

„LETOPIS NAUČNIH RADOVA“

Godina 49 (2025), broj 1 - 2, strana 1 – 70

ISSN 0546-8264; ISSN 2560-3183

Časopis iz oblasti poljoprivrede >>> LETOPIS NAUČNIH RADOVA <<<

Adresa: Trg Dositeja Obradovića 8, 21000 Novi Sad

Telefon: +381 21 4853 500; Mob.: +381 62 89 88 346

“ANNALS OF AGRONOMY”

Vol. 49 (2025), No. 1 – 2, pp. 1 – 70

ISSN 0546-8264; ISSN 2560-3183

Journal in the field of Agriculture “ANNALS OF AGRONOMY”

Adress: Trg Dositeja Obradovića 8, 21000 Novi Sad

Phone: +381 21 4853 500; Mob.: +381 62 89 88 346

Glavni i odgovorni urednik / Editor-in-Chief

Prof. dr Nenad Magazin, Poljoprivredni fakultet Novi Sad, dekan

Urednik / Editor

Doc. dr Đorđe Vojnović, Poljoprivredni fakultet Novi Sad

Pridruženi urednici / Associate Editors

Prof. dr Marina Putnik-Delić, Poljoprivredni fakultet Novi Sad – Ishrana biljaka

Prof. dr Borislav Banjac, Poljoprivredni fakultet Novi Sad – Genetika

Prof. dr Dragana Budakov, Poljoprivredni fakultet Novi Sad – Zaštita bilja

Prof. dr Marko Kostić, Poljoprivredni fakultet Novi Sad – Precizna poljoprivreda

Prof. dr Jelena Popović-Đorđević, Poljoprivredni fakultet Beograd – Funkcionalna hrana

Prof. dr Todor Marković, Poljoprivredni fakultet Novi Sad – Agroekonomija

Prof. dr Marko Cincović, Poljoprivredni fakultet Novi Sad – Veterinarska medicina

Tehnički urednik / Editorial Assistant:

Mast. inž. Teodora Feher Kričković

Izdavač / Publisher

Poljoprivredni fakultet Novi Sad / Faculty of Agriculture Novi Sad

„LETOPIS NAUČNIH RADOVA“
Godina 49 (2025), broj 1 - 2, strana 1 – 70

“ANNALS OF AGRONOMY”
Vol. 49 (2025), No. 1 – 2, pp. 1 – 70

SADRŽAJ

| | |
|--|---------|
| <i>Povrtarski plodored na otvorenom polju – zapostavljena osnovna mera</i> Červenski Janko, Adamović Boris, Zec Srđan, Slobodan Vlajić | 1 - 11 |
| <i>Balancing maize yield and nitrogen use efficiency under dry, optimal and wet production conditions</i> Dunderski Dušan, Bekavac Goran, Purar Božana, Đurić Anja, Tanasković Maja, Visković Jelena, Jaćimović Goran, Latković Dragana | 12 - 30 |
| <i>Uticaj dužine i temperature čuvanja kontrolnog seruma na stabilnost biohemijskih parametara</i> Fajin Danijela, Davidov Ivana, Ružić Zoran, Majkić Mira, Cincović Marko | 31 - 37 |
| <i>Ispitivanje efekta tretmana niacinom na metaboličku stabilnost hepatocita krava u ranoj laktaciji</i> Marković Mira, Stojanović Dragica, Hristovska Talija, Petrović Kosta, Cincović Marko, Majkić Mira | 38 - 45 |
| <i>Influence of origin and salt tolerance on biofilm formation by halotolerant isolates</i> Adamov Dušan, Stamenov Dragana, Hajnal Jafari Timea, Đurić Simonida | 46 - 52 |
| <i>Kosmajski rudnici kao primer rudarskog nasleđa: Primena GIS-a u karakterizaciji prostora</i> Paravinja Ana, Benka Pavel, Blagojević Boško, Nikolić Nina | 53 - 61 |
| <i>Kvantitativno-kvalitativna analiza stočarske proizvodnje u Srbiji 2017-2024, sa projekcijom i preporukama do 2030. godine</i> Aleksić B. Snežana | 62 - 70 |



Povrtarski plodored na otvorenom polju

– zapostavljena osnovna mera

Janko Červenski^{a*}, Boris Adamović^b, Srđan Zec^a, Slobodan Vlajić^a

^aInstitut za ratarstvo I povrtarstvo, Odeljenje za povrtarske I alternativne biljne vrste, Novi Sad, Srbija

^bUniverzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Departman za ratarstvo I povrtarstvo, Novi Sad, Srbija

*Autor za kontakt: janko.cervenski@ifvcns.ns.ac.rs

SAŽETAK

Tokom poslednjih pedeset godina smena useva značajno je pojednostavljena, pre svega smanjenjem broja biljnih vrsta u plodoredu i povećanjem površina pod monokulturama. Savremena poljoprivredna gazdinstva sve češće primenjuju pojednostavljene modele korišćenja zemljišta. Ova pojava rezultat je, s jedne strane, ekonomske opravdanosti i tržišnih zahteva, a s druge strane, sve izraženijih promena meteoroloških uslova uslovljenih (verovatnim) globalnim klimatskim promenama. Zbog toga je od izuzetnog značaja racionalno korišćenje zemljišnih resursa, uz primenu pravilnog plodoreda i smene povrtarskih biljaka. Poštovanjem plodoreda i pravilnom smenom useva izbegavaju se brojni problemi koji se u suprotnom teško prevazilaze. Dvokulturni trogodišnji ili dvokulturni četvorogodišnji povrtarski plodored na jednom polju sa redovnim obnavljanjem organske materije zemljišta čini dobru osnovu organizovanosti povrtarske proizvodnje na otvorenom polju.

KLJUČNE REČI

povrtarske vrste, intenzivna proizvodnja, plodored

Uvod

U savremenoj proizvodnji povrća gaji se veliki broj biljnih vrsta različite dužine vegetacije. Deo tih vrsta uzgaja se iz rasada, čime se značajno skraćuje period vegetacije na otvorenom polju. Ovakav način proizvodnje omogućava smenu većeg broja useva tokom jedne vegetacione sezone, što doprinosi intenzivnijem i racionalnijem korišćenju zemljišta. Sistem biljne proizvodnje kojim se planira redosled gajenja biljnih vrsta na određenoj površini, u prostornom i vremenskom smislu, naziva se plodored. Primenom plodoreda teži se očuvanju biološke ravnoteže koja postoji u ekosistemima i prirodnim biocenozama, čime se posredno utiče na očuvanje i unapređenje biodiverziteta – raznovrsnosti živog sveta, (Lazić et al., 2013; Červenski et al., 2020).

Tokom poslednjih pedeset godina smena useva značajno je pojednostavljena, pre svega smanjenjem broja biljnih vrsta u plodoredu i povećanjem površina pod monokulturama. Ovaj trend rezultat je sve intenzivnije upotrebe sintetičkih đubriva i sredstva za zaštitu bilja, kao i sve izraženijeg razdvajanja biljne i stočarske proizvodnje. Poljoprivredni proizvođači su tradicionalno koristili raznovrsne i kompleksne plodorede kako bi obezbedili optimalnu ravnotežu hranljivih materija i vode u zemljištu, te kontrolisali prisustvo korova, štetočina i biljnih bolesti. Nasuprot tome, savremena poljoprivredna gazdinstva sve češće primenjuju pojednostavljene modele korišćenja zemljišta (Barbieri et al., 2017).

Plodored predstavlja jedan od vodećih faktora održivog i profitabilnog razvoja biljne proizvodnje, a njegov značaj posebno dolazi do izražaja u povrtarstvu, gde doprinosi očuvanju plodnosti zemljišta, smanjenju zakorovljenosti, bolesti i štetočina, te omogućava racionalno korišćenje resursa.

U prošlosti se u sistemu plodoreda gajio znatno veći broj biljnih vrsta u odnosu na današnji period, u kojem dominiraju dvopoljni plodored i, sve češće, monokultura. Ova pojava rezultat je, s jedne strane, ekonomske opravdanosti i tržišnih zahteva, a s druge strane, sve izraženijih promena meteoroloških uslova uslovljenih (verovatnim) globalnim klimatskim promenama.

U poslednjim godinama verovatne klimatske promene postaju sve izraženije, što dodatno komplikuje planiranje i organizaciju biljne proizvodnje i uslovljava promene u pristupu gajenju povrća. Generalno posmatrano, površine pod povrtarskim kulturama i krompirom su u opadanju, ali se proizvodnja ovih kultura intenzivira kroz širenje objekata zaštićenog prostora i primenu savremenih tehnologija. Paralelno s tim, ekonomski položaj povrtarskih proizvoda u odnosu na žitarice i stočarske

proizvode značajno se poboljšava, što potvrđuje rast pariteta cena u korist povrća (Ilin i Pauljev, 2024).

Monokultura u povrtarskoj proizvodnji

Većinu povrtarskih biljaka ne bi trebalo gajiti uzastopno na istoj površini zemljišta, jer ne podnose monokulturu. Naime, mnoge povrtarske vrste luče u zoni korenovog sistema toksične materije, izazivajući tzv. zamor zemljišta, što je naročito izraženo u proizvodnji povrća u zaštićenom prostoru. Gajenje u monokulturi dovodi do povećanja broja i koncentracije parazitnih mikroorganizama u zemljištu. Posledično dolazi do pogoršanja hemijskih i fizičkih osobina zemljišta, kao i do promena u sastavu mikroflore i mikrofaune, najčešće u negativnom pravcu. Na taj način monokultura narušava strukturu zemljišta i utiče na njegovu plodnost. Takođe, u plodoredu bi trebalo izbegavati uzastopno gajenje povrtarskih vrsta koje pripadaju istoj porodici, jer te biljke često imaju zajedničke štetne organizme – insekte i patogene koji se lako prenose sa jednog useva na drugi (Vuković et al., 2014; Shafique et al., 2016; Vlajić et al., 2018), (Tabela 1).

Tabela 1 Povrtarske kulture koje ne treba gajiti na istoj parceli godinu za godinom zbog zajedničkih štetnih organizama

Table 1 Vegetable crops that should not be grown on the same plot year after year due to common harmful organisms

| Familija i naziv vrste | Zajednički štetni organizmi |
|---|---|
| Solanaceae: paradajz, paprika, plavi patlidžan, krompir | krompirova zlatica, <i>Verticillium</i> spp. i <i>Fusarium</i> spp. (zelena uvenuća), pamukova soвица, kukuruzni plamenac, nematode, grinje |
| Cucurbitaceae: krastavac, tikva, dinja, lubenica, tikvica | prouzrokovajući plamenjače i pepelnice, nematode, grinje |
| Brassicaceae: rotkvice, rotkve, kupus, kelj, keleraba, karfiol, brokoli | kupusova lisna vaš, prouzrokovatelj bele truleži, buvači, repičin sjajnik (kod semenskih useva) |
| Fabaceae: grašak, pasulj, boranija | žišci, prouzrokovatelj bele truleži |
| Apiaceae: šargarepa, peršun, paštrnak | mrkvina muva, prouzrokovatelj septoriozne pegavosti lista, pepelnica, grinje |
| Alliaceae: crni luk, beli luk, praziluk | lukova muva, prouzrokovatelj plamenjače luka, trips, nematode |

Jedan od glavnih faktora uspešne proizvodnje povrća jeste poznavanje zahteva svake biljne vrste u pogledu hranljivih elemenata, ali i ekoloških uslova. Plodored kao sistem vremenske i prostorne smene useva, pored toga što doprinosi održavanju plodnosti zemljišta i smanjenoj zakorovljenosti, takođe u velikoj meri smanjuje brojnost i napad brojnih štetočina. Imajući u vidu da gajene biljke iz iste familije često napadaju iste vrste insekata, istu ili srodnu biljnu vrstu na isto mesto treba gajiti posle četiri ili pet godina. Zbog toga se ne preporučuje uzastopno gajenje kultura iz iste porodice niti njihovo kombinovanje u plodoredu više godina, kao što su paradajz (*Lycopersicon esculentum* L.), paprika (*Capsicum annuum* L.), plavi patlidžan (*Solanum melongena* L.) ili krompir (*Solanum tuberosum* L.), (Šunjka i Vuković 2025).

Poštovanjem plodoreda i pravilnom smenom useva izbegavaju se brojni problemi koji se u suprotnom teško prevazilaze. Svaku proizvodnju neophodno je pažljivo planirati unapred, pri čemu se izbor kulture za određenu parcelu zasniva na većem broju kriterijuma – od agroekoloških uslova do potreba tržišta.

Značaj plodoreda u intenzivnoj proizvodnji povrća

Proizvodnja povrća predstavlja jednu od najintenzivnijih grana biljne proizvodnje, što se ogleda u visini

prinosa po jedinici površine, ostvarenom ekonomskom efektu i značajnom učešću ljudskog rada. Povrtarska proizvodnja ima višestruki značaj, pre svega zbog povezanosti sa prerađivačkom industrijom, budući da je povrće osnovna sirovina za različite oblike prerade – zamrzavanje, sterilizaciju, dehidraciju i proizvodnju gotovih jela, ali i za potrebe prehrambene i mesne industrije. Povrće takođe ima primenu u farmaceutskoj industriji, kao i u stočarstvu, gde se koristi kao kvalitetna stočna hrana (Ilin i Pauljev, 2024).

U Republici Srbiji povrtarska proizvodnja predstavlja značajnu i tradicionalnu privrednu delatnost. Ova grana omogućava intenzivno korišćenje zemljišta i ostvarivanje visokog dohotka po jedinici površine, ali uz povećana ulaganja i intenzivan angažman ljudskog rada. Međutim, proizvođači često posmatraju samo ekonomsku stranu ove proizvodnje, što neretko postaje glavni kriterijum za izbor kultura i organizaciju proizvodnje. Savremena proizvodnja povrća sve više postaje tržišno orijentisana i uglavnom se svodi na gajenje samo nekoliko najvažnijih vrsta – paprika, paradajz, krastavac, krompir, kupus i različite vrste lukova, često i u sistemu monokulture (Medić Pap et al., 2019).

Više od 95% proizvodnje povrća u Srbiji odvija se na otvorenom polju, dok se svega oko 5% realizuje u zaštićenim prostorima. Takođe, značajan deo proizvodnje odvija se u baštama i okućnicama, što čini oko 20% ukupne proizvodnje na otvorenom polju (Červenski et al., 2020).

Korišćenje većeg broja povrtarskih vrsta u sistemu proizvodnje trebalo bi da obezbedi određenu sigurnost i stabilnost proizvodnje. Pre donošenja odluke o ulasku u intenzivnu povrtarsku proizvodnju, neophodno je razmotriti šta će se gajiti, kada i na koji način, kao i gde će proizvedeni proizvodi biti plasirani i prodati. Povrtarske vrste koje se uključuju u plodored moraju biti pažljivo odabrane, uzimajući u obzir optimalne rokove setve ili sadnje.

Intenzivna proizvodnja povrća podrazumeva maksimalno racionalno i organizovano korišćenje raspoloživog zemljišta i resursa. To uključuje primenu pravilno organizovanog plodoreda sa adekvatnom agrotehnikom i poznavanje tržišta kao osnove za plasman viškova proizvodnje.

Tokom jedne vegetacione sezone, ili u okviru jedne godine, na istoj površini mogu se uzastopno ili istovremeno gajiti različite povrtarske vrste. Ovakva organizacija proizvodnje omogućena je zbog različite dužine vegetacije kod povrtarskih kultura, razlika u zahtevima za temperaturom, otpornosti na niske temperature, kao i zbog različitih potreba za vegetacionim prostorom. Princip smene useva može se zasnivati na glavnom usevu – onom koji ima najdužu vegetaciju ili ostvaruje najveći prinos.

Ukoliko se na istoj parceli tokom jedne godine proizvode: predkultura (najčešće neka rana prolećna ili ozima vrsta kao što su salata, spanać, keleraba, rotkvica, grašak, blitva, rani krompir, mladi luk); glavna kultura (ona sa najdužom vegetacijom ili najvećim prinosom, kao što su paprika, paradajz, boranija, kupus, crni luk ili tikvica); naknadna kultura (koja se gaji posle glavne kulture, poput jesenjeg belog luka, srebrnjaka, salate ili spanaća), ovakav tip plodoreda naziva se intenzivni povrtarski plodored (Lazić et al., 2013; Červenski et al., 2020).

Važan uslov uspešne intenzivne povrtarske proizvodnje jeste uvođenje pravilnog plodoreda, odnosno smene useva u vremenu i prostoru. To je posebno značajno zbog mogućnosti pojave zajedničkih bolesti, štetočina i korova kod useva iz iste grupe, ali i zbog pravilne ishrane biljaka i održavanja, odnosno povećanja plodnosti zemljišta (Lazić et al., 2003; Shafique et al., 2016; Popsimonova et al., 2017).

Smjena useva u prostoru i vremenu

Smjena useva u vremenu naziva se plodosmena i podrazumeva da se jedan usev na određenom polju smenjuje drugim, tj. da se gajenje jedne biljne vrste prekida na jednu, dve ili više godina, dok se na istoj površini seje i gaji drugi ili više drugih useva. Plodosmena treba da omogući blagovremeno izvođenje svih agrotehničkih mera — pripremu i obradu zemljišta, đubrenje i setvu narednog useva u optimalnim rokovima, (Lazić et al., 2013).

Smjena useva u prostoru naziva se poljosmena. To je princip prema kojem se isti usev iz godine u godinu gaji na različitim parcelama, odnosno poljima u okviru plodoreda. Poljosmena predstavlja prostorno smenjivanje useva, a smenjivanje useva po pojedinim poljima u toku jedne godine naziva se rotacija. Kada jedan gajeni usev obiđe sva polja u okviru plodoreda, završava se jedna rotacija i započinje nova. Dakle, rotacija predstavlja vremenski ciklus nakon kog određeni usev ponovo dolazi na istu parcelu, (Lazić et al., 2013).

Primena organskog đubriva u plodoredu

Plodored je jedna od najvažnijih agrotehničkih mera koja smenom kultura u prostoru i vremenu doprinosi očuvanju i unapređenju plodnosti zemljišta, kao i povećanju prinosa (Brust i Stinner 1991;

Sumner 1982; Shafique et al., 2016; Červenski i Medić-Pap 2018). Posebno važan uslov pravilnog plodoreda jeste stvaranje i očuvanje postojane, sitnomrvičaste strukture zemljišta. Plodnost zemljišta u velikoj meri zavisi od pravilne plodosmene, kao i od izbora odgovarajućih predhodnih useva.

Prema rezultatima dugogodišnjih analiza plodnosti zemljišta, sadržaj humusa u 60% poljoprivrednih zemljišta u Vojvodini iznosi oko 3%, dok je u čak 40% zemljišta taj sadržaj ispod 3%. Zabrinjavajući je trend konstantnog smanjenja sadržaja humusa tokom godina (Marinković et al., 2015). Navedeni autori ukazuju na neophodnost unošenja organske materije u zemljište, što se može postići zaoravanjem žetvenih ostataka, primenom stajnjaka, komposta i upotrebom mikrobioloških đubriva. Prema pravilu CL12(b) iz Regulative 834/2007 (European Commission, 2007), za pravilnu ishranu biljaka preporučuje se smena useva sa mahunarkama i zelenišnim đubrivom. Direktiva EU naglašava da je, bez obzira na to koje se kulture gaje u plodoredu, kratkoročna upotreba zelenišnog stajnjaka i mahunarki neophodna za prevenciju pojave štetočina i korova na proizvodnim površinama.

Povrtarski plodored ima određene specifičnosti. Naime, različite vrste povrća nejednako iscrpljuju hranljive materije iz zemljišta — jedne pretežno iz plićih, a druge iz dubljih slojeva. Primena pravilnog plodoreda uslovljena je potrebama biljaka za hranjivima, a kod pojedinih vrsta povrća i velikim potrebama za stajnjakom. S obzirom na ograničene količine stajnjaka, njegovo racionalno korišćenje obezbeđuje se upravo uvođenjem pravilnog plodoreda.

Organska đubriva popravljaju strukturu zemljišta, utiču na vodno-vazdušni i toplotni režim zemljišta, zatim na biološke i hemijske osobine zemljišta. Treba voditi računa koje su to vrste koje dobro reaguju na neposrednu upotrebu stajnjaka i komposta, a koje bi u plodoredu trebalo gajiti u drugoj ili trećoj godini nakon đubrenja, (Červenski et al., 2020).

Na osnovu potreba za stajnjakom, povrtarske biljke svrstavaju se u tri grupe:

Kulture koje podnose direktno đubrenje stajnjakom:

U ovu grupu spadaju kupus, kelj, karfiol, brokoli, paprika, paradajz, bostan, krastavci i tikve, a od korenastih biljaka celer, kao i praziluk od lukova.

Kulture koje se gaje posle biljaka prve grupe:

Ove vrste ne zahtevaju direktno đubrenje stajnjakom u godini proizvodnje, već koriste hraniva zaostala iz prethodne godine. U ovu grupu spadaju korenaste biljke (šargarepa, peršun, cvekla, rotkvica), lisnato (salata, spanać) i lukovičasto povrće (crni i beli luk).

Kulture koje dolaze u trećoj godini posle đubrenja stajnjakom:

To su znaste mahunarke: grašak, boranija, pasulj, bob i druge vrste (Lazić, 2002), (tabela 3).

Tabela 3

Osnovni povrtarski plodored može se smatrati tropoljni povrtarski plodored.

Table 3

The basic vegetable crop rotation can be considered a three-field vegetable crop rotation.

| Godina proizvodnje | PRVO POLJE | DRUGO POLJE | TREĆE POLJE |
|-----------------------|---|---|---|
| 1 | kupus, kelj, karfiol, brokola, paprika, paradajz, bostan, krastavci, tikve, celer, praziluk. | mrkva, peršun, cvekla, rotkvica, salata, spanać, crni, beli luk | grašak, boranija, pasulj, bob |
| 2 | mrkva, peršun, cvekla, rotkvica, salata, spanać, crni, beli luk | grašak, boranija, pasulj, bob | kupus, kelj, karfiol, brokola, paprika, paradajz, bostan, krastavci, tikve, celer, praziluk. |
| 3 | grašak, boranija, pasulj, bob | kupus, kelj, karfiol, brokola, paprika, paradajz, bostan, krastavci, tikve, celer, praziluk. | mrkva, peršun, cvekla, rotkvica, salata, spanać, crni, beli luk |

Različiti tipovi plodoreda u proizvodnji povrća

Intenzivni povrtarski plodored može se zasnivati na principu tropoljnog povrtarskog plodoreda. Uvođenjem pravilnog plodoreda u intenzivnu proizvodnju povrća stvaraju se uslovi za: bolju kontrolu biljnih bolesti, štetočina i korova, smanjenu upotrebu sredstva za zaštitu bilja, veću mogućnost korišćenja zalih vlažnosti i hranljivih materija iz zemljišta, očuvanje i povećanje plodnosti zemljišta, poboljšanje strukture zemljišta, smanjenu potrebu za mineralnim đubrivima, smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte, manju zagađenost voda, povećanu sposobnost zemljišta da skladišti i zadržava ugljenik (Červenski et al., 2020).

