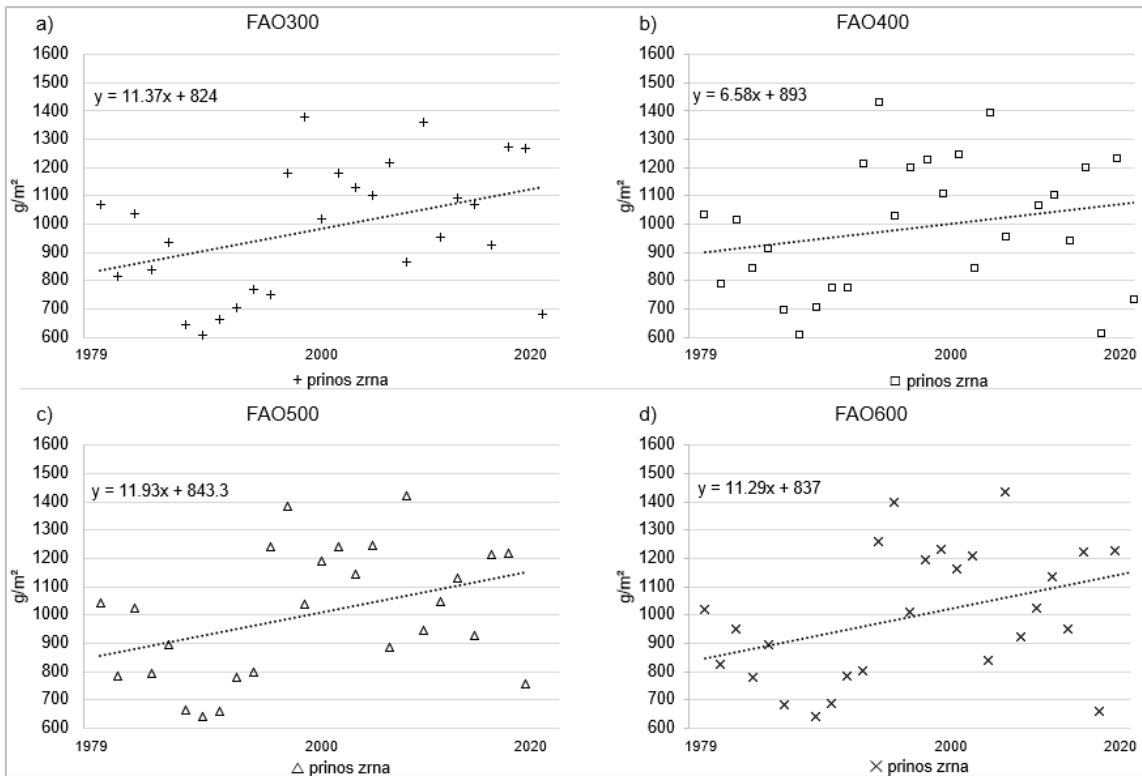
Slika 4.19. Dugoročne simulacije prinosa zrna za razdoblje od 1979. do 2020. godine za lokaciju Rugvica po skupinama zriobe FAO300 (+), FAO400 (□), FAO500 (△), FAO600 (×; a – d respektivno) predstavljene kao linearne regresije.



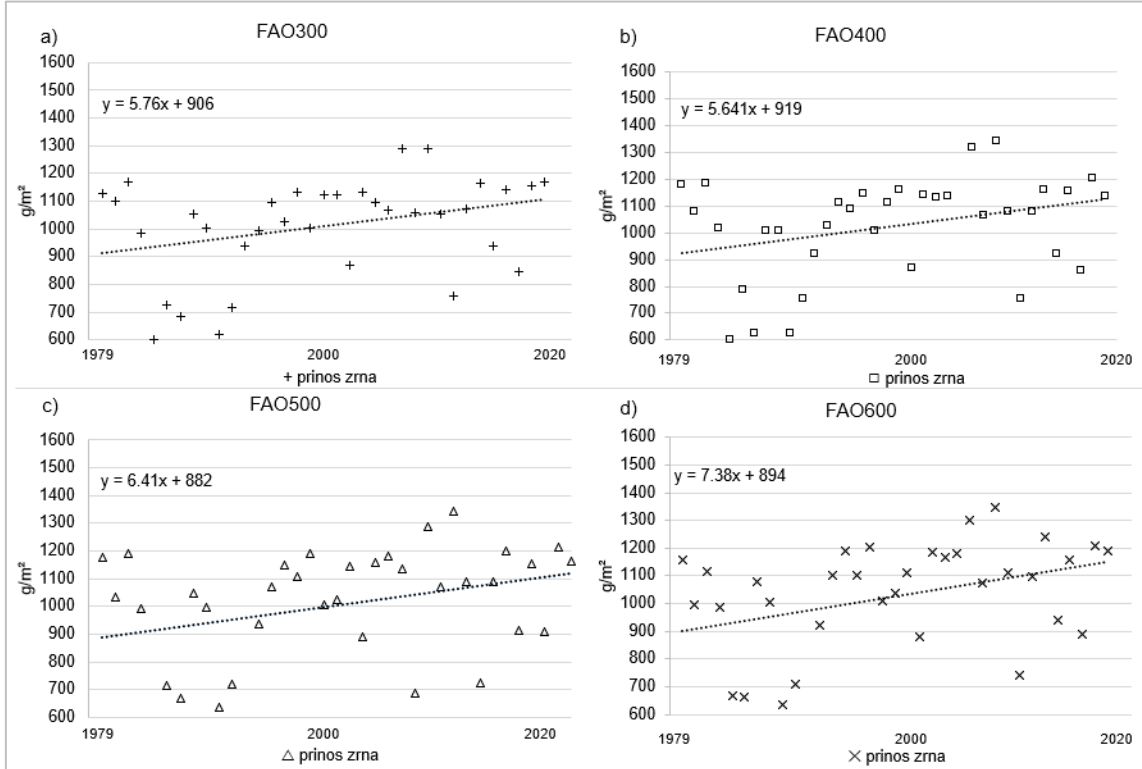
Slika 4.20. Dugoročne simulacije prinosa zrna za razdoblje od 1979. do 2020. godine za lokaciju Osijek po skupinama zriobe FAO300 (+), FAO400 (□), FAO500 (△), FAO600 (×; a – d respektivno) predstavljene kao linearne regresije.



Slika 4.21. Dugoročne simulacije prinosa zrna za razdoblje od 1979. do 2020. godine za lokaciju Beli Manastir po skupinama zriobe FAO300 (+), FAO400 (□), FAO500 (△), FAO600 (×; a – d respektivno) predstavljene kao linearne regresije.



Slika 4.22. Dugoročne simulacije prinosa zrna za razdoblje od 1979. do 2020. godine za lokaciju Tovarnik po skupinama zriobe FAO300 (+), FAO400 (□), FAO500 (△), FAO600 (×; a – d respektivno) predstavljene kao linearne regresije.



Slika 4.23. Dugoročne simulacije prinosa zrna za razdoblje od 1979. do 2020. godine za lokaciju Kutjevo po skupinama zriobe FAO300 (+), FAO400 (□), FAO500 (△), FAO600 (×; a – d respektivno) predstavljene kao linearne regresije.

4.5. Detekcija germplazme tolerantne na sušu i toplinski stres u seriji ciljanih okolina

4.5.1. Povezanost agronomskih svojstava s jačinom sušnog i toplinskog stresa

U ovom poglavlju prikazani su odnosi prosječnih vrijednosti promatranih agronomskih svojstava spram okoline karakteriziranih indeksima suše i toplinskog stresa. U seriji grafikona (Slika 4.24. grafovi a – f) 12 okolina je poredano temeljem rastućih ili padajućih vrijednosti pojedinih indeksa, tako da na osi apscise (x) čine određeni gradijent okoline (1 do 12) pri čemu 1 označava najjači stres, a 12 najslabiji. Prosječne vrijednosti 32 hibrida pojedinih analiziranih agronomskih svojstava prikazane su spram osi ordinate (y) ovih grafikona te se analizira postojanje određene funkcionalne povezanosti s gradijentom okoline. Urtane linije nelinearnog trenda i veličina R^2 vrijednosti ukazuju na veći ili manji utjecaj uzgojnih uvjeta pojedine okoline (određene razine ili odsustva stresa) na prosječnu vrijednost ispitivanog agronomskog svojstva.

Prvo svojstvo koje je promatrano kroz sva tri indeksa bio je ASI (broj dana između polinacije i svilanja). Prosječna vrijednost za ASI kroz svih 12 okolina bio je 2,5 dana, a najviše prosječne vrijednosti zabilježene su za okoline Osijek 2018 (3,8 dana), Osijek 2017 (3,2 dana) i Kutjevo 2018 (3,1 dan), dok su najniže bile u okolinama Rugvica 2017 (1,5 dana), Rugvica 2018 (1,5 dana) i Šašinovec 2018 (1,6 dana; Prilog 22.). ASI je pokazao najniže prosječne vrijednosti (Prilog 22.) u dvije (Rugvica 2018 i Šašinovec 2018) od tri (Osijek 2018) okoline okarakterizirane kao normalne kroz sva tri indeksa. Promatrajući ASI kroz grafikone za scPDSI (Slika 4.24. graf a), VPD (Slika 4.24. graf c) i SDD indeks (Slika 4.24. graf e) ovim istraživanjem nije utvrđena povezanost ovog svojstva i gradijenta okoline procijenjenog s različitim indeksima suše i toplinskog stresa.

Sljedeće svojstvo analizirano kroz okoline karakterizirane indeksima suše je vlaga zrna. Prosječna vlaga zrna u berbi kod 32 ispitivana hibrida nije pokazala vidljiv trend promjene spram evidentno različitih razina suše i toplinskog stresa kroz 12 okolina, mjerenih s nekoliko indeksa, scPDSI (Slika 4.24. graf a), VPD (Slika 4.24. graf c) ili SDD (Slika 4.24. graf e).

Treće svojstvo analizirano u pogledu njegovog odgovora na čimbenike okoline prouzročene sušom i toplinskim stresom je visina biljke. Ovo svojstvo za razliku od vlage zrna pokazalo je vrlo dobar odgovor na razinu stresa pojedinih okolina, bez obzira na indeks. U tri okoline tipizirane kao sušne zabilježene su prosječno najniže vrijednosti visine biljaka s vrijednostima od 172,6 cm za okolinu Tovarnik 2017 do 184,1 cm za okolinu Osijek 2017

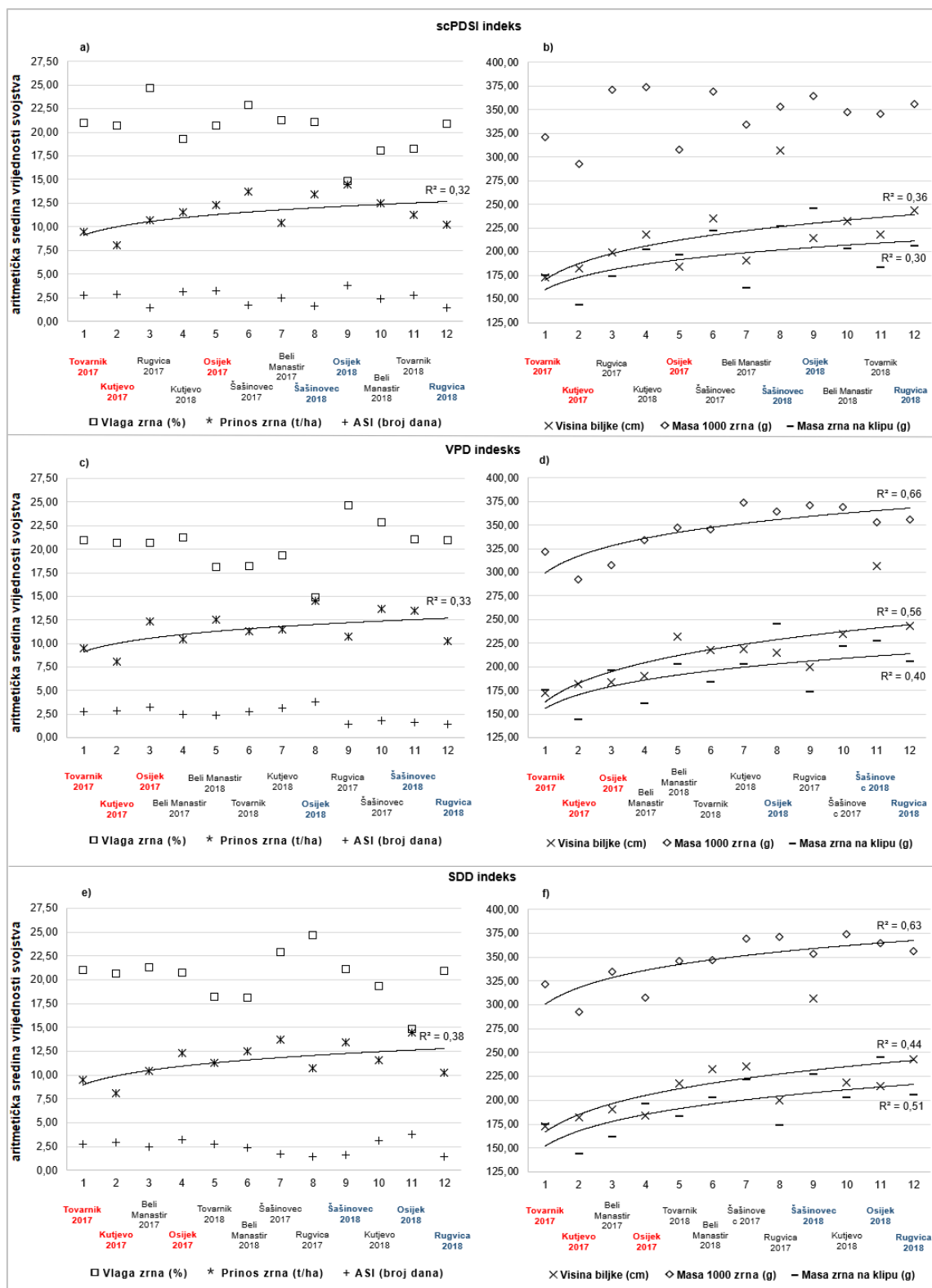
(Prilog 22.). Ponašanja ovog agronomskog svojstva najbolje se ogleda u prikazu dijagrama rasipanja za VPD indeks (Slika 4.24. graf d). Međutim, uz niske vrijednosti za visinu biljaka u najsušnijim okolinama, vidljiva je i niža prosječna vrijednost za ovo svojstvo za okolinu Osijek 2018 (214,8 cm) te je ujedno manja i od ukupnog prosjeka svih okolina (216,4 cm; Prilog 22.), iako je ranijom analizom tipizirana kao normalna. Najveće prosječne vrijednosti visine biljaka zabilježene su za okoline Rugvica 2018 (243,2 cm) i Šašincevec 2018 (306,7 cm; Prilog 22.), što je vidljivo i iz grafikona gradacije okolina prema VPD, scPDSI i SDD indeksima (Slika 4.24. grafovi d, b i f). Funkcionalna povezanost ovog svojstva i okoline očituje se i kroz koeficijent determinacije (R^2) koji kod scPDSI indeksa iznosi 0,36, kod VPD-a je 0,56, a za SDD iznosi 0,44 (Slika 4.24. grafovi d, b i f).

Masa tisuću zrna je naredno svojstvo koje je u ovoj disertaciji razmatrano u kontekstu procjene razine suše i toplinskog stresa. Prosječne vrijednosti mase tisuću zrna kao i visina biljaka pokazuju povezanost vidljivu kroz sva tri indeksa (Slika 4.24. grafovi b, d i f). Funkcionalna povezanost mase tisuću zrna i suše napose je dobro uočljiva kod prikaza dijagrama rasipanja za VPD indeks (Slika 4.24. graf d) s relativno visokom vrijednošću koeficijenta determinacije ($R^2 = 0,66$). Najmanje prosječne vrijednosti zabilježene su u okolinama Kutjevo 2017 (292,7 g), Osijek 2017 (307,9 g) i Tovarnik 2017 (321,5 g), pri čemu je prosjek kroz sve okoline bio 344,8 g (Prilog 22.). Utjecaj toplinskog stresa na masu tisuću zrna također je vrlo dobro prikazan grafom SDD indeksa ($R^2 = 0,63$; Slika 4.24. graf f), dok to nije slučaj s gradacijom okolina temeljenih na scPDSI indeksu ($R^2 = 0,18$; Slika 4.24. graf b). Ovo svojstvo pokazalo je stabilne prosječne vrijednosti i u sve tri normalne okoline, sa prosječnim vrijednostima 352,9 g za okolinu Šašincevec 2018, 356,0 g za okolinu Rugvica 2018 i 364,7 g za okolinu Osijek 2018 (Prilog 22.).

Pogleda li se prikaz odnosa mase zrna na klipju s ova tri indeksa (Slika 4.24. grafovi b, d i f) vidljiva je konzistentnost rasta ili pada prosječnih vrijednosti ovog svojstva. Masa zrna na klipju kroz sva tri indeksa pokazala je niže prosječne vrijednosti (143,7 – 196,0 g) u sušnim za razliku od normalnih okolina (205,3 – 245,1 g), no valja naglasiti da je okolina Osijek 2017 (196,0 g) imala veću vrijednost od ukupnog prosjeka koji je iznosio 194,7 grama (Prilog 22.). Linije trenda na grafovima scPDSI-a ($R^2 = 0,30$), VPD-a ($R^2 = 0,40$) i SDD-a ($R^2 = 0,51$; Slika 4.24. grafovi b, d i f) također sugeriraju određenu povezanost ovog svojstva spram gradijenta okoline.

Zadnje te ujedno i najznačajnije svojstvo na koje ćemo se osvrnuti u ovoj analizi je prinos zrna. Prosječne vrijednosti prinosa zrna u ovom istraživanju bile su od 8,09 t/ha za okolinu Kutjevo 2017, pa do 14,48 t/ha za okolinu Osijek 2018, dok je prosječna vrijednost svih okolina iznosila 11,52 t/ha (Prilog 22.). Prikazi dijagrama rasipanja (Slika 4.24. grafovi a, c

i e) kroz sva tri indeksa i pripadajuće prosječne vrijednosti prinosa zrna (Prilog 22.) detektirali su Kutjevo 2017 (8,09 t/ha) i Tovarnik 2017 (9,48 t/ha) kao sušne okoline. Funkcionalna povezanost prinosa zrna i indeksa suše i toplinskog stresa bila je dosta ujednačena kroz sva tri indeksa s vrijednostima R^2 , za scPDSI u iznosu od 0,32, za VPD u iznosu od 0,33 te za SDD u iznosu od 0,38 (Slika 4.24. grafovi a, c i e).



Slika 4.24. Funkcionalna povezanost (puna linija označava liniju trenda) aritmetičkih sredina promatranih svojstava (□vlaga zrna, ∗ prinos zrna, + ASI, × visina biljke, ◇ masa tisuću zrna, - masa zrna na klipu) 32 genotipa kukuruza i jačine stresa mjerene pomoću scPDSI (a i b), VPD (c i d) i SDD (e i f) indeksa kroz 12 promatranih okolina.

4.5.2. Indeksi tolerantnosti

Istraživana je upotrebljivost više različitih indeksa za otkrivanje tolerantnosti na sušu i toplinski stres (Tablica 3.5.). Njihove numeričke vrijednosti rezultat su različitih matematičkih operacija kojima se tretira prinos zrna nekog genotipa zabilježen u stresnim i u povoljnim uvjetima. Vrijednosti ovih indeksa i poredak genotipova na temelju istih prikazani su Tablica 4.7 i Tablica 4.8. Za svaki indeks prikazane su padajuće vrijednosti pojedinog indeksa i šifra genotipa. Zelenom bojom označeno je osam genotipova (25%) koje dati indeks proglašava kao najtolerantnije, te osam genotipova označenih žutom bojom koji imaju suprotne vrijednosti (netolerantni). Istraživanje je potvrdilo visoku međusobnu sličnost indeksa GMP, STI, MP i HARM (Tablica 4.7.), kao i visoku međusobnu sličnost između druge grupe indeksa TOL, SSI i RDY (Tablica 4.8.). Usporedba vrijednosti indeksa u pojedinim grupama pokazala je da su bile u visokoj korelaciji ($r > 0,98$ – podaci nisu prikazani). Ovo praktično znači da indeksi iz jedne grupe na vrlo sličan način rangiraju 32 ispitivana genotipa kukuruza. Međutim, korelacije indeksa između grupa bile su vrlo slabe ($r < 0,25$) i posljedično na različit način procjenjuju tolerantnost ili osjetljivost pojedinih genotipova. Iz ovih rezultata proizlazi da ocjena nekog genotipa s jednim indeksom može biti kontradiktorna procijeni s drugim indeksom.

Ukoliko se promatraju vrijednosti grupe indeksa iz Tablica 4.7 (GMP, STI, MP i HARM) najtolerantniji genotipovi su: 29, 30, 31, 21 i 5. Prema istim indeksima najmanje tolerantni genotipovi trebali bi biti: 4, 2, 9, 17 i 25. Razmatranjem formula po kojima su izračunati ovi indeksi, vidljivo je da se ova grupa indeksa zasniva na prosječnoj vrijednosti prinosa zrna nekog genotipa iz kontrastnih okolina. Druga grupa indeksa (TOL, SSI i RDY, Tablica 4.8.) primarno se zasniva na razlici prinosa iz kontrastnih okolina. Vrijednosti ovih indeksa izdvajaju kao tolerantne one genotipove koji pokazuju manja odstupanja između stresnih i povoljnih okolina. Prema ovoj grupi indeksa, kao najtolerantniji pokazali su se: 3, 11, 6, 4 i 1, dok su kao netolerantni izdvojeni slijedeći: 9, 23, 25, 17 i 24.