S obzirom na sve češću pojavu gajenja samo nekoliko glavnih povrtarskih vrsta i na nedovoljnu upotrebu organskih đubriva, u nastavku su prikazani neki tipovi povrtarskih plodoreda za proizvodnju na otvorenom polju, uz obavezno zaoravanje organske materije i stajnjaka.

Dvokulturni trogodišnji plodored na jednom polju (primer):

Prva godina: kao predkulturu gaji se rani (mladi) krompir. Nakon vađenja mladog krompira, iste godine rasađuje se glavna kultura, kao što su kasni kupus, kelj, karfiol ili brokoli.

Druga godina: kao predkultura gaji se salata. Po ubiranju salate, na istom polju seje se glavna kultura, na primer cvekla ili mrkva.

Treća godina: kao predkultura seje se spanać, a nakon njegove berbe, na istoj površini seje se glavna kultura – boranija ili pasulj. Po završetku berbe glavne kulture, u jesen, rastura se organsko đubrivo (sveži ili zgoreli stajnjak) i vrši se duboko zaoravanje (Červenski et al., 2013; Červenski et al., 2016; Medić-Pap et al 2017; Medić-Pap et al 2019; Červenski et al., 2020). (Tabela 4).

Tabela 4

Dvokulturni trogodišnji plodored na jednom polju.

Table 4

Two-culture three-year crop rotation in one field.

| Godina | 1-P O L J E | |
|--------|---|--|
| | proizvodnje | predkultura |
| 1 | rani krompir | kasni kupus ili kelj, karfiol, brokola |
| 2 | salata | cvekla ili mrkva, |
| 3 | spanać | boranija ili pasulj |
| | na jesen unosimo zgoreli stajnjak + duboko oranje | |

Dvokulturni četvorogodišnji plodored na jednom polju (primer):

Kod četvorogodišnjeg plodoreda sa predkulturom i glavnom biljnom vrstom na jednom polju, smena useva se organizuje na sledeći način (primer):

Prva godina: kao predkulturu gaji se rani kupus. Nakon berbe mladog kupusa, iste godine rasaditi glavnu kulturu, kao što su praziluk, krastavac, celer ili bostan.

Druga godina: kao prvu predkulturu sejati spanać. Nakon berbe spanaća, na istoj površini sejati glavnu kulturu — cveklu ili jesenji beli luk.

Treća godina: kao predkulturu rasaditi salatu. Ukoliko je u prethodnoj jeseni posejan jesenji beli luk, u proleće treće godine nastaviti sa gajenjem kultura koje slede nakon njega. Po ubiranju predkulture, na istom polju sejati glavnu kulturu, što mogu biti boranija ili pasulj. Nakon berbe glavne kulture, tokom jeseni sejati pšenicu.

Četvrta godina: obavlja se žetva pšenice kombajnom. Nakon žetve, na žetvenim ostacima primeniti 100 kg/ha UREE (46% N) i plitko zaorati. U toku jeseni primeniti organsko đubrivo, najčešće sveži ili zgoreli stajnjak, uz istovremeno duboko zaoravanje (Červenski et al., 2013; Červenski et al., 2016; Medić-Pap et al 2017; Medić-Pap et al 2019; Červenski et al., 2020), (Tabela 5).

Tabela 5

Dvokulturni četvorogodišnji plodored na jednom polju.

Table 5

Two-culture four-year crop rotation in one field.

| Godina | 1-P O L J E | | |
|--------|---|---------------------------------------|----------------|
| | proizvodnje | predkultura | glavna kultura |
| 1 | rani kupus | praziluk ili krastavac, celer, bostan | |
| 2 | spanać | cvekla ili jesenji beli luk | |
| 3 | salata | boranija ili pasulj+ pšenica na jesen | |
| 4 | Pšenica + na jesen uneti zgoreli stajnjak + duboko oranje | | |

Intenzivni i polu-intenzivni povrtarski plodoredi

Intenzivni trogodišnji povrtarski plodored na jednom polju podrazumeva gajenje predkulture, glavne kulture i naknadne kulture tokom jedne godine. To znači da je polje neprekidno iskorišćeno u proizvodnom ciklusu, bez praznih perioda.

Prva godina (primer): kao predkulturu rasaditi rani kupus. Nakon berbe kupusa, na istoj površini rasaditi glavnu kulturu – krastavac. Tokom oktobra posaditi naknadnu kulturu, odnosno jesenji beli luk.

Druga godina: predkultura je beli luk iz prethodne godine. Nakon vađenja (berbe) belog luka, sejati glavnu kulturu – cveklu. Po ubiranju cvekla, na istoj površini sejati naknadnu kulturu, najčešće spanać. Ovaj spanać iz zimske proizvodnje postaje predkultura treće godine.

Treća godina: nakon ubiranja spanaća, sejati glavnu kulturu – pasulj. Po završetku berbe pasulja, tokom jeseni uneti organsko đubrivo (sveži ili zgoreli stajnjak), uz uporedno duboko zaoravanje (Červenski et al., 2013; Červenski et al., 2016; Medić-Pap et al 2017; Medić-Pap et al 2019; Červenski et al., 2020), (Tabela 6).

Tabela 6

Intenzivni trogodišnji povrtarski plodored na jednom polju.

Table 6

Intensive three-year vegetable crop rotation in one field.

| Godina | 1-P O L J E | | | |
|--------|---|-------------|------------------|------------------|
| | proizvodnje | predkultura | glavna kultura | naknadna kultura |
| 1 | rani kupus | krastavac | jesenji beli luk | |
| 2 | jesenji beli luk | cvekla | spanać | |
| 3 | spanać | pasulj | stajnjak | |
| | na jesen uneti zgoreli stajnjak + duboko oranje | | | |

Intenzivni četvorogodišnji povrtarski plodored na jednom polju započinje sadnjom predkulture i nastavlja se planskom smenom useva (primer):.

Prva godina: kao predkulturu saditi rani (mladi) krompir. Nakon vađenja mladog krompira, rasaditi glavnu kulturu – kelj. Po završetku berbe kupusa, trebalo bi saditi naknadnu kulturu – srebrnjak (mladi crni luk), koji postaje predkultura za narednu godinu.

Druga godina: nakon berbe mladog luka (srebrnjaka), kao glavnu kulturu trebalo bi rasaditi papriku. Po završetku berbe paprike u jesen, sadimo naknadnu kulturu – jesenju salatu.

Treća godina: naknadna kultura iz prethodne godine (jesenja salata) postaje predkultura. Nakon berbe salate, rasaditi glavnu kulturu – paradajz. Po završetku berbe paradajza, na istoj parceli sejati naknadnu kulturu – ozimi povrtarski grašak.

Četvrta godina: predkultura je ozimi grašak iz prethodne godine. Po ubiranju graška, sejati glavnu kulturu – cveklu. Nakon gajenja cvekla, u jesen uneti organsko đubrivo (sveži ili zgoreli stajnjak) uz duboko zaoravanje (Červenski et al., 2013; Červenski et al., 2016; Medić-Pap et al 2017; Medić-Pap et al 2019; Červenski et al., 2020), (Tabela 7).

Tabela 7

Intenzivni četvorogodišnji povrtarski plodored na jednom polju.

Table 7

Intensive four-year vegetable crop rotation in one field.

| Godina | 1-P O L J E | | | |
|--------|-------------|---|----------------|------------------|
| | proizvodnje | predkultura | glavna kultura | naknadna kultura |
| 1 | | rani krompir | kelj | srebrenjak |
| 2 | | mladi luk | paprika | jesenja salata |
| 3 | | salata | paradajz | ozimi grašak |
| 4 | | grašak | cvekla | stajnjak |
| | | na jesen uneti zgoreli stajnjak + duboko oranje | | |

Četvorogodišnji polu-intenzivni povrtarski plodored na četiri različita polja predstavlja proizvodnju dve do tri povrtarske kulture godišnje na jednom polju, u zavisnosti od organizacionih i tehničkih mogućnosti proizvođača.

Na prvom polju:

Prva godina: proizvodnja započinje sa predkulturom – ranim kupusom. Nakon berbe kupusa rasaduje se glavna kultura – krastavac. Krajem jeseni rasaduje se naknadna kultura – salata.

Druga godina: ozima salata postaje predkultura, nakon koje se rasaduje glavna kultura – paradajz ili paprika.

Treća godina: seje se prolećni grašak kao predkultura, a nakon njega kao glavna kultura dolazi cvekla.

Četvrta godina: na prvom polju se gaji crni luk kao glavna kultura. Po završetku berbe, u jesen, uneti organsko đubrivo (sveži ili zgoreli stajnjak) i vrši duboko zaoravanje.

Na drugom, trećem i četvrtom polju organizacija proizvodnje se sprovodi identično, s tim što se svake godine proizvodnja pomera za jedno polje unapred, prateći principe plodoreda (Červenski et al., 2013; Červenski et al., 2016; Medić-Pap et al 2017; Medić-Pap et al 2019; Červenski et al., 2020), (Tabela 8).

Tabela 8

Četvorogodišnji polu-intenzivan povrtarski plodored na četiri polja.

Table 8

Four-year semi-intensive vegetable crop rotation on four fields.

| Godina | P O L J E | | | | |
|--------|-------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| | proizvodnje | PRVO | DRUGO | TREĆE | ČETVRTO |
| 1 | | kupus | ozima salata | grašak | crni luk |
| | | + krastavac | + paradajz | + cvekla | + stajnjak |
| 2 | | + ozima salata | ili paprika | | |
| | | ozima salata | grašak | crni luk | kupus |
| 3 | | + paradajz | + cvekla | + stajnjak | + krastavac |
| | | ili paprika | | | + ozima salata |
| 4 | | grašak | crni luk | kupus | ozima salata |
| | | + cvekla | + stajnjak | + krastavac | + paradajz |
| 4 | | crni luk | kupus | ozima salata | grašak |
| | | + stajnjak | + krastavac | + paradajz | + cvekla |
| | | + ozima salata | ili paprika | | |

Četvorogodišnji povrtarski plodored

Kod četvorogodišnjeg jednokulturnog povrtarskog plodoreda, organizovanog na četiri polja, svake godine na jednom polju gaji se samo glavna kultura.

Na prvom polju:

prva godina: proizvodnja kasnog kupusa, kelja, karfiola ili brokole;

druga godina: gajenje paradajza ili paprike;

treća godina: proizvodnja šargarepe kao glavne kulture;

četvrta godina: gajenje leguminoze — pasulj, boranija ili grašak. Po završetku četvrte godine, tokom jeseni, rasturanje organskog đubriva (sveži ili zgoreli stajnjak) uz duboko zaoravanje.

Na drugom, trećem i četvrtom polju proizvodnja se organizuje na isti način, uz jednogodišnje pomeranje proizvodnje po principima plodoreda (Červenski et al., 2013; Červenski et al., 2016; Medić-Pap et al 2017; Medić-Pap et al 2019; Červenski et al., 2020), (Tabela 9).

Tabela 9

Četvorogodišnji jedno-kulturni povrtarski plodored na četiri polja.

Table 9

Four-year single-culture vegetable crop rotation on four fields.

| Godina proizvodnje | P O L J E | | | |
|-----------------------|-----------|----------|-----------|----------|
| | PRVO | DRUGO | TREĆE | ČETVRTO |
| 1 | kupus | paprika | cvekla | pasulj |
| 2 | paradajz | crni luk | grašak | karfiol |
| 3 | mrkva | boranija | krastavac | paprika |
| 4 | pasulj | karfiol | paradajz | crni luk |

Červenski et al (2016) u svojim istraživanjima obuhvatio je gajenje čak četrnaest povrtarskih vrsta kroz dobro organizovanu i vremenski tačno određenu proizvodnju u optimalnim rokovima. Na otvorenom polju najpre su zasejani predusevi: grašak, rotkvica, keleraba, spanać i salata. Nakon njihove berbe, rasađeni su glavni usevi: kupus, paradajz, paprika, cvekla i kelj. Po završetku proizvodnje glavnih useva, na istim parcelama posađeni su naknadni usevi: srebrnjak, beli luk, salata i spanać.

Primer četvorogodišnjeg povrtarskog plodoreda istraživali su Medić-Pap et al. (2017). Navedeni autori preporučuju da se prve godine kao predusev kupusu posadi mladi krompir, a da se nakon vađenja krompira na istoj parceli rasađuje kasni kupus. Ovakvom organizacijom maksimalno se koristi proizvodna površina i omogućava ostvarivanje dve žetve u toku jedne godine. Druge godine preporučuje se gajenje paprike ili paradajza, treće godine setva crnog luka ili rasađivanje jesenjeg belog luka, dok grašak ili pasulj predstavljaju preporučene useve za četvrtu godinu. Nakon žetve graška ili pasulja preporučuje se unošenje 50–60 t stajnjaka po hektaru dubokim jesenjim oranjem. Ovaj četvorogodišnji plodored predstavlja jedno od mogućih rešenja organizacije povrtarske proizvodnje u plodoredu i značajno doprinosi smanjenju rizika od pojave potencijalnog inokuluma prouzrokovaca biljnih bolesti.

Osnovni tropoljni povrtarski plodored trebalo bi da bude sastavni deo svakog povrtarskog plodoreda na otvorenom polju. Na osnovu raspoloživih proizvodnih resursa (proizvodnog zemljišta, poljoprivredne mehanizacije, sistema za navodnjavanje, skladišta, radne snage, tržišta, itd.) plodored treba proširiti na više povrtarskih vrsta kako prostorno tako i vremenski. Ukoliko uslovi proizvodnje dozvoljavaju, dobro je organizovati intenzivni trogodišnji ili intenzivni četvorogodišnji povrtarski plodored. U suprotnom kod višegodišnjeg jedno-kulturnog povrtarskog plodoreda zemljište se ekstenzivnije eksploatiše i ostvaruje se jedan prinos tokom godine.

Bez obzira koji tip plodoreda se koristi na otvorenom polju, treba redovno kontrolisati procenat organske materije u zemljištu i svake treće ili četvrte godine unositi stajsko đubrivo ili drugi oblik organske materije zbog obnovljivosti iste.

Iz povrtaske proizvodnje takođe treba u potpunosti isključiti monokulturni sistem gajenja.

Zaključci

Dvokulturni trogodišnji ili dvokulturni četvorogodišnji povrtarski plodored na jednom polju sa redovnim obnavljanjem organske materije zemljišta čini dobru osnovu organizovanosti povrtarske

proizvodnje na otvorenom polju. Intenzivno korišćenje zemljišta i sistema za navodnjavanje, uz smenu dve do tri biljne vrste u toku jedne godine na otvorenom polju povećava se održivost sistema i plodnost zemljišta a smanjuje se rizik od pojave bolesti, štetočina i korova.

Zbog toga je od izuzetnog značaja racionalno korišćenje zemljišnih resursa, uz primenu pravilnog plodoreda i smene povrtarskih biljaka. Time se smanjuje mogućnost pojave štetnih organizama, unapređuje zdravlje zemljišta i doprinosi dugoročnoj održivosti proizvodnje. Plodored u povrtarskoj proizvodnji predstavlja često zanemarenu, ali osnovnu preventivnu meru, koja ima ključnu ulogu u očuvanju plodnosti zemljišta i stabilnosti proizvodnje.

Zahvalnica

Ovo istraživanje je podržalo Ministarstvo za nauku, tehnološki razvoj i inovacije Republike Srbije, Evidencioni broj Ugovora: 451-03-136/2025-03/ 200032.

Literatura

- Barbieri, P., Pellerin, S., Nesme, T. 2017. Comparing crop rotations between organic and conventional farming. *Scientific Reports*, 7 (13761), 1-10.
- Brust, E., Stinner, R. 1991. Crop rotation for insect, plant pathogen, and weed control. In D. Pimentel (Eds.), *CRC Handbook of Pest Management in Agriculture I*. Second edition. (pp.217-236). Boca Raton, FL: CRC
- Červenski, J., Gvozdanović Varga, J., Vasić, M., Zekić, V., Ferencz, A., Taskovics Tóthné, Z., Szabó, T., Kalmár, R. 2013. New farming models in backyards as possible solutions for generating additional income and self-employment in the rural cross-border area, Institute of Field and vegetable crops, Maxima graf, p.1-96, ISBN 978-8680417-49-3, COBISS.SR-ID 282296071, (Medjunarodna studija, Project ID: HUSRB/1203/213/122; Project acronym: FARMADDINC), <http://fiver.ifvcns.rs/handle/123456789/2443>
- Červenski, J., Gvozdanović-Varga, J., Vasić, M., Stojanović, A., Medić-Pap, S., Danojević, D., Savić, A. 2016. Home gardens and backyards – suitable area for vegetable production. *Acta Hort.* 1142, p.179-186.
- Červenski, J., Medić-Pap, S. 2018. Proizvodnja kupusa. Novi Sad: SZR Bizi štampa.
- Červenski J., Medić-Pap S., Danojević, D. Savić, A., Bugarski, D. 2020. Značaj rotacije useva u intenzivnoj proizvodnji povrća u zaštićenom prostoru, *Journal of Agricultural Sciences-Belgrade*, Vol. 65, No. 3, p.199-212
- Červenski, J., Medić-Pap, S., Danojević, D. Bugarski, D. (2020): Significance of vegetable crops rotation in garden plots from the perspective of producing health-safe food, *Proceedings, XXIV International ECO-conference XI Safe food*, 23-25th September 2020, Novi Sad, Srbija, p.205-212.
- European Commission. 2007. European communities council regulation (EC) No. 834/2007 of 28 June 2007 on organic production and labelling of organic products and repealing Regulation (EEC) No. 2092/91. *Official Journal of the European Union L*, 189, 1-23.
- Ilin, Ž., Pauljev, S. 2024. Analiza i predviđanje proizvodno ekonomskih obeležja povrća u Vojvodini. *Agroekonomika/Agrieconomica*, 53(102), 33-45.
- Lazić, B., Đurovka, M., Mišković, A. 2003. Osnove organske poljoprivrede u povrtarstvu. *Savremena poljoprivredna tehnika*, 29 (1-2), 56-62.
- Lazić, B., Ilić, Z., Đurovka, M. 2013. *Organska proizvodnja povrća*. Novi Sad: Tampograf, Centar za organsku proizvodnju- Selenča i Unverzitet Edukons-S.Kamenica, 336
- Medić-Pap, S., Červenski, J., Danojević, D. 2017. Plodored u proizvodnji kupusa kao prevencija pojave štetnih organizama. *Biljni lekar*, 45 (3), 293-302.
- Medić-Pap, S., Červenski, J., Danojević, D. 2019. Preventive measures as a tool for environment-friendly vegetable production in suburban areas. In *Proceedings, 23rd International Eco-Conference-13th Environmental protection of urban and suburban settlements*, 25-27 September 2019, Novi Sad, 154-162 http://fiver.ifvcns.rs/bitstream/id/6715/bitstream_6715.pdf
- Marinković, J., Bjelić, D., Tintor, B., Ninkov, J. 2015. Biodiverzitet i uloga mikroorganizama u zemljištu. *Zbornik referata*, 5. Otvoreni dani biodiverziteta, 30. jun 2015, Pančevo, 17-26.
- Ouma, G., Jeruto, P. 2010. Sustainable horticultural crop production through intercropping: The case of fruits and vegetable crops. *Agriculture and Biology Journal of North America*, 1 (5), 1098-1105.
- Popsimonova, G., Benko, B., Karić, L., Gruda, N. 2017. Protected Vegetables in South-East Europe, *Book of Abstracts, VII South-Eastern Europe Symposium on Vegetables & Potatoes*, (pp. 55). Maribor, Slovenia.
- Shafique, H.A., Sultana, V., Ehteshamul-Haque, S., Athar, M. 2016. Management of soil-borne diseases of organic vegetables. *Journal of Plant Protection Research*, 56 (3), 221-230.
- Sumner, R. 1982. Crop rotation and plant productivity. In M. Rechcigl (eds.), *Handbook of Agricultural Productivity*. (pp.273-313). Boca Raton, FL: CRC.
- Šunjka, D., Vuković, S. 2025. Izazovi i trendovi u organskoj poljoprivrednoj proizvodnji, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, str.339, ISBN 978-86-7520-614-9; COBISS.SR-ID 161865481, [Elektronski izvor]: monografija, (http://polj.uns.ac.rs/sites/default/files/udzbenici/Monografija_Izazovi_i_trendovi.pdf.)
- Vlajić, S., Gvozdanović-Varga, J., Maširević, S., Ilić, R., Barać, R., Červenski, J., Božić, V. 2018. Kila kupusa - da li predstavlja opasnost? *Zbornik radova XXIII Savetovanje o biotehnologiji sa međunarodnim učešćem- Čačak*, pp.390-395.

Vuković, S., Inđić, D., Gvozdenac, S., Červenski, J. 2014. Efficacy of insecticides in the control of cabbage pests. *Research Journal of Agricultural Science*, 46:2, 421-425.

Crop rotation in open-field vegetable production – a neglected fundamental practice

Janko Červenski^{a*}, Boris Adamović^b, Srđan Zec^a, Slobodan Vlajić^a

^a Institut of field and vegetable crops, Department of vegetable and alternative crops, Novi Sad, Republic of Serbia

^b University of Novi Sad, Faculty of Agriculture, Department of field and vegetable crops, Novi Sad, Republic of Serbia

*Corresponding author: janko.cervenski@ifvcns.ns.ac.rs

ABSTRACT

In the last fifty years, crop rotation has been significantly simplified, primarily by reducing the number of plant species in the rotation and increasing the growing area of monocultures. Modern agricultural farms apply simplified soil use models more frequently. This phenomenon is the result of economic justification and market demands, on the one hand, and the increasing changes in meteorological conditions caused by global climate change, on the other. For this reason, rational use of land resources and proper vegetable crop rotation are extremely important practices. Proper crop rotation prevents numerous issues that would otherwise be difficult to overcome. A two-culture three-year or two-culture four-year vegetable crop rotation in one field with regular renewal of soil organic matter forms a good basis for the organization of vegetable production in an open field.

KEY WORDS

vegetable species, intensive production, crop rotation

Rad primljen : 2.4.2025.

Recenzija : 20.5.2025.

Prihvaćen : 27.5.2025.

Objavljen : 15.6.2025.