Ipak, ukoliko se preklape vrijednosti indeksa iz obje grupe određeni broj genotipova izdvaja se kao tolerantan ili netolerantan. Kao tolerantni temeljem više indeksa mogli bi se smatrati genotipovi 13, 15, 12, 14 i 21.

Tablica 4.7. Vrijednosti GMP, STI, MP i HARM indeksa tolerantnosti za 32 genotipa kukuruza.

Šifra genotipa	GMP	Šifra genotipa	STI	Šifra genotipa	MP	Šifra genotipa	HARM
29	13,54	29	1,13	29	13,72	29	13,37
30	13,28	30	1,09	30	13,35	30	13,20
31	12,69	31	0,99	31	12,83	31	12,56
21	12,48	21	0,96	5	12,55	21	12,41
5	12,42	5	0,95	21	12,55	5	12,29
14	12,08	14	0,90	23	12,18	14	12,01
12	11,91	12	0,88	14	12,15	12	11,86
23	11,88	23	0,87	12	11,97	15	11,76
15	11,80	15	0,86	32	11,86	32	11,62
32	11,74	32	0,85	15	11,84	23	11,59
27	11,40	27	0,80	27	11,48	13	11,32
13	11,36	13	0,80	22	11,42	27	11,32
22	11,33	22	0,79	13	11,39	22	11,24
19	11,26	19	0,78	28	11,38	19	11,17
28	11,24	28	0,78	19	11,34	10	11,16
18	11,21	18	0,77	18	11,26	18	11,15
10	11,20	10	0,77	10	11,24	28	11,10
26	11,08	26	0,76	26	11,24	26	10,93
7	10,91	7	0,73	8	10,96	7	10,87
8	10,89	8	0,73	7	10,95	8	10,83
16	10,79	16	0,72	16	10,85	16	10,74
6	10,71	6	0,71	6	10,72	6	10,69
3	10,68	3	0,70	3	10,68	3	10,67
11	10,55	11	0,69	20	10,62	11	10,54
20	10,54	20	0,69	24	10,62	20	10,47
24	10,46	24	0,67	11	10,56	1	10,40
1	10,43	1	0,67	25	10,47	24	10,31
25	10,17	25	0,64	1	10,46	2	9,99
17	10,12	17	0,63	9	10,38	17	9,91
9	10,05	9	0,62	17	10,33	25	9,88
2	10,03	2	0,62	2	10,08	4	9,86
4	9,88	4	0,60	4	9,91	9	9,74
Aritmetička sredina	11,25		0,79		11,35		11,16
Zeleno – najtolerantniji genotipovi							
Žuto – najosjetljiviji genotipovi							

Tablica 4.8. Vrijednosti TOL, SSI i RDY indeksa tolerantnosti za 32 genotipa kukuruza.

Šifra genotipa	TOL	Šifra genotipa	SSI	Šifra genotipa	RDY
3	0,51	3	0,21	3	4,63
11	0,83	11	0,35	11	7,59
6	1,02	6	0,42	6	9,11
4	1,36	4	0,59	4	12,88
1	1,55	1	0,64	1	13,80
13	1,73	13	0,65	13	14,09
2	1,80	15	0,70	15	15,09
7	1,83	7	0,71	7	15,45
10	1,92	10	0,73	10	15,74
15	1,93	2	0,76	2	16,37
16	2,11	18	0,80	18	17,36
18	2,14	12	0,81	12	17,58
12	2,31	16	0,82	16	17,73
8	2,45	21	0,88	21	18,97
20	2,55	14	0,89	14	19,20
14	2,58	30	0,90	30	19,43
21	2,63	8	0,93	8	20,13
27	2,76	20	0,99	20	21,44
19	2,78	27	0,99	27	21,46
30	2,87	19	1,01	19	21,86
22	2,93	22	1,05	22	22,76
32	3,40	32	1,16	32	25,09
28	3,55	5	1,17	5	25,24
5	3,63	31	1,18	31	25,50
24	3,63	28	1,25	28	26,98
26	3,71	29	1,27	29	27,57
31	3,75	26	1,31	26	28,34
17	4,15	24	1,35	24	29,22
29	4,39	17	1,55	17	33,49
25	4,94	23	1,67	23	36,08
9	5,14	25	1,76	25	38,21
23	5,36	9	1,83	9	39,70
Aritmetička sredina	2,76		0,98		21,19
Zeleno – najtolerantniji genotipovi					
Žuto – najosjetljiviji genotipovi					

5. RASPRAVA

5.1. Pouzdanost agrometeoroloških podataka obzirom na izvor prikupljanja i vremenski interval meteoroloških elemenata

Validacija podataka o prosječnim dnevnim temperaturama zraka provedena u ovom istraživanju pokazala je vrlo visoku sličnost podataka prikupljenih direktno u pokusu (POK) s podacima iz alternativnih (DHMZ i A4C) izvora. Podaci prikupljeni iz DHMZ-ove baze pokazali su nešto veću pouzdanost od podataka prikupljenih s A4C platforme no u oba slučaja podaci su pokazali visoku podudarnost s POK podacima. Stoga možemo zaključiti da su vrijednosti prosječnih dnevnih temperatura zraka porijeklom iz bilo kojeg od ova tri izvora međusobno vrlo usporedivi, a time i zamjenjivi. U sličnom istraživanju usporedbe dnevnih podataka koje su Behnke i sur. (2016) proveli na području Sjedinjenih Američkih Država došli su do saznanja da se podaci o temperaturi zraka iz motriteljske mreže i alternativnih izvora međusobno vrlo dobro poklapaju. Njihovim istraživanjem utvrđena je jaka međusobna povezanost podataka s koeficijentom korelacije većim od 0,90, što je vrlo slično našim rezultatima. Kada su u pitanju prosječne dekadne vrijednosti srednje dnevne temperature zraka, onda su oni međusobno još sličniji. Podaci o prosječnoj dekadnoj temperaturi zraka podupiru sličnosti proizašle iz usporedbe dnevnih podataka te su njihove međusobne usporedbe pokazale visoku povezanost podataka u svih 12 promatranih okolina kroz 15 promatranih dekada (svibanj – rujan). Uočeno je također da su međusobna odstupanja na šest okolina tijekom 2018. godine bila nešto veća u odnosu na 2017. Svjetska Banka je provela istraživanje kvalitete podataka s alternativnih izvora vezano uz rizike poljoprivredne proizvodnje na području Hondurasa i Gvatemale (World Bank Group, 2013). Istraživanje je pokazalo da su podaci o minimalnoj i maksimalnoj temperaturi zraka visoko usporedivi i prikladni za upotrebu u svrhu karakterizacije klimatskih pojava poput suše i toplinskog stresa. Nadalje, istraživanje koje su proveli Mourtzinis i sur. (2017) na temu procjene kvalitete meteoroloških podataka prikupljenih iz alternativnih baza podataka u obliku rastera za njihovu primjenu u poljoprivredi baš kao i ovo istraživanje ukazuje na značajnu sličnost podataka o temperaturi zraka s pouzdanošću većom od 98%. Temeljem svega navedenog opravdano je koristiti alternativne izvore podataka u vidu DHMZ i A4C baza kao izvor prilikom izračuna vrijednosti indeksa suše i toplinskog stresa koji koriste podatke za dnevne i dekadne vrijednosti temperature zraka. Sukladno udaljenostima POK-a i referentnih meteoroloških postaja DHMZ-a pouzdanost podataka s DHMZ postaja do daljine 30 km u osnovi neće utjecati na variranje vrijednosti indeksa suše i toplinskog stresa. Isti zaključak vrijedi i za podatke prikupljene sa A4C platforme (raster 25×25 km), no valja naglasiti da je u oba slučaja preporučljivo korištenje podataka sa što je moguće bližih

motriteljskih postaja kada je to moguće. Ovo je dodatno provjereno validacijom vrijednosti SDD indeksa proizašlih iz dekadnih vrijednosti temperature zraka sva tri izvora podataka. Naime, koeficijenti korelacije proizašli iz usporedbe vrijednosti SDD indeksa izračunatog iz POK i DHMZ ($r = 0,99 - 1,00$) te POK i A4C ($r = 0,99 - 1,00$) izvora sugeriraju izrazitu pouzdanost vrijednosti indeksa, a time i korištenja podataka bez obzira na izvor.

Uz neznatno niže vrijednosti koeficijenata korelacije, gotovo identični zaključci mogu se donijeti i za podatke o relativnoj vlazi zraka. Dnevne vrijednosti relativne vlage zraka prikupljene izravno u pokusima ovog istraživanja pokazale su statistički značajnu sličnost s podacima prikupljenim iz alternativnih izvora. Za razliku od podataka srednje dnevne temperature zraka gdje su tijekom 2018. godine zabilježena nešto veća odstupanja u odnosu na 2017. godinu, podaci za relativnu vlagu zraka pokazali su suprotan efekt te su zamijećene nešto slabije veze između POK i DHMZ te A4C izvora podataka u 2017. Dekadni vremenski intervali za relativnu vlagu zraka pokazali su još bolju povezanost (sličnost) od onih za dnevne vrijednosti relativne vlage zraka. Statistička pouzdanost korištenja dekadnih podataka zabilježena je u svim okolinama promatranim ovim istraživanjem, pri čemu možemo naglasiti njihovu još izraženiju preciznost tijekom 2017. godine koja se istaknula manjom količinom oborine i većom srednjom dnevnom temperaturom zraka za razliku od 2018. godine. Za razliku od ovog istraživanja u kojem je utvrđena značajna razina pouzdanosti podataka o relativnoj vlazi zraka Mourtzinis i sur. (2017) su u svom istraživanju zapazili znatno slabiju povezanost vrijednosti za relativnu vlagu zraka. Ovako slabu povezanost podataka o vrijednosti relativne vlage zraka pripisuju nemogućnosti direktnog mjerenja ovog meteorološkog elementa na lokaciji motriteljske mreže, te posljedici pada kvalitete računanja njezine vrijednosti iz vrijednosti minimalne, maksimalne temperature zraka i tlaka pare stvarne zasićenosti zraka. Sukladno suprotnim stajalištima ovim istraživanjem provedena je i dodatna validacija vrijednosti relativne vlage zraka kroz usporedbu vrijednosti VPD indeksa. Vrijednosti VPD indeksa računaju se iz vrijednosti minimalne i maksimalne temperature zraka te relativne vlage zraka, stoga je validacija njegovih vrijednosti najpouzdaniji pokazatelj upotrebljivosti alternativnih ulaznih podataka. Validacija vrijednosti VPD indeksa proizašlih iz POK i DHMZ ($r = 0,69 - 0,97$) baš kao i vrijednosti proizašle iz POK i A4C ($r = 0,70 - 0,98$) izvora potvrdile su ranija zapažanja o zadovoljavajućoj pouzdanosti vrijednosti za relativnu vlagu zraka iz alternativnih izvora. Stoga unatoč saznanjima proizašlim iz istraživanja provedenim od strane Mourtzinis i sur. (2017), rezultati ovog istraživanja sugeriraju da su obje alternativne baze (DHMZ i A4C) pouzdan izvor podataka prilikom računanja vrijednosti indeksa suše i toplinskog stresa koji u svojim izrazima koriste vrijednosti relativne vlage zraka. Prihvatljiva udaljenost DHMZ-ovih postaja prilikom korištenja podataka o relativnoj vlazi zraka odgovara

onoj ranije spomenutoj prilikom analize podataka o temperaturi zraka. Unatoč potvrđenoj pouzdanosti preporuča se korištenje podataka sa što je moguće bližih motriteljskih postaja, dok se podaci prikupljeni s A4C platforme trebaju bazirati na rasteru koji odgovara zemljopisnoj duljini i širini provedbe istraživanja.

Validacija sličnosti dnevnih vrijednosti količine oborine pokazala je manju, ali još uvijek statistički značajnu usporedivost podataka preuzetih iz DHMZ baze, no njihova povezanost s POK podacima pokazala se slabijom u odnosu na podatke o srednjoj dnevnoj temperaturi i relativnoj vlazi zraka. Podaci o dnevnoj količini oborine proizašli iz A4C baze pokazali su nedovoljnu usporedivost sa podacima izmjerenim izravno u pokusu (POK). Prilikom usporedbe A4C i POK podataka statistički značajna sličnost podataka zabilježena je u šest od dvanaest promatranih okolina. S druge strane pogleda li se dekadni vremenski interval, alternativni izvori podataka polučili su zadovoljavajuću razinu sličnosti podataka. Validacija provedena između POK i DHMZ izvora pokazala je visoku značajnost sličnosti dekadnih podataka na svim promatranim okolinama osim kod okoline Rugvica 2018, dok je usporedba POK i A4C podataka pokazala njihovu sličnost u svih dvanaest promatranih okolina. Gebrechorkos i sur. (2018) u svom istraživanju provedenom nad usporedbom više izvora meteoroloških podataka za područje istočne Afrike donose saznanja koja potvrđuju rezultate proizašle iz ovog istraživanja. Rezultati ukazuju na vrlo slabu povezanost podataka o dnevnim vrijednostima količine oborine, te također kao i u ovom istraživanju njihova pouzdanost znatno raste ako se podaci koriste u dekadnom vremenskom intervalu (Gebrechorkos i sur., 2018). Pouzdanost podataka na razini dekadnog vremenskog intervala proizašlog ovim istraživanjem zapazili su i Mourtzinis i sur. (2017) prilikom usporedbi serija podataka prikupljenih u motriteljskoj mreži i podataka prikupljenih s dva alternativna izvora u vidu raster točaka. Ranije spomenuto istraživanje Svjetske Banke (World Bank Group, 2013) uključuje i usporedbu podataka o količini oborine. Podaci prikupljeni za područje Hondurasa i Gvatemale uspoređeni su s alternativnim izvorima podataka te su za razliku od ovog istraživanja pokazali izvrsnu pouzdanost ($r = 0,98$; $r = 0,99$; World Bank Group, 2013). Ovdje valja naglasiti da su podaci o količini oborine prikupljeni za Honduras i Gvatemalu ujedno uspoređeni i s rezultatima koje su u istraživanju o dnevnim meteorološkim podacima u Europi proveli Hofstra i sur. (2008). Njihovo istraživanje ustanovilo je nešto slabiju pouzdanost podataka o količini oborine ($r = 0,85$), što prikazuje značajno jaču povezanost podataka o dnevnim količinama oborine za razliku od vrijednosti validiranih ovim istraživanjem. Wang i Wolff (2010) i Cohen Liechti i sur. (2012) su također istraživali mogućnost korištenja podataka o količini oborine prikupljenih direktno u poljskim pokusima. Njihova istraživanja pokazala su da tako prikupljeni podaci nisu pouzdani za primjenu na širem proizvodnom području provedbe pokusa. Mnogo slabija

pouzdanost podataka vidljiva je i iz istraživanja koje su Behnke i sur. (2016) proveli na podacima o dnevnim vrijednostima količina oborine ($r \leq 0,80$) za područje SAD-a, pri čemu naglašavaju da podaci iz alternativnih izvora podataka poput A4C baze uz njihovu pravilniju klasifikaciju i veću dostupnost u budućnosti mogu postati još pouzdaniji i kvalitetniji. Kroz pregled ovih istraživanja kada su u pitanju vrijednosti količine oborine, usprkos pouzdanosti koju nudi statistička analiza provedena nad usporedbom ova tri izvora podataka, njihova slabija međusobna povezanost ipak može ograničiti pouzdanost izračuna indeksa kakav je primjerice scPDSI. Nakon analize provedene nad ulaznim podacima dodatna validacija podataka o vrijednostima količine oborine iz alternativnih izvora provedena je i usporedbom scPDSI indeksa koji kao primarni meteorološki element koristi vrijednosti o količini oborine. Unatoč rezultatima i zaključcima o slabijoj pouzdanosti dnevnih vrijednosti te upitnoj pouzdanosti dekadnih podataka, validacija vrijednosti scPDSI indeksa izračunatih iz dekadnih vrijednosti proizašlih iz POK i DHMZ izvora pokazala je izrazitu pouzdanost ovako korištenih podataka ($r = 0,91 - 1,00$). Pogleda li se pak pouzdanost podataka proizašla iz usporedbe POK i A4C izvora zamjetna je velika heterogenost jačine povezanosti podataka ($r = 0,10 - 0,97$). Ovakva heterogenost može se pripisati nemogućnosti permanentnog bilježenja podataka u razdoblju od 1990. – 1995. godine, kao i rezoluciji rastera A4C baze (25×25 km) budući interpolirane vrijednosti meteoroloških elemenata ovise o prostornoj gustoći (međusobnoj udaljenosti) nepravilne motriteljske mreže koje služe kao izvor podataka. U prilog ovoj tvrdnji ide i istraživanje koje su Škrk i sur. (2021) proveli nad dnevnim podacima za količinu oborine te maksimalne i minimalne temperature zraka za područje Republike Slovenije. Njihovo istraživanje donosi usporedbu stvarnih podataka proizašlih iz nepravilne motriteljske mreže i podataka interpoliranih u pravilnu mrežu točaka visoke rezolucije. Njihovo istraživanje ističe vrlo jaku povezanost stvarnih podataka i podataka interpoliranih u rasteru 1×1 km, pri čemu kao i ovo istraživanje ističe jaču povezanost podataka o temperaturi zraka od podataka o količini oborine. Dolinar (2016) u svom istraživanju usporedbe mjesečnih setova podataka za količinu oborine i temperature zraka donosi slična zapažanja kao i Škrk i sur. (2021). U ovom radu vidljiva je još jača povezanost stvarnih i interpoliranih podataka budući se radi o mjesečnom vremenskom intervalu. Zaključno, A4C daje dovoljno pouzdane podatke o temperaturi i relativnoj vlazi zraka za istraživanje kakvo je primijenjeno u ovom radu (izračun VPD i SDD indeksa). Međutim, vrijednosti količine oborine sa A4C nisu dovoljno usporedive s podacima izmjerenim u samim pokusima pa stoga nisu prikladne za računanje vrijednosti indeksa suše koji se zasnivaju na ovim ulaznim podacima, a kakav je i scPDSI.

5.2. Procjena intenziteta suše i toplinskog stresa scPDSI, VPD i SDD indeksima

Oplemenjivači kroz proces oplemenjivanja primarni fokus stavljaju na fenotipske i genotipske karakteristike kandidata, dok je tipizacija okoline kao treći aspekt oplemenjivačkog procesa bila poprilično zapostavljena. Općenito, kroz presjek dosadašnjih agronomskih istraživanja pregled agrometeoroloških zbivanja u okolini u kojoj se vršila selekcija najčešće se temeljio na prikazu Walterovih klimatskih dijagrama ili njemu sličnih prikaza. Poznato je također da ovaj u poljoprivredi često korišteni prikaz osim uvida u dinamiku mjesečnih temperatura i oborine te uvjetnih sušnih razdoblja, ne daje preciznije pokazatelje o intenzitetu suše i toplinskog stresa. Stoga se ovo istraživanje bavi detaljnijom tipizacijom okoline spram suše i toplinskog stresa koja bi oplemenjivačima trebala dati dublji uvid u agrometeorološke prilike svake pojedine okoline, te posljedično i njezin utjecaj na ekspresiju gena u pogledu tolerantnosti na sušu i toplinski stres. Walterovi klimatski dijagrami proizašli iz agrometeoroloških podataka prikupljenih ovim istraživanjem služe kao početna točka u tipizaciji okoline namijenjene detekciji genotipova tolerantnih na sušu i toplinski stres. Općenito, prema Walterovim klimatskim dijagramima vegetacijska sezona 2017. u istočnom dijelu Hrvatske imala je češće i izraženije epizode suše, dok je 2018. bila relativno povoljna s aspekta oborine. Izraženiji deficit oborine u vegetacijskom periodu tijekom 2017. godine zabilježen je u okolinama Osijek 2017, Beli Manastir 2017, Tovarnik 2017 i Kutjevo 2017. S druge strane Walterovi klimatski dijagrami bilježe povoljan odnos količine oborine i temperature zraka na lokaciji Šašincev tijekom obje godine istraživanja (Šašincev 2017 i Šašincev 2018). U svojoj disertaciji Babić (2014) bilježi sličnu situaciju u pogledu klimatoloških prilika tijekom dvije godine istraživanja provedenih na procjeni stabilnosti kvantitativnih svojstava hibrida kukuruza. Ovo istraživanje donosi dvije klimatološki divergentne godine na lokaciji Osijek, normalnu 2008. i sušnu 2009. godinu. S druge strane lokacija Zagreb pokazala je sličan odnos količine oborine i temperature zraka baš kao i lokacija Šašincev promatrana ovim istraživanjem. Prema trogodišnjim istraživanjima (2016. – 2018.) u kojima su Mandić i sur. (2024) proučavali utjecaj različitih gustoći sjetve na formiranje prinosa kukuruza na području Vojvodine prema Walterovim klimatskim dijagramima početak sušnog razdoblja tijekom 2017. godine zamijećen je u fazi cvatnje kukuruza te je trajao do faze nalijevanja zrna (cijelu vegetaciju). U 2018. godini suša je zamijećena tek u fazi nalijevanja zrna (kolovoz) i trajala je do pune zriobe (rujan). Ovakav sličan trend poklapa se sa zapažanjima ovog istraživanja za lokacije smještene na istoku zemlje.

Nadalje, pogleda li se tipizacija okoline spram scPDSI, VPD i SDD indeksa vidljiva je njihova još jasnija gradacija u pogledu suše i toplinskog stresa. Temeljem scPDSI indeksa u okolini Tovarnik 2017 zabilježena je umjerena suša, dok su okoline Kutjevo 2017, Rugvica 2017, Kutjevo 2018, Osijek 2017 bili zahvaćeni srednje jakom sušom. Sukladno scPDSI skali početak sušnog perioda zabilježen je za okolinu Šašince 2017, a normalnim okolinama smatraju se redom okoline Beli Manastir 2017, Šašince 2018, Osijek 2018, Beli Manastir 2018 i Tovarnik 2018. Okolina Rugvica 2018 se našla na suprotnom djelu scPDSI spektra i prema scPDSI konceptu okarakterizirana je kao lagano vlažna okolina. Valja istaknuti da se uvjeti proizvodnje iz okoline Rugvica 2018 smatraju pogodnima za proizvodnju kukuruza na cijelom proizvodnom području Republike Hrvatske. Pandžić i sur. (2022) u svom istraživanju na temu procjene utjecaja suše na prinos zrna kukuruza u panonskom dijelu Republike Hrvatske donose dekadni prikaz scPDSI vrijednosti temeljem DHMZ podataka. U njihovom istraživanju 2017. godina pokazala se sušnijom u odnosu na 2018. baš kao i u ovom istraživanju gdje su vrijednosti scPDSI indeksa izračunate iz POK podataka. Iako je potvrđena upotrebljivost scPDSI u povezivanju sušnih epizoda i utjecaju na prinos zrna kod kukuruza (Pandžić i sur., 2022), gledajući sva tri istraživana indeksa scPDSI se pokazao najzahtjevnijim u primjeni. U prvom redu, izračun ovog indeksa zahtijeva serije povijesnih podataka i aktualne podatke stavlja u kontekst povijesnih i sušu definira relativno u odnosu na višegodišnji prosjek (lokalnu klimu), a ne stvarne potrebe za vodom kukuruza. Čini se da je ovaj indeks suše više prikladan za šire regionalne analize i dugoročno praćenje učinaka klimatskih promjena (Dai i sur., 2004; Dai, 2011).

Pogleda li se tipizacija okoline temeljem VPD indeksa primjetan je njihov drugačiji redoslijed od vrijednosti scPDSI indeksa, ali u osnovi ovaj indeks, posebno kada su u pitanju ekstremne vrijednosti, slično razdvaja okoline obzirom na stres suše. Kako je i ranije u ovom radu istaknuto radi same naravi indeksa, VPD nema jasnu klasifikaciju kojom bi se konsensualno okoline razdvajale prema razini stresa. Interpretacija klasifikacije okoline temeljem VPD indeksa, zapravo je interpretacija fiziološkog (transpiracijskog) odgovora biljke kukuruza na uvjete iz okoline. Prema istraživanju koje su Gholipooru i sur. (2010) proveli na 34 hibrida kukuruza primijećen je transpiracijski odgovor kod njih 11 s pragom razine VPD indeksa iznad kojeg je brzina transpiracije bila ograničena. Prag VPD indeksa varirao je od 1,7 do 2,5 kPa. Vidljivo je da su najstresnije okoline iz našeg istraživanja na samoj granici ovog praga. Međutim, rezultati nisu potpuno usporedivi jer su korišteni potpuno različiti genotipovi. Može se pretpostaviti da su najstresnije okoline u ovom istraživanju omogućile učinke stresa koji su vodili razlikovanju i selekciji genotipova veće tolerantnosti na sušu. Nadalje, prema istraživanju koje su Millet i sur. (2016) proveli u cjelogenomskoj studiji pridruživanja (GWAS) za prinos kukuruza u Europi u uvjetima sušnog

stresa, veze između QTL učinka i okoline opažaju se pri deficitu tlaka para većem od 3 kPa, dok su učinci bili zanemarivi kod niskih vrijednosti kakvi su zapaženi u okolinama promatranim ovim radom. Međutim, načini izračuna VPD-a u njihovom i našem istraživanju nisu bili potpuno isti. Vrijednosti od 3 kPa odnose se na maksimalne dnevne temperature u kritičnim razdobljima za kukuruz. Naši podaci odnose se na višemjesečni prosjek u funkciji tipizacije vegetacijskog perioda pojedinih okolina. Probni izračuni VPD vrijednosti za pojedine dekade ljetnih mjeseci (srpanj i kolovoz) ukazuju na znatno više vrijednosti ovog indeksa u tim vremenskim intervalima, ali ovi podaci na kraju nisu korišteni u rangiranju okolina po razini stresa. Ovo potvrđuju rezultati Galić i sur. (2019). Slična zapažanje u svom istraživanju s dva roka sjetve kukuruza i dvije razine VPD indeksa donose i Choudhary i sur. (2019). Oni u svom istraživanju također dolaze do saznanja da se smanjena stopa transpiracije očekuje nakon što vrijednost VPD indeksa dosegne 3 kPa.

U ovom istraživanju najekstremnijim okolinama u pogledu toplinskog stresa temeljem SDD indeksa mogu se smatrati okoline Tovarnik 2017 i Kutjevo 2017, u kojima su ujedno ostvareni najmanji prosječni prinosi u ovom istraživanju. Izraženijim toplinskim stresom još su bile zahvaćene i okoline Beli Manastir 2017 i Osijek 2017, dok se okoline Tovarnik 2018, Beli Manastir 2018, Šašincevec 2017 i Rugvica 2017 mogu smatrati okolinama s manjim rizikom spram stresa izazvanog toplinom. Okolinama pogodnim u pogledu toplinskog stresa procijenjenog SDD indeksom smatraju se okoline Šašincevec 2018, Kutjevo 2018, Osijek 2018 (ostvaren najveći prosječni prinos) i Rugvica 2018 (normalna okolina). Slične rezultate iznose i Stepinac i sur. (2021) prilikom tipizacije okolina SDD indeksom izračunatim iz 20 godišnjeg razdoblja temeljem A4C izvora u istraživanju koje je provedeno na temu modeliranja utjecaja toplinskog stresa na prinos kukuruza. Tipizacija okolina promatranih u ovom istraživanju (Rugvica, Kutjevo i Osijek) pokazala je izražen utjecaj toplinskog stresa tijekom 2017. godine, dok su tijekom 2018. godine zabilježeni pogodni klimatski uvjeti (nije bilo stresa izazvanog toplinom) na sve tri lokacije istraživanja. Buhiniček i sur. (2021) u istraživanju na temu prinosa kukuruza kroz pet skupina zriobe donose tipizaciju okoline temeljem SDD indeksa za lokacije Zagreb i Osijek u razdoblju od 1961. – 2016. godine. Iz ovog istraživanja izraženiji toplinski stres vidljiv je na istoku (Osijek) u odnosu na zapad (Zagreb) zemlje, te značajnije utječe na hibride ranije skupine zriobe. Također je zamjetan i sveobuhvatni trend rasta toplinskog stresa kroz promatrano razdoblje na cijelom proizvodnom području Republike Hrvatske. S druge strane u istraživanju utjecaja okoline karakterizirane SDD indeksom koje su Zorić i sur. (2022) proveli na prinosu zrna u VCU pokusima, koeficijent regresije prinosa i SDD indeksa za tri promatrane skupine zriobe nije se pokazao značajnim. Nadalje ovim istraživanjem kroz sva tri indeksa suše i toplinskog stresa okoline Tovarnik 2017, Kutjevo 2017 i Osijek 2017 detektirane su kao sušne, pri

čemu su Tovarnik 2017 i Kutjevo 2017 za sva tri indeksa imale ekstremne vrijednosti. S druge strane, temeljem vrijednosti tri analizirana indeksa, okoline Šašincev 2018, Osijek 2018 i Rugvica 2018 mogu se smatrati „pozitivno ekstremnim“, tj. vrijednosti indeksa su najviše s druge strane raspona i ne upućuju na stanje stresa te mogu služiti za procjenu agronomskih svojstava u pogodnim (normalnim) uvjetima. Prema Lobellu i sur. (2013) temperature zraka iznad 30°C uslijed smanjenja vlage u zraku i zahtjeva za povećanom evapotranspiracijom imaju značajniju ulogu od same suše. Ovakva opažanja potvrđuje i istraživanje koje su Tian i sur. (2018) proveli na temu ublažavanja stresa prouzročenog toplinom i hladnoćom. Oni u svom radu donose saznanja da temperature iznad 31,8°C u fazi pet dana prije i nakon svilanja značajno doprinose smanjenju prinosa kukuruza te sugeriraju njihovo izbjegavanje adaptacijom vremena sjetve. Slična saznanja u istraživanju utjecaja toplinskog stresa na prinos kukuruza za područje SAD-a donose i Zhu i sur. (2019). Njihovo istraživanje donosi saznanja da je redukcija prinosa u većoj mjeri prouzročena utjecajem toplinskog stresa za razliku od neizravnog stresa prouzročenog manjkom vode, te sugeriraju prilagodbu proizvodnje izbjegavanjem visokih temperatura u fazi formiranja zrna.

Kako bi upotpunili mogućnost tipizacije okoline temeljem ova tri indeksa ovim istraživanjem provedena je i analiza njihove međusobne povezanosti temeljem Pearsonovog koeficijenta korelacije. Validacije vrijednosti VPD i SDD indeksa pokazale su vrlo dobru međusobnu povezanost, stoga je uz pomoć jednog od njih moguće interpretirati uvjete okoline koji bi se također očitovali izračunom drugog. Slično zapažanje u svom istraživanju na temu prinosa kukuruza kroz pet skupina zriobe donose i Buhiniček i sur. (2021). Prema analizama provedenim u njihovom istraživanju utjecaj toplinskog stresa izražen visokim vrijednostima SDD indeksa također je vrlo dobro povezan s porastom vrijednosti VPD indeksa ($r = 0,85$). Sukladno ovom istraživanju tipizaciju okoline za detekciju genotipova tolerantnih na sušu i toplinski stres uslijed pouzdanosti podataka kao i praktičnosti izračuna njihovih vrijednosti moguće je procijeniti iz VPD ili SDD indeksa. S druge strane, valja naglasiti da vrijednosti scPDSI indeksa ne slijede vrijednosti VPD i SDD indeksa, pa se čini da oni mjere okolinski stres na različite načine i time međusobno nisu usporedivi.

5.3. Analiza varijance agronomskih svojstava, raščlamba G×E interakcije i AMMI analiza

Ovo istraživanje je provedbom skupne trofaktorske analize varijance pokazalo da su vrijednosti ASI-a značajan izvor variranja za učinke – L, G, Y×L i G×Y×L. Vlaga zrna i visina biljaka bili su značajan izvor variranja za sve učinke osim G×L, dok su masa tisuću zrna i masa zrna na klipu bile značajne za sve učinke (Y, G, Y×L, G×Y, G×L i G×Y×L) osim za L.

Vrijednosti prinosa zrna pokazale su se značajne za sve analizirane učinke osim L i $G \times L$. Meseka i sur. (2018) u istraživanju o procjeni sposobnosti hibrida tolerantnih na sušu i toplinski stres prilikom provedbe kombinirane analize varijance zapažaju statistički značajno variranje u vrijednostima za ASI, visinu biljke i prinos zrna kroz Y. Variranje je ustanovljeno i za G uključene u istraživanje kao i za $G \times Y$ interakcije. Balbaa i sur. (2022) u istraživanju svojstava vezanih uz prinos na linijama kukuruza u normalnim i sušnim okolinama prilikom provedbe analize varijance utvrdili su značajnost variranja G, Y te njihove interakcije $G \times Y$ za većinu promatranih svojstava među kojima su i visina biljke, masa 100 zrna i prinos zrna.

Daljnja složena dvofaktorska analiza varijance pokazala je da su učinci E i G kao i njihova $G \times E$ interakcija bili značajan izvor variranja za sva svojstva promatrana ovim istraživanjem. Prilikom analize udjela variranja kroz šest promatranih lokacija s uključenih 32 genotipa kukuruza okolina se pokazala kao primarni izvor variranja za sva svojstva promatrana ovim istraživanjem. Učinak genotipa za razliku od $G \times E$ interakcije prouzročio je veći udio variranja kod vlage zrna, visine biljke, mase tisuću zrna i mase zrna na klipu, dok je $G \times E$ interakcija odgovorna za veće udjele variranja kod ASI-a i prinosa zrna. Musvosvi i sur. (2018) u svom istraživanju na tropskoj germplazmi u sušnim i normalnim okolinama prilikom provedbe analize varijance zapažaju statistički značajna variranja za sve glavne izvore variranja (G, E i $G \times E$ interakcija) na svojstva koja su proučavana i ovim istraživanjem ASI, visinu biljke, masu zrna na klipu, masu 100 zrna i prinos zrna. Njihovo istraživanje je također okolinu označilo kao primarni izvor variranja za sva svojstva, pri čemu je i visina biljke također primarno pod utjecajem učinaka iz okoline. Učinak genotipa za razliku od $G \times E$ interakcije prouzročio je veći udio variranja kod svih promatranih svojstava. Ndhlela i sur. (2014) u istraživanju na temu utjecaja $G \times E$ interakcija na prinos genotipa kukuruza prema AMMI biplotu prilikom provedbe kombinirane analize varijance za 14 promatranih okolina zapažaju da je najveći udio ukupnog variranja u prinosu pripao E, dok je variranje proizašlo iz učinaka $G \times E$ interakcije zauzelo veći udio u odnosu na one proizašle iz učinaka G. Yue i sur. (2022) kao i Ndhlela i sur. (2014) u istraživanju utjecaja $G \times E$ interakcija na svojstva kukuruza provedbom kombinirane ANOVA-e ustanovili su statističku značajnost utjecaja E, G i $G \times E$ interakcije na prinos zrna. Najveći udio ukupnog variranja proizašao je također iz E, dok je variranje proizašlo iz učinaka $G \times E$ interakcije zauzelo veći udio u odnosu na one proizašle iz učinaka G.

Provedbom analize varijance utvrđeno je da je variranje proizašlo iz učinka okoline i genotipa nedvojbeno odgovorno za jedan veliki dio formiranja i produkcije prinosa. Također ovo istraživanje kroz AMMI analizu pozabavilo se i onim dijelom variranja koji je pod utjecajem njihove interakcije. $G \times E$ interakcija interpretirana je s 11 glavnih komponenti pri

čemu prve dvije komponente objašnjavaju 54,10% interakcija G×E. Bogale i sur. (2008) u svom istraživanju pokazuju da su svi glavni izvori variranja (E, G i G×E interakcija) bili statistički značajni. Najveći udio variranja u sumi kvadrata (SS) baš kao i u ovom istraživanju otpada na okolinu. Za razliku od ovog istraživanja gdje je udio variranja genotipa i G×E interakcija podjednak u istraživanju koje su proveli Bogale i sur. (2008) udio variranja genotipa je približno pet puta manji od udjela za G×E interakciju. U njihovom istraživanju prve dvije glavne komponente objašnjavaju 56,00% sume kvadrata interakcije G×E. Nzuve i sur. (2013) prilikom istraživanja analize G×E interakcija za prinos zrna kukuruza kao i Bogale i sur. (2008) potvrđuju statističku značajnost svih glavnih izvora variranja. Njihovo istraživanje također potvrđuje da je prinos zrna najviše pod utjecajem okoline. Za razliku od ovog istraživanja gdje su genotipski i interakcijski G×E učinci bili podjednaki, istraživanje koje su proveli Nzuve i sur. (2013) pokazalo je dvostruko veću važnost genotipskih učinaka od učinaka proizašlih iz G×E interakcije. Istraživanje koje su proveli Ndhlela i sur. (2014) donosi iste zaključke glede udjela okoline u ukupnoj sumi kvadrata, koja zauzima najveći udio. Suprotno ovom istraživanju gdje je udio variranja genotipa i G×E interakcija podjednako zastupljen, Ndhlela i sur. (2014) iznose da je udio variranja koji otpada na utjecaj genotipa dvostruko manji od utjecaja G×E interakcije. S druge strane, Singamsetti i sur. (2021) u istraživanju utjecaja G×E interakcija prilikom selekcije genotipova kukuruza u vlažnim uvjetima okoline zapažaju prilično slične odnose u udjelima variranja glavnih učinaka (E, G i G×E interakcija) kao i prethodno navedeni autori. U njihovom istraživanju IPCA1 objašnjava 41,60%, a IPCA2 18,20% interakcija G×E u sumi kvadrata (SS), što se u znatnoj mjeri podudara s rezultatima proizašlim iz ovog istraživanja (IPCA1 = 36,10%, IPCA2 = 18,00%). AMMI2 biplot proizašao iz rezultata ovog istraživanja općenito ukazuje da su genotipovi ranijih skupina zriobe (FAO300 i FAO400) specifično adaptabilniji prema sušnim i slabije prinostnim okolinama (okoline smještene u II. i III. Kvadrant) što ujedno može ukazivati da su ovi genotipovi ranijih skupina zriobe pokazali značajnu varijabilnost kroz okoline. S druge strane genotipovi kasnijih skupina zriobe (FAO500 i FAO600) su se pokazali kao široko adaptabilni genotipovi. Grupirani oko ishodišta biplota te oni u njegovom I. i IV. kvadrantu pokazuju pogodnost za uzgoj u visokoprinostnim normalnim i vlažnim okolinama. Bogale i sur. (2008) ističu veliku varijabilnost kroz promatrane okoline prikazane AMMI2 biplotom, te sukladno ovom istraživanju u I. i IV. kvadrantu detektiraju visokoprinostne okoline. Njihovo istraživanje niskoprinostne okoline također svrstava u II. i III. kvadrant, te ih obilježava niski prosječni prinos i veliki interakcijski učinci pojedinih genotipova.

5.4. Detekcija tolerantnosti modeliranjem i tipizacijom ekofizioloških procesa ciljanih okolina

Različiti statistički modeli u ovoj disertaciji (trofaktorska i dvofaktorska ANOVA i AMMI analiza) imali su svrhu pokazati različitu strukturu interakcije G×E i ukazivati na njezinu složenost raščlanjujući ju na različite izvore variranja. Međutim, ovi modeli ograničeni su samo na realizirana agronomska svojstva ne uzimajući stvarnovremenske agroekološke, često stresne činitelje koje su dovele do formiranja vrijednosti pojedinog svojstva, pogotovo prinosa. Iako postoji cijeli niz statističkih modela koji uključuju ekološke kovarijable za procjenu prinosa u dužem vremenskom razdoblju (Bönecke i sur., 2020), procesnim modeliranjem (modelom rasta usjeva) moguć je drugačiji pristup i matematički procijeniti fenološke faze genotipova određene FAO skupine i odrediti u kakvoj su interakciji s meteorološkim podacima. Od presudne važnosti za ovakve dinamičke modele su sume toplinskih jedinica (*growing degree units – growing degree days*) koje su povezane sa SDD (Buhiniček i sur., 2021). Procesnim modeliranjem moguće je odrediti razlike među genotipovima različitih skupina zriobe budući da su FAO skupine povezane sa sumom GDD (Dwyer i sur., 1999). U konačnici, korištenjem dugoročnih meteoroloških podataka moguće je procesnim modeliranjem napraviti tipizaciju ciljanih okolina, (odnosno lokacija) i cijelim spektrom različitih scenarija poboljšane agrotehnike u interakciji G×E×M pokazati pun potencijal pojedine lokacije unatoč klimatskim promjenama.

APSIM kao model rasta usjeva korišten je mahom za analizu proizvodnje ratarskih kultura u zemljama u razvoju (Keating, 2024) i to uglavnom za procjenu i preporuku poboljšavanja agrotehničkih postupaka. Međutim, Archontoulis i sur. (2014) daju pregled istraživanja koje koriste različite module APSIM-a u visokorazvijenoj proizvodnji kukuruza na Srednjem Zapadu Sjedinjenih Država. Autori zaključuju da se APSIM pokazao kao vrlo pouzdan alat za istraživanja i donošenje odluka o poboljšavanju sustava ratarske proizvodnje na Srednjem Zapadu. U Hrvatskoj, istraživanja provedena pomoću APSIM-a vrlo su ograničena (Buhiniček i sur., 2021; Stepinac i sur., 2021; Zorić i sur., 2022) i manjim se dijelom poklapaju s podacima u ovoj disertaciji. Rezultati validacije APSIM-om procijenjenih vrijednosti prinosa prikazanih u ovoj disertaciji ukazuju na točnije procjene u odnosu na one prikazane kod Stepinac i sur. (2021) i Buhiniček i sur. (2021), jer je ovdje korišten kalibrirani model gdje su uzeti stvarni podaci o tlu i stvarnim genotipovima različitih FAO skupina preračunatih u GDD jedinice. Pored nekalibriranih modela, Stepinac i sur. (2021), Buhiniček i sur. (2021) i Zorić i sur. (2022) nisu izvršili statističku validaciju modela korištenjem RMSE mjerila. Iako je RMSE bio samo 0,02 t/ha, procesno modeliranje može biti još točnije i preciznije na što ukazuju slabiji rezultati simulacija za lokacije Šašincevec i Osijek. Pasley i

sur. (2023) zaključuju da procesno modeliranje zapravo nikad nije dovršeno do kraja jer integriranjem kvalitetnijih meteoroloških i agronomskih podataka, kao i beskonačnim variranjem parametara, simulacije i procjene uvijek mogu biti točnije i preciznije.

Rezultati dugoročnih APSIM simulacija ukazuju da je na ciljanim lokacijama na zapadu Hrvatske općenito stagnacija prinosa neovisno o FAO skupini. U Kutjevu je uočeno blago povećanje prinosa kroz sve četiri FAO skupine, dok su istočne lokacije imale nešto veće povećanje prinosa. Ovi rezultati ukazuju da pun potencijal istočnih lokacija nije još dostignut unatoč klimatskim promjenama iako su potencijali pojedinih lokacija uvjetovani i drugim parametrima (Abendroth i sur. 2021). Međutim, nisu uočene jasne razlike u obrascu povećanja prinosa između pojedinih skupina zriobe, te općenito se ne može pojedina FAO skupina deklarirati kao bolja u odnosu na druge, iako je za očekivati da u okolnostima globalnog zatopljenja kasnije FAO skupine mogu bolje iskoristiti brže nakupljanje toplinskih jedinica. Stoga se zaključak na osnovi rezultata u ovoj disertaciji podudara sa zaključkom Abendrotha i sur. (2021) da uporaba kasnijih skupina zriobe nije nužno jedina adaptacijska strategija proizvodnje kukuruza u uvjetima sve jačih klimatskih promjena.