Balancing maize yield and nitrogen use efficiency under dry, optimal and wet production conditions

Dušan Dundžerski^{a*}, Goran Bekavac^a, Božana Purar^a, Anja Đurić^a, Maja Tanasković^a, Jelena Visković^b, Goran Jaćimović^b, Dragana Latković^a

^aInstitut za ratarstvo i povrtarstvo, Novi Sad, Srbija

^bUniverzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Departman za ratarstvo i povrtarstvo, Novi Sad, Srbija

*Autor za kontakt: dusan.dundzerski@nsseme.com

ABSTRACT

Nitrogen rate, yield, and NUE (Nitrogen Use Efficiency) are tightly linked, and moisture availability plays a critical role in this relationship. This multi-year trial was established with the aim of optimizing maize grain yield and agronomic nitrogen use efficiency (NUE) under varying moisture conditions. The dataset, covering the period from 2002 to 2020, was obtained from a long-term residue management experiment combined with increasing nitrogen (N) rates. Residue management included two treatments, with and without residue incorporation. When residues were incorporated, six nitrogen rates were applied: 0 (control treatment), 50, 100, 150, 200, and 250 kg N ha⁻¹. In the variant without residue incorporation, three nitrogen rates were applied: 0 (control treatment), 100, and 200 kg N ha⁻¹. A multiobjective approach was employed to analyze the trade-off between yield and NUE under different precipitation regimes, with growing seasons classified as dry, optimal, or wet based on percentile-based precipitation thresholds. This methodology enabled a more precise interpretation of yield responses and nitrogen use efficiency under varying moisture conditions. The results indicated distinct optimal nitrogen rates depending on the precipitation regime. In dry years, the optimal range was between 70 and 77 kg N ha⁻¹, whereas in optimal seasons, it ranged from 118 to 133 kg N ha⁻¹. In wet years, the optimal rates were between 94 and 124 kg N ha⁻¹. These nitrogen rates allowed for achieving near-maximum yields while maintaining nitrogen use efficiency. Further increases in nitrogen application resulted in only modest yield gains while notably reducing NUE. The findings highlight that moderate nitrogen fertilization rates, adjusted to the available moisture conditions, can ensure high and stable maize production. The analysis also confirmed the importance of residue incorporation, which consistently ranked among the optimal solutions in the multiobjective approach.

KEY WORDS

Multiobjective optimization; Pareto; Harvest residues; Nitrogen; Nitrogen Use Efficiency; Yield

Introduction

Given its large-scale cultivation and economic role, optimizing nitrogen use in maize is essential for maintaining productivity and environmental balance (Huang et al., 2021). In Serbia, maize cultivation spans the largest area among all agricultural crops, averaging 1 million hectares and 5.94 million tons production (Grčak et al., 2020). Nutrient management involves the timing, amount, and type of fertilizer application to match crop demands and minimize losses. Nitrogen management particularly plays a critical role in achieving potential yields and high returns in maize farming (Gheith et al., 2022). In Serbia, the usual farmers practice for maize production is to apply 150 kg N ha⁻¹. Around 30% of this is applied together with phosphorus and potassium as complex mineral fertilizers before winter ploughing, while the rest of the N is broadcasted in form of CO(NH₂)₂ or NH₄NO₃ and then mixed with soil during pre-sowing cultivation. Over the past three decades, advancements in mineral fertilizers have significantly boosted maize yields, alongside progress in crop selection (Duvick, 2005).

To achieve sustainable production, agricultural practices must enhance productivity while protecting the environment, as well as human and animal health. Enhancing nitrogen use efficiency (NUE) is a key component of this framework (Zhang et al., 2015; Xiong et al., 2018). It is utilized by both Eurostat and the European Environment Agency (EEA) as an agri-environmental indicator to assess the impact of agricultural practices on the environment. They use it to monitor and compare food production, ensuring it is both high-quality and safe for human health, while also meeting environmental standards. This indicator can be applied across different territorial units and various production sectors - whether crop production, livestock farming, or integrated systems (Oenema, 2015). There are numerous approaches to calculate NUE, but the most widespread is agronomic NUE. It is useful to determine how to increase or maintain crop yield while minimizing N inputs, or how

much productivity is improved by the application of N (Congreves et al., 2021). It can be broken down into two components: nitrogen uptake efficiency (NuPE), which is the proportion of available soil nitrogen that the plant absorbs, and nitrogen utilization efficiency (NuTE), which is the amount of grain produced per unit of nitrogen taken up by the plant. Higher maize yields are typically linked to greater biomass production, and nitrogen uptake tends to increase with both biomass and grain yield.

There are two main strategies to enhance NUE: breeding more efficient genotypes and developing improved fertilization systems. On one side, selecting genotypes that can better absorb nutrients from both soil and fertilizers and utilize them effectively to produce higher yields is crucial (He et al., 2020). For maize, the research has shown that certain hybrids exhibit significant variations in nitrogen accumulation and utilization, indicating the potential for genetic improvement in NUE (Sharifi et al., 2023). The study conducted on the experimental field of the Institute of Field and Vegetable Crops in Novi Sad proved that agronomic NUE was by 25% lower in older maize hybrids NS 444 and NS 640 in comparison to newer hybrids NS 3023 and NS 6140 (Dunđerski et al., 2021). Besides hybrids, NUE also has great variations among maize lines, with 3 of 36 lines having higher N concentration in grains in control treatment in comparison to N treatment (Dragičević et al., 2020). This marks them as the best N users in low-N conditions. However, the authors highlighted 16 lines as the primary focus for further breeding programs, since they don't have only improved NUE, but also high grain yield.

On the other side, achieving high yields with efficient nitrogen management is essential for cereal production in the Pannonian Basin (Moitzi et al., 2020). The same authors concluded that three against two split applications of N in the Pannonian climate region resulted in high-quality wheat for bread-making and for reducing the N loss. Two splits are recommended when aiming only at high GY. The results by Jaćimović et al., 2018 from the experiment conducted on the experimental field at location Rimski Šančevi revealed that the highest efficiency of applied nitrogen fertilizers in wheat was achieved with the application rate of 50 kg N ha⁻¹. However, from the perspective of the combined effect on yield and NUE, the application of a moderate nitrogen rate (100 kg N ha⁻¹) stands out as rational one.

A yield-focused approach is commonly employed to recommend nitrogen fertilizer rates for maize. However, optimizing nitrogen use has become increasingly important due to the environmental and economic costs associated with nitrogen fertilization (Basso et al., 2016).

This study examines the impact of different nitrogen rates on maize yield, and agronomic NUE across three different environmental scenarios: dry, optimal, and wet conditions. We highlight the importance of matching N supply to the season's moisture conditions to optimize yield and NUE. To determine N supply in each scenario, the Pareto front analysis was used to optimize two conflicting objective functions simultaneously. Pareto front analysis has long been used in fields such as engineering and economics to identify efficient trade-offs between competing objectives. For example, in power systems, it assists in evaluating trade-offs between operational costs and environmental impacts like CO₂ emission (Giannelos et al., 2024). Its application in agronomic nutrient management remains scarce. In this study, we frame maize yield and agronomic NUE as dual objectives and construct a Pareto frontier as a set of N-rate treatments for which no increase in yield is possible without a concomitant decrease in NUE, and vice versa. This approach is innovative for three reasons. First, it moves beyond single-objective optimization (maximizing yield or efficiency alone) by identifying treatments that balance agronomic productivity with environmental performance. Second, stratifying the analysis by dry, optimal, and wet years reveals how water availability shifts the shape and position of the frontier. Finally, presenting results as a Pareto frontier provides growers with a clear decision-support tool: they can select N rates that achieve a desired yield level with minimal efficiency loss, or vice versa, rather than relying on arbitrary economic or environmental thresholds. This method aligns with broader sustainability goals by quantifying trade-offs and guiding balanced nutrient management strategies (Alocilja and Ritchie, 1993; Kropp et al., 2019; Karamian et al., 2023).

Materials and Methods

Description of the study cite

A study was conducted to assess the effects of the long-term return of crop residues combined with increasing amounts of nitrogen on maize yield. The research was performed on a long-term, fixed-site field trial known as "ISDV" (Internationale Stickstoff Dauer Versuche). This trial was established in 1971 in a Pannonian environment (PAN3 zone for Serbia) with temperate, moderately wet, and seasonal climate zone (Metzger et al., 2013) and continues to this day. The soil type on the site is chernozem, class A–C (humus-accumulative soil), type—chernozem on loess and loess-like sediments, variety—calcareous, and moderately deep form (40–80 cm, according to A horizon depth)

(Pavlović et al., 2017). It is located on the experimental field of the Institute of Field and Vegetable Crops in Novi Sad. The current article uses results from 2002 to 2020, excluding years 2009, 2014, 2016 (missing data). The cropping system followed a winter wheat-maize-soybean rotation.

Experimental design

Conducted under rain-fed conditions, the experiment was arranged in a randomized complete block design with four replicates. Each replicate consisted of the plots with two factors: (a) residue management (treatments with or without plowing in the crop residues) and (b) nitrogen dosage. The N dosages ranged from 0 to 250 kg N ha⁻¹, in increments of 50 kg, for treatments with residue incorporation, and from 0 to 200 kg N ha⁻¹, in increments of 100 kg, for treatments without residue incorporation. The 50% of the N requirements were incorporated with winter plowing together with 80 kg P₂O₅ ha⁻¹ and 80 kg K₂O ha⁻¹, and the remaining 50% were incorporated together with pre-sowing soil preparation. The area of each main plot for fertilizer application was 57 m² (6 m long, 9.5 m wide), while for harvest only the central two rows of the plot were considered, from the total of 12 rows in each plot. The distance between rows was 75 cm, while the distance between plants in a row was 25 cm. For yield determination, the ears were hand-harvested at physiological maturity from the two central rows of the plot. The total weight of ears was measured, and then 10 representative ears (ears that represented the average size of the ears in the plot) were chosen. Subsequently, these 10 ears were shelled using an electric sheller that ensured the preservation of every kernel and cob. The kernel and cob weight of each ear were measured with a digital scale and used to calculate the percentage of kernels on the ear. Subsequently, the kernels were combined, and a 100 g portion of the composite was utilized for the determination of moisture content. The measurement of moisture content was conducted by subjecting the samples to constant heat in an oven and measuring the weight loss until constant dry weight was achieved. The weight loss is moisture content in the grains (%). The grain dry matter content (%) was then easily determined as 100 - moisture content (%). Knowing the grain dry matter content and percent of kernels based on 10 representative ears and the total weight of ears from the central two rows of the plot, the grain yield was calculated as:

$$\text{Yield (kg ha}^{-1}\text{)} = (\text{TWK} \times \text{DM}) / 0.86 \times 1111.11 \quad (1)$$

where TWK is the total weight of kernels from the central two rows, DM is the grain dry matter content, 0.86 is the correction factor to standardize yield to a moisture content of 14%, and 1111.11 is the conversion factor to express yield per hectare, based on a harvested area of 6 m × 1.5 m.

Statistical Data Analysis

During the 2002–2020 experiment, eight different maize hybrids were planted, and each treatment was replicated four times. To generalize the results, the data were grouped such that neither hybrid identity nor replicate block was treated as a factor in the analysis.

To identify Pareto-optimal treatments, a two-objective framework was adopted, wherein grain yield (kg ha⁻¹) and agronomic nitrogen use efficiency (NUE, kg kg⁻¹) were used as the criteria. Since experimental data were collected at discrete nitrogen levels, Pareto analysis was first applied to the original dataset (with observed values of yield and NUE) within each precipitation category. This initial analysis determined that plowing residue management consistently appeared as the optimal solution in every precipitation category. As a result, further estimation of yield and NUE values was performed only for cases where residues were plowed.

For these plowed-residue cases, various regression curves were fitted to the observed yield and NUE data - specifically, exponential, linear, linear + plateau, quadratic, and square-root models—for each precipitation category. The best model for interpolation in each scenario was selected based on an evaluation of AIC, BIC, R², and RMSE. This ensured that an appropriate functional form was used to capture the relationship between yield or NUE and N dose for subsequent interpolation. To evaluate the accuracy of the model-based interpolation, leave-one-out cross-validation (LOOCV) was performed for each dataset. In this approach, each observation was excluded one at a time, and a model was fitted on the remaining data. The excluded value was then predicted using the fitted model, and the squared error was calculated. This process was repeated for all observations, and the root mean squared error (RMSE) was computed as a summary measure of predictive performance.

Using the prediction formulas derived from the selected regression models, estimated values were interpolated for nitrogen doses ranging from 50 to 250 kg N ha⁻¹ in 1 kg increments. These interpolated values were then used to identify Pareto-optimal N doses, ensuring that the Pareto front was constructed with a continuous dataset rather than being restricted to the originally tested nitrogen

levels. A solution is considered Pareto-optimal if no other treatment exhibits both a higher or equal yield and a higher or equal NUE, with at least one of these metrics being strictly greater.

Following the identification of Pareto-optimal nitrogen doses, the subsequent analysis was confined to this optimal range. A four-tier categorization was implemented, with treatments in the top quartile (75th percentile and above) receiving the highest designation (Q4), those between the 50th and 75th percentiles receiving a high designation (Q3), those between the 25th and 50th percentiles receiving an intermediate designation (Q2), and those below the 25th percentile receiving the lowest designation (Q1). If fewer categories were used, important nuances between different treatments would be lost. On the other hand, a larger number of categories could complicate result interpretation and reduce clarity. However, splitting Pareto-optimal doses into quartiles is an arbitrary choice unless showed that those groups differ statistically. Differences among the four value groups in terms of yield and NUE were tested using one-way ANOVA ($\alpha = 0.05$), with Tukey HSD as the post-hoc test for pairwise comparisons, respecting the assumptions necessary for conduction such tests (normality and homogeneity).

Additionally, linear regression analysis was conducted on the Pareto-optimal NUE and yield values for each dataset. This allowed quantification of the rate at which NUE declines per kilogram increase in yield. By combining the visual cues of conditional formatting with quantitative regression insights, the analysis provides both an immediate overview of treatment performance and a more precise understanding of the trade-offs between yield maximization and nutrient use efficiency.

Agronomic NUE was calculated according to the standard formula:

$$\text{NUE (kg kg}^{-1}\text{)} = (\text{Yield with N}) - (\text{Yield without N})/\text{N applied} \quad (12) \text{ (Fageria and Baligar, 2005)}$$

All data manipulation and statistical analyses were performed using statistical software JMP Pro 17.0.0 and R version 4.4.2.

Results

Weather conditions during the research period

This climadiagram (Figure 1) shows seasonal precipitation and mean temperature from April to October for the years 2002–2020. The year 2010 had by far the highest precipitation, exceeding 670 mm, while 2012 had the lowest, just above 200 mm. Mean temperatures generally hovered around 19–20 °C, with peaks in 2003, 2012, and 2018. Notably, 2003 and 2012 had both high temperatures and very low precipitation, which indicate a severe drought year. There's no clear long-term trend, but variability is significant year by year.

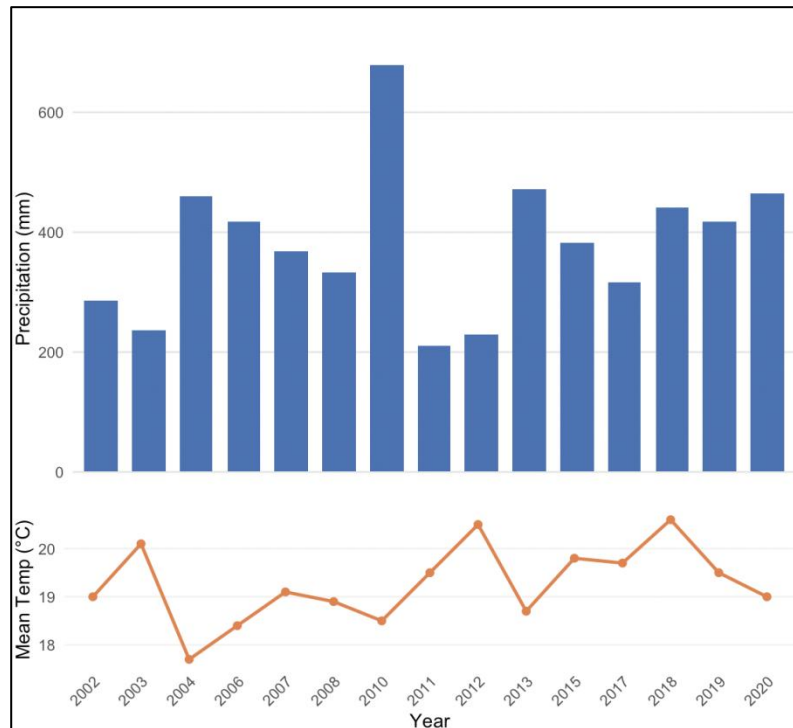


Figure 1. Climadiagram with sum of precipitations and mean temperatures from April to October in experimental years.

Figura 1. Klimadijagram sa sumom padavina i prosečnim temperaturama od aprila do oktobra u godinama istraživanja.

Precipitation data from the 2002–2020 period (covering the typical maize growing season from April to October) were obtained from the Republic Hydrometeorological Service of Serbia (RHMZ). Using the percentile method, each year in this interval was classified as a dry year (precipitation below the 25th percentile), an optimal year (precipitation between the 25th and 75th percentile), or a wet year (precipitation above the 75th percentile) (Figure 2). The entire dataset was then divided into these three categories, and all subsequent statistical analyses were performed separately for each category.

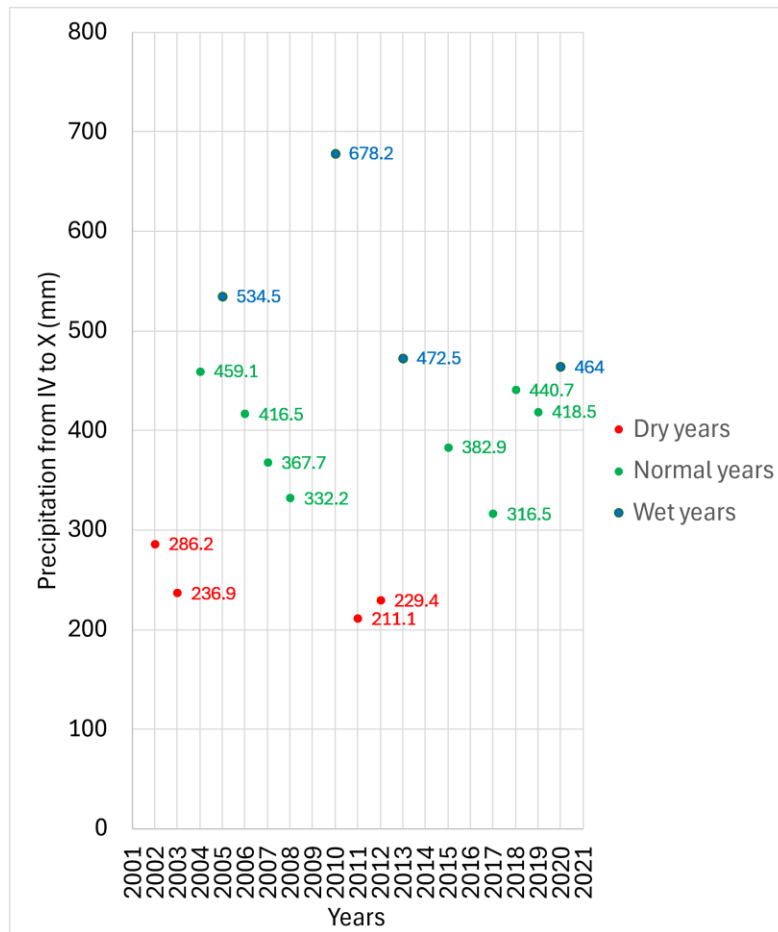


Figure 2. Grouping of the years based on maize in season precipitation using percentile method.
Figura 2. Grupisanje godina na osnovu količine padavina tokom vegetacije kukuruza primenom metode percentila.

Validation of precipitation-based year classification

To confirm if percentile method to classify years into three categories based on precipitations from IV-X is suitable, we used nonparametric multiple-comparison test (Steel–Dwass) to see if these categories differ statistically. The reason to use nonparametric test is because the precipitation data did not follow a normal distribution (Table 1). Welch’s ANOVA showed that the differences between the precipitation groups are statistically highly significant (Table 2). Effect-size measures evidenced very large effects: eta-squared for the ANOVA was 0.776 (rainfall category explained 77.6 % of the variance), and Cliff’s delta for all pairwise contrasts was $|\delta| = 1.00$ (95 % CI $[-1.00, -0.999]$). All three pairwise comparisons are highly significant, indicating that each category differs from the others in median precipitation (Table 3). The Steel–Dwass results confirm that these three categories are indeed distinct in terms of growing-season rainfall.

Table 1
 Shapiro-Wilk test results to examine the normality of the data

Tabela 1
 Shapiro-Wilk test za ispitivanje normalnosti podataka

| Rainfall Category | W Statistic | p-value |
|-------------------|-------------|---------|
| Dry | 0.779 | < 0.001 |
| Optimal | 0.905 | < 0.001 |
| Wet | 0.729 | < 0.001 |

Table 2

Welch's ANOVA results

Tabela 2

Rezultati Welch's ANOVA

| F (df1, df2) | F statistic | p-value | Eta-squared |
|--------------|-------------|----------|-------------|
| F (2, 56.73) | 255.13 | < 0.0001 | 0.776 |

Table 3

Steel–Dwass pairwise comparisons of precipitation among dry, optimal, and wet years

Tabela 3

Steel–Dwass poređenja količine padavina između sušnih, optimalnih i vlažnih godina

| Condition - Condition | | Score Mean Difference | p-Value | Cliff's Delta δ | 95% CI |
|-----------------------|---------|-----------------------|-----------|---------------------|-----------------|
| optimal | dry | 41,97321 | <0.0001** | 1.0 | [-1.00, -0.999] |
| wet | optimal | 41,97321 | <0.0001** | 1.0 | [-1.00, -0.999] |
| wet | dry | 27,96429 | <0.0001** | 1.0 | [-1.00, -0.999] |

** statistically significant at $p < 0.01$ **Comparative model performance in explaining yield and NUE across contrasting moisture regimes**

The analyses of the relationships between N dose and both NUE and yield reveal distinct optimal model choices across moisture regimes (Table 4a, 4b). For yield, the quadratic model consistently outperformed the alternatives in all datasets. In the dry dataset, the quadratic model yielded an AIC of 68.29, a BIC of 66.73, an R^2 of 0.804, and an RMSE of 100.49, indicating a better fit compared to the exponential, linear, or square root formulations. Similar performance was observed in the optimal and wet datasets, where the quadratic formulation provided the lowest AIC and BIC values and the highest R^2 values. Notably, the linear-plateau model emerged as the second-best model in both the optimal and wet datasets, offering competitive performance with slightly higher AIC and BIC values than the quadratic model. However, in the dry dataset, the linear-plateau model could not be fitted, because the dry dataset did not exhibit a pronounced plateau phase which contributed to the singularity problem.

To assess interpolation accuracy for the yield across dry, optimal, and wet year categories, we performed leave-one-out cross-validation (LOOCV) of interpolation across N doses, which yielded an RMSE of 164.78, 145.28 and 220.61 kg ha⁻¹ for dry, optimal and wet dataset, respectively. For the dry dataset, this error corresponds to an average deviation of about 1.9% of the mean yield and covering ~26% of the total yield range, indicating that interpolation provides reasonably precise estimates of unobserved values. For the optimal dataset, the leave-one-out interpolation RMSE was 145.28, meaning that interpolated yields differ from the true values by about 1.5% of the mean yield and 15.5% of the total range. The LOOCV interpolation RMSE of 220.61 kg ha⁻¹ for wet category means that predictions miss the true value by about 220 kg ha⁻¹ on average. Since the mean yield is 10107 kg ha⁻¹, this corresponds to around 2.2% average error and around 12.5% of the full 1762 kg ha⁻¹ yield range.

Table 4Summary of model fit indices (AIC, BIC, R^2 , and RMSE) across dry, optimal, and wet year categories. Below are the equations for best fitted models for each condition.**Tabela 4**Pregled indeksa prilagođenosti modela (AIC, BIC, R^2 i RMSE) u kategorijama sušnih, optimalnih i vlažnih godina. U nastavku su prikazane jednačine najbolje prilagođenih modela za svaki od uslova.