5.5. Implementacija tipizacije okoline u klasični oplemenjivački postupak detekcije genotipova kukuruza tolerantnih na sušu i toplinski stres

Bilo bi korisno prilikom procjene prinosa zrna imati spoznaju o intenzitetu i trajanju sušnih epizoda procijenjenih učinkovitim indeksom suše. Prosječne vrijednosti prinosa zrna pokazale su povezanost ovog svojstva u odnosu na gradijent okoline i ključne su za detekciju germplazme tolerantne na sušu i toplinski stres. Okoline Kutjevo 2017 i Tovarnik 2017 zabilježile su najniži prosječni prinos te su ujedno kroz sva tri indeksa tipizirane kao najstresnije okoline, dok su Osijek 2018, Šašincevec 2018 i Rugvica 2018 imale najmanju razinu stresa. Najbolja povezanost (R^2) utjecaja razine stresa na prinos zrna proizašla je iz okolina tipiziranih VPD i SDD indeksima. Meseka i sur. (2018) u istraživanju o procjeni sposobnosti hibrida tolerantnih na sušu i toplinski stres izvještavaju o značajnoj statističkoj razlici prinosa zrna ostvarenog u normalnim i sušnim okolinama.

Kroz analize provedene ovim istraživanjem masa zrna na klipu također je pokazala značajnu povezanost s gradijentom okoline te bilježi niže prosječne vrijednosti u sušnim za razliku od normalnih okolina gdje su one bile najviše. Visina biljke je treće svojstvo koje je u ovom istraživanju polučilo značajnu povezanost s gradijentom okoline. Najniže prosječne vrijednosti ovog svojstva zabilježene su u okolinama koje su ovim istraživanjem tipizirane kao najstresnije, dok su najviše vrijednosti zabilježene u dvije (Rugvica 2018 i Šašincevec

2018) od tri normalne okoline. Hajibabae i sur. (2012) u istraživanju utjecaja suše na agronomska svojstva opažaju povezanost utjecaja suše na redukciju visine biljke. Nadalje Ali i sur. (2017) prilikom istraživanja fenotipske stabilnosti prinosa kukuruza i njegovih sekundarnih svojstava dolaze do saznanja da je visina biljke značajno povezana s prinosom zrna po biljci u sušnim uvjetima. Sukladno rezultatima svoga rada sugeriraju da bi svojstva poput visine biljke trebala biti uključena u oplemenjivačke programe kako bi se razvili tolerantni hibridi. Balbaa i sur. (2022) u svom istraživanju na temu detekcije morfo-fizioloških svojstava vezanih uz prinos na linijama kukuruza u normalnim i sušnim okolinama također iznose saznanja o značajnoj redukciji visine biljke u sušnim za razliku od normalnih okolina. Slična zapažanja donose i Musvosvi i sur. (2018) u svom radu na temu doprinosa sekundarnih svojstava na visok prinos kukuruza i stabilnost tropske germplazme u sušnim i normalnim okolinama. Oni naglašavaju važnost mase zrna na klipu u kasnijim fazama oplemenjivačkog procesa okrenutog detekciji genotipova tolerantnih na sušu kada je potrebno identificirati stabilne i visokoprinosne genotipove. Yue i sur. (2022) u istraživanju provedenom nad utjecajem G×E interakcija na svojstva kukuruza također su utvrdili povezanost mase zrna na klipu i prinosa.

Iznenadujuće, vrijednosti ASI nisu pokazivale značajniju povezanost s gradijentom okoline, baš kao i nekonzistentne vrijednosti za masu tisuću zrna. Masa tisuću zrna pokazala je povezanost s jačinom stresa tipiziranom temeljem VPD i SDD indeksa, dok to nije bio slučaj sa vrijednostima scPDSI indeksa. Vlaga kao agronomsko svojstvo indikator je stupnja zriobe, ali i ranozrelosti pojedinog genotipa ili skupine genotipova objedinjenih u skupine zriobe. Iako je logično očekivati da vlaga zrna ovisi o suši i toplinskim stresovima kao što je to slučaj u istraživanjima Buhiničeka i sur. (2021) i Donga i sur. (2021), gdje su se genotipovi ranijih skupina pokazali osjetljivijima od onih smještenih u kasnije skupine zriobe. Izostanak povezanosti ovog svojstva s utvrđenim različitim razinama stresa na promatranim okolinama u ovom istraživanju mogao bi ponajprije biti posljedica praktične naravi, kao što je određivanje termina berbe. Na različitim lokacijama termin berbe određen je temeljem procjene općeg izgleda usjeva ili raspoloživosti strojeva i osoblja za berbu, a ne rezultat iste duljine vegetacije na svakoj lokaciji.

Za razliku od ovog istraživanja Meseka i sur. (2018) u svom istraživanju zapažaju značajnu negativnu povezanost vrijednosti za ASI s prinosom zrna samo u sušnim okolinama no ne i u okolinama gdje je stres prouzročen toplinom. Singamsetti i sur. (2021) u istraživanju utjecaja G×E interakcija prilikom selekcije genotipova kukuruza u vlažnim uvjetima okoline zapažaju da visoke vrijednosti za ASI kao i niske prosječne vrijednosti visine biljke u stresnim za razliku od normalnih okolina rezultiraju malim prinosom zrna. Musvosvi i sur. (2018) u ranije spomenutom istraživanju na tropskoj germplazmi prilikom kreiranja modela

kao dodatno svojstvo detekcije germplazme tolerantne na sušu uz prinos zrna po biljci, visinu biljke i masu zrna na klipu u model uključuju i masu 100 zrna. Balbaa i sur. (2022) u istraživanju svojstava vezanih uz prinos na linijama kukuruza u normalnim i sušnim okolinama baš kao i Musvosvi i sur. (2018) naglašavaju i značaj povezanosti mase 100 zrna s visokim prinosom, ali samo u normalnim okolinama.

Međutim, uz sva navedena zapažanja i zaključke na umu svakako treba imati da ukupni učinak okoline, pored prosječne vrijednosti indeksa suše ili toplinskog stresa podrazumijeva i samu dinamiku stresa (vrijeme pojave), kao i druge čimbenike poput plodnosti i strukture tla. Zaključno se može konstatirati da VPD i SDD indeksi dosta uspješno razdvajaju okoline prema razini stresa, tj. reakcija genotipova to pokazuje padajućim vrijednostima važnih agronomskih svojstava. Stoga ovakav pristup u oplemenjivanju na tolerantnost na sušu može biti koristan.

Ovim istraživanjem provedena je detekcija tolerantnosti genotipova analizom razlika u prinosu zrna u stresnim (sušnim) i normalnim okolinama. Istraživanjem je također utvrđena i međusobna udaljenost svakog pojedinog genotipa sukladno njihovoj osjetljivosti spram okolinskih učinaka proizašlih iz sušnih i normalnih okolina. Osnova detekcije tolerantnosti ogleda se u varijabilnosti genotipova promatranih istraživanjem i okoline u kojima se oni testiraju. Provedba složene dvofaktorske ANOVA-e potvrdila je variranje okoline i genotipova uz značajnost ($p \leq 0,01$) razlika između svih glavnih izvora variranja, okolina (E), genotip (G) te njihove G×E interakcije za sva promatrana svojstva u pokusu te time omogućila detekciju putem indeksa tolerantnosti. Za razliku od ovog istraživanja analiza varijance koju su Moradi i sur. (2012) proveli u istraživanju na temu evaluacije indeksa tolerantnosti na genotipovima kukuruza pokazuje varijabilnost genotipova temeljem prinosa samo u stresnoj okolini, dok ona nije bila statistički značajna u normalnoj (navodnjavanoj) okolini. Bonea (2020) koristila je slične indekse tolerantnosti u istraživanju prinosa i indeksa tolerantnosti na šest genotipova kukuruza i došla do sličnih zaključaka kao u našem istraživanju. Zaključila je da ni jedan hibrid nije bio superioran i u stresnim i u nestresnim uvjetima. Ustanovila je dvije grupe indeksa koje na različite načine razdvajaju genotipove kao tolerantne ili netolerantne. Jedan od istraživanih hibrida (P9003) koji je korišten i u našem istraživanju (šifra 5) izdvojen je kao potencijalno tolerantan na sušu, a što se podudara s našim rezultatima. Slične zaključke prilikom testiranja lokalnih i stranih hibrida na toplinski stres za područje Pakistana donose i Rahman i sur. (2022) koji su ustanovili značajnu varijabilnost razlika u prinosu između genotipova i okoline.

Detekcija tolerantnosti provedena je temeljem sedam indeksa koji se u praksi i prema dostupnoj literaturi koriste u selekciji na tolerantnost prema suši i toplinskom stresu. Grupa indeksa GMP, STI, MP i HARM pokazuju međusobnu sličnost, tj. detektiraju i rangiraju genotipove po svojim vrijednostima na vrlo sličan način. U slučaju ove grupe, uočava se povezanost njihovih vrijednosti s prinosima zrna u stresnim i normalnim okolinama. U osnovi, visoke vrijednosti ovih indeksa proizlaze iz iznadprosječne izvedbe pojedinih hibrida i u stresnim i u nestresnim okolinama. S druge strane TOL, SSI i RDY indeksi su pokazali slabiju povezanost s prinosom zrna ostvarenim u stresnim i normalnim okolinama, ali njima se otkrivaju genotipovi koji pokazuju relativno male razlike u prinosu zrna u kontrastnim okolinama što sugerira određenu stabilnost u okviru različitih okolina. Ranije je spomenuto da i u ovom, a i u nekoliko drugih istraživanja nisu otkriveni genotipovi koji bi bili superiorni u prinosu u bilo kojoj okolini.

Genotipovi koji su pokazali značajan pad prinosa u stresnim uvjetima, i dalje se mogu smatrati prikladnima za uzgoj u normalnim i visoko intenzivnim proizvodnim uvjetima. Sukladno rezultatima dobivenim u ovom istraživanju, istraživanje koje su Farshadfar i sur. (2013) proveli na temu procjene otpornosti sorata pšenice na sušu, tolerantnim sortama smatraju se također sorte koje su ostvarile najveće vrijednosti GMP, STI, MP i HARM indeksa. Khalili i sur. (2012) u istraživanju tolerantnosti sorata jare uljane repice temeljem GMP, MP i STI indeksa tolerantnima smatraju one kultivare koji su ostvarili najveće vrijednosti indeksa tolerantnosti, dok preostale genotipove dijele na stabilne (zadržavaju sličan prinos u kontrastnim okolinama) i osjetljive sukladno niskim vrijednostima indeksa. Moradi i sur. (2012) su u istraživanju na temu evaluacije indeksa tolerantnosti na genotipovima kukuruza dobili slične odnose vrijednosti GMP, STI, MP, HARM i TOL indeksa sukladno ovom istraživanju, te ih smatraju najprikladnijima za detekciju tolerantnih genotipova. Slične sugestije proizlaze i iz istraživanja koje su na kukuruzu proveli Zhao i sur. (2019) prilikom evaluacije indeksa za detekciju prinosa u okolinama s niskom razinom dušika. Oni su GMP, STI, MP, HARM indekse također označili kao najprikladnije prilikom detekcije genotipova tolerantnih na nisku razinu dušika. Nadalje, istraživanje koje su Rahman i sur. (2022) proveli na 9 genotipova kukuruza također donosi zaključak da su se GMP, STI, MP i HARM indeksi pokazali kao najbolji prilikom analize prinosa u stresnim i normalnim okolinama, za razliku od SSI i TOL indeksa koji su kao i u ovom istraživanju pokazali slabiju povezanost. Za razliku od ovog istraživanja gdje RDY indeks tolerantnosti nije pokazao povezanost s prinosom u obje okoline, Shahrokhi i sur. (2020) u istraživanju na temu evaluacije indeksa tolerantnosti za testiranje inbred linija kukuruza šećerca uz ranije navedene indekse i RDY indeks također smatraju prikladnim za detekciju tolerantnosti.

Indeksi suše poput VPD-a i SDD-a dobar su alat za procjenu sušnog i toplinskog stresa, a potrebni podaci za izračun su lako dostupni i besplatni. Uz pomoć istih podataka moguće je kreirati povijesne nizove vrijednosti indeksa i uz pomoć njih procjenjivati razinu stresa pojedinih godina u kontekstu dužih vremenskih perioda. Unutar seta od 32 ispitivana hibrida utvrđena je genetska varijabilnost (različita reakcija) na sušu i toplinski stres. Ovako provedena tipizacija te varijabilnost populacije sugerira mogućnost procjene tolerantnosti hibrida na sušu tijekom postupka odabira kandidata u eksperimentalnoj fazi testiranja te kasnije u vrijeme postupka priznavanja (VCU testiranje) od strane službenih državnih tijela. Dodatno, tipizacijom okoline stječu se potrebna znanja i informacije za kasnije širenje hibrida u proizvodnji. Sličan pristup primjenjiv je i u postupku razvoja i testiranja inbred linija te njihovo širenje u sjemenskoj proizvodnji kukuruza.

Svakako valja naglasiti, unatoč navedenim zapažanjima i zaključcima o tipizaciji okoline temeljene na indeksima suše i toplinskog stresa, za ukupan učinak proizašao iz okoline na umu treba imati i agroekološki učinak tla koji ovim istraživanjem nije detaljno obrađen. Agroekološki aspekt u pogledu značajki tla (plodnost, fizikalna i kemijska struktura), kao i učinci tehnologije uzgoja, svakako trebaju biti uključeni kao sastavni dio učinaka proizašlih iz okoline u kojoj se vrši detekcija hibrida tolerantnih na sušu i toplinski stres.

6. ZAKLJUČCI

1. Validacija podataka o prosječnim dnevnim temperaturama i relativnoj vlazi zraka pokazala je vrlo visoku sličnost podataka prikupljenih direktno u pokusu (POK) s podacima iz alternativnih (DHMZ i A4C) izvora. Podaci prikupljeni iz DHMZ-ove baze pokazali su nešto veću pouzdanost od podataka prikupljenih s A4C platforme no u oba slučaja podaci su pokazali statistički značajno podudaranje s POK podacima. Stoga se ovi podaci mogu koristiti za izračun indeksa okolinskih stresova koji zahtijevaju ove meteorološke elemente. Vrijednosti količine oborine imale su slabiju međusobnu povezanost, posebno na razini dnevnih vrijednosti, a što može ograničiti pouzdanost izračuna indeksa kakav je primjerice scPDSI. Stoga u izračunu indeksa suše koji zahtijevaju količinu oborine uputno je osigurati mjerenje izravno na lokaciji provedbe pokusa.

2. Analiza varijance za utjecaj genotipa izračunata pojedinačno za svaku okolinu pokazala je statističku značajnost F-testa na razini $p \leq 0,05$ za svih šest proučavanih agronomskih svojstava, osim za ASI u okolini Šašincev 2018. Veće vrijednosti intervala između polinacije i svilanja (ASI), te niže vrijednosti visine biljaka na istoku (Beli Manastir, Kutjevo, Osijek i Tovarnik) za razliku od zapada zemlje (Rugvica i Šašincev), kao i značajno smanjenje mase zrna na klipju i prinosa sugerira da su istočne lokacije tijekom 2017. godine pretrpjele stres prouzročen sušom i visokim temperaturama, dok to nije bio slučaj za lokacije smještene na zapadu zemlje. Ovakvu distribuciju suše potvrđuju i u određenoj mjeri kvantificiraju vrijednosti korištenih indeksa suše i toplinskog stresa.

3. AMMI analizom utvrđen je statistički značajan učinak svih glavnih izvora na variranje prinosa, pri čemu je okolina (E) imala najveći učinak, a znatno manji genotip (G) i interakcija $G \times E$. AMMI2 biplot ukazao je na nestabilnost okolina i značajan interakcijski doprinos genotipova FAO skupine 300. Genotipovi FAO skupine 400 pokazali su se široko adaptabilni, pri čemu treba istaknuti genotipove 9, 11 i 16 koji su se pokazali specifično adaptabilni spram tri različite okoline i pritom pokazali značajan doprinos interakcijskim učincima. Genotipovi FAO skupine 500, a napose genotipovi FAO skupine 600 pokazali su potencijal prinosa zrna u uvjetima proizvodnje kukuruza kakvi su bili u 2018. godini.

4. Korištenjem procesnog modeliranja temeljenog na dugoročnim meteorološkim podacima moguće je napraviti tipizaciju ciljanih okolina, (odnosno lokacija) i s cijelim spektrom različitih scenarija poboljšane agrotehnike u interakciji $G \times E \times M$ pokazati pun potencijal pojedine lokacije unatoč klimatskim promjenama. Rezultati dugoročnih APSIM simulacija pokazale su da je na ciljanim lokacijama na zapadu Hrvatske prisutna stagnacija prinosa neovisno o FAO skupini, dok su istočne lokacije imale trend određenog povećanja prinosa. Međutim, nije uočen jasan obrazac povećanja prinosa između pojedinih skupina

zriobe unatoč većem potencijalu prikupljanja toplinskih jedinica kod genotipova smještenih u kasnije skupine zriobe.

5. Povezanost analiziranih agronomskih svojstava i jačine stresa bila je jača kada je okolinski stres procjenjivan VPD i SDD indeksom nego u slučaju korištenja scPDSI indeksa. Ova povezanost je bila najjača za masu tisuću zrna, umjerena za masu zrna na klipcu, prinos zrna i visinu biljke, dok vrijednosti za ASI i vlagu zrna nisu pokazivale značajniju povezanost s gradijentom okoline.

6. Analizom tolerantnosti na sušu primjenom indeksa tolerantnosti na bazi visine i redukcije prinosa zrna kroz kontrastne okoline može se zaključiti da dvije grupe korištenih indeksa različito rangiraju genotipove spram tolerantnosti na sušu i toplinski stres. Prema prvoj grupi indeksa (GMP, STI, MP i HARM) kao tolerantni izdvojeni su genotipovi 29, 30 i 31, dok su prema drugoj grupi indeksa (TOL, SSI, RDY) kao tolerantni izdvojeni 3, 11 i 6. Ipak, ako se promatraju iznadprosječni genotipovi prema obje grupe indeksa, onda se mogu izdvojiti genotipovi 13, 15, 12, 14 i 21 kao tolerantni prema obje grupe indeksa. Iste ove genotipove slično izdvaja i AMMI analiza.

7. POPIS LITERATURE

1. Abendroth L.J., Miguez F.E., Castellano M.J., Carter P.R., Messina C.D., Dixon P. M., Hatfield J. L. (2021). Lengthening of maize maturity time is not a widespread climate change adaptation strategy in the US Midwest. *Global Change Biology* 27(11): 2426–2440. <https://doi.org/10.1111/gcb.15565>
2. Aghaei-Sarbarze R.M., Mohammadi R., Haghparast R., Rajabi R. (2009). Determination of drought tolerant genotypes in bread wheat. *Electron. J. Crop Prod.* 2: 1–23.
3. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998). *Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements - FAO Irrigation and Drainage paper 56*. Rome: FAO.
4. Ali F., Ahsan M., Ali Q., Kanwal N. (2017). Phenotypic Stability of Zea mays Grain Yield and Its Attributing Traits under Drought Stress. *Frontiers in Plant Science* 8. <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2017.01397>
5. Atlin G.N., Baker R.J., McRae K.B., Lu X. (2000). Selection response in subdivided target regions. *Crop Sci* 40 (1): 7–13. <https://www.crops.org/publications/cs/abstracts/40/1/7>
6. Atlin G.N., Kleinknecht K., Singh G.P., Piepho H.P. (2011). Managing genotype environment interaction in plant breeding programs: a selection theory approach. *J Indian Soc Agric Stat* 65 (2): 237–247.
7. Anscombe F.J., Tukey J.W. (1963). The examination and analysis of residuals. *Technometrics* 5: 141–160. <https://doi.org/10.1080/00401706.1963.10490071>
8. Araus J.L., Slafer G.A., Royo C., Serret M.D. (2008). Breeding for yield potential and stress adaptation in cereals. *Crit. Rev. Plant Sci.* 27: 377–412. <https://doi.org/10.1080/07352680802467736>
9. Archontoulis S.V., Miguez F.E., Moore K.J. (2014). Evaluating APSIM maize, soil water, soil nitrogen, manure, and soil temperature modules in the Midwestern United States. *Agronomy Journal* 106(3): 1025-1040. <https://doi.org/10.2134/agronj2013.0421>
10. Babić V. (2014). Procjena stabilnosti kvantitativnih svojstava hibrida kukuruza. Doktorska disertacija. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Poljoprivredni fakultet u Osijeku.