(a)

| | Model | AIC | BIC | R ² | RMSE | Durbin-Watson test | Breusch-Pagan test |
|----------------|----------------|----------|----------|----------------|-----------|--------------------|--------------------|
| Dry | Exponential | 71.48664 | 70.31495 | 0.4470561 | 168.9707 | | |
| | Linear | 71.43272 | 70.26104 | 0.4529864 | 168.0621 | | |
| | Quadratic* | 68.29045 | 66.72820 | 0.8044103 | 100.4948 | p = 0.04 | p = 0.80 |
| | Square Root | 72.27845 | 71.10677 | 0.3521757 | 182.8940 | | |
| Optimal | Exponential | 74.53493 | 73.36325 | 0.5535508 | 229.19083 | | |
| | Linear | 74.41501 | 73.24332 | 0.5641315 | 226.45867 | | |
| | Quadratic** | 59.97084 | 58.40859 | 0.9837433 | 43.73486 | p = 0.07 | p = 0.77 |
| | Square Root | 72.96006 | 71.78838 | 0.6741780 | 195.79491 | | |
| Wet | Linear+Plateau | 60.93304 | 59.37079 | 0.9802935 | 48.15213 | | |
| | Exponential | 78.68503 | 77.51334 | 0.7022665 | 347.08309 | | |
| | Linear | 78.34877 | 77.17708 | 0.7216311 | 335.60618 | | |
| | Quadratic*** | 65.79502 | 64.23277 | 0.9848470 | 78.30126 | p = 0.14 | p = 0.67 |
| | Square Root | 76.50462 | 75.33294 | 0.8074959 | 279.08703 | | |
| | Linear+Plateau | 69.03613 | 67.47388 | 0.9710254 | 108.27504 | | |

* Yield = 8319.02 + 7.5 * Ndose - 0.03 * Ndose²

** Yield = 8298.66 + 19.58 * Ndose - 0.05 * Ndose²

*** Yield = 7595.82 + 31.05 * Ndose - 0.08 * Ndose²

(b)

| | Model | AIC | BIC | R ² | RMSE | Ljung-Box p-value | slope p-value |
|----------------|----------------|-----------|-----------|----------------|-----------|-------------------|---------------|
| Dry | Exponential* | 6.647767 | 5.476081 | 0.9991481 | 0.2581636 | p = 0.26 | p = 0.15 |
| | Linear | 29.453395 | 28.281708 | 0.9184794 | 2.5254037 | | |
| | Quadratic | 7.562191 | 5.999942 | 0.9993143 | 0.2316056 | | |
| | Square Root | 24.605766 | 23.434079 | 0.9690823 | 1.5552527 | | |
| | Linear+Plateau | 21.631896 | 20.069648 | 0.9885664 | 0.9457766 | | |
| Optimal | Exponential | 20.03156 | 18.85988 | 0.8879729 | 0.9843416 | | |
| | Linear | 16.92498 | 15.75329 | 0.9398149 | 0.7214874 | | |
| | Quadratic** | 15.23744 | 13.67519 | 0.9712132 | 0.4989772 | p = 0.11 | p = 0.71 |
| | Square Root | 20.23881 | 19.06713 | 0.8832318 | 1.0049552 | | |
| Wet | Exponential*** | 27.04176 | 25.87007 | 0.9763996 | 1.984242 | p = 0.45 | p = 0.48 |
| | Linear | 33.47775 | 32.30606 | 0.9145048 | 3.776645 | | |
| | Quadratic | 28.34931 | 26.78706 | 0.9794518 | 1.851493 | | |
| | Square Root | 29.22975 | 28.05807 | 0.9634434 | 2.469552 | | |
| | Linear+Plateau | 33.81890 | 32.25666 | 0.9386440 | 3.199363 | | |

* NUE = 46.88 * exp(-0.0097 * Ndose)

** NUE = 13.99 - 0.003 * Ndose - 0.0001 * Ndose²

*** NUE = 70.43 * exp(-0.0061 * Ndose)

* Durbin-Watson and Ljung-Box test were used to assess autocorrelation. Breusch-Pagan and p-value of the slope coefficient from a regression of squared residuals on fitted values were used to assess heteroscedasticity, respectively.

The evaluation of agronomic NUE demonstrated model selection that varied with environmental moisture. In the dry and wet datasets, the exponential model emerged as the best fit. In the dry dataset, although both the exponential and quadratic models showed very high coefficients of determination (R^2 values exceeding 0.999), the exponential model achieved a slightly lower AIC (6.65 versus 7.56 for the quadratic) and comparable RMSE values, supporting its selection as the superior model. A similar pattern was observed in the wet dataset where the exponential model had an AIC of 27.04 and an RMSE of 1.98, outperforming the quadratic model despite both models explaining a large portion of the variance in NUE. In contrast, for the optimal dataset, the quadratic model provided the best fit, with an AIC of 15.24, a BIC of 13.68, and an R^2 of 0.971, outperforming the exponential model whose performance metrics were inferior.

The dry dataset with a mean NUE of 13.71 kg ha^{-1} and a total span of 24.27 kg ha^{-1} , this corresponds to about 2.5% of the mean and 1.4% of the range. The exponential fit therefore delivers very tight interpolation across the N interval. In the optimal dataset, LOOCV RMSE = 2.33 kg ha^{-1} . Against a mean NUE of 10.13 kg ha^{-1} and a span of 7.45 kg ha^{-1} , the error represents roughly 23% of the mean and 31% of the range. For applications focusing on NUE shifts exceeding $\sim 2.3 \text{ kg ha}^{-1}$, this model captures the response curve well. For the wet dataset, LOOCV RMSE for the exponential NUE model is 4.85 kg kg^{-1} . Since the mean NUE is 31.09 and the full range is 37.43 kg kg^{-1} , this error represents roughly 15.6% of the mean and about 13% of the range.

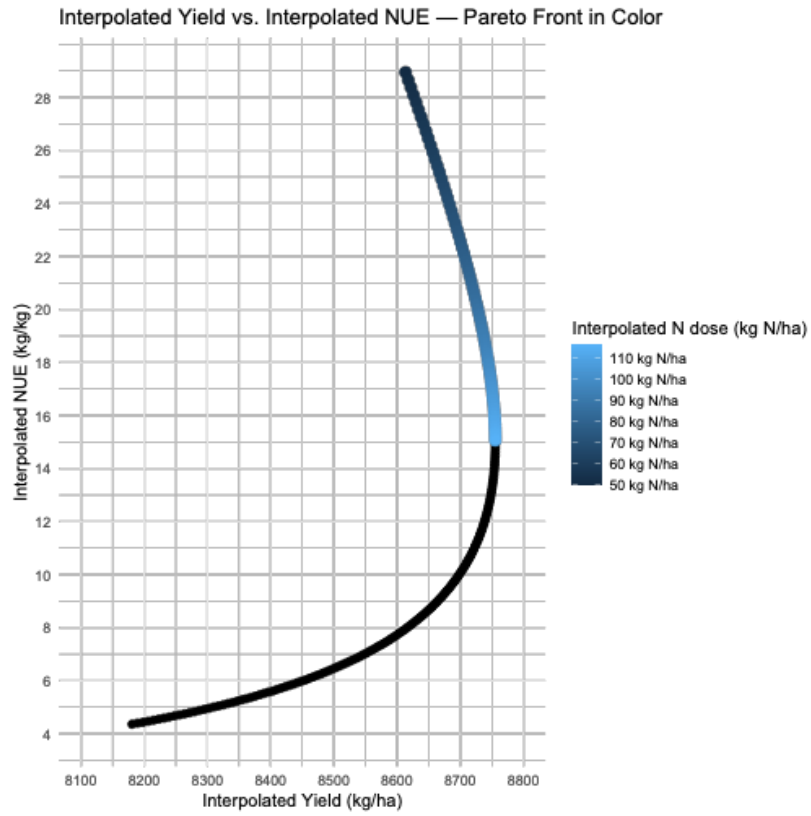
The quadratic models in all datasets suggest that yield initially increases with nitrogen dose until a maximum is reached, after which further increases in nitrogen lead to a decline in yield. The coefficients of the linear term increase from 7.5 in the dry condition to 31.05 in the wet condition, indicating that the responsiveness of yield to nitrogen application is much stronger under more favorable moisture conditions. Conversely, the negative quadratic coefficients become more pronounced (from -0.03 to -0.08), reflecting a sharper curvature in the yield response when moisture is ample. The formula reveals that under dry conditions the estimated N dose for theoretical maximum yield is approximately 125 kg N ha^{-1} , while in both optimal and wet conditions the dose shifts to around $194\text{--}196 \text{ kg N ha}^{-1}$. This pattern indicates that under water-limited conditions the yield response is subdued and peaks at a lower nitrogen rate, whereas in environments with optimal or abundant moisture, maize yield responds more noticeably to increasing nitrogen, albeit with a steeper eventual decline.

For NUE, the best-fit models differ with moisture regimes. In the wet and dry dataset, the equations indicate that NUE decreases exponentially as nitrogen dose increases, a common phenomenon as higher doses often lead to diminishing returns in nitrogen uptake and utilization. Notably, the decay constant is higher in the dry dataset (0.0097 versus 0.0061 in the wet dataset), suggesting that under drought conditions the efficiency with which plants use applied nitrogen declines more rapidly with increasing dose. In contrast, for the optimal dataset, the quadratic model was best fitted for NUE. The model shows a gradual decline in NUE with increasing nitrogen dose. Specifically, at the lower bound of 50 kg N ha^{-1} , the predicted NUE is about 13.9, whereas by 250 kg N ha^{-1} , it decreases to around 8.5. This milder quadratic response indicates a more moderate decrease in efficiency as nitrogen increases. It suggests that, while overapplication of nitrogen can still reduce efficiency, the penalty is less steep when moisture is neither limiting nor excessive.

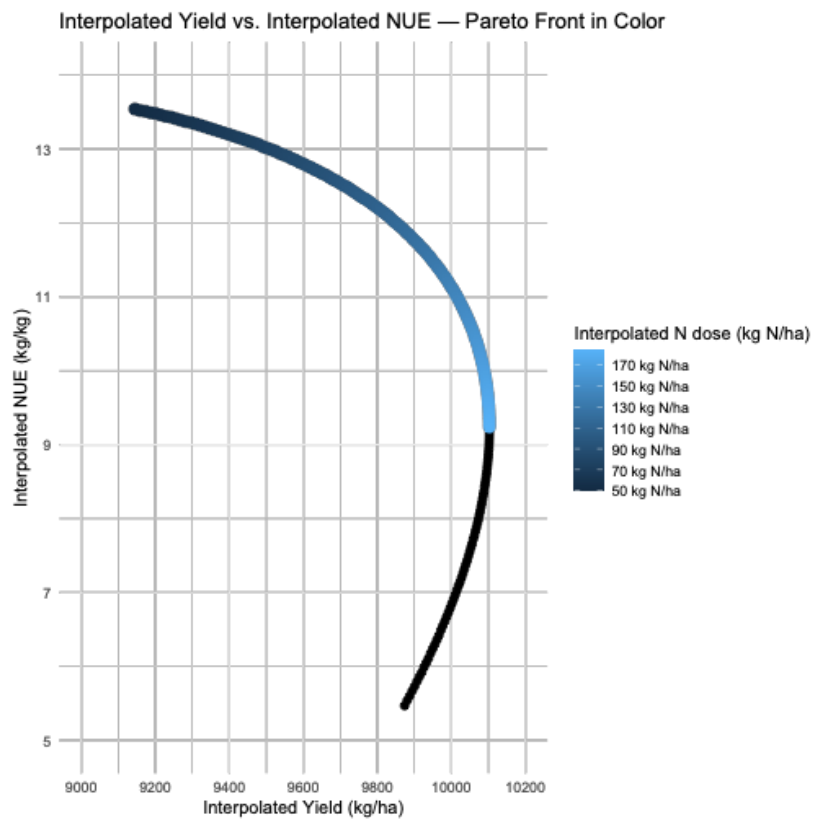
Multiobjective optimization of nitrogen fertilization: balancing yield and efficiency across moisture regimes

The Figure 3a, 3b, 3c represent points on the Pareto front for each moisture regime, which reflects a compromise between yield and NUE for a given N dose. In a multiobjective sense, one cannot increase yield further without sacrificing NUE, or vice versa, along these solutions.

(a)



(b)



(c)

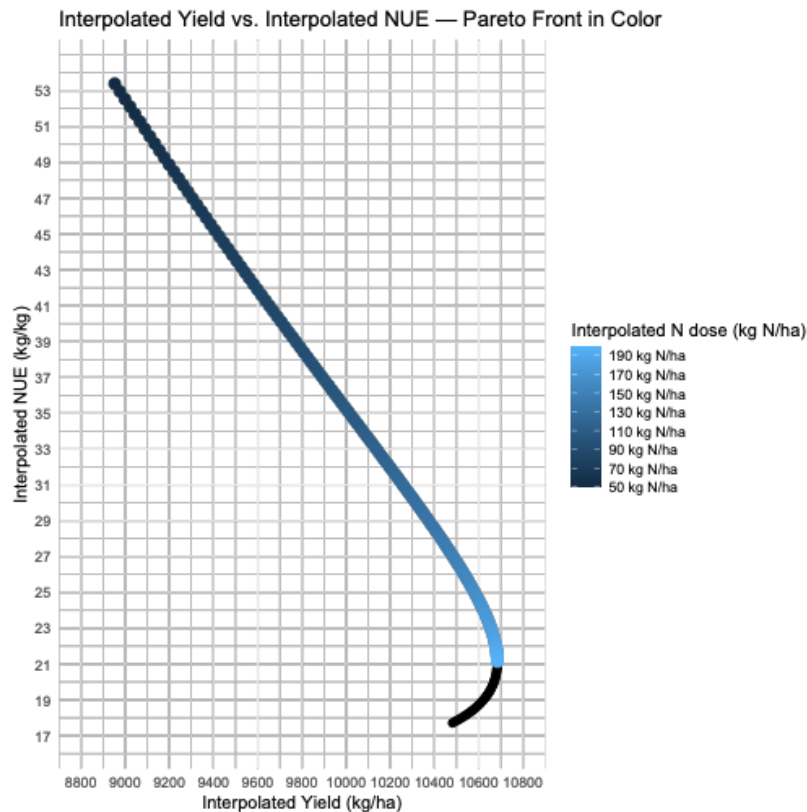


Figure 3. Pareto front of yield and NUE under: **(a)** Dry conditions, **(b)** Optimal conditions, **(c)** Wet conditions. Black points represent non-optimal solutions, while colored points form the Pareto front. Color indicates the nitrogen dose (kg N ha^{-1}).

Figura 3. Pareto front prinosa i agronomske efikasnosti korišćenja azota (NUE) u uslovima: **(a)** suše, **(b)** optimalne vlažnosti, **(c)** prekomerne vlažnosti. Crne tačke predstavljaju neoptimalna rešenja, dok obojene tačke čine Pareto front. Boja označava dozu azota (kg N ha^{-1}).

In each dataset, the categories formed using the percentile-based method were checked for statistical differences using one-way ANOVA ($\alpha = 0.05$), with Tukey HSD as the post-hoc test. Checking statistical differences between categories shows that the groups created by quartiles capture real differences in yield and NUE, not random noise. It proves low (Q1), intermediate (Q2), high (Q3), and highest (Q4) N-rate bands differ in performance. ANOVA showed that mean NUE values differed significantly across categories in dry conditions. Tukey HSD confirmed all pairwise differences (all p-values < 0.001) (Table 5). Similarly, ANOVA for yield across categories revealed a significant difference, and Tukey HSD showed that all four groups differed from each other ($p < 0.001$). This was the case for both optimal and wet conditions also. Normality assumptions Shapiro-Wilk test didn't show normality of the residuals; however, the one-way ANOVA was still applied because the Levene test showed that the homogeneity was present in the data (Table 6). According to Blanca et al. (2017), the F-test of ANOVA is still a valid statistical procedure for data that do not have a normal distribution, only if the variances between groups are homogeneous.

Table 5

ANOVA and pairwise differences in NUE and yield between quartile categories in dry, optimal and wet conditions

Tabela 5

ANOVA i razlike između grupa u NUE i prinosu između kvartilnih kategorija u sušnim, optimalnim i vlažnim uslovima

| Condition | NUE category | NUE difference | p-value | Yield category | Yield difference | p-value |
|-----------|--------------|----------------|---------|----------------|------------------|---------|
| Dry | Q2-Q1 | 3.525241 | <0.001 | Q2-Q1 | 36.87030 | <0.001 |
| | Q3-Q1 | 7.000848 | <0.001 | Q3-Q1 | 73.83448 | <0.001 |
| | Q4-Q1 | 10.544336 | <0.001 | Q4-Q1 | 114.06691 | <0.001 |
| | Q3-Q2 | 3.475608 | <0.001 | Q3-Q2 | 36.96418 | <0.001 |
| | Q4-Q2 | 7.019095 | <0.001 | Q4-Q2 | 77.19660 | <0.001 |
| | Q4-Q3 | 3.543487 | <0.001 | Q4-Q3 | 40.23242 | <0.001 |
| | Pr(>F) | <0.001 | | <0.001 | | |
| Optimal | Q2-Q1 | 1.087731 | <0.001 | Q2-Q1 | 245.3157 | <0.001 |
| | Q3-Q1 | 2.175858 | <0.001 | Q3-Q1 | 491.7635 | <0.001 |
| | Q4-Q1 | 3.284517 | <0.001 | Q4-Q1 | 763.2242 | <0.001 |
| | Q3-Q2 | 1.088126 | <0.001 | Q3-Q2 | 246.4479 | <0.001 |
| | Q4-Q2 | 2.196785 | <0.001 | Q4-Q2 | 517.9086 | <0.001 |
| | Q4-Q3 | 1.108659 | <0.001 | Q4-Q3 | 271.4607 | <0.001 |
| | Pr(>F) | <0.001 | | <0.001 | | |
| Wet | Q2-Q1 | 6.550950 | <0.001 | Q2-Q1 | 439.8553 | <0.001 |
| | Q3-Q1 | 13.014554 | <0.001 | Q3-Q1 | 882.4098 | <0.001 |
| | Q4-Q1 | 19.565504 | <0.001 | Q4-Q1 | 1377.0039 | <0.001 |
| | Q3-Q2 | 6.463604 | <0.001 | Q3-Q2 | 442.5545 | <0.001 |
| | Q4-Q2 | 13.014554 | <0.001 | Q4-Q2 | 937.1485 | <0.001 |
| | Q4-Q3 | 6.550950 | <0.001 | Q4-Q3 | 494.5941 | <0.001 |
| | Pr(>F) | <0.001 | | <0.001 | | |

* Q4-75th percentile and above, Q3-between the 50th and 75th percentiles, Q2-between the 25th and 50th percentiles, Q1-below the 25th percentile.

Table 6

Results of Shapiro–Wilk and Levene’s tests before applying ANOVA under dry, optimal, and wet conditions

Tabela 6

Rezultati Shapiro–Wilk i Levene testa pre primene ANOVA u sušnim, optimalnim i vlažnim uslovima

| Condition | Test | Response | P-value |
|-----------|--------------|----------|---------|
| Dry | Shapiro–Wilk | Yield | 0.007 |
| | | NUE | 0.012 |
| | Levene | Yield | 0.996 |
| | | NUE | 0.992 |
| Optimal | Shapiro–Wilk | Yield | <0.001 |
| | | NUE | <0.001 |
| | Levene | Yield | 0.995 |
| | | NUE | 0.997 |
| Wet | Shapiro–Wilk | Yield | <0.001 |
| | | NUE | <0.001 |
| | Levene | Yield | 0.999 |
| | | NUE | 0.993 |

In the dry dataset (Figure 3a) from 50 kg N ha⁻¹ (yield = 8,613 kg ha⁻¹, NUE = 29 kg kg⁻¹) up to 116 kg N ha⁻¹ (yield = 8,755 kg ha⁻¹, NUE = 15 kg kg⁻¹), the Pareto- optimal points show a steady tradeoff: modest increases in yield at the cost of a rapid decline in efficiency. Past 116 kg N ha⁻¹ NUE continues dropping, underscoring the limited yield potential under water- stressed conditions and the sharply diminishing returns from additional nitrogen. Conditional formatting based on percentile distribution reveals that under dry conditions, the optimal N dose range where yields are increasing and NUE stays stable is between 70 and 77 kg N ha⁻¹ (Figure 4a). When compared with the 116 kg N ha⁻¹, the optimal N dose range produced roughly 0.7% lower yield while achieving a substantially higher NUE - approximately 52% greater.

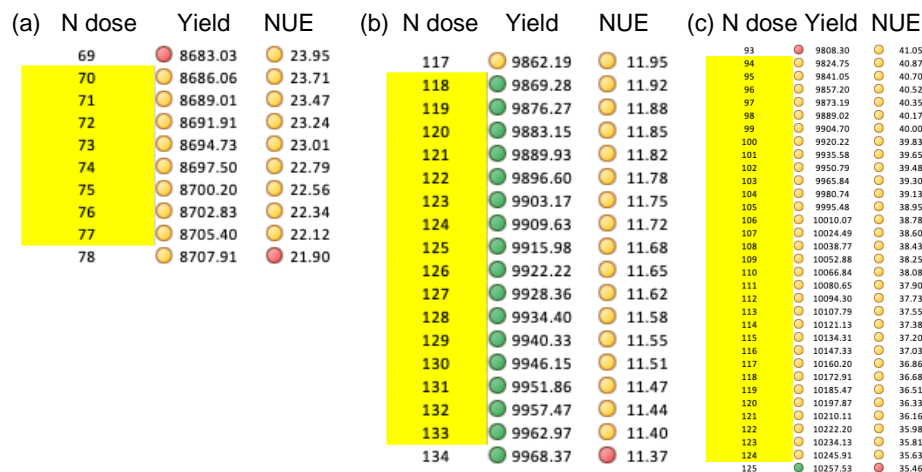


Figure 4. (a) The table shows the response of maize to varying nitrogen (N) doses under dry conditions, with N dose (kg ha⁻¹), yield (kg ha⁻¹), and nitrogen use efficiency (NUE; kg grain per kg N) represented in columns. The optimal N dose range (70–77 kg N ha⁻¹), highlighted in yellow, corresponds to high values for both yield and NUE, as indicated by the golden-colored markers. Doses below 70 or above 77 kg N ha⁻¹ are associated with reduced performance, which could be seen from different colored markers in either yield or NUE. (b) Under optimal moisture conditions, the optimal N dose range for simultaneously achieving high yield and NUE is between 118 and 133 kg N ha⁻¹ (highlighted in yellow). Within this range, yield values are among the highest recorded (green-colored markers), while NUE remains stable (golden-colored markers). (c) Under wet conditions, the optimal N dose range for balancing high yield and NUE lies between 94 and 124 kg N ha⁻¹ (highlighted in yellow). Doses under 94 or over 124 kg N ha⁻¹ result in reduced performance, indicated by different coloured markers in yield or NUE.