11. Balbaa M.G., Osman H.T., Kandil E.E., Javed T., Lamlom S.F., Ali H.M., Kalaji H.M., Wróbel J., Telesiński A., Brysiewicz A., Ghareeb R.Y., Abdelsalam N.R., Abdelghany A.M. (2022). Determination of morpho-physiological and yield traits of maize inbred lines (*Zea mays* L.) under optimal and drought stress conditions. *Frontiers in Plant Science* 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.959203>
12. Barker T.C., Campos H., Cooper M., Dolan D., Edmeades G.O., Habben J., Schussler J., Wright D., Zinselmeier C. (2005). Improving drought tolerance in maize. *Plant Breeding Reviews* 25: 173 – 253.
13. Bänziger M., Setimela P.S., Hodson D., Vivek B. (2004). Breeding for improved drought tolerance in maize adapted to southern Africa Proceedings. 4th International Crop Science Congress, 26.9.–1.10.2004., Brisbane, Australia.
14. Behnke R., Vavrus S., Allstadt A., Albright T., Thogmartin W.E., Radeloff V.C. (2016). Evaluation of downscaled, gridded climate data for the conterminous United States. *Ecological Applications*. 26 (5): 1338 – 1351. <https://doi.org/10.1002/15-1061>
15. Betrán F.J., Beck D., Bänziger M., Edmeades G.O. (2003). Secondary traits in parental inbreds and hybrids under stress and non-stress environments in tropical maize. *Field Crops Research* 83: 51–65.
16. Blauhut V., Gudmundsson L., Stahl K. (2015). Towards pan-European drought risk maps: quantifying the link between drought indices and reported drought impacts. *Environ Res Lett* 10: 14008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/1/014008>
17. Bogale G., Van Rensburg J.B.J., Van Deventer C.S. (2008). AMMI Analysis of Genotype x Environment Interaction for Grain Yield in Drought-Tolerant Maize (*Zea mays* L.). *East African Journal of Sciences* 2 (1): 1 – 6. [doi.10.4314/eajsci.v2i1.40356](https://doi.org/10.4314/eajsci.v2i1.40356)
18. Bolanós J., Edmeades G.O. (1996). The importance of the anthesis–silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize. *Field Crops Res.* 48: 65–80.
19. Borrell A., Jordan D., Mullet J., Henzell B., Hammer G. (2006). Drought adaptation in sorghum. In: Ribaut J.M. (Ed.), *Drought Adaptation in Cereals*. The Haworth Press, Binghamton, USA, pp., 335–399.
20. Bonea D. (2020). Grain yield and drought tolerance indices of maize hybrids. *Notulae Scientia Biologicae* 12(2): 376 – 386. <https://doi.org/10.15835/nsb12210683>
21. Bönecke E., Breitsameter L., Brüggemann N., Chen T.W., Feike T., Kage H., Kersebaum K.C., Piepho H.P., Stützel H. (2020). Decoupling of impact factors reveals the response of German winter wheat yields to climatic changes. *Global change biology* 26(6): 3601 – 3626. <https://doi.org/10.1111/gcb.15073>

22. Brkić I., Jambrović A., Šimić D., Zdunić Z., Ledenčan T. (2012). Oplemenjivanje kukuruza u Poljoprivrednom institutu Osijek. U: Oplemenjivanje poljoprivrednog bilja u Hrvatskoj, ur. (Kozumplik V. i Pejić I.), Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Zagreb, str. 62 – 67.
23. Braun H.J., Rajaram S., van Ginkel M. (1996). CIMMYT's approach to breeding for wide adaptation. *Euphytica* 92 (1–2): 175–183. <https://doi.org/10.1007/BF00022843>
24. Brown H.E., Teixeira E.I., Huth N.I., Holzworth D.P. (2014). The APSIM maize model. *APSIM initiative: toowoomba, Australia*.
25. Buhiniček I., Kaučić D., Kozić Z., Jukić M., Gunjača J., Šarčević H., Stepinac D., Šimić D. (2021). Trends in Maize Grain Yields across Five Maturity Groups in a Long-Term Experiment with Changing Genotypes. *Agriculture* 11 (9): 887. <https://doi.org/10.3390/agriculture11090887>
26. Bunce J.A. (1997). Does transpiration control stomatal responses to water vapour pressure deficit. *Plant Cell Environ.* 20: 131–135. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1997.d01-3.x>
27. Bustos-Korts D., Romagosa I., Borràs-Gelonch G., Casas A.M., Slafer G.A., van Eeuwijk F. (2019). Genotype by Environment Interaction and Adaptation. In: Savin, R., Slafer, G. (Eds.) *Crop Science. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Series*. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8621-7_199
28. Carberry P.S., Abrecht D.G. (1991). Tailoring crop models to the semi-arid tropics. In: Muchow R.C., Bellamy J.A. (Eds.), *Climatic Risk in Crop Production: Models and Management for the Semiarid Tropics and Subtropics*. CAB International, Wallingford, UK, pp. 157 – 182.
29. Ceccarelli S. (1989). Wide adaptation: how wide? *Euphytica* 40(3) :197–205. <https://doi.org/10.1007/BF00024512>
30. Chapman S.C., Cooper M., Hammer G.L., Butler D. (2000). Genotype by environment interactions affecting grain sorghum II. Frequencies of different seasonal patterns of drought stress are related to location effects on hybrid yields. *Aus. J. Agric. Res.* 51(2): 209–222. <https://doi.org/10.1071/AR99021>
31. Chenu K., Chapman S.C., Tardieu F., McLean G., Welcker C., Hammer G.L. (2009). Simulating the Yield Impacts of Organ-Level Quantitative Trait Loci Associated With Drought Response in Maize: A “Gene-to-Phenotype” Modeling Approach. *Genetics* 183: 1507–1523. <https://doi.org/10.1534/genetics.109.105429>
32. Cheikh N.C., Jones R.J. (1994). Disruption of kernel growth and development by heat stress: Role of cytokinin/ABA balance. *Plant Physiology*: 106: 45–51.

33. Choudhary S., Guha A., Kholova J., Pandravada A., Messina C.D., Cooper M., Vadez V. (2019). Maize, sorghum, and pearl millet have highly contrasting species strategies to adapt to water stress and climate change-like conditions. *Plant Science* 295. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110297>
34. Christensen J.H., Hewitson B., Busuioc A., Che A., Gao X., Held I., Jones R., Kolli R.K., Kwon W.T., Laprise R., Rueda V.M., Mearns L., Menéndez C.G., Räisänen J., Rinke A., Sarr A., Whetton P. (2007). Regional climate projections. Poglavlje 11. Ujedinjeno Kraljevstvo: N. p., 2007.
35. Cindrić K., Telišman Prtenjak M., Herceg Bulić I., Mihajlović D., Pasarić Z. (2016). Analysis of the extraordinary 2011/2012 drought in Croatia. *Theor Appl Climatol* 123: 503–522. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1368-8>
36. Cohen Liechti T., Matos J.P., Boillat J.L., Schleiss A.J. (2012). Comparison and evaluation of satellite derived precipitation products for hydrological modeling of the Zambezi River Basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16: 489–500. <https://doi.org/10.5194/hess-16-489-2012>
37. Cooper M., Hammer G.L. (1996). Plant adaptation and crop improvement. CAB International, Wallingford.
38. Cooper M., van Eeuwijk F.A., Hammer G.L., Podlich D.W., Messina C. (2009). Modeling QTL for complex traits: detection and context for plant breeding. *Curr Opin Plant Biol* 12: 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.01.006>
39. Cooper M., Gho C., Leafgren R., Tang T., Messina C. (2014). Breeding drought tolerant maize hybrids for the US Corn-Belt: Discovery to product. *J Exp Bot* 65: 6191–6204. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru064>
40. Crafts-Brandner S.J., Salvucci M.E. (2002). Sensitivity of photosynthesis in a C4 plant, maize, to heat stress. *Plant Physiology* 129(4): 1773–1780.
41. Dai A., Trenberth K.E., Qian T.T. (2004). A global dataset of palmer drought severity index for 1870–2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming. *J Hydrometeorol.* <https://doi.org/10.1175/JHM-386.1>
42. Dai A. (2011). Characteristics and trends in various forms of the palmer drought severity index during 1900–2008. *J Geophys Res* 116: D12115. <https://doi.org/10.1029/2010JD015541>
43. Darkwa K., Ambachew D., Mohammed H., Asfaw A., Blai, M.W. (2016). Evaluation of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes for drought stress adaptation in Ethiopia. *The Crop Journal* 4(5): 367–376. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2016.06.007>
44. DG Environment, European Commission (2007). Water scarcity and droughts, in-depth assessment. Second Interim Report.

45. DHMZ (2014). 160 godina meteoroloških motrenja i njihova primjena u Hrvatskoj. Zagreb.
46. DHMZ (2023). Zahtjevi za podacima i uslugama. (preuzeto s: https://meteo.hr/proizvodi.php?section=katalog_zahitjevi¶m=zahtjev_podaci_usluge; 12.2.2023.).
47. Dias A.S., Lidon F.C. (2009). Evaluation of grain filling rate and duration in bread and durum wheat, under heat stress after anthesis. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195: 137–147.
48. Dolinar M. (2016). Monthly gridded datasets for temperature and precipitation over Slovenia. *Proceedings of GeoMLA–Geostatistics and Machine Learning*, 21. – 24. lipanj 2016., Belgrade, Serbia.
49. Dong X., Guan L., Zhang P., Liu X., Li S., Fu Z., Tang L., Qi Z., Qiu Z., Jin C., Huang S., Yang H. (2021). Responses of maize with different growth periods to heat stress around flowering and early grain filling. *Agricultural and Forest Meteorology* 303: 108378. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108378>
50. Duvick D.N. (2005). The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.). *Adv Agron* 86(1): 83–145.
51. Dwyer L.M., Stewart D.W., Carrigan L., Ma B.L., Neave P., Balchin D. (1999). Guidelines for comparisons among different maize maturity rating systems. *Agronomy Journal* 91(6): 946–949. <https://doi.org/10.2134/agronj1999.916946x>
52. Eagleman, J. R. (1967). Pan evaporation, potential and actual evapotranspiration. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 6(3): 482-488. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1967\)006<0482:PEPAAE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1967)006<0482:PEPAAE>2.0.CO;2)
53. Edmeades G.O. (2013). *Progress in Achieving and Delivering Drought Tolerance in Maize - An Update*, ISAAA: Ithaca, New York.
54. Edmeades G.O., Bolaños J., Elings A., Ribaut J.M., Bänziger M., Westgate M.E. (2000). The role and regulation of the anthesis-silking interval in maize. p. 43 – 73. In: M.E. Westgate and K.J. Boote (eds.). *Physiology and modeling kernel set in maize*. CSSA Special Publication No. 29, CSSA, Madison, WI.
55. Edreira J.I.R., Otegui M.E. (2012). Heat stress in temperate and tropical maize hybrids: Differences in crop growth, biomass partitioning and reserves use. *Field Crops Research* 130: 87–98. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.02.009>
56. Ehrler W.L., Idso S.B., Jackson R.D., Reginato R.J. (1978a). Wheat canopy temperature: relation to plant water potential. *Agron. J.* 70: 251—256.
57. Ehrler W.L., Idso S.B., Jackson R.D., Reginato R.J. (1978b). Diurnal changes in plant water potential and canopy temperature of wheat as affected by drought. *Agron. J.* 70: 999 – 1004.

58. Farshadfar E., Poursiahbidi M.M., Safavi S.M. (2013). Assessment of drought tolerance in land races of bread wheat based on resistance/tolerance indices. *International journal of Advanced Biological and Biomedical Research* 1(2): 143 – 158.
59. Fernandez G.C.J. (1992). Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In: Kuo CG (ed) *Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and other Food Crops in Temperature and Water Stress*, Publication, Tainan, Taiwan.
60. Ferina J., Vučetić V., Bašić T., Anić M. (2021). Spatial distribution and long-term changes in water balance components in Croatia. *Theor Appl Climatol.* <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03593-1>
61. Fischer R. A., Maurer R. (1978). Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research* 29: 897 – 912. <https://doi.org/10.1071/AR9780897>
62. Fischer G., Shah M.M., Van Velthuizen H.T., Nachtergaele F.O. (2001). Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century. *International Institute for Applied Systems Analysis*, Laxenburg, Austrija.
63. Franks P.J., Farquhar G.D. (1999). A relationship between humidity response, growth form and photosynthetic operating point in C3 plants. *Plant Cell Environ.* 22: 1337–1349. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1999.00494.x>
64. Forde B.J., Mitchell K.J., Edge E.A. (1977). Effect of temperature, vapour-pressure deficit and irradiance on transpiration rates of maize, paspalum, westerwolds and perennial ryegrasses, peas, white clover and lucerne. *Aust. J. Plant Physiol.* 4: 889–899. <https://doi.org/10.1071/PP9770889>
65. Galić V., Franić M., Jambrović A., Ledenčan T., Brkić A., Zdunić Z., Šimić D. (2019). Genetic correlations between photosynthetic and yield performance in maize are different under two heat scenarios during flowering. *Frontiers in Plant Science* 10: 566. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00566>
66. Gates D.M. (1968). Transpiration and leaf temperature. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 19: 211 – 238.
67. Gauch H.G., Zobel R.W. (1996). AMMI analysis of yield trials. In: Kang MS. and Gauch H.G. (eds.). *Genotype by environment interactions*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
68. Gauch H.G.Jr., Piepho H.P., Annicchiarico P. (2008). Statistical Analysis of Yield Trials by AMMI and GGE: Further Considerations. *Crop Sci.* 48: 866–889.
69. Gauch H.G.Jr. (2013). A simple protocol for AMMI analysis of yield trials. *Crop science* 53(5): 1860-1869. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.04.0241>

70. Gebrechorkos S.H., Hülsmann S., Bernhofer C. (2018). Evaluation of multiple climate data sources for managing environmental resources in East Africa. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22: 4547–4564. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4547-2018>
71. Gholinezhad E., Darvishzadeh R., Bernousi I. (2014). Evaluation of drought tolerance indices for selection of confectionery sunflower (*Helianthus annuus* L.) landraces under various environmental conditions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 42(1): 187–201. <https://doi.org/10.15835/nbha4219394>
72. Gholipoor M., Prasad P.V.V., Mutava R.N., Sinclair T.R. (2010). Genetic variability of transpiration response to vapor pressure deficit among sorghum genotypes. *Field Crops Res.* 119: 85–90. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.06.018>
73. Gholipoor M., Choudhary S., Sinclair T.R., Messina C.D., Cooper M. (2013). Transpiration response of maize hybrids to atmospheric vapor pressure deficit. *J. Agron. Crop Sci.* 119: 155–160. <https://doi.org/10.1111/jac.12010>
74. Grzesiak S., Hordyńska N., Szczyrek P., Grzesiak M.T., Noga A., Szechyńska-Hebda M. (2019). Variation among wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes in response to the drought stress: I–selection approaches. *J. Plant Interact.* 14: 30 – 44. <https://doi.org/10.1080/17429145.2018.1550817>
75. Guttman N.B., Wallis J.R., Hosking J.R.M. (1992). Spatial comparability of the Palmer Drought Severity Index. *Water Resour Bull* 28: 1111–1119.
76. Hajibabae M., Azizi F., Zargari K. (2012) Effect of Drought Stress on Some Morphological, Physiological and Agronomic Traits in Various Foliage Corn Hybrids. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.* 12 (7): 890 – 896. DOI: 10.5829/idosi.ajeaes.2012.12.07.1751
77. Hall A.E. (1993). Is dehydration tolerance relevant to genotypic differences in leaf senescence and crop adaptation to dry environments. In: Close T.J., Bray E.A., Eds., *Plant Responses to Cellular Dehydration during Environmental Stress*, 1 – 10. 10.4236/gm.2014.43009
78. Hammer G.L., Kropff M.J., Sinclair T.R., Porter J.R. (2002). Future contributions of crop modelling—from heuristics and supporting decision making to understanding genetic regulation and aiding crop improvement. *European Journal of Agronomy* 18 (1–2): 15–31. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00093-X)
79. Hansen J.W. (2002). Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture: issues, approaches, challenges. *Agricultural systems* 74(3): 309 – 330. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(02\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00043-4)
80. Hirasawa T., Hsiao T.C. (1999). Some characteristics of reduced leaf photosynthesis at midday in maize growing in the field. *Field Crops Res* 62: 53 – 62. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00005-2)

81. Hofstra N., Haylock M., New M., Jones P., Frei C. (2008). Comparison of six methods for the interpolation of daily, European climate data. *J. Geophys. Res.* 113. <https://doi.org/10.1029/2008JD010100>
82. Holzworth D.P., Hunt N.I., DeVoil P.G., Zurcher E.J., Herrmann N.I., McLean G., Chenu K., Van Oosterom E.J., Snow V., Murphy C., Moore A.D., Brown H., Whish J.P.M., Verrall S., Fainges J., Bell L.W., Peake A.S., Poultona P.L., Hochman Z., Thorburn P.J., Gaydon D.S., Dalgliesh N.P., Rodriguez D., Cox H., Chapman S., Doherty A., Teixeira E., Sharp J., Cichota R., Vogeler I., Li F.Y., Wang E., Hammer G.L., Robertson M.J., Dimes J.P., Whitbread A.M., Hunt J., Van Rees H., McClelland T., Carberry P.S., Hargreaves J.N.G., MacLeod N., McDonald C., Harsdorf J., Wedgwood S., Keating B.A. (2014). APSIM—evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environmental Modelling & Software* 62: 327–350. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.009>
83. Holzworth D.P., Hunt N.I., Fainges J., Brown H., Zurcher E.J., Cichota R., Verrall S., Herrmann N.I., Zheng B., Snow V. (2018). APSIM Next Generation: Overcoming challenges in modernising a farming systems model. *Environmental Modelling & Software* 103, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.02.002>
84. Idso S.B., Ehler W.L. (1976). Estimating soil moisture in the root zone of crops: a technique adaptable to remote sensing. *Geophys Res Lett* 3: 23 – 25.
85. Idso S.B., Jackson R.D., Reginato R.J. (1977). Remote sensing of crop yields. *Science* 196: 19 – 25.
86. Idso S.B., Jackson R.D., Reginato R.J. (1978a). Extending the "degree day" concept of plant phenological development to include water stress effects. *Ecology* 59: 431 – 433.
87. Idso S.B., Jackson R.D., Reginato R.J. (1978b). Remote sensing for agricultural water management and crop yield prediction. *Agric. Water Manage* 1: 299 – 310.
88. Idso S.B., Pinter P.J.Jr., Hatfield J.L., Jackson R.D., Reginato R.J. (1979a). A remote sensing model for the prediction of wheat yields prior to harvest. *J Theor Biol* 77: 217 – 228.
89. Idso S.B., Hatfield J.L., Jackson R.D., Reginato R.J. (1979b). Grain yield prediction: extending the stress-degree-day approach to accommodate climatic variability. *Remote Sens Environ* 8: 267 – 272.
90. Idso S.B., Reginato R.J., Hatfield J.L., Walker G.K., Jackson R.D., Pinter P.J.Jr. (1980). A generalization of the stress-degree-day concept of yield prediction to accommodate a diversity of crops. *Agric Meteorol* 21: 205 – 211.

91. Idso S.B., Jackson R.D., Pinter P.J. Jr., Reginato R.J., Hatfield J.L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.* 24: 45–55. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(81\)90032-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(81)90032-7)
92. Ionenko I.F., Anisimov A.V., Dautova N.R. (2010). Effect of temperature on water transport through aquaporins. *Biol Plant* 54: 488–494. <https://doi.org/10.1007/s10535-010-0086-z>
93. IPCC (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 184. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
94. Jackson R.D., Reginato R.J., Idso S.B. (1977). Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resour Res* 13: 651 – 656.
95. Jambrović A. (2001). *Različitość i broj lokacija za testiranje hibrida kukuruza*. Doktorska disertacija. Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet.
96. Joint Research Centre (2020). *Gridded Agro-Meteorological Data in Europe*. Date Last Modified: June 13th, 2020. (preuzeto s: <https://agri4cast.jrc.ec.europa.eu/DataPortal/Index.aspx>; 08.08.2020.).
97. Kamrani M., Hoseini Y., Ebadollahi A. (2018). Evaluation for heat stress tolerance in durum wheat genotypes using stress tolerance indices. *Arch. Agron. Soil Sci.* 64: 38 – 45. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1326104>
98. Karl T.R. (1986). The sensitivity of the palmer drought severity index and palmer's Z-index to their calibration coefficients including potential evapotranspiration. *J Clim Appl Meteorol* 25: 77–86. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1986\)025%3c0077:TSOTPD%3e2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025%3c0077:TSOTPD%3e2.0.CO;2)
99. Keating B.A., Carberry P.S., Hammer G.L., Probert M.E., Robertson M.J., Holzworth D., Huth N.I., Hargreaves J.N.G., Meinke H., Hochman Z., McLean G., Verburg K., Snow V., Dimes J.P., Silburn M., Wang E., Brown S., Bristow K.L., Asseng S., Chapman S., McCown R.L., Freebairn D.M., Smith C.J. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy* 18: 267–288. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9)
100. Keating B.A. (2024). APSIM's origins and the forces shaping its first 30 years of evolution: A review and reflections. *Agronomy for Sustainable Development*, 44(3): 24. <https://doi.org/10.1007/s13593-024-00959-3>
101. Khalili M., Naghavi M.R., Aboughadareh A.P., Talebzadeh S.J. (2012). Evaluating of Drought Stress Tolerance Based on Selection Indices in Spring Canola Cultivars (*Brassica napus* L.). *Journal of Agricultural Science* 4(11):1916 – 9752. <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v4n11p78>