*The full dataset includes N doses from 50 to 250 kg N ha⁻¹, but only values near the optimal range (one below and one above) are shown here for better visibility.

Figura 4. (a) Tabela prikazuje odgovor kukuruza na različite doze azota u uslovima suše, sa kolonama koje sadrže dozu azota (kg ha⁻¹), prinosa (kg ha⁻¹) i agronomsku efikasnost korišćenja azota (NUE; kg zrna po kg N). Optimalni opseg doze azota (70–77 kg N ha⁻¹), označen žutom bojom, odgovara visokim vrednostima i prinosa i NUE, što je prikazano zlatnim markerima. Doze ispod 70 ili iznad 77 kg N ha⁻¹ povezane su sa smanjenim učinkom, što se vidi po markerima druge boje u kolonama prinosa ili NUE. (b) U uslovima optimalne vlažnosti, optimalni opseg doze azota za istovremeno postizanje visokog prinosa i visoke NUE iznosi između 118 i 133 kg N ha⁻¹ (označeno žutom bojom). U ovom intervalu, vrednosti prinosa su među najvišima zabeležanima (označene zelenim markerima), dok NUE ostaje stabilna (zlatni markeri). (c) U uslovima prekomerne vlažnosti, optimalni opseg doze azota za balansiranje visokog prinosa i visoke NUE nalazi se između 94 i 124 kg N ha⁻¹ (označeno žutom bojom). Doze ispod 94 ili iznad 124 kg N ha⁻¹ dovode do smanjenja performansi, što je prikazano različitim bojama markera u kolonama prinosa i NUE.

* Kompletan skup podataka obuhvata doze azota u rasponu od 50 do 250 kg N ha⁻¹, ali su ovde prikazane samo vrednosti u blizini optimalnog opsega (jedna doza ispod i jedna iznad), radi bolje preglednosti.

The Figure 5 illustrates the trade-off between yield and NUE under a dry scenario using interpolated data points for nitrogen doses from 50 kg N ha⁻¹ up to 116 kg N ha⁻¹. The labeled points at 50 kg N ha⁻¹ and 116 kg N ha⁻¹ mark the extremes of this trade-off: lower nitrogen rates maintain higher efficiency at the cost of reduced yield, whereas higher rates push yield upward but diminish efficiency. The steep negative slope highlights the diminishing returns in agronomic efficiency once yield approaches its upper limit under these dry conditions. The linear equation quantifies how NUE declines as yield increases under these dry conditions. Specifically, the slope of -0.093 means that for every 1 kg ha⁻¹ increase in yield, NUE decreases by about 0.093 kg kg⁻¹.

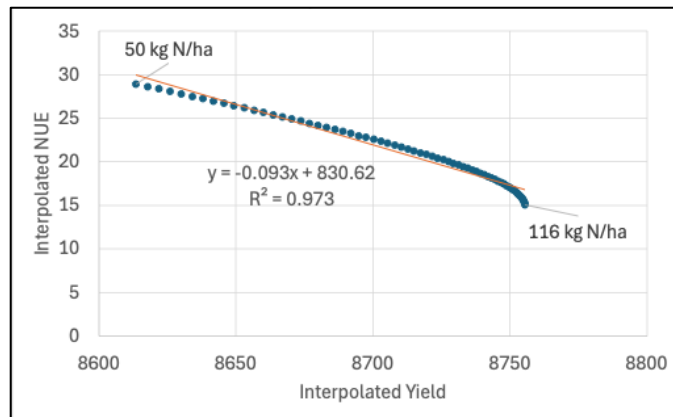


Figure 5. Relationship between maize yield and NUE in dry conditions.

Figura 5. Odnos između prinosa kukuruza i agronomske efikasnosti korišćenja azota (NUE) u uslovima suše.

Under optimal moisture, the Pareto front spans a broader range (Figure 3b). At the low end (50 kg N ha^{-1}), yield is around $9,145 \text{ kg ha}^{-1}$, with $\text{NUE} \approx 13.5 \text{ kg kg}^{-1}$. As N input increases toward $141\text{--}167 \text{ kg N ha}^{-1}$, yield goes above $10,000 \text{ kg ha}^{-1}$ but NUE declines into the $10\text{--}11 \text{ kg kg}^{-1}$ range. The plateau near $10,100 \text{ kg ha}^{-1}$ emerges at 184 kg N ha^{-1} , where NUE settles at 9.24 kg kg^{-1} . Each step along this Pareto front highlights how optimal moisture conditions allow for higher yields than the dry scenario but still require accepting a reduced efficiency at high N doses. Conditional formatting based on percentile distribution indicates that, under optimal moisture conditions, the optimal nitrogen application rate for stable yields and nitrogen use efficiency is between 118 and 133 kg N ha^{-1} (Figure 4b). Compared to the 50 kg N ha^{-1} , the intermediate range yielded about 8.4% more but exhibited a 13.9% reduction in NUE. In contrast, relative to the high nitrogen rate, the intermediate range produced roughly 1.8% lower yield while enhancing NUE by approximately 26.2% .

Under optimal moisture, the negative slope of -0.0041 reveals that as yield increases by 1 kg ha^{-1} , NUE declines by $0.0041 \text{ kg kg}^{-1}$ (Figure 6). This decline in efficiency is less steep than in more water-limited scenarios, suggesting that under these conditions, producers can increase yield with only a moderate penalty to NUE.

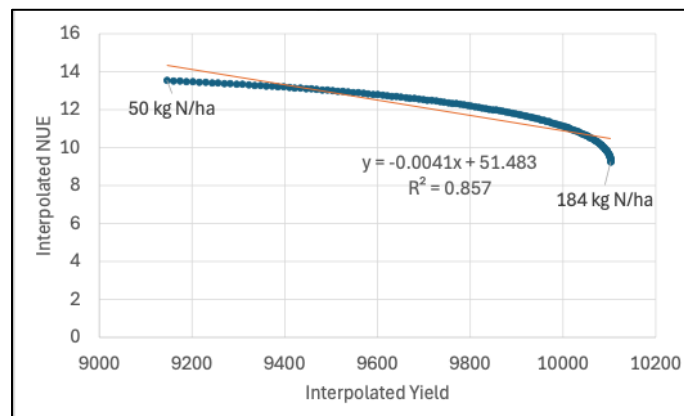


Figure 6. Relationship between maize yield and NUE in optimal conditions.

Figura 6. Odnos između prinosa kukuruza i agronomske efikasnosti korišćenja azota (NUE) u optimalnim uslovima vlage.

In the wet environment in the Figure 3c, the Pareto front starts with high NUE – around 48 kg kg^{-1} at 50 kg N ha^{-1} and yields nearly $9,000 \text{ kg ha}^{-1}$. As N increases toward $150\text{--}160 \text{ kg N ha}^{-1}$, yield can exceed $10,500 \text{ kg ha}^{-1}$, but NUE simultaneously drops to around $25\text{--}27 \text{ kg kg}^{-1}$. The highest yields ($\approx 10,690 \text{ kg ha}^{-1}$) appear at 200 kg N ha^{-1} , where NUE is closer to 21 kg kg^{-1} . Although wet conditions enable the largest absolute gains in yield, the Pareto front still reveals a pronounced efficiency penalty for each additional unit of nitrogen once the crop's high yield potential is approached. Conditional formatting reveals that in the wet environment, the optimal N dose range where yields are increasing

and NUE stays stable is between 94 and 124 kg N/ha (Figure 4c). The intermediate range provided a yield increase of roughly 12.1% relative to the 50 kg N ha⁻¹, albeit with a reduction in NUE of about 21.2%. When contrasted with a high nitrogen rate of 199 kg N ha⁻¹, the intermediate range exhibited a yield approximately 6.1% lower, yet its NUE was improved by approximately 69.7% than that observed at the high nitrogen rate.

Compared with the corresponding graphs under dry and optimal conditions, this wet-environment graph highlights a stronger yield potential but also a steeper decline in NUE as yield increases. The negative slope of -0.0141 reveals that as yield increases by 1 kg ha⁻¹, NUE declines by 0.0141 kg kg⁻¹ (Figure 7).

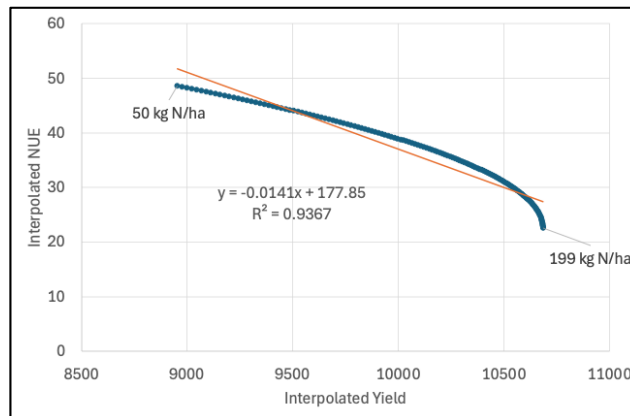


Figure 7. Relationship between maize yield and NUE in wet conditions.

Figura 7. Odnos između prinosa kukuruza i agronomske efikasnosti korišćenja azota (NUE) u uslovima prekomerne vlage.

Discussion

Multiobjective optimization of maize yield and nitrogen use efficiency

The Pareto front is a curve consisting of all outcomes where you cannot improve one objective without worsening the other (Röglin, 2020). By plotting yield on one axis and NUE on the other for various N rates and different moisture scenarios, we obtain a frontier of optimal points. Our results showed that under each moisture condition, the location and shape of the Pareto-optimal region change. Under each condition, a different segment of the interpolated yield–NUE curve becomes Pareto-optimal. This results in a different set of optimal trade-off points along the curve, rather than a uniform shift of the entire frontier. In a well-watered condition, the frontier extends to higher yields with a broader NUE loss, whereas in a drought condition, the maximum achievable yield and thus the Pareto front is lower, and trying to reach for it causes steeper NUE penalty. This multiobjective view reinforces recommendations to avoid chasing 100% of maximal yield at disproportionate cost to efficiency. In other words, as you apply more nitrogen to reach the highest possible yield, each additional unit of yield requires much more nitrogen, so NUE drops rapidly. It quantitatively shows how backing off slightly from the yield maximum can improve NUE.

The findings from this study confirm a well-known agronomic pattern: increasing N fertilizer boosts maize yield up to a point, but excessive N leads to diminishing returns in yield and a sharp drop in efficiency (Su et al., 2020; Ju et al., 2015). Moisture conditions modulate this optimum – adequate water allows the crop to respond fully to N, whereas drought or excessively wet or soil where nitrogen is washed below the root zone and becomes unavailable to plants can stunt the response (Wani et al., 2021). Sufficient soil moisture promotes robust root growth, increasing the root surface area and depth. This expansion allows for greater exploration of the soil profile, facilitating more efficient absorption of N and other essential nutrients (Ma et al., 2023). Adequate water availability supports optimal transpiration rates, which drive the mass flow of nutrients, including N, from the soil to the root surfaces. This process enhances the delivery of N to the plant, supporting growth and metabolic functions (Plett et al., 2020). When water is scarce, the crop's ability to use N is impaired, so yield plateaus at a lower N rate and any N above that reduces NUE (Capurro and Sawchik, 2015), which aligns with our results. A drought-year trial reported that a base rate of 120 kg N ha⁻¹ was optimal, as additional N did not improve yield due to lack of rain. Likewise, excess moisture can limit yield response by inhibiting root function and N uptake. In that case, maize roots suffer oxygen deprivation and nutrient uptake is disrupted, meaning even if ample N is present, the plant cannot absorb it

efficiently (Kaur et al., 2020). Our results showed that there wasn't much difference in terms of yield and optimal N dose between optimal and excess moisture conditions, which confirms finding from (Kaur et al., 2020). It also aligns with the results from (Latković et al., 2006) who state that the calculated highest yield was achieved by applying 195 kg N ha⁻¹. Our study suggests that the peak in yield is achieved with 184 and 199 kg N ha⁻¹ in optimal and wet conditions, respectively. Considering the economy of production, as well as the nitrogen balance, the same authors further state that the optimal amount of nitrogen would be 110–150 kg N ha⁻¹, if the harvest residues are plowed. That is the similar range of N as in our study (Figures 4b, 4c). However, in drought conditions the optimal N rate shifts between 70 and 77 kg N ha⁻¹ (Figure 4a).

Environmental considerations

Research shows that very high N may only raise yield slightly more than moderate N rates, while reducing NUE and risking environmental losses. In recent years, agricultural regions and settlements have experienced accelerated contamination of groundwater with nitrogen-containing substances (Rogožarski and Marjanović, 2012) due to the excessive use of mineral fertilizers, applied in quantities exceeding what plants can utilize. A study by Rajković et al. (2014) reported that in certain regions of Serbia, the most common causes of drinking water contamination were elevated concentrations of nitrates (up to 20 times above the permissible limit) and nitrites (up to 10 times above the limit). While there are many ways to reduce the amount of nitrate and nitrite entering the water, one of the approaches is to reduce N fertilizer added to the field. Additionally, adopting nutrient management techniques that consider soil testing, crop requirements, and environmental conditions can further enhance nitrogen use efficiency. This approach ensures that the applied nitrogen meets crop needs without contributing to environmental pollution (Clarke and Beegle, 2014).

For instance, in rice cultivation, applying more than 315 kg N ha⁻¹ led to reduced grain yield and NUE. The optimal application rate was identified as 210 kg N ha⁻¹, which balanced high grain yield with efficient nitrogen utilization (Liang et al., 2021). One long-term study found that reducing N by 25% caused almost no yield penalty (<4% yield drop) but significantly improved NUE in maize. Similarly, another experiment noted that cutting N by about 30% did not decrease maize biomass or yield, and it achieved the highest NUE at that reduced rate, whereas further N increases only lowered NUE (Shi et al., 2016). Sensor-based fertilization strategies have demonstrated that reducing N input by up to 20% from the optimal rate can result in only about a 5% yield loss, thereby enhancing NUE and minimizing nitrogen surplus (Mittermayer et al., 2024).

Modeling approaches in fertilizer management

Our analyses consistently showed that a quadratic model best described the relationship between N rate and maize grain yield across different moisture regimes. Many agronomic studies have used quadratic models to represent this nutrient response pattern (Zou et al., 2024; Li et al., 2020; Qiu et al., 2015; Latković, 2010). However, it is important to note that while the quadratic model is prevalent, it may not always provide the most accurate representation of yield responses, especially at higher nutrient application rates. Alternative models, such as the quadratic-plus-plateau model, have been suggested to better capture the plateau effect observed in crop yields at higher nutrient levels (Wang et al., 2020). However, we didn't use it in this study because the quadratic-plus-plateau model is constituted from four parameters, and we had five data points – using it would promote overfitting in such situations. In our case, the linear-plus-plateau model (three parameters) was the second best after the quadratic-plus-plateau model.

For agronomic NUE the relationship with N rate under extreme moisture conditions was explained by an exponential decay model. Here, the NUE against N curve became very steep initially and then quickly flattened near zero, a shape characteristic of exponential decay. Under optimal conditions, NUE typically declines as N rate increases, often in a smooth curvilinear way. These results corroborate many other studies that investigated the relationship between NUE and fertilizer rates (Hegedus et al., 2023).

Conclusion

The findings from this study highlight a pronounced trade-off between yield maximization and agronomic nitrogen use efficiency (NUE) in maize production across distinct moisture conditions. Dry years showed a lower optimal nitrogen rate, whereas optimal and wet years supported higher N applications before returns on yield began to diminish. However, the optimal rate in optimal years was slightly higher than in wet years, by 7-25%. Quadratic models adequately captured the yield response

to nitrogen in each scenario, and exponential decay models frequently explained the decline in NUE as N rates rose. By focusing on nitrogen ranges below the absolute yield peak, growers can realize substantial improvements in NUE (ranging 26.2-69.7%), reducing input costs and mitigating potential nitrate leaching risks. This approach supports more resource-conscious maize production, emphasizing strategic nitrogen applications tailored to site-specific precipitation patterns. Such practices can stabilize yields while preserving water quality and ecosystem integrity. Overall, results underscore the value of aligning nitrogen doses with prevailing moisture conditions and show that 70-77 kg N ha⁻¹, 118-133 kg N ha⁻¹ and 94-124 kg N ha⁻¹ in dry, optimal and wet conditions respectively, can meet productivity targets without incurring excessive environmental costs.

Acknowledgment

This research was supported by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia, grant number: 451-03-136/2025-03/ 200032

Reference

- Alocilja, E. C., Ritchie, J. T. 1993. Multicriteria optimization for a sustainable agriculture. In Systems approaches for agricultural development: Proceedings of the International Symposium on Systems Approaches for Agricultural Development, 2-6 December 1991, Bangkok, Thailand (pp. 381-396). Springer Netherlands.
- Basso, B., Dumont, B., Cammarano, D., Pezzuolo, A., Marinello, F., Sartori, L. 2016. Environmental and economic benefits of variable rate nitrogen fertilization in a nitrate vulnerable zone. *Science of the total environment*, 545, 227-235.
- Blanca Mena, M. J., Alarcón Postigo, R., Arnau Gras, J., Bono Cabré, R., Bendayan, R. 2017. Non-normal data: Is ANOVA still a valid option? *Psicothema*, 2017, vol. 29, num. 4, p. 552-557.
- Capurro, M. C., Sawchik, J. 2015. Nitrogen fertilization in maize under irrigated and rainfed conditions. *Agrociencia Uruguay*, 19(3), 21-21.
- Clarke, K., Beegle, D. B. 2014. Nutrient management to improve nitrogen use efficiency and reduce environmental losses. *Agronomy Facts*, 76, EE0094.
- Congreves, K. A., Otchere, O., Ferland, D., Farzadfar, S., Williams, S., Arcand, M. M. 2021. Nitrogen use efficiency definitions of today and tomorrow. *Frontiers in Plant Science*, 12, 637108.
- Dragičević, V., Mladenović Drinić, S., Simić, M., Brankov, M., Dumanović, Z., Sečanski, M., Milenković, M. 2020. Variability of maize inbred lines in nitrogen use efficiency. *Genetika*, 52(2), 585-596.
- Dunđerski, D., Latković, D., Crnobarac, J., Jaćimović, G., Visković, J., Bekavac, G. 2021. 56. hrvatski i 16. međunarodni simpozij agronoma: zbornik sažetaka. In 56. hrvatski i 16. međunarodni simpozij agronoma. Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek.
- Duvick, D. N. 2005. The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.). *Advances in agronomy*, 86, 83-145.
- Fageria, N. K., Baligar, V. C. 2005. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in agronomy*, 88, 97-185.
- Gheith E. M. S., El-Badry Ola Z., Lamlom Sobhi F., Ali Hayssam M., Siddiqui Manzer H., Ghareeb Rehab Y., El-Sheikh Mohamed H., Jebriil Jebriil, Abdelsalam Nader R., Kandil Essam E. 2022. Maize (*Zea mays* L.) productivity and nitrogen use efficiency in response to nitrogen application levels and time. *Frontiers in Plant Science*, 13, 941343.
- Grčak, M., Grčak, D., Penjišević, A., Simjanović, D., Orbović, B., Đukić, N., Rajčić, V. 2020. The trends in maize and wheat production in the republic of Serbia. *Acta Agriculturae Serbica*, 25(50), 121-127.
- Giannelos, S., Zhang, X., Zhang, T., Strbac, G. 2024. Multi-Objective Optimization for Pareto Frontier Sensitivity Analysis in Power Systems. *Sustainability* (2071-1050), 16(14).
- He, K., Xu, S., Zhang, X., Li, Y., Chang, L., Wang, Y., Shi, Y., Cui, T., Dong, Y., Lan, T., Liu, X., Du, Y., Zhang, R., Liu, J., Xue, J. 2020. Mining of candidate genes for nitrogen use efficiency in maize based on genome-wide association study. *Molecular breeding*, 40, 1-17.
- Hegedus, P. B., Ewing, S. A., Jones, C., Maxwell, B. D. 2023. Using spatially variable nitrogen application and crop responses to evaluate crop nitrogen use efficiency. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 126(1), 1-20.
- Huang, S., He, P., Jia, L., Ding, W., Ullah, S., Zhao, R., Zhang, J., Xu, X., Liu, M., Zhou, W. 2021. Improving nitrogen use efficiency and reducing environmental cost with long-term nutrient expert management in a summer maize-winter wheat rotation system. *Soil and Tillage Research*, 213, 105117.
- Jaćimović, G., Aćin, V., Crnobarac, J., Latković, D., Visković, J., Miroslavljević, M., Brbaklić, L. 2018. The mineral nutrition specificity of winter wheat cultivars and the efficiency of NPK nutrients in the grain yield formation.
- Ju, C., Buresh, R. J., Wang, Z., Zhang, H., Liu, L., Yang, J., Zhang, J. 2015. Root and shoot traits for rice varieties with higher grain yield and higher nitrogen use efficiency at lower nitrogen rates application. *Field Crops Research*, 175, 47-55.
- Karamian, F., Mirakzadeh, A. A., Azari, A. 2023. Application of multi-objective genetic algorithm for optimal combination of resources to achieve sustainable agriculture based on the water-energy-food nexus

framework. *Science of The Total Environment*, 860, 160419.

Kaur, G., Singh, G., Motavalli, P. P., Nelson, K. A., Orlowski, J. M., Golden, B. R. 2020. Impacts and management strategies for crop production in waterlogged or flooded soils: A review. *Agronomy Journal*, 112(3), 1475-1501.

Kropp, I., Nejadhashemi, A. P., Deb, K., Abouali, M., Roy, P. C., Adhikari, U., Hoogenboom, G. 2019. A multi-objective approach to water and nutrient efficiency for sustainable agricultural intensification. *Agricultural Systems*, 173, 289-302.

Latković, D. 2010. Iznošenje NPK hraniva prinosom kukuruza u zavisnosti od đubrenja azotom. (Doktorska disertacija).

Latković, D., Starčević, L., Marinković, B., Crnobarac, J., Jaćimović, G. 2006. Grain yield and nitrogen outputting at different fertilization variants in maize monoculture. *Letopis naučnih radova Poljoprivrednog fakulteta*, 30(1), 134-140.

Li, Y., Cui, S., Zhang, Z., Zhuang, K., Wang, Z., Zhang, Q. 2020. Determining effects of water and nitrogen input on maize (*Zea mays*) yield, water-and nitrogen-use efficiency: A global synthesis. *Scientific reports*, 10(1), 9699.

Liang, H., Gao, S., Ma, J., Zhang, T., Wang, T., Zhang, S., Wu, Z. 2021. Effect of nitrogen application rates on the nitrogen utilization, yield and quality of rice. *Food and Nutrition Sciences*, 12(01), 13.

Ma, Z., Yin, J., Yang, Y., Sun, F., Yang, Z. 2023. Effect of water and nitrogen coupling regulation on the growth, physiology, yield, and quality attributes and comprehensive evaluation of wolfberry (*Lycium barbarum* L.). *Frontiers in plant science*, 14, 1130109.

Metzger, M. J., Brus, D. J., Bunce, R. G. H., Carey, P. D., Gonçalves, J., Honrado, J. P., Jongman, R.H.G., Trabucco, A., Zomer, R. (2013). Environmental stratifications as the basis for national, European and global ecological monitoring. *Ecological Indicators*, 33, 26-35.