102. Kholova J., Hash C.T., Kakkera A., Kocova M., Vadez V. (2010a). Constitutive waterconserving mechanisms are correlated with the terminal drought tolerance of pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.). R. Br.]. *J Exp Bot* 61: 369–377. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp314>
103. Kholova J., Hash C.T., Kumar P.L., Yadav R.S., Kocova M., Vadez V. (2010b). Terminal drought-tolerant pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.). R. Br.] have high leaf ABA and limit transpiration at high vapour pressure deficit. *J Exp Bot* 61: 1431–1440. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq013>
104. Kristin A.S., Senra R.R., Perez F.I., Enriquez B.C., Gallegos, J.A.A., Vallego, P.R., Wassimi N., Kelley J.D. (1997). Improving common bean performance under drought stress. *Crop Sci* 37: 43–50. <https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700010007x>
105. Kozumplik V., Pejić I. (2012). Oplemenjivanje poljoprivrednog bilja u Hrvatskoj. Monografija, Zagreb.
106. Leakey A.D.B. (2009). Rising atmospheric carbon dioxide concentration and the future of C4 crops for food and fuel. *Proc R Soc B* 1666: 2333 – 2343. <https://doi.org/10.1098/rspb.2008.1517>
107. Lobell D.B., Hammer G.L., McLean G., Messina C., Roberts M.J., Schlenker W. (2013). The critical role of extreme heat for maize production in the United States. *Nat Clim Chang* 3: 497–501. <https://doi.org/10.1038/nclimate1832>
108. Löffler C.M., Wei J., Fast T., Gogerty J., Langton S., Bergman M., Merrill R.E., Cooper M. (2005). Classification of maize environments using crop simulation and geographic information systems. *Crop Sci* 45: 1708–1716. <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.0370>
109. Ludlow M.M., Muchow R.C. (1990). A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Adv Agron* 43: 107–153. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60477-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60477-0)
110. Mandić V., Đorđević S., Brankov M., Živković V., Lazarević M., Keškić T., Krnjaja V. (2024). Response of Yield Formation of Maize Hybrids to Different Planting Densities. *Agriculture* 14(3): 351. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030351>
111. Maroco J.P., Pereira J.S., Chaves M.M. (1997). Stomatal responses to leaf-to-air vapour pressure deficit in sahelian species. *Aust J Plant Physiol* 24: 381–387. <https://doi.org/10.1071/PP96062>
112. McCown R.L., Hammer G.L., Hargreaves J.N.G., Holzworth D.P., Freebairn D.M. (1996). APSIM: a novel software system for model development, model testing, and simulation in agricultural systems research. *Agric Syst* 50: 255 – 271. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(94\)00055-V](https://doi.org/10.1016/0308-521X(94)00055-V)

113. McKee T.B., Doesken N.J., Kliest J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: proceedings of the 8th conference on applied climatology. American Meteorological Society, Boston, pp 179–184.
114. Meseka S., Menkir A., Bossey B., Mengesha W. (2018). Performance Assessment of Drought Tolerant Maize Hybrids under Combined Drought and Heat Stress. *Agronomy* 8 (12): 274. <https://doi.org/10.3390/agronomy8120274>
115. Messina C.D., Hammer G., Dong Z., Podlich D., Cooper M. (2009). Modelling Crop Improvement in a G×E×M Framework via Gene–Trait–Phenotype Relationships. *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy* 581: 235 – 265. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374431-9.00010-4>
116. Messina C.D., Podlich D., Dong Z.S., Samples M., Cooper M. (2011). Yield-trait performance landscapes: from theory to application in breeding maize for drought tolerance. *J Exp Bot* 62: 855–868. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq329>
117. Messmer R.E. (2006). The genetic dissection of key factors involved in the drought tolerance of tropical maize (zea maize L.). A dissertation submitted to the Swiss Federal Institute of Technology Zurich. <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:29035/eth-29035-01.pdf>
118. Miguez F. (2024). *apsimx: Inspect, Read, Edit and Run 'APSIM' "Next Generation" and 'APSIM' Classic.* R package version 2.7.7. <https://CRAN.R-project.org/package=apsimx>
119. Mihajlović D. (2006). Monitoring the 2003–2004 meteorological drought over Pannonian part of Croatia. *Int J Climatol* 26: 2213–2225. <https://doi.org/10.1002/joc.1366>
120. Millet E.J., Welcker C., Kruijer W., Negro S., Coupel-Ledru A., Nicolas S.D., Laborde J., Bauland C., Praud S., Ranc N., Presterl T., Tuberosa R., Bedo Z., Draye X., Usadel B., Charcosset A., Van Eeuwijk F., Tardieu F. (2016). Genome-wide analysis of yield in europe: allelic effects vary with drought and heat scenarios. *Plant Physiol* 172: 749–764. doi: 10.1104/pp.16.00621
121. MINGOR (2018). Seventh national communication and third biennial report of the Republic of Croatia under the United Nations framework convention on climate change (UNFCCC). Ministry for Environment and Energy. Zagreb.
122. MINGOR (2020). Strategija prilagodbe klimatskim promjenama u Republici Hrvatskoj za razdoblje do 2040. godine s pogledom na 2070. godinu. Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja. Zagreb.

123. Moradi H., Akbari G.A., Khavari Khorasani S., Ramshini H.A. (2012). Evaluation of drought tolerance in corn (*Zea mays* L.) new hybrids with using stress tolerance indices. *European Journal of Sustainable Development* 1(3): 543 – 560. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2012.v1n3p543>
124. Morel J., Parsons D., Halling M.A., Kumar U., Peake A., Bergkvist G., Brown H., Hetta M. (2020). Challenges for Simulating Growth and Phenology of Silage Maize in a Nordic Climate with APSIM. *Agronomy* 10(5): 645. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050645>
125. Mourtzinis S., Rattalino Edreira J.I., Conley S.P., Grassini P. (2017). From grid to field: Assessing quality of gridded weather data for agricultural applications. *European Journal of Agronomy*. 82: 163 – 172. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.10.013>
126. Musvosvi C., Setimela P.S., Wali M.C., Gasura E., Channappagoudar B.B., Patil S.S. (2018). Contribution of Secondary Traits for High Grain Yield and Stability of Tropical Maize Germplasm across Drought Stress and Non-Stress Conditions. *Agronomy Journal* 110 (3). <https://doi.org/10.2134/agronj2017.04.0199>
127. MZO (2016). Strategija pametne specijalizacije Republike Hrvatske za razdoblje od 2016. do 2020. godine i akcijski plan za provedbu strategije pametne specijalizacije Republike Hrvatske za razdoblje od 2016. do 2017. godine. Ministarstvo znanosti i obrazovanja. Zagreb.
128. Naghavi M.R., Aboughadareh A. P., Khalili M. (2013). Evaluation of drought tolerance indices for screening some of corn (*Zea mays* L.) cultivars under environmental conditions. *Notulae Scientia Biologicae* 5(3): 388 – 393. <https://doi.org/10.15835/nsb539049>
129. Nardini A., Salleo S., Andri S. (2005). Circadian regulation of leaf hydraulic conductance in sunflower (*Helianthus annuus* L. cv. Margot). *Plant Cell Environ* 28: 750–759. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01320.x>
130. Ndhlela T., Herselman L., Magorokosho C., Setimela P., Mutimaamba C., Labuschagne M. (2014). Genotype × Environment Interaction of Maize Grain Yield Using AMMI Biplots. *Crop Science* 54. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.07.0448>
131. Nzuve F., Githiri S., Mukunya D., Gethi J. (2013). Analysis of Genotype x Environment Interaction for Grain Yield in Maize Hybrids. *Journal of Agricultural Science* 5 (11). [doi.10.5539/jas.v5n11p75](https://doi.org/10.5539/jas.v5n11p75)
132. Olivoto T., Dal'Col Lúcio A. (2020). metan: An R package for multi-environment trial analysis. *Methods Ecol Evol* 11: 783–789. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13384>
133. Onofri A., Ciricifolo E. (2007). Using R to perform the AMMI analysis on agriculture variety trials. *R. News* 7(1):14–19.

134. Oren R., Sperry J.S., Katul G.G., Pataki D.E., Ewers B.E., Phillips N., Schafer K.V.R. (1999). Survey and synthesis of intra- and interspecific variation in stomatal sensitivity to vapour pressure deficit. *Plant Cell Environ* 22: 1515–1526. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1999.00513.x>
135. Palmer W.C. (1965). Meteorological drought. U.S. Department of Commerce Research Paper No. 45, Washington.
136. Pandžić K., Trninić D., Likso T., Bošnjak T. (2009). Long-term variations in water balance components for Croatia. *Theoretical and Applied Climatology* 95: 39-51. <https://doi.org/10.1007/s00704-007-0366-5>
137. Pandžić K., Likso T., Mesić M., Pejić I., Curić O. (2020). Drought indices for the Zagreb-Grič Observatory with an overview of drought damage in agriculture in Croatia. *Theor Appl Climatol* 142: 555–567. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03330-0>
138. Pandžić K., Likso T., Pejić I., Šarčević H., Pecina M., Šestak I., Tomšić D., Strelec Mahović N. (2022). Application of the self-calibrated palmer drought severity index and standardized precipitation index for estimation of drought impact on maize grain yield in Pannonian part of Croatia. *Nat Hazards* 113(2): 1237–1262. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05345-4>
139. Pankin A., Campoli C., Dong X., Kilian B., Sharma R., Himmelbach A., Saini R., Davis S.J., Stein N., Schneeberger K., von Korff M. (2014). Mapping-by-sequencing identifies HvPHYTOCHROME C as a candidate gene for the early maturity 5 locus modulating the circadian clock and photoperiodic flowering in barley. *Genetics* 198: 383–396. <https://doi.org/10.1534/genetics.114.165613>
140. Parent B., Hachez C., Redondo E., Simonneau T., Chaumont F., Tardieu F. (2009). Drought and abscisic acid effects on aquaporin content translate into changes in hydraulic conductivity and leaf growth rate: a trans-scale approach. *Plant Physiol* 149: 2000–2012. <https://doi.org/10.1104/pp.108.130682>
141. Pasley H., Brown H., Holzworth D., Whish J., Bell L., Huth N. (2023). How to build a crop model. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 43(1): 2. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00854-9>
142. Pejić I. (2022). Konvencionalno i molekularno oplemenjivanje bilja. U: Molekularno oplemenjivanje bilja, ur. (Pejić I., Šatović Z.), Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Zagreb, str. 3 – 17.
143. Penzar B. (1976). Drought severity Palmer's indices for Zagreb and their statistical forecast (in Croatian). *Papers and Presentations (Zagreb)* 13: 1–58.
144. Penzar I., Penzar B. (2000). *Agrometeorologija*. Školska knjiga, Zagreb.

145. Perčec Tadić M., Gajić-Čapka M., Zaninović K., Cindrić K. (2014). Drought vulnerability in Croatia. *Agric Conspec Sci* 79: 31–38.
146. Perdomo J.A., Carmo-Silva E., Hermida-Carrera C., Flexas J., Galmés J. (2016). Acclimation of biochemical and diffusive components of photosynthesis. *Fron Plant Sci* 7: 1719. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01719>
147. Perfect Grower (2019). VPD Chart (Vapor Pressure Deficit). Date Last Modified: December 11th, 2019. (preuzeto s: <https://www.perfectgrower.com/knowledge/knowledge-base/vpd-chart-vapor-pressure-deficit/>; 08.02.2024.).
148. Posit team (2024). RStudio: Integrated Development Environment for R. Posit Software, PBC, Boston, MA. <http://www.posit.co/>
149. Puntel L.A., Sawyer J.E., Barker D.W., Dietzel R., Poffenbarger H., Castellano M.J., Moore K.J., Thorburn P., Archontoulis S.V. (2016). Modeling Long-Term Corn Yield Response to Nitrogen Rate and Crop Rotation *Plant Science* 7: 1630. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01630>
150. R Core Team (2023). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
151. Rahman S.U., Yousaf M.I., Hussain M., Hussain K., Hussain S., Bhatti M.H., Hussain D., Ghani A., Razzaq A., Akram M., Ibrar I., Ahmed M.S., Kohli S.A., Siddiq M.A. (2022). Evaluation of local and multinational maize hybrids for tolerance against high temperature using stress tolerance indices. *Pakistan Journal of Agricultural Research* 35 (1): 36 – 46. <https://dx.doi.org/10.17582/journal.pjar/2022/35.1.36.46>
152. Ray J.D., Gesch R.W., Sinclair T.R., Hartwell Allen L. (2002)The effect of vapor pressure deficit on maize transpiration response to a drying soil. *Plant Soil* 239: 113 – 121. <https://doi.org/10.1023/A:1014947422468>
153. Reginato R.J., Idso S.B., Jackson R.D. (1978). Estimating forage crop production: a technique adaptable to remote sensing. *Remote Sens Environ* 7: 77 – 80.
154. Rezaei E.E., Webber H., Gaiser T., Naab J., Ewert F. (2015). Heat stress in cereals: Mechanisms and modelling. *European Journal of Agronomy* 64: 98–113. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.10.003>
155. Ribaut J.M. (2006). *Drought Adaptation in Cereals*. The Haworth Press, Inc., Binghamton, New York.
156. Richards R.A., Passioura J.B. (1989). A breeding program to reduce the diameter of the major xylem vessel in the seminal roots of wheat and its effect on grain yield in rain-fed environments. *Aust J Agric Res* 40: 943–950. <https://doi.org/10.1071/AR9890943>

157. Rosielle A. A, Hamblin J. (1981). Theoretical aspects of selection for yield in stress and nonstress environments. *Crop Science* 21: 943 – 946. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100060033x>
158. SAFU (2017). Izvještaj o procijenjenim utjecajima i ranjivosti na klimatske promjene po pojedinim sektorima. <http://prilagodbaklimi.hr/wp-content/uploads/docs/Procjena-ranjivosti-na-klimatske-promjene.pdf>
159. Sánchez B., Rasmussen A., Porter J.R. (2014). Temperatures and the growth and development of maize and rice: A review. *Global Change Biology* 20: 408–417. <https://doi.org/10.1111/gcb.12389>
160. Sedri M.H., Amini A., Golchin A. (2019). Evaluation of Nitrogen Effects on Yield and Drought Tolerance of Rainfed Wheat using Drought Stress Indices. *J. Crop Sci. Biotechnol.* 22: 235 – 242. <https://doi.org/10.1007/s12892-018-0037-0>
161. Shahrokhi M., Khavari Khorasani S., Ebrahimi A. (2020). Evaluation of Drought Tolerance Indices for Screening Some of Super Sweet Maize (*Zea mays* L. var. *saccharata*) Inbred Lines. *AGRIVITA Journal of Agricultural Science.* 42(3): 435 – 448. <http://doi.org/10.17503/agrivita.v42i3.2574>
162. Siebers M.H., Slattery R.A., Yendrek C.R., Locke A.M., Drag D., Ainsworth E.A., Bernacchi C.J., Ort D.R. (2017). Simulated heat waves during maize reproductive stages alter reproductive growth but have no lasting effect when applied during vegetative stages. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 240: 162–170. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.11.008>
163. Sijerković M., Čapka B. (1994). Prirodne katastrofe, poljodjelstvo i gospodarenje vodama. Stručnoznanstveni simpozij, „Poljoprivreda i gospodarenje vodama“, Bizovačke Toplice, Hrvatska, str. 487 – 495.
164. Sinclair T.R., Tanner C.B., Bennett J.M. (1984). Water-use efficiency in crop production. *Bio Sci* 34: 36–40. <https://doi.org/10.2307/1309424>
165. Sinclair T.R., Hammer G.L., van Oosterom E.J. (2005). Potential yield and water-use efficiency benefits in sorghum from limited maximum transpiration rate. *Funct Plant Biol* 32: 945–952. <https://doi.org/10.1071/FP05047>
166. Sinclair T.R. (2012). Is transpiration efficiency a viable plant trait in breeding for crop improvement? *Functional Plant Biology* 39: 359–365. <https://doi.org/10.1071/FP11198>
167. Singamsetti A., Shahi J.P., Zaidi P.H., Seetharam K., Vinayan M.T., Kumar M., Singla S., Shikha K., Madankar K. (2021). Genotype × environment interaction and selection of maize (*Zea mays* L.) hybrids across moisture regimes. *Field Crops Research* 270. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108224>

168. Spinoni J., Naumann G., Vogt J., Barbosa P. (2016). Meteorological Droughts in Europe: Events and Impacts – Past Trends and Future Projections. Publications Office of the European Union, Luxembourg, EUR 27748 EN. doi:10.2788/450449
169. Stepinac D., Pejić I., Šimić D. (2021). Modeling the long-term response of yield to heat stress for maize genotypes of different maturity. Zbornik radova 56. hrvatskog i 16. međunarodnog simpozija agronoma, Poljoprivredni fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 5. – 10. rujan 2021., Vodice, Hrvatska, str. 368 – 372.
170. Škrk N., Serrano-Notivoli R., Čufar K., Merela M., Črepinšek Z., Kajfež Bogataj L., de Luis M. (2021). SLOCLIM: a high-resolution daily gridded precipitation and temperature dataset for Slovenia, Earth Syst. Sci. Data 13: 3577–3592 <https://doi.org/10.5194/essd-13-3577-2021>
171. Thompson A.J., Andrews J., Mulholland B.J., McKee J.M.T., Hilton H.W., Black C.R., Taylor I.B. (2007). Overproduction of abscisic acid in tomato increases transpiration efficiency and root hydraulic conductivity and influences leaf expansion. Plant Physiol 143: 1905–1917. <https://doi.org/10.1104/pp.106.093559>
172. Tian B., Zhu J., Nie Y., Xu C., Meng Q., Wang P. (2018). Mitigating heat and chilling stress by adjusting the sowing date of maize in the North China Plain. J Agro Crop Sci. 205: 1–11. <https://doi.org/10.1111/jac.12299>
173. Tukey J.W. (1949). One degree of freedom for non – aditivity. Biometrics 5: 232 – 242.
174. Tyree M.T., Nardini A., Salleo S., Sack L., El Omari B. (2005). The dependence of leaf hydraulic conductance on irradiance during HPFM measurements: any role for stomatal response. J Exp Bot 56: 737–744. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri045>
175. Utz H.F. (2003). “Plabstat”. Ein Computerprogramm für die statistische Analyse pflanzenzüchterischer Experimente. (In German). Stuttgart: Institut für Pflanzenzüchtung, Saatgutforschung und Populationsgenetik der Universität Hohenheim, Germany.
176. Vadez V., Kholova J., Zaman-Allah M., Belko N. (2014). Water: the most important “molecular” component of water stress tolerance research. Functional Plant Biology 40: 1310–1322. <https://doi.org/10.1071/FP13149>
177. van der Schrier G., Briffa K.R., Jones P.D., Osborn T.J. (2006). Summer moisture variability across Europe. J Clim 19: 2818–2834. <https://doi.org/10.1175/JCLI3734.1>
178. van der Schrier G., Efthymiadis K.R., Briffa K.R., Jones P.D. (2007). European alpine moisture variability for 1800–2003. Int J Climatol 27: 415–427. <https://doi.org/10.1002/joc.1411>

179. van Eeuwijk F.A., Bustos-Korts D.V., Malosetti M. (2016). What should students in plant breeding know about the statistical aspects of genotype × environment interactions? *Crop Sci* 56: 2119–2140. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.06.0375>
180. Vargas M., Crossa J., van Eeuwijk F.A., Sayre K., Reynolds M.P. (2001). Interpreting treatment × environment interaction in agronomy trials. *Agron. J.* 93: 949 – 960. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.934949x>
181. Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I. (2010). A multiscalar drought indeks sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *J Clim* 23: 1696–1718.
182. Vučetić V. (2016). *Poljoprivreda i klimatske promjene*. Zagreb: Državni hidrometeorološki zavod.
183. Walker G.K., Hatfield J.L. (1979). A test of the stress-degree-day concept using multiple planting dates of red kidney beans. *Agron J* 71: 967 – 971.
184. Wang J., Wolff D.B. (2010). Evaluation of TRMM Ground-Validation Radar-Rain Errors Using Rain Gauge Measurements. *J. Appl. Meteorol. Clim.* 49: 310–324. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2264.1>
185. Wells N. (2002). Development of the self-calibrating palmer drought severity index. BS Honors thesis, University of Nebraska, Lincoln.
186. Wells N., Goddard S., Hayes M.J. (2004). A self-calibrating palmer drought severity index. *J Clim* 17: 2335–3235. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017%3c2335:ASPDSI%3e2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017%3c2335:ASPDSI%3e2.0.CO;2)
187. Weather data grids for agriculture risk management : the case of Honduras and Guatemala (English), Washington D.C.: World Bank Group, 2013; preuzeto s: <http://documents.worldbank.org/curated/en/583801468037498415/Weather-data-grids-for-agriculture-risk-management-the-case-of-Honduras-and-Guatemala>
188. Windhausen V.S., Wagener S., Magorokosho C., Makumbi D., Vivek B., Piepho H.P., Melchinger A.E., Atlin G.N. (2012). Strategies to subdivide a target population of environments: results from the CIMMYT led maize hybrid testing programs in Africa. *Crop Sci* 52 (5): 2143–2152. <https://dl.sciencesocieties.org/publications/cs/abstracts/52/5/2143>
189. Xu Y. (2016). Envirotyping for deciphering environmental impacts on crop plants. *Theoretical and Applied Genetics* 129(4): 653 – 673. <https://doi.org/10.1007/s00122-016-2691-5>
190. Yan W., Hunt L.A. (2003). Biplot analysis of multienvironment trial data. In: Kang MS. (ed) *Quantitative genetics, genomics and plant breeding*. CAB International, Wallingford, Oxon, UK.