Mittermayer, M., Donauer, J., Kimmelmann, S., Mair, F. X., Hülsbergen, K. J. 2024. Effects of different nitrogen fertilization systems on crop yield and nitrogen use efficiency—Results of a field experiment in southern Germany. *Heliyon*, 10(7).

Moitzi, G., Neugschwandtner, R. W., Kaul, H. P., & Wagenritzl, H. 2020. Efficiency of mineral nitrogen fertilization in winter wheat under Pannonian climate conditions. *Agriculture*, 10(11), 541.

Oenema, O. 2015. Nitrogen use efficiency (NUE)—an indicator for the utilisation of nitrogen in agricultural and food systems.

1. Pavlović, P., Kostić, N., Karadžić, B., Mitrović, M. 2017. Soils as Natural Resources. *The Soils of Serbia*, 25-29.

Plett, D. C., Ranathunge, K., Melino, V. J., Kuya, N., Uga, Y., Kronzucker, H. J. 2020. The intersection of nitrogen nutrition and water use in plants: new paths toward improved crop productivity. *Journal of experimental botany*, 71(15), 4452-4468.

Qiu, S. J., He, P., Zhao, S. C., Li, W. J., Xie, J. G., Hou, Y. P., Grant, C. A., Zhou, W., Jin, J. Y. 2015. Impact of nitrogen rate on maize yield and nitrogen use efficiencies in northeast China. *Agronomy Journal*, 107(1), 305-313.

Rajković, M. B., Antić, M., Milojković, S., Marjanović, T. 2014. Ispitivanje sadržaja nitrata, nitrata i amonijaka u vodi za piće. XIX savetovanje o biotehnologiji sa međunarodnim učešćem, Čačak, Zbornik radova, 19(21), 511-515.

Röglin, H. 2020. Smoothed Analysis of Pareto Curves in Multiobjective Optimization.

Rogožarski, Z., Marjanović, T. 2012. Sagledavanje zdravstvene ispravnosti vode za piće na teritoriji grada Požarevca. UB Radovanović (urednik): Zbornik radova „Održivi razvoj grada Požarevca i energetskog kompleksa Kostolac, 217-220.

Sharifi, S., Shi, S., Dong, X., Obaid, H., He, X., Gu, X. 2023. Variations in Nitrogen Accumulation and Use Efficiency in Maize Differentiate with Nitrogen and Phosphorus Rates and Contrasting Fertilizer Placement Methodologies. *Plants*, 12(22), 3870.

Shi, D. Y., Li, Y. H., Zhang, J. W., Liu, P., Zhao, B., Dong, S. T. 2016. Increased plant density and reduced N rate lead to more grain yield and higher resource utilization in summer maize. *Journal of Integrative Agriculture*, 15(11), 2515-2528.

Su, W., Ahmad, S., Ahmad, I., Han, Q. 2020. Nitrogen fertilization affects maize grain yield through regulating nitrogen uptake, radiation and water use efficiency, photosynthesis and root distribution. *PeerJ*, 8, e10291.

Wang, X., Miao, Y., Dong, R., Chen, Z., Kusnierek, K., Mi, G., Mulla, D. J. 2020. Economic optimal nitrogen rate variability of maize in response to soil and weather conditions: Implications for site-specific nitrogen management. *Agronomy*, 10(9), 1237.

Wani, S. H., Vijayan, R., Choudhary, M., Kumar, A., Zaid, A., Singh, V., Kumar, P., Yasin, J. K. 2021. Nitrogen use efficiency (NUE): elucidated mechanisms, mapped genes and gene networks in maize (*Zea mays* L.). *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 27(12), 2875-2891.

Xiong, Q., Tang, G., Zhong, L., He, H., Chen, X. 2018. Response to nitrogen deficiency and compensation on physiological characteristics, yield formation, and nitrogen utilization of rice. *Frontiers in plant science*, 9, 1075.

Zhang, X., Davidson, E. A., Mauzerall, D. L., Searchinger, T. D., Dumas, P., Shen, Y. 2015. Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, 528(7580), 51-59.

Zou, H., Li, D., Ren, K., Liu, L., Zhang, W., Duan, Y., Lu, C. 2024. Response of maize yield and nitrogen recovery efficiency to nitrogen fertilizer application in field with various soil fertility. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1349180.

Optimizacija prinosa kukuruza i efikasnosti korišćenja azota u sušnim, optimalnim i vlažnim proizvodnim uslovima

Dušan Dunđerski^{a*}, Goran Bekavac^a, Božana Purar^a, Anja Đurić^a, Maja Tanasković^a, Jelena Visković^b, Goran Jaćimović^b, Dragana Latković^a

^aInstitut za ratarstvo i povrtarstvo, 21000 Novi Sad, Srbija

^bUniverzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Departman za ratarstvo i povrtarstvo, 21000 Novi Sad, Srbija

*Autor za kontakt: dusan.dundjerski@nsseme.com

SAŽETAK

Doze azota, prinos zrna kukuruza i efikasnost korišćenja azota (NUE) su usko povezani, a režim padavina ima značajnu ulogu u toj vezi. Višegodišnji ogled postavljen je sa ciljem optimizacije prinosa zrna kukuruza i agronomске efikasnosti korišćenja azota u različitim uslovima vlažnosti. Podaci, koji obuhvataju period od 2002. do 2020. godine, dobijeni su iz dugoročnog eksperimenta upravljanja žetvenim ostacima u kombinaciji sa rastućim dozama azota (N). Upravljanje žetvenim ostacima obuhvatalo je dva tretmana, sa i bez zaoravanja ostataka. Kada su žetveni ostaci bili zaorani, primenjeno je šest nivoa azota: 0 (kontrolni tretman), 50, 100, 150, 200 i 250 kg N ha⁻¹. U varijanti bez zaoravanja biljnih ostataka, primenjene su tri doze azota: 0 (kontrolni tretman), 100 i 200 kg N ha⁻¹. Za analizu je primenjen višeciljni pristup, koji je omogućio uvid u kompromis između prinosa i NUE u zavisnosti od režima padavina, pri čemu su se vegetacione sezone klasifikovale kao suve, optimalne i vlažne, na osnovu percentilskih pragova padavina. Ova metodologija omogućila je precizniju interpretaciju reakcije prinosa i efikasnosti korišćenja azota u različitim uslovima vlažnosti. Rezultati su ukazali na različite optimalne doze azota u zavisnosti od režima padavina. U suvim godinama, optimalni raspon kretao se od 70 do 77 kg N ha⁻¹, dok je u sezonama sa uobičajenim padavinama iznosio od 118 do 133 kg N ha⁻¹. U vlažnim godinama, optimalne doze su bile između 94 i 124 kg N ha⁻¹. Ove doze omogućile su ostvarenje prinosa bliskih maksimalnim vrednostima, uz održavanje efikasnosti korišćenja azota. Dalje povećanje količine azota donosilo je samo skromna povećanja prinosa, uz istovremeno izraženiji pad NUE. Rezultati naglašavaju da umereni nivoi dubrenja azotom, prilagođeni raspoloživoj vlažnosti, mogu obezbediti visoku i stabilnu proizvodnju kukuruza. Analiza je takođe potvrdila značaj zaoravanja biljnih ostataka, koje se dosledno pokazalo kao jedno od optimalnih rešenja u okviru višeciljnog pristupa.

KLJUČNE REČI

Višeciljna optimizacija; Pareto; žetveni ostaci; azot; iskorišćenje azota; prinos

Rad primljen : 24.3.2025.

Recenzija : 28.5.2025.

Prihvaćen : 31.5.2025.

Objavljen : 15.6.2025.



Uticaj dužine i temperature čuvanja kontrolnog seruma na stabilnost biohemijskih parametara

Danijela Fajin^a, Ivana Davidov^a, Zoran Ružić^a, Mira Majkić^a, Marko Cincović^a

^aUniverzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Departman za veterinarsku medicinu, Srbija

*Autor za kontakt: mcincovic@gmail.com

SAŽETAK

Cilj ovog rada je bio da se ispita uticaj temperature prilikom skladištenja uzoraka na vrednosti biohemijskih parametara. Za potrebu ovog rada je korišćen je goveđi kontrolni serum koji je čuvana na temperaturi od +4°C i +20°C tokom 6 dana. Praćena je stabilnost parametara funkcije jetre, bubrega, energetskog i metaboličkog statusa. Vršena je analiza koncentracije ALB, TPROT, UREA, NEFA, GLU, BHB, CHOL, TGC, TBIL, AST, Ca i P, uz procenu maksimalno dozvoljene nestabilnosti (MPI) za svaki parametar. Uočeno je da parametri imaju različit stepen stabilnosti prilikom skladištenja na različitim temperaturama. Zabeleženo je da je čuvanje na +4°C značajno povećalo stabilnost većine ispitivanih analita. Analiti među kojima su ALB, TPROT i UREA su pokazali bolju stabilnost na nižoj temperaturi, za razliku od BHB, CHOL i AST koji su pokazali odstupanja već nakon 2-3 dana čuvanja na +20°C. Promene u vrednosti metabolita su bile mnogo značajnije kada se uzorak čuva na +20°C (temperatura spoljnjne sredine) u odnosu na temperaturu +4°C (temperatura frižidera) za parametre ALB, UREA, GLU, NEFA, CHOL i TGC. Posmatrajuci poslednji, šesti dan ogleđa vrednosti metabolita prilikom čuvanja na sobnoj temperaturi u odnosu na temperaturu frižidera u odnosu na prvi dan bila je: ALB 84,5:98,3%; TPROT 98,6:99,1; UREA 119,3:88,5; GLU 72,6:82,6; NEFA 132,5:115,1; BHB 108,7:104,6; CHOL 88,3:97,9; TGC 80,1:98,1; TBIL 89,6:90,2; AST 82,3:89,4; Ca 100,2:99,5; P 105,9:104,7. U ovom istraživanju potvrđen je značaj uticaja temperature na biohemijske analite tokom skladištenja uzoraka te ukazuje na potrebu kontrole temperature sredine u kojoj se čuvaju uzorci.

Ključne reči:

biohemijski parametri, serum, termostabilnost.

Uvod

Stabilnost uzoraka zavisi od očuvanosti njihovih fizičko-hemijskih osobina, na koje mogu uticati način rukovanja, uslovi transporta, naročito temperatura kao i kasnije čuvanje. Najkasnije dva sata nakon uzimanja krvi, potrebno je centrifugiranjem odvojiti serum ili plazmu od eritrocita, pri čemu je važno da se prethodno formiraju stabilni krvni ugrušci, što zavisi od vrste epruveta koje se koriste (Flores et al., 2020; Nordin et al., 2024). Na sobnoj temperaturi odvojeni uzorci ostaju postojani oko osam sati, dok se na 2-4 °C mogu čuvati do 48 časova. Po isteku tog perioda serum je potrebno zamrznuti na -20 °C (Zhou i sar., 2024).

Testovi stabilnosti izvođeni su kod različitih životinjskih vrsta i ljudi (Taylor et al., 2011; Oddo et al., 2012). Rosato i sararadnici (2009) ispitivali su stabilnost biohemijskih parametara seruma pasa pri različitim temperaturama (25, 4, -4, -20, -70 °C) i vremenima čuvanja (12 h-90 d). Pratili su elektrolite, proteine, lipide, kreatinin, ureu i enzime. Metaboliti i minerali ostali su stabilni na -4 i -20 °C do 60, odnosno 30 dana. GGT i AST rano se menjaju na -70 °C; kreatin kinaza posle 60 d na -4 °C, GGT posle 30 d na -20 °C. Na temperaturama od -4 i -20 °C najbolje se čuvaju uzorci. Serum se često zamrzava i odlaže kako bi se kasnije mogao analizirati. Cray i sararadnici (2009) sprovode istraživanje radi procene stabilnosti 17 analita u serumu pacova na temperaturi frižidera od 4°C i na temperaturi mržnjenja od -20°C i -70°C. Serumi su bili analizirani nultog dana, a zatim 7., 30., 90., i 360. dana. Samo aktivnost kreatin kinaze je varirala za više od 10% nakon 7 dana odlaganja u frižideru. Promene u koncentraciji CO₂ su primećene 30. dana, a u aktivnosti alanil transferaze 90. dana, pri temperaturi zamrzavanja od -70°C. Uzorci seruma čuvanih u zamrzivačima sa i bez stvaranja leda na temperaturi od -20°C nisu pokazali značajne razlike do 90. dana skladištenja.

Prema Evropskoj federaciji kliničke hemije (EFLM), formirana je radna grupa za "Preanalitičku fazu" (WG-PRE), osnovana 2013. godine koja radi na unapređenju harmonizacije preanalitičke faze pisanjem uputstava i preporuka i edukacijom u zemljama članicama Evropske unije i drugim članovima udruženja (Nordin et al., 2024). Preporuke su neophodne i u veterinarskoj medicini jer su laboratorijski parametri veoma značajni u praksi i istraživačkom radu (Cincović i sar., 2023; Majkić i

sar., 2023; Krnjaić i sar., 2024). Cilj ovog rada je da se ispita stabilnost metabolita iz kontrolnih seruma čuvanih u temperaturnom režimu ambijentalne temperature i frižidera tokom šest dana.

Materijal i metode

U ovom istraživanju korišćeno je 30 uzoraka kontrolnog seruma, koji je prethodno pripremljen za potrebe oglada. Ovi uzorci su dobijeni mešanjem kontrolnih seruma sa najvišim i najnižim vrednostima u različitim procentualnim odnosima. Na taj način formirani su uzorci različitih koncentracija, koji sa aspekta matriksa i koncentracije koja je dobijena verno oponašaju najčešće vrednosti u realnim kliničkim uzorcima.

Metabolički parametri su određivani u svakoj nedelji uzorkovanja krvi. Korišćene su fotometrijske reakcije i fotometar proizvođača Rayto (Chemray120). Fotometriranje je vršeno na talasnoj dužini i u vremenskom intervalu prema specifikaciji proizvođača. Pre upotrebe svakog novog kita formirana je kalibraciona kriva, prema specifikaciji proizvođača. Korišćeni su standardni kitovi proizvođača Biosystem (Španija), Randox (UK) i/ili Pointe scientific (SAD). Za procenu energetskog statusa krava vršeno je ispitivanje koncentracije NEFA, BHB i glukoze. Metabolizam proteina procenjen je kroz koncentraciju ukupnih proteina, albumina, uree i amonijaka. Hepatični profil podrazumeva određivanje holesterol, trigliceridi, ukupni bilirubin i AST. Profil jona je ispitan merenjem koncentracije Ca i P.

Uzorci su ostavljani na sobnoj temperaturi (+20°C) i na temperaturi frižidera (+4°C) i testirani su jednom dnevno tokom 6 dana čuvanja uzorka. Gomez-Rioja i saradnici (2023) u svom protokolu precizno su definisali tehničke procedure za merenje stabilnosti. Gubitak stabilnosti se procenjuje poređenjem mernih vrednosti dva uzorka dobijena od istog pacijenta i analizirana u različitim vremenskim tačkama - bazalno vreme/uzorak i vreme ispitivanja/uzorak. Razlike su izražene procentualnom devijacijom (PD%). MPI je izračunat $MPI = 0,5 \times (CVa+CVi)$. $PD\% < MPI$ za sve ispitanike ukazuje na to da nije došlo do značajnog gubitka stabilnosti unutar proučenog vremena skladištenja. Analitička varijacija, biološka varijacija i RCV određeni su prema podacima Kovačević i saradnika (2021), koji potiču iz iste laboratorije kao i naši rezultati. Statistički softver SPSS (SAD) je korišćen za obradu i analizu rezultata.

Rezultati

Analiza stabilnosti uzoraka i odstupanje vrednosti tokom šest dana ispitivanja prikazani su u Tabeli 1. Parametri proteina su pokazali sledeće osobine stabilnosti. ALB je bio stabilan 6 dana na 4°C, odnosno 3 dana na 20°C. TPROT su bili stabilni u uzorku u ispitivanom periodu na oba temperaturna režima. UREA je bila stabilna 5 dana na 4°C, odnosno 2 dana na 20°C. Vrednost uree je sa vremenom rasla. Može se reći da su ovo prilično stabilni parametri u navedena dva temperaturna režima. Parametri energetskog bilansa su takvi da su glukoza i NEFA vrlo malo stabilni u uzorcima, pa se analiza mora završiti u roku od dva do tri dana, dok je vrednost BHB bila mnogo stabilnija u oba temperaturna režima. Stabilnost GLU i NEFA postojala je tokom jednog dana na 20°C i tokom dva dana na 4°C. Dok je vrednost glukoze opadala, vrednost NEFA je rasla. BHB je pokazala stabilnost tokom svih dana na 4°C i tokom 4 dana na 20°C, a postojao je blagi trend porasta tokom vremena. Kada se radi o profilu hepatocita, stabilnost parametara je bila različita. Vrednost svih parametara je opadala tokom vremena. CHOL je bio stabilan 6 dana na 4°C, a u uslovima čuvanja na 20°C bio je stabilan 3 dana. TGC je bio stabilan 6 dana na 4°C, a u uslovima čuvanja na 20°C bio je stabilan 4 dana. TBIL je bio stabilan u svim vremenima ispitivanja i oba temperaturna režima tokom 5 dana. AST je bio stabilan 4 dana na 4°C, ali svega 2 dana na 20°C. Ca je bio stabilan 6 dana na 4°C kao i na 20°C. Stabilnost P bila je nepromenjena tokom 5 dana na oba temperaturna režima.

Tabela 1.

Odstupanje vrednosti parametara tokom 6 dana ispitivanja u dva različita temperaturna režima i trenutak kada je odstupanje veće od dozvoljene vrednosti (DA znači povećanu nestabilnosti - odbaciti rezultat).

Table 1.

Deviation of parameter values over 6 days of testing under two different temperature conditions and the moment when the deviation exceeds the allowable value (DA indicates increased instability - discard the result).

| Parametar | | 1 dan | 2 dan | 3 dan | 4 dan | 5 dan | 6 dan |
|---------------|-----------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| ALB (g/L) | +20°C PD% | 100 | 100 | 98,1 | 90,5 | 87,1 | 84,5 |
| | PD%>MPI | NE | NE | NE | DA | DA | DA |
| | +4°C PD% | 100 | 100 | 100 | 99,1 | 98,1 | 98,3 |
| TPROT (g/L) | PD%>MPI | NE | NE | NE | NE | NE | NE |
| | +20°C PD% | 100 | 100 | 100 | 100 | 99,5 | 98,6 |
| | PD%>MPI | NE | NE | NE | NE | NE | NE |
| UREA (mmol/L) | +4°C PD% | 100 | 99 | 100 | 101,1 | 98,9 | 99,1 |
| | PD%>MPI | NE | NE | NE | NE | NE | NE |
| | +20°C PD% | 100 | 102,6 | 105,5 | 107,4 | 114,5 | 119,3 |
| GLU (mmol/L) | PD%>MPI | NE | NE | DA | DA | DA | DA |
| | +4°C PD% | 100 | 98 | 98,2 | 97,4 | 90,0 | 88,5 |
| | PD%>MPI | NE | NE | NE | NE | DA | DA |
| NEFA (mmol/L) | +20°C PD% | 100 | 109,5 | 119,9 | 123,3 | 129,1 | 132,5 |
| | PD%>MPI | NE | DA | DA | DA | DA | DA |
| | +4°C PD% | 100 | 102,2 | 109,1 | 111,4 | 115,2 | 115,1 |
| BHB (mmol/L) | PD%>MPI | NE | NE | DA | DA | DA | DA |
| | +20°C PD% | 100 | 102,2 | 104,5 | 104,1 | 109,9 | 108,7 |
| | PD%>MPI | NE | NE | NE | NE | DA | DA |
| CHOL (mmol/L) | +4°C PD% | 100 | 101,2 | 102,2 | 101,3 | 103,2 | 104,6 |
| | PD%>MPI | NE | NE | NE | NE | NE | NE |
| | +20°C PD% | 100 | 100 | 97,5 | 92,2 | 90,1 | 88,3 |
| TGC (mmol/L) | PD%>MPI | NE | NE | NE | DA | DA | DA |
| | +4°C PD% | 100 | 99,5 | 99,3 | 98,5 | 99,1 | 97,9 |
| | PD%>MPI | NE | NE | NE | NE | NE | NE |
| TBIL (µmol/L) | +20°C PD% | 100 | 101,4 | 99,5 | 99,1 | 79,9 | 80,1 |
| | PD%>MPI | NE | NE | NE | NE | DA | DA |
| | +4°C PD% | 100 | 99 | 98 | 96,9 | 95,8 | 89,6 |
| AST (IU/L) | PD%>MPI | NE | NE | NE | NE | NE | DA |
| | +20°C PD% | 100 | 96,5 | 90,1 | 88,6 | 84,5 | 82,3 |
| | PD%>MPI | NE | NE | DA | DA | DA | DA |
| Ca (mmol/L) | +4°C PD% | 100 | 98,1 | 98,1 | 97,6 | 90,2 | 89,4 |
| | PD%>MPI | NE | NE | NE | NE | DA | DA |
| | +20°C PD% | 100 | 99,7 | 100,6 | 100 | 99,5 | 100,2 |
| P (mmol/L) | PD%>MPI | NE | NE | NE | NE | NE | NE |
| | +4°C PD% | 100 | 100 | 100 | 1000,5 | 99,5 | 99,5 |
| | PD%>MPI | NE | NE | NE | NE | NE | NE |
| P (mmol/L) | +20°C PD% | 100 | 100,5 | 101,3 | 100,3 | 101,2 | 105,9 |
| | PD%>MPI | NE | NE | NE | NE | NE | DA |
| | +4°C PD% | 100 | 100 | 100 | 101,1 | 101,2 | 104,7 |
| P (mmol/L) | PD%>MPI | NE | NE | NE | NE | NE | DA |

Diskusija

Varijabilnost dobijenih rezultata i njihova dijagnostička vrednost u velikoj meri su u skladu sa kategorizacijom koju opisuje Van Saun (2000). Klinički laboratorijski uzorci uzeti od krava poslužili su kao osnova za ispitivanje, ali ostaje potreba da se identični, standardizovani uzorci analiziraju pod različitim uslovima sredine radi preciznije procene. Vrednosti metabolita, njihova dinamika i obim promena uglavnom se poklapaju sa prethodnim radovima koji su proučavali stabilnost uzoraka u različitim populacijama ljudi i životinja (Jones 1985a, b; Donnelly et al., 1995; Tanner et al., 2008; Ehsani et al., 2008; Moe et al., 2018). Koncentracija NEFA je bila očuvana pri 4 °C u toku brzog transporta u laboratoriju, ali se stabilnost značajno smanjivala već nakon 12-24 h kod produženog transporta i u prisustvu preanalitičkih faktora. Pri -20 °C, NEFA je ostao stabilan tokom celog perioda ispitivanja. Stokol i Njadam (2005) su utvrdili da NEFA ostaje stabilan 72 h na 4 °C u odvojenoj plazmi ili serumu, a da je na -20 °C stabilnost još izraženija, što je u saglasnosti sa našim rezultatima. BHB je u svim uslovima i vremenskim tačkama zadržao stabilnost, što potvrđuju i raniji autori. Kod ovaca i ljudi NEFA pokazuje porast koncentracije tokom vremena na +4 °C (Menéndez et al., 2001; Morris et al., 2002). Kalcijum (Ca) je ostao stabilan bez obzira na preanalitičke faktore, način čuvanja i vreme uzorkovanja, što je potvrdio i Bach i saradnici (2021). Ipak, degradacija uzoraka tokom vremena dovodi do opadanja pojedinih analita. Klinički značaj određenog procenta uzoraka utvrđen je za AST, NEFA, BHB, TBIL i Ca, pri čemu je u prethodnom testu stabilnosti već bio istaknut značaj TBIL (Flores i sar., 2020).

Kughapriya i Elanchezhian (2019) uporedili su uzorke čuvane na sobnoj temperaturi 2 i 4 h i uočili značajne promene glukoze, uree, kreatinina, albumina, ukupnog bilirubina i ukupnih proteina, dok holesterol i trigliceridi nisu značajno varirali. U našem ogledu pokazan je pad glukoze već posle jednog dana na +20 °C, odnosno dva dana na +4 °C, što se slaže sa rezultatima Kughapriya i Elanchezhian (2019). Urea je rasla tokom skladištenja, posebno na sobnoj temperaturi, takođe u skladu sa njihovim zapažanjima. Albumin je kod nas bio stabilan 6 dana na +4 °C i 3 dana na +20 °C, što se razlikuje od njihovih podataka o promenama već posle 4 h. Ukupni proteini ostali su stabilni u našem ogledu, dok su pomenuti autori našli blage promene; slično, za bilirubin naši nalazi ne beleže značajne promene, dok oni izveštavaju o padu posle 4 h. Holesterol i trigliceridi u oba rada pokazuju stabilnost.

Mujamdar i Guha Thakurta (2019) su ispitivali tri temperature (18-22 °C, 4-8 °C i 37 °C) i zaključili da su urea, kreatinin i natrijum stabilni 24 h, dok glukoza u plazmi i kalijum pokazuju značajne varijacije već posle 12 h, naročito na višim temperaturama. Naše merenja potvrđuju trend opadanja glukoze, posebno posle 1 dana na +20 °C i 2 dana na +4 °C. Urea je bila stabilna 5 dana na +4 °C i 2 dana na sobnoj temperaturi, uz porast koncentracije, što je delimično u skladu sa njihovim zaključkom o 24-časovnoj stabilnosti.

Van Balveren i saradnici (2016) ističu da glukoza i bikarbonati u litijum-heparin uzorcima premašuju dozvoljene greške bez obzira na temperaturu, pri čemu je glukoza stabilna do 4 h na +4 °C, dok natrijum-fluorid kao antikoagulans produžava stabilnost, ali već za 6 h na +20 °C vrednosti izlaze iz granica. Natrijum, kalijum, kalcijum i LD prelaze limite već pri čuvanju na +4 °C i +8 °C. I mi smo registrovali pad glukoze pri čuvanju na višim temperaturama, što potvrđuje njihove nalaze. Kod nas su kalcijum i fosfor ostali stabilni, dok su oni za fosfor našli prekoračenje posle 8 h na višim temperaturama.

Prema Pandey i saradnicima (2023), fosfor varira pri 2-8 °C i 37 °C zbog hidrolize fosfatnih estara, kreatinin je stabilan na nižim temperaturama, ali ne i na 37 °C, dok urea gubi stabilnost na +37 °C; nestabilnost je uočena i za mokraćnu kiselinu, ukupne proteine i AP, a AST je izrazito nestabilan. Naši podaci pokazuju stabilan fosfor tokom 5 dana na obe temperature i AST stabilan 4 dana na +4 °C i 2 dana na +20 °C, što se delimično razlikuje od rezultata koje su našli Pandey i saradnici (2023). I u našem i u navedenom istraživanju urea pri višim temperaturama gubi stabilnost.

Rendle et al., (2009) kod konja su zabeležili konstantan pad glukoze i porast LDH i magnezijuma, dok su AST i urea rasli tokom 72 h, a bilirubin opadao prva 24 h. Mi smo takođe našli pad glukoze i postepen porast uree. Sa druge strane postojale su i određene razlike u našem ogledu pa je tako AST ostao stabilan 4 dana na +4 °C i 2 dana na +20 °C, što delimično odudara.

Roy i saradnici (2017) su na 2-8 °C za 24 h našli značajne promene glukoze, uree, kreatinina, LDH, ALT i AST, dok su hloridi, kalcijum, kalijum, natrijum, bilirubin, albumin, ukupni proteini, GGT i ALP bili stabilni. Naši rezultati potvrđuju pad glukoze i stabilnost albumina, ukupnih proteina i kalcijuma, ali se razlikuju po stabilnosti AST i uree.

Marjani (2008) je pokazao da vreme i temperatura ne utiču na ureu, mokraćnu kiselinu, kalcijum, ukupni protein, albumin, trigliceride i holesterol, dok glukoza opada posle 48 h na 4 °C i 24 h na 23 °C, a kreatinin i fosfor rastu. Mi smo zabeležili sličan pad glukoze i stabilnost većine parametara, ali bez porasta fosfora.

Agina i saradnici (2007) utvrdili su da su natrijum i glukoza stabilni 72 h na 4 °C. U rezultatima ovog oglada utvrđena je bolja stabilnost glukoze na 4 °C nego na 20 °C, ali samo do 2 dana, što je delimično saglasno sa Agina i saradnicima (2007). Kada se radi o kalcijumu rezultati ovog oglada gde je utvrđena stabilnost tokom 6 dana se razlikuju od rezultata Agina i saradnika (2007) gde je stabilnost nađena samo u prvom danu ispitivanja.

Pahwa et al. (2021), našli su da su mokraćna kiselina, urea, trigliceridi i HDL stabilni 7 dana, ALP 15, a AST čak 30 dana na 0 i 4 °C; većina analita osim kalcijuma varirala je posle 3 dana na sobnoj temperaturi, a glukoza, fosfor i kreatinin treba odrediti u roku od 24-48 h. Rezultati dobijeni u ovom ogledu o nestabilnosti glukoze i stabilnosti uree i kalcijuma u velikoj meri se poklapaju sa Pahwa et al. (2021), iako je za AST nađena kraća stabilnost.

Eshar et al. (2018), kod kornjača su primetili porast AST, mokraćne kiseline, ukupnih proteina i kalijuma na 4 °C i -20 °C nakon 48 h, pri čemu su promene uglavnom bile u dozvoljenim granicama, osim za kalcijum i kalijum na -20 °C. Za AST je utvrđena stabilnost tokom 4 dana na 4 °C i 2 dana na 20 °C, što delimično odudara od nalaza Eshar et al. (2018), dok su ukupni proteini stabilni u oba istraživanja. Kalcijum je u ovom ogledu stabilan na svim ispitivanim temperaturama.

Moe et al. (2018), su utvrdili da vreme skladištenja snižava kalcijum, kreatinin i glukozu, a povećava albumin, GLDH, magnezijum, fosfor i ukupne proteine; temperatura utiče na većinu ovih parametara. Rezultati u ovom ogledu potvrđuju pad glukoze, ali kalcijum i fosfor pokazuju stabilnost, što se ne slaže sa Moe et al. (2018).

Zaključak

Dobijeni rezultati ukazuju da kontrola temperature i dužina čuvanja predstavljaju ključni faktor za dobijanje validnih laboratorijskih rezultata, što se odnosi i na prečišćene kontrolne serume. Pravilnim rukovanjem i skladištenjem uzoraka dopirinosi se smanjenju grešaka i unapređenju laboratorijske i dijagnostičke tačnosti.

Literatura

- Agina, O.A., Ikechukwu, P.J., Agina, B.C. 2017. Stability of some clinical biochemistry parameters in equine serum/plasma stored at refrigerator and room temperatures: A preliminary study. *Comparative Clinical Pathology* 26(3): 465-469.
- Bach, K.D., Neves, R.C., Stokol, T., McArt, J.A.A. 2020. Effect of storage time and temperature on total calcium concentrations in bovine blood. *Journal of Dairy Science* 103(2): 922-928.
- Cincović, M., Majkić, M., Spasojević J., Jožef, I., Mitrović J., Kovačević D., Kovačević, D. 2023. Stabilnost hematoloških parametara kod krava u uzorcima čuvanim pod različitim temperaturnim režimima. *Letopis naučnih radova / Annals of Agronomy* 47(1): 47-57.
- Cray, C., Rodriguez, M., Zaias, J., Altman, N.H. 2009. Effects of storage temperature and time on clinical biochemical parameters from rat serum. *Journal of the American Association for Laboratory Animal Science* 48(2): 202-204.
- Donnelly, J.G., Soldin, S.J., Nealon, D.A., Hicks, J.M. 1995. Stability of twenty-five analytes in human serum at 22 degrees C, 4 degrees C, and -20 degrees C. *Pediatric Pathology & Laboratory Medicine* 15(6): 869-874.
- Ehsani, A., Afshari, A., Bahadori, H., Mohri, M., Seifi, H.A. 2008. Serum constituents analyses in dairy cows: Effects of duration and temperature of the storage of clotted blood. *Research in Veterinary Science* 85(3): 473-475.
- Eshar, D., Avni-Magen, N., Kaufman, E., Beaufrère, H. 2017. Effects of time and storage temperature on selected biochemical analytes in plasma of red-eared sliders (*Trachemys scripta elegans*). *American Journal of Veterinary Research* 79(8): 852-857.
- Flores, C. F. Y., Pineda, Á. D. L. M. H., Bonilla, V. M. C., & Sáenz-Flor, K. 2020. Sample management: stability of plasma and serum on different storage conditions. *Ejifcc*, 31(1), 46.
- Flores, C.F.Y., Pineda, Á.D.L.M.H., Bonilla, V.M.C., Sáenz-Flor, K. 2020. Sample management: Stability of plasma and serum on different storage conditions. *EJIFCC* 31(1): 46-55.
- Gomez-Rioja, R., Von Meyer, A., Cornes, M., Costelloe, S., Vermeersch, P., Simundic, A. M., ... & Laboratory Medicine (EFLM) Working Group Preanalytical Phase (WG-PRE). 2023. Recommendation for the design of stability studies on clinical specimens. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (CCLM)* 61(10): 1708-1718.
- Jones, D.G. 1985a. Stability and storage characteristics of enzymes in cattle blood. *Research in Veterinary Science*, 38(3): 301-306.
- Jones, D.G. 1985b. Stability and storage characteristics of enzymes in sheep blood. *Research in Veterinary Science* 38(3): 307-311.

- Kovačević, D., Cincović, M., Belić, B., Đoković, R., Majkić, M. 2021. Blood serum stability limit and maximum storage time of bovine samples. *Acta Scientiae Veterinariae*, 49.
- Krnjajić, S., Đoković, R., Majkić, M., Starić, J., Cincović, M. 2024. Uticaj frekvencije muže na povezanost mobilizacije lipida i pokazatelja funkcionalnog statusa jetre kod krava u laktaciji. *Letopis naučnih radova / Annals of Agronomy* 48(1): 1-8.
- Kughapriya, P., Elanchezhian, J.A. 2019. Stability of common biochemical analytes in serum when subjected to changes in storage conditions and temperature. *Indian Journal of Medical Biochemistry* 23(1): 178-181.
- Majkić, M., Cincović, M., Spasojević, J., Jožef, I., Blond, B., Kovačević, D. 2023. Kriva rezilijentnosti i kumulativni odgovor krava na toplotni stres. *Letopis naučnih radova / Annals of Agronomy* 47(1): 38-46.
- Marjani, A. 2008. Effect of storage time and temperature on serum analytes. *American Journal of Applied Sciences*, 5(8): 1047-1051.
- Menéndez, L.G., Fernández, A. L., Enguix, A., Ciriza, C., Amador, J. 2001. Effect of storage of plasma and serum on enzymatic determination of non-esterified fatty acids. *Annals of Clinical Biochemistry* 38(3): 252-255.
- Moe, M.O., Okstad, W., Berland, S., Framstad, T. 2018. Effects of storage duration and temperature conditions on biochemical analytes in porcine clotted, uncentrifuged blood samples. *Journal of Dairy & Veterinary Animal Research* 7(1): 00181.
- Morris, J.D., Fernandez, J.M., Chapa, A.M., Gentry, L.R., Thorn, K.E., Weick, T.M. 2002. Effects of sample handling, processing, storage and hemolysis on measurements of key energy metabolites in ovine blood. *Small Ruminant Research* 43(2): 157-166.
- Mujamdar, P., Guha Thakurta, T. 2019. Effect of storage time and temperature on hematological and biochemical parameters of blood. *IOSR Journal of Dental and Medical Sciences (IOSR-JDMS)* 18(7): 10-15.
- Nordin, N., Ab Rahim, S. N., Wan Omar, W. F. A., Zulkarnain, S., Sinha, S., Kumar, S., Haque, M. 2024. Preanalytical errors in clinical laboratory testing at a glance: Source and control measures. *Cureus* 16(3): e57243.
- Oddoze, C., Lombard, E., Portugal, H. 2012. Stability study of 81 analytes in human whole blood, in serum and in plasma. *Clinical biochemistry* 45: 464-469.
- Pahwa, M.B., Menaka, K., Manish, R. 2021. Monitoring the effect of storage time and temperature on serum clinical biochemistry analytes. *Current Advances in Chemistry and Biochemistry* 2: 66-75.
- Pandey, I., Puppalwar, P., Dhotre, A., Sharma, A. 2023. Stability of routine biochemical parameters with temperature variation – A pilot study. *IJRAR - International Journal of Research and Analytical Reviews* 10(3): 542-548.
- Rendle, D. I., Heller, J., Hughes, K.J., Innocent, G.T., Durham, A.E. 2009. Stability of common biochemistry analytes in equine blood stored at room temperature. *Equine Veterinary Journal*, 41(5): 428-432.
- Rosato, P.N.R., Gama, F.G.V., Bruneto, M.A., Gomes, M.O.S., & Santana, A.E. 2009. Effects of storage time and temperature on biochemistry results from canine serum. Paper presented at the WSAVA 2009 Congress. Retrieved from <https://www.vin.com/apputil/content/defaultadv1.aspx?id=4253034&pid=22>
- Roy, J.E., Shanthy, B., Devi, A.J.M. 2017. Effect of storage on biochemical parameters. *Scholars Academic Journal of Biosciences (SAJB)*, 5(9): 622-625.
- Stokol, T., Nydam, D.V. 2005. Effect of anticoagulant and storage conditions on bovine nonesterified fatty acid and β -hydroxybutyrate concentrations in blood. *Journal of Dairy Science* 88(9): 3139-3144.
- Tanner, M., Kent, N., Smith, B., Fletcher, S., Lewer, M. 2008. Stability of common biochemical analytes in serum gel tubes subjected to various storage temperatures and times pre-centrifugation. *Annals of Clinical Biochemistry* 45(4): 375-379.
- Taylor, E.C., Sethi, B. 2011. Stability of 27 biochemistry analytes in storage at a range of temperatures after centrifugation. *British journal of biomedical science* 68:147-157.
- van Balveren, J. A., Huijskens, M. J., Gemen, E. F., Péquériau, N. C., Kusters, R. 2017. Effects of time and temperature on 48 routine chemistry, haematology and coagulation analytes in whole blood samples. *Annals of Clinical Biochemistry* 54(4): 448-462.
- Van Saun R. (2000). Blood profiles as indicators of nutritional status. In *Proceedings of the 18th Annual Western Canadian Dairy Seminar* (pp. 1-6). Red Deer, Alberta, Canada.
- Zhou, J., Fabros, A., Lam, S. J., Coro, A., Selvaratnam, R., Brinc, D., & Di Meo, A. (2024). The stability of 65 biochemistry analytes in plasma, serum, and whole blood. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (CCLM)*, 62(8), 1557-1569.

Influence of storage duration and temperature on the stability of biochemical parameters in control serum

Danijela Fajin^a, Ivana Davidov^a, Zoran Ružić^a, Mira Majkić^a, Marko Cincović^a

^aUniversity of Novi Sad, Faculty of Agriculture, Department of veterinary medicine, Novi Sad, Serbia

*Corresponding author: mcincovic@gmail.com

ABSTRACT

The aim of this study was to examine the effect of storage temperature on the values of biochemical parameters. Bovine control serum was stored at 4 °C and 20 °C for six days. The stability of liver, kidney, energy, and metabolic function parameters was monitored. Concentrations of ALB, TPROT, UREA, NEFA, GLU, BHB, CHOL, TGC, TBIL, AST, Ca, and P were analyzed, with the maximum permissible instability assessed for each. Parameters exhibited different degrees of stability depending on temperature. Storage at 4 °C significantly improved the stability of most analytes. ALB, TPROT, and UREA were more stable at the lower temperature, whereas BHB, CHOL, and AST deviated after only 2–3 days at 20 °C. Changes in metabolite values were much greater when samples were stored at +20 °C (ambient temperature) than at +4 °C (refrigerator temperature) for ALB, UREA, GLU, NEFA, CHOL, and TGC. On day six, metabolite values at room temperature versus refrigerator temperature (relative to day one) were: ALB 84.5:98.3%; TPROT 98.6:99.1%; UREA 119.3:88.5%; GLU 72.6:82.6%; NEFA 132.5:115.1%; BHB 108.7:104.6%; CHOL 88.3:97.9%; TGC 80.1:98.1%; TBIL 89.6:90.2%; AST 82.3:89.4%; Ca 100.2:99.5%; P 105.9:104.7%. This study confirmed the significant impact of temperature on biochemical analytes during sample storage, highlighting the need to control the ambient temperature where samples are kept.

KEY WORDS

biochemistry parameters, serum, thermostability.

Rad primljen: 17.10.2025.

Ispravljen: 17.11.2025.

Prihvaćen: 21.11.2025.

Objavljen: 31.12.2025.



Ispitivanje efekta tretmana niacinom na metaboličku stabilnost hepatocita krava u ranoj laktaciji

Mira Marković^a, Dragica Stojanović^a, Talija Hristovska^b, Kosta Petrović^c,
Marko Cincović^a, Mira Majkić^a

^aUniverzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Departman za veterinarsku medicinu, Srbija

^bUniverzitet „Sv.Kliment Ohridski“, Veterinarski fakultet Bitolj, S.Makedonija

^cPoljoprivredna škola sa domom učenika Futog

*Autor za kontakt: miramajkic@gmail.com

SAŽETAK

Cilj ovog rada bio je da se ispita hepatoprotektivni uticaj niacina posle njegove aplikacije u paripartalnom periodu, tako što će se utvrditi razlika u vrednosti metabolita značajni za funkcionalni status hepatocita u uzorcima poreklom od krava koje su primale i koje nisu primale niacin. Drugi cilj je da se utvrdi da li hepatoprotektivni uticaj niacina raste sa porastom ocene niacinskog statusa tako što će se utvrditi veza između vrednosti niacinskog statusa (NAD:NADP) i šanse da krave imaju očuvane metaboličke parametre u okviru referentnih vrednosti. Niacin pokazuje hepatoprotektivnu ulogu jer pomaže jetri u očuvanju sekretornog kapaciteta što se vidi kroz vrednosti albumina i glukoze. Niacin pokazuje hepatoprotektivnu ulogu jer dovodi do opadanja lipolize, ketogeneze i akumulacije masti u jetri, što se ogleda kroz smanjenje vrednosti NEFA, BHB, porast vrednosti holesterola i triglicerida i povoljniji odnos NEFA:holesterol.. Niacin smanjuje opterećenje i nekrozu hepatocita i opterećenje žučnih puteva jer dovodi do opadanja aktivnosti jetrinih enzima i koncentracije bilirubina. Niacinski status koji se ogleda u NAD:NADP indeksu značajno ukazuje na hepatoprotektivnu funkciju niacina, tako da sa porastom ovog indeksa postoji mnogo veća šansa da se veliki broj biohemijskih parametara nađe u okviru referentne vrednosti nego da njihove vrednosti budu nepovoljne odnosno izvan referentne vrednosti. Odnos verovatnoća je dobar i jednostavan pokazatelj efekta tretmana niacinom kod krava u ranoj laktaciji.

Ključne reči:

status niacina, funkcija hepatocita, krvni parametri, odnos verovatnoća

Uvod

Rana laktacija kod krava predstavlja kritičnu fazu u produktivnom i reproduktivnom ciklusu, jer se u ovom periodu dešavaju značajne metaboličke i neuroendokrine promene nakon teljenja (Sadiq et al., 2024). Ove adaptacije direktno utiču na zdravlje životinja, količinu i kvalitet mleka, kao i na ekonomsku efikasnost stočarstva. Rano nakon teljenja dolazi do naglog povećanja energetske potrebe zbog laktacije, koje često premašuju ranije energetske potrebe zbog razvoja fetusa u završnoj fazi gestacije, što rezultira negativnim energetskim bilansom. Nedovoljan unos hrane uzrokuje mobilizaciju telesnih masti, što dovodi do povećanog rizika od metaboličkih, reproduktivnih i infektivnih poremećaja (Häussler et al., 2022).

Tokom ovog perioda, masna tkiva služe kao glavni izvor energije, dok se glukoza preusmerava ka mlečnoj žlezdi i plodu, a krave pokazuju različit stepen rezilijentnosti na stresogene (Majkić i sar., 2023). Hormon rasta podstiče antagonizam insulinu i povećava potrošnju nutrijenata u mlečnoj žlezdi (Suarez-Trujillo et al., 2022). Jetra intenzivno koristi rezerve glikogena i metabolizuje masti, što može dovesti do formiranja ketonskih tela i akumulacije triglicerida (Dong et al., 2022). Negativan energetski bilans u periodu oko partusa izaziva smanjenje glikemije i porast slobodnih masnih kiselina (NEFA), što povećava rizik od ketoze i masne jetre (Krnjajić i sar., 2024). Hepatična glukoneogeneza, koristeći laktat, alanin, propionat i glicerol kao prekursore, predstavlja adaptivni mehanizam za obezbeđivanje dovoljne količine glukoze (Wang et al., 2025). Oksidacija NEFA u jetri može dovesti do sinteze ketonskih tela i triglicerida, dok je aktivnost ključnih enzima glukozo-6-fosfataze i piruvat karboksilaze ograničena kod krava sa masnom jetrom ili ketozom (Loor et al., 2007). Lipoliza i ketogeneza predstavljaju značajne mehanizme prestrojavanja mehanizma u peripartalnom i drugim vrstama stresa kod krava (Lakić i sar., 2018; Cincović i sar., 2023).

Niacin (vitamin B3) smanjuje lipolizu i ketogenezu kod krava u ranoj laktaciji (Petrović i sar., 2021; Hristovska et al., 2024). Mehanizmi delovanja niacina dobro su dokumentovani u literaturi (Chen et al., 2019; Murthy et al., 2021; Boronovskiy et al., 2024; Ovaj vitamin u obliku nikotinske kiseline ili nikotinamida igra važnu ulogu u energetskom metabolizmu, ugrađujući se u koenzime NAD i NADP.