191. Yang H.S., Dobermann A., Lindquist J.L., Walters D.T., Arkebauer T.J., Cassman K.G. (2004). Hybrid-maize—a maize simulation model that combines two crop modeling approaches. *Field crops research* 87(2 – 3): 131 – 154. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.10.003>
192. Yang Z., Sinclair T.R., Zhu M., Messina C.D., Cooper M., Hammer G.L. (2012). Temperature effect on transpiration response of maize plants to vapor pressure deficit. *Env Exp Bot* 78: 157–162. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.12.034>
193. Yue H., Gauch H.G., Wei J., Xie J., Chen S., Peng H., Bu J., Jiang X. (2022). Genotype by Environment Interaction Analysis for Grain Yield and Yield Components of Summer Maize Hybrids across the Huanghuaihai Region in China. *Agriculture* 12 (5): 602. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050602>
194. Zaman-Allah M., Jenkinson D.M., Vadez V. (2011). A conservative pattern of water use, rather than deep or profuse rooting, is critical for the terminal drought tolerance of chickpea. *J Exp Bot* 62: 4239–4252. <https://doi.org/10.1093/jxb/err139>
195. Zhao Z., He K., Feng Z., Li Y., Chang L., Zhang X., Xu S., Liu J., Xue J. (2019). Evaluation of Yield-Based Low Nitrogen Tolerance Indices for Screening Maize (*Zea mays* L.) Inbred Lines. *Agronomy* 9: 240. <https://doi.org/10.3390/agronomy9050240>
196. Zhu P., Zhuang Q., Archontoulis S.V., Bernacchi C., Müller C. (2019). Dissecting the nonlinear response of maize yield to high temperature stress with model-data integration. *Glob Chang Biol* 25: 2470–2484. <https://doi.org/10.1111/gcb.14632>
197. Zorić M., Gunjača J., Galić V., Jukić G., Varnica I., Šimić D. (2022). Best Linear Unbiased Predictions of Environmental Effects on Grain Yield in Maize Variety Trials of Different Maturity Groups. *Agronomy* 12(4):922. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040922>

8. ŽIVOTOPIS

Domagoj Stepinac rođen je 30. travnja 1989. godine u Zagrebu. Osnovno školsko obrazovanje pohađao je u Osnovnoj školi Kardinal Alojzije Stepinac Krašić u Krašiću. Srednjoškolsku naobrazbu usmjerenja opće gimnazije pohađao je u Srednjoj školi Jastrebarsko u Jastrebarskom. Preddiplomski studij Biljne znanosti završio je 2011. godine na Agronomskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu radom „Mineralni sastav korijena i lista kukuruza uzgajanog na hranjivim otopinama sa suboptimalnim koncentracijama željeza“. U 2010. godini prima Rektorovu nagradu za rad „Nedostatak željeza kod biljaka s različitim mehanizmima usvajanja željeza “*case study*“: kukuruz i uljana repica“. Diplomski studij Biljne znanosti završio je 2013. godine također na Agronomskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu radom „Rast i morfološke karakteristike korijena kukuruza u uvjetima nedostatka fosfora“, s najvećom pohvalom (*summa cum laude*).

Po završetku studija kraće vrijeme radi u tvrtki Jamnica d.d. u sklopu Agrokor d.d. grupacije. Nakon toga se zapošljava u Bc Institutu za oplemenjivanje i proizvodnju bilja, d.d. u Zagrebu gdje od 2. travnja 2014. godine do 30. travnja 2020. radi na radnom mjestu suradnika sjemenara, nakon čega od 1. svibnja 2020. do danas radi kao sjemenar u proizvodnji roditeljskih komponenti i linija hibrida kukuruza. Tijekom godina provedenih u Bc Institutu, d.d. kao suradnik sudjeluje na dva znanstvena i jednom stručnom projektu. Na prvom znanstvenom projektu pod nazivom „Procjena adaptabilnosti hrvatskog sortimenta kukuruza i soje u funkciji oplemenjivanja za tolerantnost na sušu“ u trajanju od dvije godine (2017. – 2019.) sudjeluje u ulozi vanjskog suradnika Agronomskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu u sklopu kojeg je izradio ovaj rad. U drugom znanstvenom projektu pod nazivom „Selekcija genotipova ozime pšenice s većom učinkovitosti korištenja dušika iz tla“ koji je Bc Institut, d.d. prijavio u sklopu operativnog programa Konkurentnost i kohezija u trajanju od tri godine (2021. – 2023.) daje znanstveni doprinosi matičnoj instituciji prilikom odabira genotipova ozime pšenice s najvećom učinkovitosti korištenja dušika iz tla. U sklopu stručnog projekta iz fondova Europske Unije također sudjeluje kao suradnik tijekom provedbe projekta pod nazivom „Ulaganje u opremanje i modernizaciju, te ugradnja opreme za doradu sjemena i nabavka mehanizacije“ u razdoblju od kolovoza 2022. do lipnja 2025. godine. Kao autor i koautor ima 7 objavljenih radova, od čega tri u kategoriji A1, dva u kategoriji A2 i dva u kategoriji A3.

Popis objavljeni znanstvenih radova:

Znanstveni radovi iz skupine a1:

1. Stepinac D., Šarčević H., Buhiniček I., Jukić M., Marković B., Jambrović A., Pejić I., Šimić D. (2021). Environmental Variability of Thousand Kernel Weight in Maize Hybrids of Different Maturity Groups. *Agriculture* 27 (2): 50 – 55. <https://doi.org/10.18047/poljo.27.2.6>
2. Buhiniček I., Kaučić D., Kozić Z., Jukić M., Gunjača J., Šarčević H., Stepinac D., Šimić D. (2021). Trends in Maize Grain Yields across Five Maturity Groups in a Long-Term Experiment with Changing Genotypes. *Agriculture* 11 (9): 887. <https://doi.org/10.3390/agriculture11090887>
3. Šarčević H., Iljkić D., Andrijanić Z., Sudarić A., Gunjača J., Varnica I., Rastija M., Godena S., Maričević M., Stepinac D., Pejić I (2022). Stability of Soybean Seed Composition across Dry and Normal Environments-A Case Study in Croatia. *Agronomy* 12 (4): 915. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040915>

Znanstveni radovi iz skupine a2:

1. Maričević M., Ikić I., Jukić K., Sever M., Stepinac D., Lovrić A. (2022). Utjecaj godine, sorte i tretmana dušičnim gnojivom na kvalitetu zrna ozime pšenice. *Sjemenarstvo* 33 (1 – 2): 5 – 16.
2. Maričević M., Jukić K., Sever M., Stepinac D., Ivanušić T., Ikić I. (2021). Nove sorte pšenoraži Bc Instituta. *Sjemenarstvo* 31(1): 39 – 46.

Znanstveni radovi iz skupine a3:

1. Lazarević B., Poljak M., Horvat T., Karažija T., Stepinac D. (2013). Utjecaj nedostatka željeza na usvajanje mikrohranjiva kod kukuruza. Zbornik radova 48. hrvatskog i 8. međunarodnog simpozija agronoma, Poljoprivredni fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 17. – 22. veljače 2013., Dubrovnik, Hrvatska, str. 88 – 92.
2. Stepinac D., Pejić I., Šimić D. (2021). Modeling the long-term response of yield to heat stress for maize genotypes of different maturity. Zbornik radova 56. hrvatskog i 16. međunarodnog simpozija agronoma, Poljoprivredni fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 20. – 25. lipnja 2021., Vodice, Hrvatska, str. 368 – 372.

9. PRILOG

Prilog 1. Prosječne mjesečne vrijednosti srednje dnevne temperature zraka za 12 promatranih okolina.

Okolina	Svibanj	Lipanj	Srpanj	Kolovoz	Rujan	Aritmetička sredina okoline
Šašinovec 2017	17,23	21,32	22,05	20,94	14,28	19,18
Rugvica 2017	17,27	22,42	22,81	20,83	13,39	19,36
Osijek 2017	17,88	22,72	23,51	23,64	16,21	20,81
Beli Manastir 2017	17,55	22,42	23,16	23,33	16,46	20,60
Tovarnik 2017	18,10	23,14	23,65	24,30	17,03	21,26
Kutjevo 2017	17,20	22,34	23,29	23,80	15,95	20,53
Aritmetička sredina 2017.	17,54	22,39	23,08	22,81	15,55	20,29
Šašinovec 2018	18,58	20,56	21,60	21,89	15,98	19,74
Rugvica 2018	18,01	20,22	20,45	21,00	16,84	19,31
Osijek 2018	20,46	21,41	22,37	24,05	18,08	21,29
Beli Manastir 2018	19,98	21,42	22,55	24,04	17,79	21,18
Tovarnik 2018	20,51	21,73	22,71	24,10	18,67	21,56
Kutjevo 2018	19,41	20,83	21,99	23,24	17,28	20,57
Aritmetička sredina 2018.	19,49	21,03	21,95	23,05	17,44	20,61

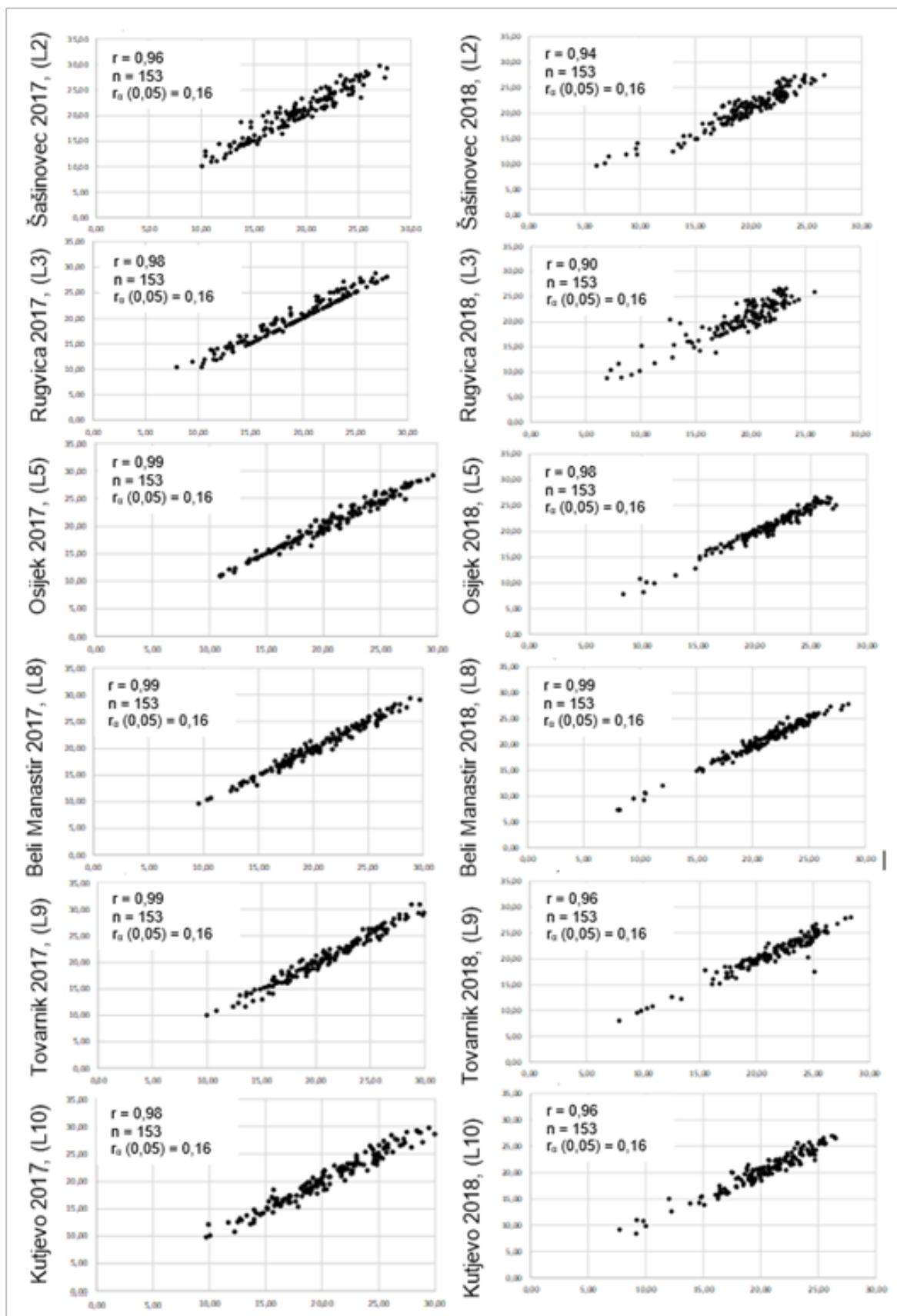
Prilog 2. Prosječne mjesečne vrijednosti relativne vlage zraka za 12 promatranih okolina.

Okolina	Svibanj	Lipanj	Srpanj	Kolovoz	Rujan	Aritmetička sredina okoline
Šašinovec 2017	70,99	72,82	73,13	79,23	86,60	76,51
Rugvica 2017	73,92	73,81	71,01	74,67	85,76	75,78
Osijek 2017	65,17	58,60	59,54	59,52	71,43	62,82
Beli Manastir 2017	73,41	62,03	58,56	58,80	69,69	64,48
Tovarnik 2017	63,92	58,23	59,16	56,25	67,18	60,93
Kutjevo 2017	63,71	57,16	54,53	52,80	68,47	59,29
Aritmetička sredina 2017.	68,52	63,78	62,65	63,54	74,85	66,63
Šašinovec 2018	76,80	77,43	79,56	78,68	81,16	78,72
Rugvica 2018	77,56	77,53	78,06	79,35	77,20	77,95
Osijek 2018	65,23	74,52	73,30	71,75	73,82	71,69
Beli Manastir 2018	61,73	69,38	66,49	62,11	65,56	65,02
Tovarnik 2018	63,55	70,68	70,35	64,87	65,30	66,94
Kutjevo 2018	62,23	65,68	66,15	63,47	65,92	64,68
Aritmetička sredina 2018.	67,85	72,54	72,32	70,04	71,49	70,83

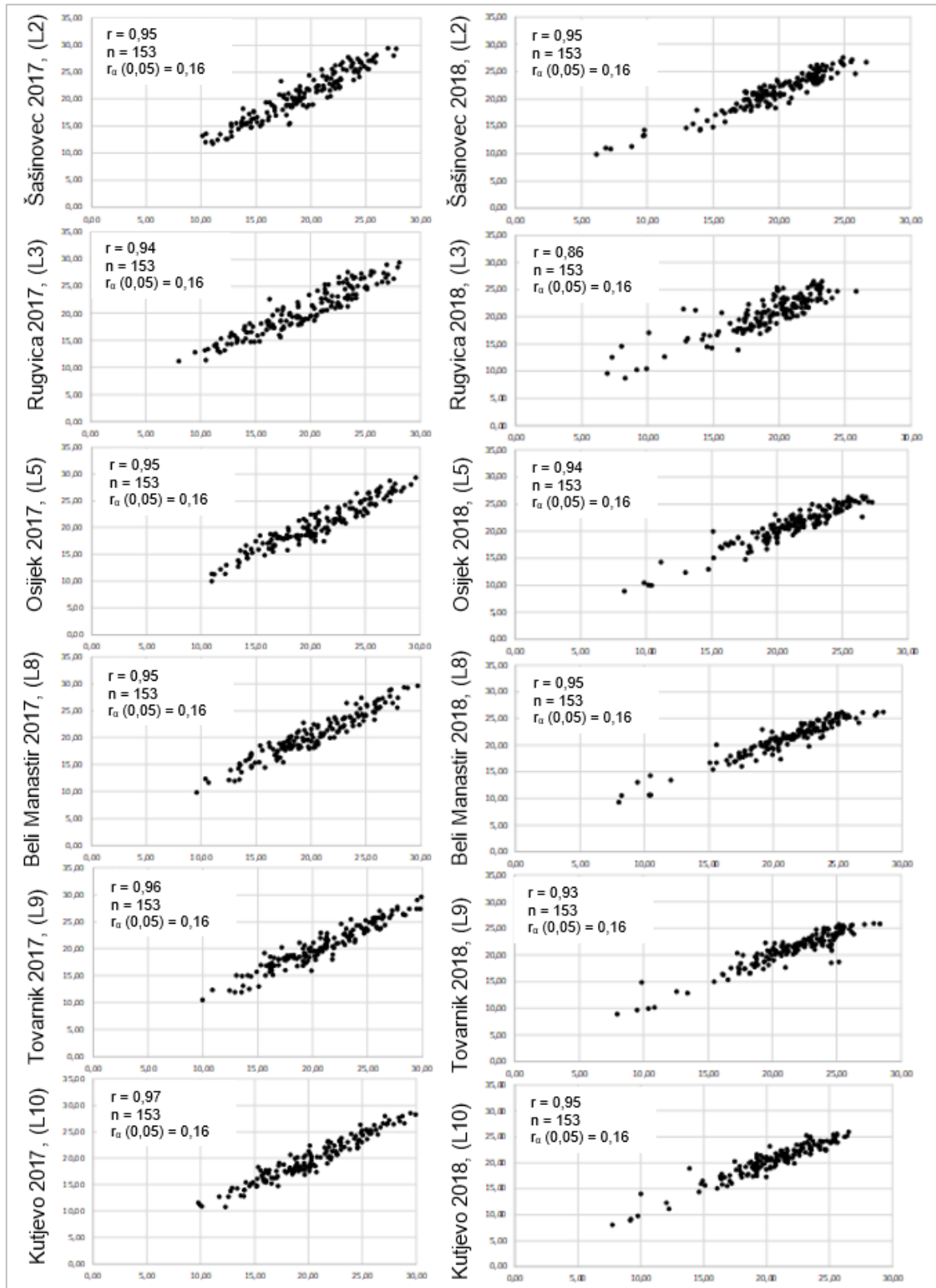
Prilog 3. Sume i prosječne vrijednosti mjesečnih količina oborine za 12 promatranih okolina.

Okolina	Svibanj	Lipanj	Srpanj	Kolovoz	Rujan	Suma okoline
Šašincevec 2017	42,80	90,80	111,62	55,62	280,27	581,11
Rugvica 2017	47,80	57,80	71,30	36,60	202,20	415,70
Osijek 2017	50,60	45,40	64,00	30,00	80,30	270,30
Beli Manastir 2017	49,50	45,30	63,80	33,00	106,30	297,90
Tovarnik 2017	42,50	38,00	55,60	40,80	74,80	251,70
Kutjevo 2017	57,60	57,60	36,40	26,00	108,80	286,40
Aritmetička sredina 2017.	48,47	55,82	67,12	37,00	142,11	350,52
Šašincevec 2018	155,66	157,46	107,39	79,74	79,20	579,45
Rugvica 2018	77,60	135,60	82,50	34,80	24,60	355,10
Osijek 2018	49,00	97,00	90,50	52,00	64,20	352,70
Beli Manastir 2018	37,40	158,60	55,80	38,60	72,80	363,20
Tovarnik 2018	101,40	164,40	92,80	62,00	52,40	473,00
Kutjevo 2018	38,40	110,80	103,60	62,00	44,80	359,60
Aritmetička sredina 2018.	76,58	137,31	88,77	54,86	56,33	413,84
Aritmetička sredina svih 12 okolina						382,18

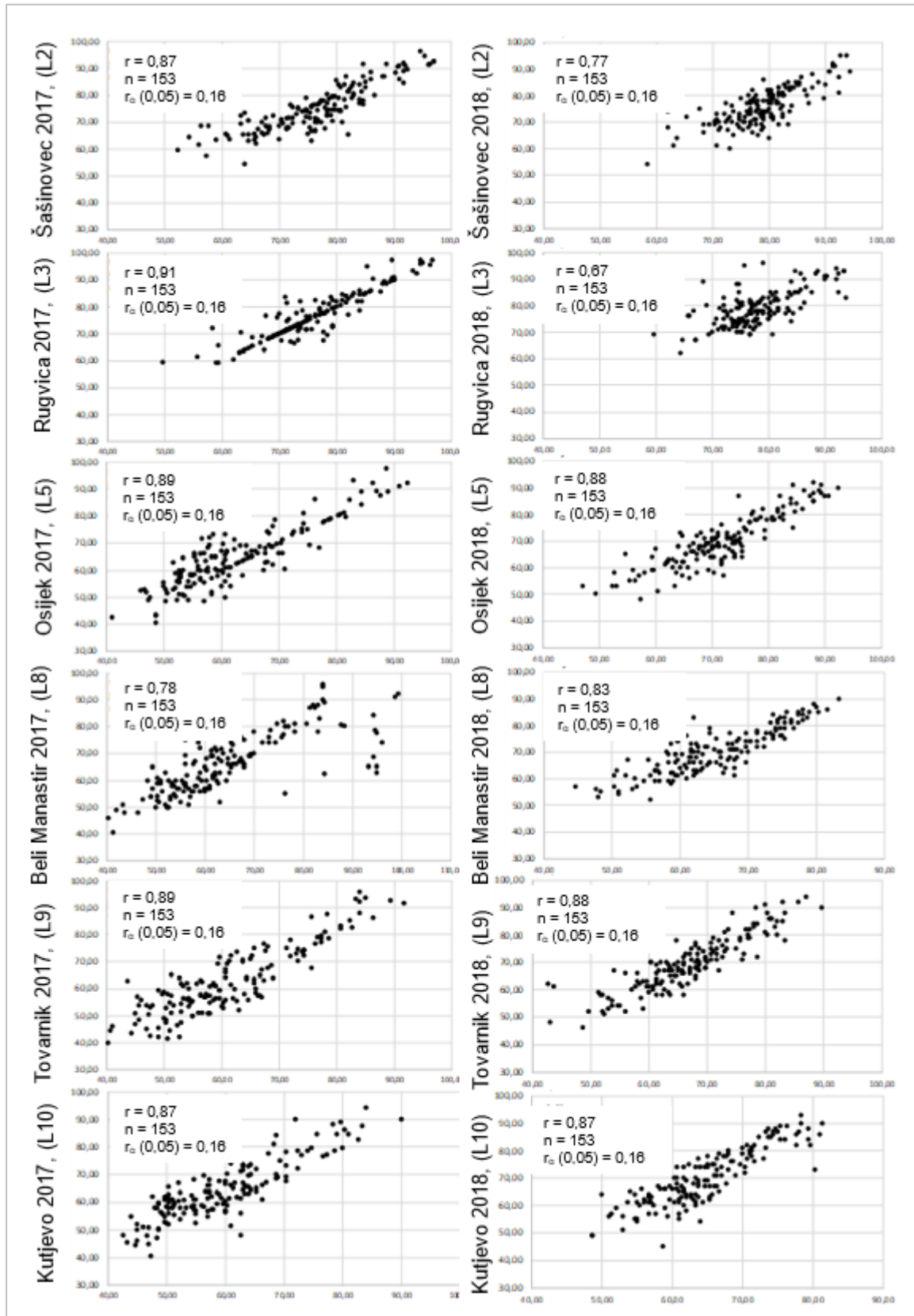
Prilog 4. Pearsonovi koeficijenti korelacije između podataka prikupljenih na pokusnoj lokaciji i alternativnih izvora (POK i DHMZ) za srednje dnevne temperature zraka tijekom 2017. i 2018. godine, za sve lokacije provedbe pokusa.



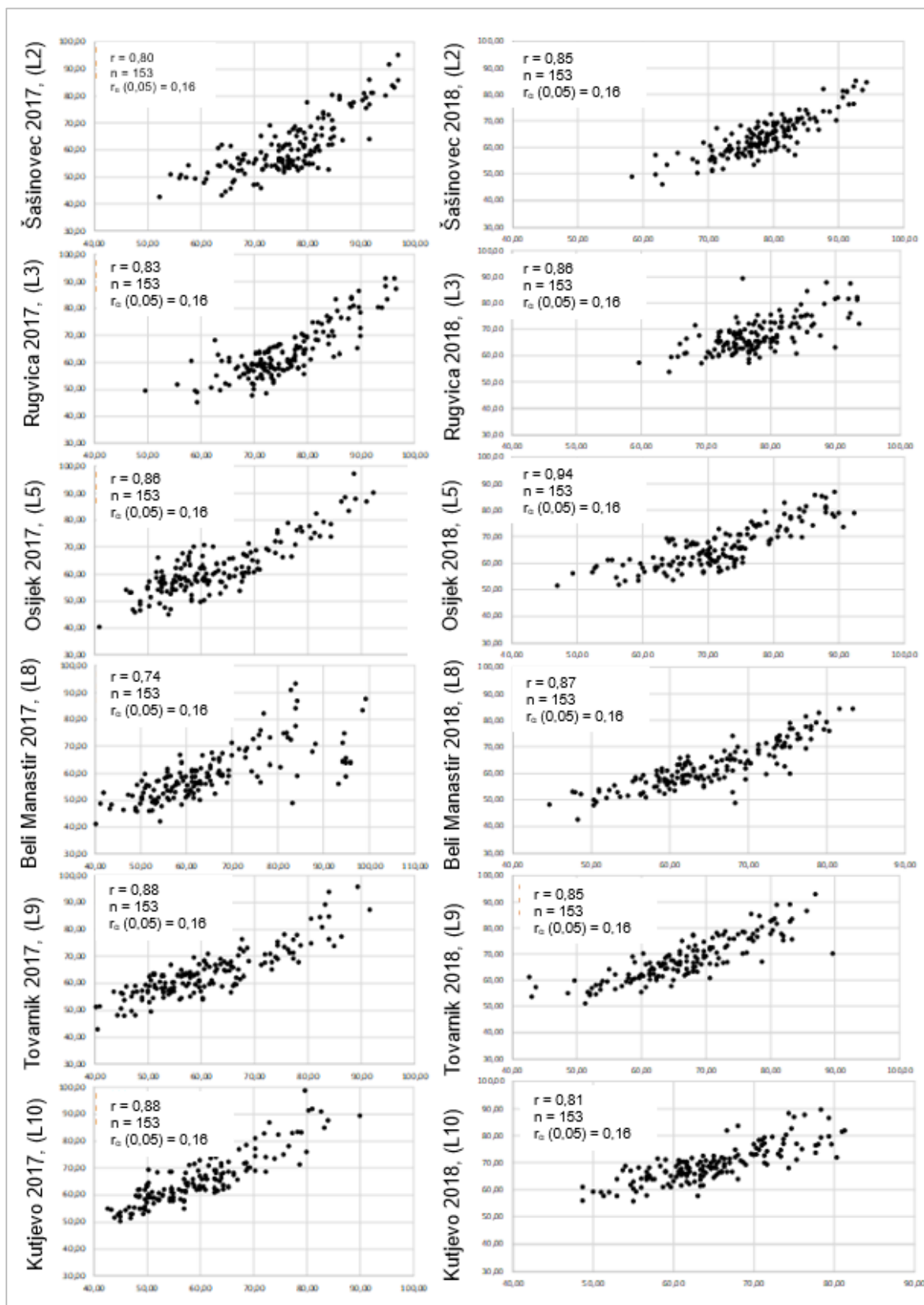
Prilog 5. Pearsonovi koeficijenti korelacije između podataka prikupljenih na pokusnoj lokaciji i alternativnih izvora (POK i A4C) za srednje dnevne temperature zraka tijekom 2017. i 2018. godine, za sve lokacije provedbe pokusa.



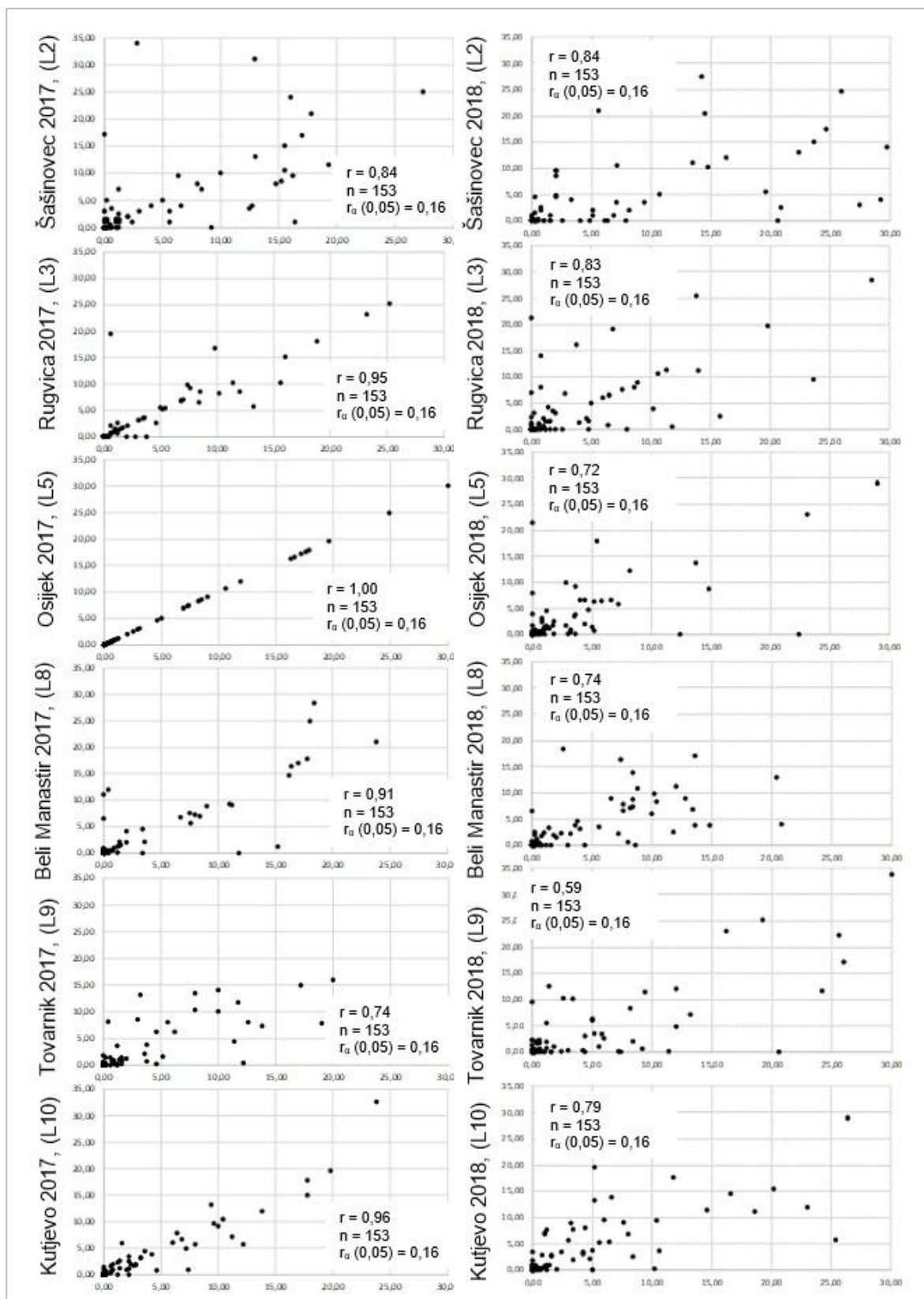
Prilog 6. Pearsonovi koeficijenti korelacije između podataka prikupljenih na pokusnoj lokaciji i alternativnih izvora (POK i DHMZ) za relativne vlage zraka tijekom 2017. i 2018. godine, za sve lokacije provedbe pokusa.



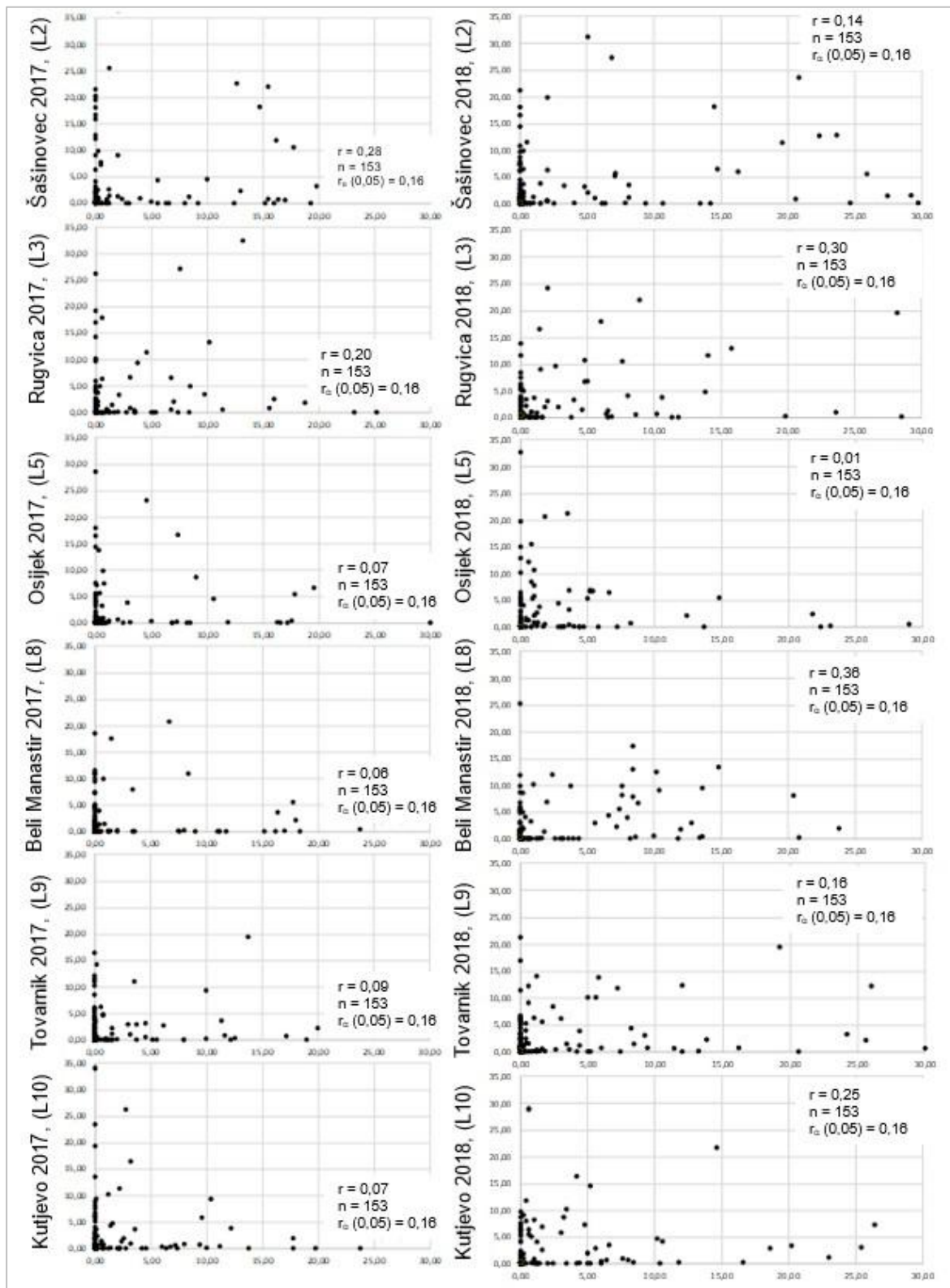
Prilog 7. Pearsonovi koeficijenti korelacije između podataka prikupljenih na pokusnoj lokaciji i alternativnih izvora (POK i A4C) za relativne vlage zraka tijekom 2017. i 2018. godine, za sve lokacije provedbe pokusa.



Prilog 8. Pearsonovi koeficijenti korelacije između podataka prikupljenih na pokusnoj lokaciji i alternativnih izvora (POK i DHMZ) za količine oborine tijekom 2017. i 2018. godine, za sve lokacije provedbe pokusa.



Prilog 9. Pearsonovi koeficijenti korelacije između podataka prikupljenih na pokusnoj lokaciji i alternativnih izvora (POK i A4C) za količine oborine tijekom 2017. i 2018. godine, za sve lokacije provedbe pokusa.



Prilog 10. Analiza varijance (ANOVA) pokusa po lokacijama u 2017. godini za interval između polinacije i svilanja – ASI (dani).

Izvor variranja	Stupnjevi slobode	Varijanca (MS)					
		Šašinovec	Rugvica	Osijek	Beli Manastir	Tovarnik	Kutjevo
Repeticija	3	0,9 *	2,8*	0,1	0,2	2,7*	3,1**
Genotip	31	1,6**	2,0**	0,9*	2,0**	1,0	3,4**
Ostatak	93	0,3	0,8	0,5	0,5	0,7	0,8

** F test značajan na razini $p \leq 0,01$

* F test značajan na razini $p \leq 0,05$

Prilog 11. Analiza varijance (ANOVA) pokusa po lokacijama u 2018. godini za interval između polinacije i svilanja – ASI (dani).

Izvor variranja	Stupnjevi slobode	Varijanca (MS)					
		Šašinovec	Rugvica	Osijek	Beli Manastir	Tovarnik	Kutjevo
Repeticija	3	0,05	1,0	1,9	0,6	1,4	0,3
Genotip	31	0,9	1,3**	1,6**	1,2**	1,7*	2,9**
Ostatak	93	0,7	0,6	0,8	0,6	0,9	0,8

** F test značajan na razini $p \leq 0,01$

* F test značajan na razini $p \leq 0,05$

Prilog 12. Analiza varijance (ANOVA) pokusa po lokacijama u 2017. godini za vlagu zrna (%).

Izvor variranja	Stupnjevi slobode	Varijanca (MS)					
		Šašinovec	Rugvica	Osijek	Beli Manastir	Tovarnik	Kutjevo
Repeticija	3	3,32*	0,62	5,92**	4,74**	0,90	0,44
Genotip	31	16,49**	41,78**	46,10**	22,61**	11,36**	27,86**
Ostatak	93	1,19	1,45	1,00	0,72	0,34	0,86

** F test značajan na razini $p \leq 0,01$

* F test značajan na razini $p \leq 0,05$

Prilog 13. Analiza varijance (ANOVA) pokusa po lokacijama u 2018. godini za vlagu zrna (%).

Izvor variranja	Stupnjevi slobode	Varijanca (MS)					
		Šašinovec	Rugvica	Osijek	Beli Manastir	Tovarnik	Kutjevo
Repeticija	3	5,83**	10,84**	0,76	0,01	1,44**	1,08
Genotip	31	44,88**	27,92**	8,24**	0,86**	5,45**	5,25**
Ostatak	93	1,03	1,17	0,36	0,03	0,33	0,50

** F test značajan na razini $p \leq 0,01$

Prilog 14. Analiza varijance (ANOVA) pokusa po lokacijama u 2017. godini za visinu biljke (centimetri).

Izvor variranja	Stupnjevi slobode	Varijanca (MS)					
		Šašinovec	Rugvica	Osijek	Beli Manastir	Tovarnik	Kutjevo
Repeticija	3	315,8**	84,0	312,4**	265,9**	23,3	184,5*
Genotip	31	1509,4**	529,1**	807,2**	639,5**	585,3**	749,0**
Ostatak	93	58,0	39,5	59,8	26,8	32,1	66,2

** F test značajan na razini $p \leq 0,01$

* F test značajan na razini $p \leq 0,05$

Prilog 15. Analiza varijance (ANOVA) pokusa po lokacijama u 2018. godini za visinu biljke (centimetri).

Izvor variranja	Stupnjevi slobode	Varijanca (MS)					
		Šašinovec	Rugvica	Osijek	Beli Manastir	Tovarnik	Kutjevo
Repeticija	3	75,7	3299,5**	64,0	875,3	251,5**	65,1
Genotip	31	430,4**	1099,9**	602,6**	1332,1**	1356,7**	1118,1**
Ostatak	93	163,1	200,7	60,3	567,1	56,4	69,5

** F test značajan na razini $p \leq 0,01$

Prilog 16. Analiza varijance (ANOVA) pokusa po lokacijama u 2017. godini za masu tisuću zrna (grami).

Izvor variranja	Stupnjevi slobode	Varijanca (MS)					
		Šašinovec	Rugvica	Osijek	Beli Manastir	Tovarnik	Kutjevo
Repeticija	3	767,2	712,2	497,1	268,4	239,4	135,4
Genotip	31	3435,8**	5653,3**	2550,4**	2523,3**	2131,5**	2523,0**
Ostatak	93	390,7	397,4	555,0	480,0	434,0	274,2

** F test značajan na razini $p \leq 0,01$

Prilog 17. Analiza varijance (ANOVA) pokusa po lokacijama u 2018. godini za masu tisuću zrna (grami).

Izvor variranja	Stupnjevi slobode	Varijanca (MS)					
		Šašinovec	Rugvica	Osijek	Beli Manastir	Tovarnik	Kutjevo
Repeticija	3	274,4	591,7	518,8	586,3	813,0	212,7
Genotip	31	3600,6**	4267,4**	2980,5**	2670,6**	2612,4**	2395,5**
Ostatak	93	522,0	883,0	369,2	326,6	436,0	450,1

** F test značajan na razini $p \leq 0,01$

Prilog 18. Analiza varijance (ANOVA) pokusa po lokacijama u 2017. godini za masu zrna na klipu (grami).

Izvor variranja	Stupnjevi slobode	Varijanca (MS)					
		Šašinovec	Rugvica	Osijek	Beli Manastir	Tovarnik	Kutjevo
Repeticija	3	654,1	50,4	182,4	1012,3**	247,4	630,0
Genotip	31	3043,5**	5483,9**	1385,0**	1928,6**	2172,0**	1728,8**
Ostatak	93	341,9	319,4	343,3	240,6	245,7	261,0

** F test značajan na razini $p \leq 0,01$

Prilog 19. Analiza varijance (ANOVA) pokusa po lokacijama u 2018. godini za masu zrna na klipa (grami).

Izvor variranja	Stupnjevi slobode	Varijanca (MS)					
		Šašinovec	Rugvica	Osijek	Beli Manastir	Tovarnik	Kutjevo
Repeticija	3	160,8	1490,4*	381,4	637,6	512,7	255,4
Genotip	31	2629,6**	3370,0**	1546,7**	3051,0**	2137,8**	2758,7**
Ostatak	93	456,8	402,2	243,4	378,8	339,7	514,4

** F test značajan na razini $p \leq 0,01$

* F test značajan na razini $p \leq 0,05$

Prilog 20. Analiza varijance (ANOVA) pokusa po lokacijama u 2017. godini za prinos zrna (tone po hektaru).

Izvor variranja	Stupnjevi slobode	Varijanca (MS)					
		Šašinovec	Rugvica	Osijek	Beli Manastir	Tovarnik	Kutjevo
Repeticija	3	3,35	0,62	10,51**	1,73	1,84	2,00
Genotip	31	6,79**	7,14**	8,22**	4,22**	4,53**	2,83**
Ostatak	93	1,65	1,21	1,48	0,81	0,98	0,99

** F test značajan na razini $p \leq 0,01$

Prilog 21. Analiza varijance (ANOVA) pokusa po lokacijama u 2018. godini za prinos zrna (tone po hektaru).

Izvor variranja	Stupnjevi slobode	Varijanca (MS)					
		Šašinovec	Rugvica	Osijek	Beli Manastir	Tovarnik	Kutjevo
Repeticija	3	2,19	12,47**	2,01	0,67	0,41	7,05*
Genotip	31	18,90**	7,51**	4,35**	5,97**	3,98**	4,19*
Ostatak	93	3,47	1,24	2,11	0,60	0,62	2,25

** F test značajan na razini $p \leq 0,01$

* F test značajan na razini $p \leq 0,05$

Prilog 22. Aritmetičke sredine 6 promatranih svojstava kroz svih 12 okolina.

Okolina	ASI	Vlaga zrna	Visina biljke	Masa tisuću zrna	Masa zrna na klip	Prinos
Šašinovec 2017	1,8	22,87	235,1	369,5	221,7	13,70
Rugvica 2017	1,5	24,65	199,4	371,5	173,5	10,68
Osijek 2017	3,2	20,71	184,1	307,9	196,0	12,35
Beli Manastir 2017	2,5	21,27	190,4	334,4	161,1	10,41
Tovarnik 2017	2,8	20,98	172,6	321,5	174,9	9,48
Kutjevo 2017	2,9	20,68	182,2	292,7	143,7	8,09
Aritmetička sredina 2017.	2,4	21,86	194,0	332,9	178,5	10,78
Šašinovec 2018	1,6	21,10	306,7	352,9	227,0	13,45
Rugvica 2018	1,5	20,95	243,2	356,0	205,3	10,26
Osijek 2018	3,8	14,87	214,8	364,7	245,1	14,48
Beli Manastir 2018	2,4	18,12	232,3	347,1	202,7	12,50
Tovarnik 2018	2,8	18,24	218,0	345,4	183,3	11,29
Kutjevo 2018	3,1	19,34	218,3	373,7	202,4	11,52
Aritmetička sredina 2018.	2,5	18,77	238,9	356,7	211,0	12,25
Aritmetička sredina svih 12 okolina	2,5	20,31	216,4	344,8	194,7	11,52
LSD (0,05)	0,5	0,66	8,2	14,6	10,2	0,75