On stimuliše mikrofloru predželuca, povećava broj protozoa i utiče na koncentraciju amonijaka. Antilipolitički efekat nikotinske kiseline manifestuje se smanjenjem NEFA u plazmi i inhibicijom lipolize preko GPR109A receptora. Ovaj efekat smanjuje rizik od ketoze i masne jetre i doprinosi stabilnosti glukoze i efikasnosti insulina. Sve navedeno dovešće do smanjenog opterećenja hepatocita i bolje metaboličke adaptacije krava.

Cilj ovog rada je da se ispita hepatoprotektivni uticaj niacina posle njegove aplikacije u paripartalnom periodu. To će se postići utvrđivanjem razlike u vrednosti metabolita značajnih za funkcionalni status hepatocita u uzorcima poreklom od krava koje su primale i koje nisu primale niacin. Dodatno će se utvrditi da li hepatoprotektivni uticaj niacina raste sa porastom ocene niacinskog statusa tako što će se utvrditi veza zimešu vrednosti niacinskog statusa (NAD:NADP) i šanse da krave imaju očuvane metaboličke parametre u okviru referentnih vrednosti.

Materijal i metode

Ogled je izvršen na 30 klinički zdravih krava Holštajn-frizijske rase u drugoj i trećoj laktaciji, sa proizvodnjom mleka na nivou 6700-8800 litara u predhodnoj laktaciji. Krave su gajene u slobodnom sistemu, na dubokoj prostirci, ali su u tranzicionom periodu bile u porodilištu, gde je postojao vezani sistem. Ishrana krava je obročna, dok je u porodilištu posle partusa bila po volji. Krave su hranjene potpuno mešanim obrokom kojim se zadovoljavaju kompletne potrebe krava, a voda im je davana ad libitum. Obrok za krave u ranoj laktaciji se pravi da zadovolji sledeće standarde: proteini (17,5-19,5% SM sirovih proteina, 30-33% razgradivih proteina od ukupnih, 35-40% nerazgradivih proteina od ukupnih); ugljeni hidrati (ADF minimum 17-21%, NDF minimum 28-31%, NDF iz kabaste hrane minimum 18-23%, nestrukturni ugljeni hidrati 35-42%, nivo suve materije iz kabaste hrane minimum 40-45%); energija (NEL 7-7,4 MJ/kg suve materije obroka); masti u obroku 5-7%. ADF i NDF su dve frakcije celuloze. Niacin je aplikovan putem hrane per os kod 15 krava, dok su 15 predstavljale negativnu kontrolu. Korišćen je Rovimix@Niacin u dozi koja omogućuje dostupnost u crevima oko 6-12g niacina/dan (60-120g krava/dan u hrani), što se u prethodnim istraživanjima pokazalo kao optimalna biološka koncentracija. Niacin je aplikovan u periodu dve nedelje pre, kao i tri nedelje posle teljenja.

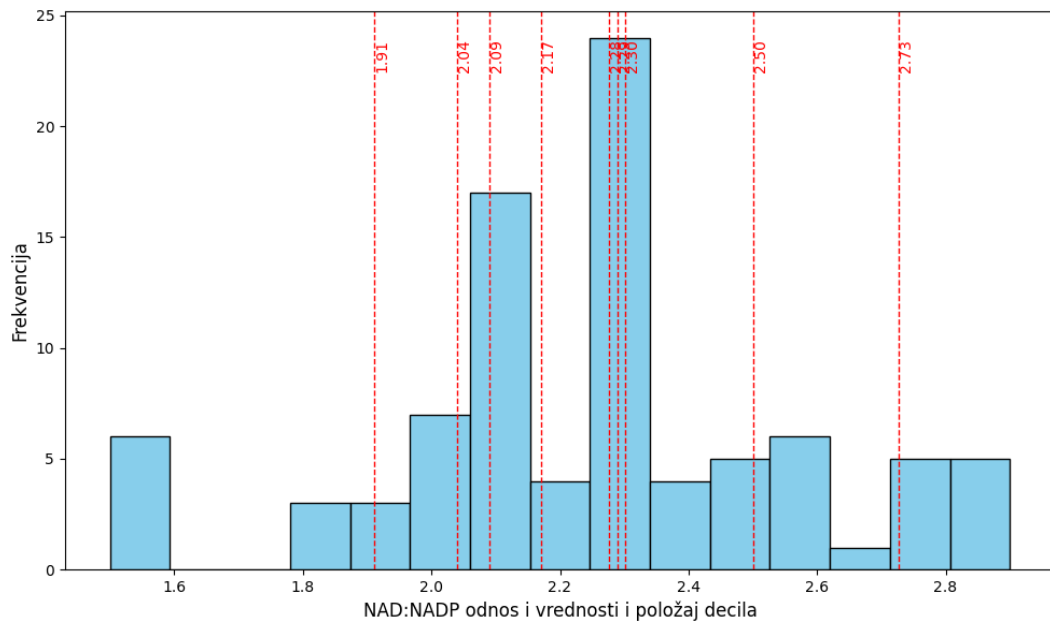
Krv je uzimana u prvoj, drugoj i trećoj nedelji posle teljenja. Uzorci krvi su uzimani venepunkcijom iz repne vene (v.coccigea) u serumske vakutajnere. Nakon toga, uzorci krvi su transportovani u Laboratoriju za patološku fiziologiju, Departman za veterinarsku medicinu, gde je posle centrifugiranja i izdvajanja seruma vršena biohemijska analiza krvi. Prilikom analize metaboličkog profila krava, korišćene su fotometrijske reakcije i fotometar Chemray i ELISA čitača proizvođača Rayto (Kina). Fotometrisanje je vršeno na talasnoj dužini i u vremenskom intervalu prema specifikaciji proizvođača. Za biohemijsku analizu krvi korišćeni su standardni kitovi proizvođača Biosystems (Španija). Određena je vrednost sledećih parametara: neesterifikovane masne kiseline (NEFA), betahidroksi butirrat (BHB), glukoza, ukupni proteini, albumini, globulini, holesterol, trigliceridi, AST, ALT, GGT, ALP i ukupni bilirubin. Određen je NEFA:holesterol odnos kao pokazatelj funkcionalnog statusa hepatocita, kao i indeks funkcionalnosti hepatocita prema formulama koje su dali Trevisi i Minuti (2018). Krv je uzimana paralelno i u litijum-heparinske vakutajnere, za potrebe analize NAD i NADP. NAD i NADP su određeni pomoću kolorimetrijske ELISA metode iz lizata eritrocita.

Ukupan broj analiziranih tačaka je 90. Jedna tačka predstavlja jedan uzorak dobijen od jedne krave u jednoj nedelji istraživanja. Kako je u ogledu učestvovalo 30 krava kroz tri nedeđe ogleda ukupan broj analiziranih tačaka je 90.

Efekat tretmana niacinom na parametre hepatocita ispitan je utvrđivanjem veze između vrednosti niacinskog statusa iskazanog kao NAD:NADP i odnosa šansi (engl., odds ratio, OR) da se ispolji hepatoprotektivni efekat u funkciji porasta vrednosti NAD:NADP količnika. Hepatoprotektivni efekat je postojao ukoliko su ispitivani parametri bili u okviru referentne vrednosti (obeleženo sa 1), a ukoliko su vrednosti bile izvan referentnih tada se smatra da nije postojao hepatoprotektivni efekat (obeleženo sa 0). Vrednost NAD:NADP je podeljena na decile, pa je za svaki nivo NAD:NADP izračunat odnos šansi da se ispitivani parametar nađe u okviru referentne vrednosti u peripartalnom periodu, čime se potvrđuje funkcionalna stabilnost hepatocita i protektivna uloga niacina. Predstavljene su pozicione vrednosti decila u distribuciji frekvencije vrednosti NAD:NADP odnosa, kao i učestalost krava koje su primale i koje nisu primale niacin za svaku grupu decila posebno.

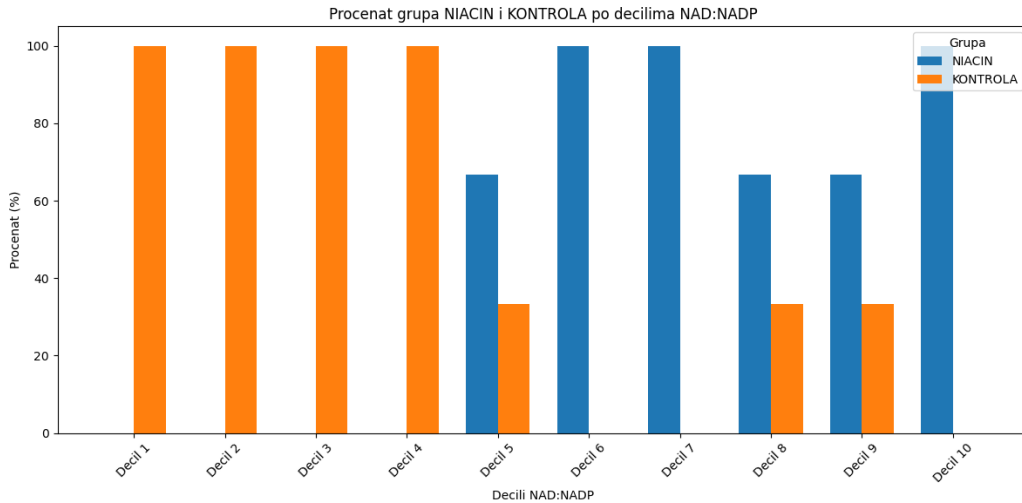
Rezultati

Na osnovu analize decilnih granica i frekvencija NAD:NADP odnosa kao pokazatelja dostupnosti niacina u organizmu, rezultati pokazuju da se najmanjih 10% vrednosti nalazi u opsegu od približno 1.500 do 1.552, dok sledećih 10% vrednosti zauzima opseg od 1.552 do 1.785, što ukazuje na prisustvo nekoliko niskih ekstremnih vrednosti. Podaci u srednjem delu raspodele, od D3 do D8, nalaze se u opsezima od 1.786 do 2.400, sa najvećom koncentracijom oko centralnih vrednosti od 2.0 do 2.3, što označava da većina podataka pripada sredini raspodele. Vrednosti iznad sredine, obuhvaćene decilnim grupama D7 i D8, kreću se od 2.206 do 2.400, dok najvećih 10% podataka pripada opsegu od 2.693 do 2.900, pokazujući prisustvo nekoliko visokih ekstremnih merenja. Ukupno, ova analiza pokazuje da je raspodela podataka blago asimetrična sa koncentracijom u srednjem opsegu i prisustvom retkih ekstremnih vrednosti na oba kraja.



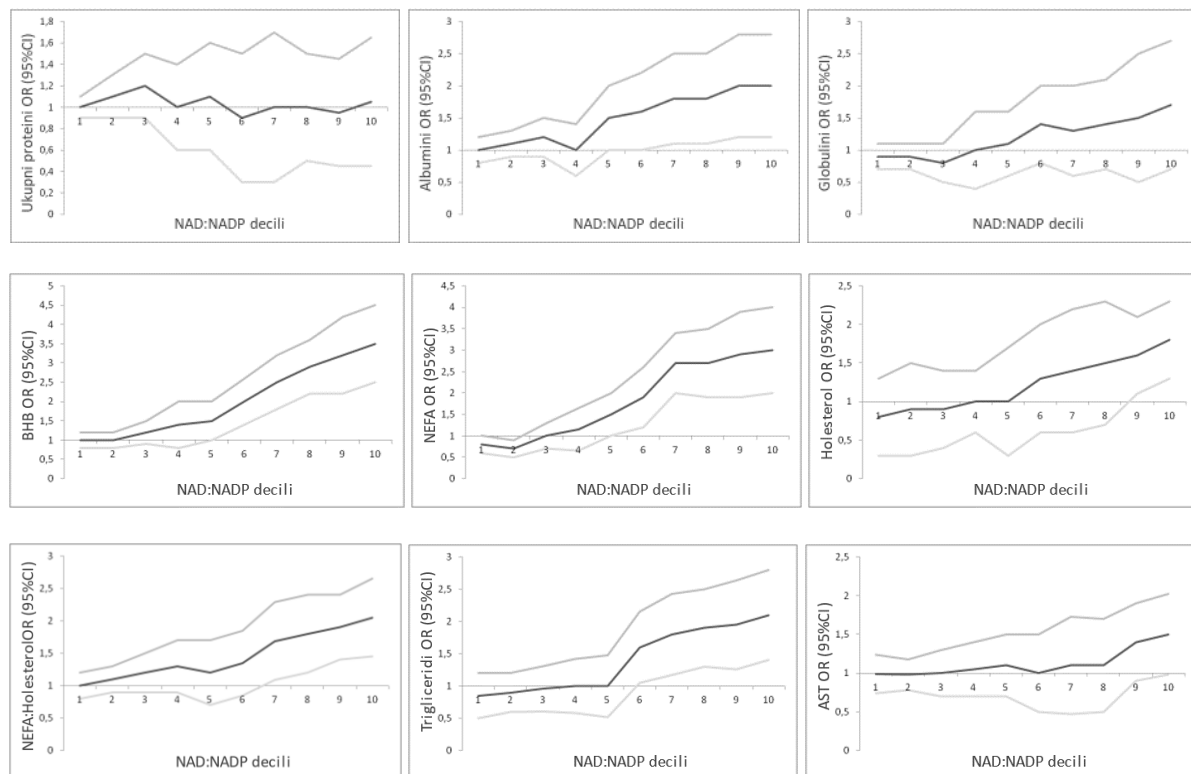
Grafikon 1. Distribucija frekvencije NAD:NADP odnosa i položaj vrednosti decila
Figure 1. Distribution of the frequency of the NAD:NADP ratio and the position of decile values

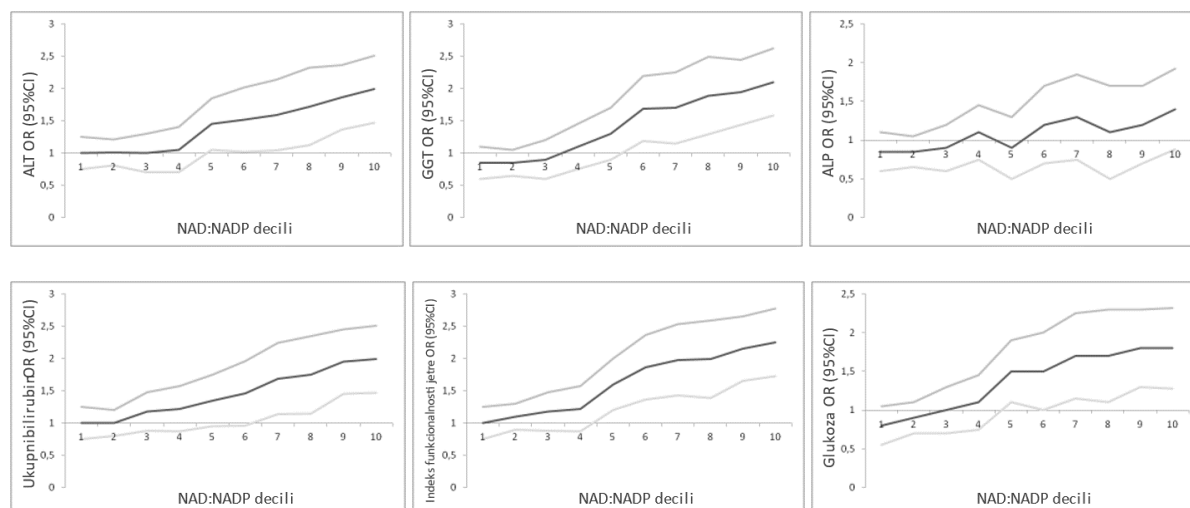
Decili sa nižim NAD:NADP vrednostima imaju veću zastupljenost krava iz grupe KONTROLA, dok su decili sa višim NAD:NADP vrednostima imali veću dominaciju krava iz grupe NIACIN. Poredak obe grupe unutar svakog decila omogućava laku vizuelizaciju načina na koji se njihov udeo menja kako NAD:NADP raste. Drugim rečima, grafikon jasno prikazuje trend povećanja udela grupe NIACIN u višim decilima NAD:NADP i smanjenje udela grupe KONTROLA.



Grafikon 2. Odnos jedinki koje su primale i koje nisu primale niacin (NIACIN vs. KONTROLA) u različitim decilima vrednosti NAD:NADP odnosa
Figure 2. Ratio of individuals who received and who did not receive niacin (NIACIN vs. CONTROL) across different deciles of NAD:NADP ratio values

Niacinski status koji se ogleda u NAD:NADP indeksu značajno ukazuje na hepatoprotektivnu funkciju niacina, tako da sa porastom ovog indeksa postoji mnogo veća šansa da se veliki broj biohemijskih parametara nađe u okviru referentne vrednosti nego da njihove vrednosti budu nepovoljne odnosno izvan referentne vrednosti. Sa porašću vrednosti NAD:NADP raste šansa da se u uzorku nalazi neki parametar u okviru referentne vrednosti u odnosu na nepovoljan nalaz koji znači vrednost parametara izvan referentne vrednosti. Ovakva nalaz je prisutan najčešće iznad 5. decila vrednosti NAD:NADP količnika, što odgovara onim vrednostima indeksa koji pripadaju kravama koje su primale niacin. Ovaj trend nije utvrđen za ukupne proteine, globuline i aktivnosti AST i ALP. Rezultati su prikazani za svaki parametar posebno na grafikonu 3.





Grafikon 3. Povezanost vrednosti NAD:NADP indeksa niacinskog statusa sa verovatnoćom da se ispolji hepatoprotekivan uticaj niacina i očuva vrednost ispitivanih parametrima u referentnim vrednostima (95%CI OR>1 je pozitivan ishod).

Figure 3. Association of NAD:NADP index values of niacin status with the likelihood of exhibiting a hepatoprotective effect of niacin and maintaining the tested parameters within reference values (95% CI, OR > 1 indicates a positive outcome).

Diskusija

NAD:NADP odnos je koristan indikator metaboličkog efekta dodatog niacina, jer pokazuje linearnu povezanost sa velikim brojem parametara metaboličkog profila kod krava (Petrović i sar., 2022). Posle apsorpcije niacin cirkuliše vezan za eritrocite, a najveće koncentracije nalaze se u jetri, gde se iz triptofana sintetiše NAD(P), koji zatim služi drugim tkivima. Mišići, mozak i testisi mogu direktno koristiti nikotinamid. Koenzimi NAD i NADP imaju centralnu ulogu u anaboličkim i kataboličkim procesima: NADPH deluje kao redukujući agens u sintezi lipida i nukleinskih kiselina, a NAD/NADH u glikolizi i Krebsovom ciklusu (Rehage et al., 1999; Bender, 2003). NAD je izvor ADP-riboze za posttranslacione modifikacije proteina, a enzimi kao što su poli(ADP-riboza)polimeraze i NAD-glikohidrolaza regulišu metabolizam ugljenih hidrata, masti i proteina. Visoke doze nikotinske kiseline dodatno inhibiraju lipolizu (Tunaru et al., 2003; Pires i Grummer, 2007). Eritrocitne koncentracije NAD i NADP predstavljaju osetljiv pokazatelj statusa niacina: pri nedostatku, NAD u krvi može pasti za 70% za pet nedelja, dok NADP ostaje gotovo nepromenjen (Fu et al., 1989). Povišene koncentracije NAD i NADP u krvi omogućavaju procenu statusa niacina (Jacobson i Jacobson, 1997). Kod ljudi je pokazano da povećanje odnosa NADH/NAD⁺ u jetri tokom razgradnje alkohola podstiče razvoj masne jetre (Masia et al., 2018). Nikotinska kiselina može povećati koncentracije NAD-a u jetri i krvi, a Hara i saradnici (2007) utvrdili su da je u tome efikasnija od nikotinamida. Savremena istraživanja ističu ulogu NAD/NADH u procesima starenja, apoptoze, nastanka tumora i neurodegenerativnih bolesti (Berge et al., 2020; Amjad et al., 2021). Yoshino i saradnici (2011), su na modelu miševa pokazali da gojaznost snižava nivo NAD⁺ u jetri, mišićima i masnom tkivu, a hronična inflamacija prati insulinsku rezistenciju (Yamaguchi i Yoshino, 2017).

U tranzicionom periodu oko teljenja kod visokomlečnih krava dolazi do pojačane mobilizacije neesterifikovanih masnih kiselina (NEFA). Njihov višak može biti toksičan, a istovremeno se javljaju hipoglikemija, povišen bilirubin, snižen holesterol i urea (Cincović, 2016). Nikotinska kiselina koja izbegne jetreni metabolizam može inhibirati lipolizu preko specifičnih receptora (Gille et al., 2008). Kod krava sa ketozom kao znakom loše metaboličke adaptacije uočava se velik broj promena funkcionalnog statusa hepatocita (Đoković i sar., 2014), kao što je negativna korelacija između NEFA i glukoze zbog oslabljene glukoneogeneze u masno infiltriranoj jetri. BHB i NEFA negativno koreliraju sa glukozom i insulinom, a koncentracija insulina opada proporcionalno porastu NEFA; trigliceridi su kod ketoznih krava značajno niži. Oštećenje jetre povećava bilirubin, koji pozitivno korelira sa NEFA i BHB. Aktivnost AST je pouzdan pokazatelj zamašćenja jetre: raste paralelno sa nivoima NEFA i BHB, a opadaju trigliceridi, holesterol i albumin. Kod krava u ranoj laktaciji niacin smanjuje insulinsku rezistenciju uz smanjenje lipolize i ketogeneze i poboljšava funkciju jetre (Titgemeyer et al., 2011, 2011a; Cincović i sar., 2018; Petrović i Stojanović, 2020).

Efekat terapije lekom u kliničkoj farmakologiji i epidemiologiji procenjuje se poređenjem tretirane i kontrolne grupe. Ključ je jasno definisan ishod – npr. izlečenje ili pojava komplikacija – i odabir mere

efekta. Apsolutne mere kao što su apsolutna redukcija rizika (ARR) ili broj koji treba lečiti (NNT) daju direktnu sliku, dok relativne mere – relativni rizik (RR), hazard ratio (HR) i naročito odnos verovatnoća (Odds Ratio, OR) – izražavaju relativnu promenu (Faraone, 2008). RR i HR pokazuju odnos rizika tokom vremena, ali u studijama slučaj–kontrola, gde se ne zna incidencija u populaciji, OR je standardna mera. Šansa (odds) je odnos verovatnoće da se događaj desi i da se ne desi ($p/(1-p)$); OR poredi šanse u eksponiranoj i kontrolnoj grupi formulom $OR = (a \times d)/(b \times c)$ u 2×2 tabeli. $OR = 1$ znači da nema razlike. Tumačenje OR zavisi od tipa ishoda: ako je ishod negativan (npr. bolest), $OR < 1$ ukazuje na zaštitu, a $OR > 1$ na povećan rizik; ako je ishod pozitivan (izlečenje), $OR > 1$ znači koristan efekat. Stoga razumevanje ograničenja OR-a omogućava pravilno donošenje terapijskih odluka i u humanoj i u veterinarskoj medicini. U novijim istraživanjima utaja niacina na tretiranje ketoze kod krava pokazano je da je OR za normoketonemiju u ketozi iznosila 1,5 kod krava koje su primale niacin (Chirivi et al., 2023).

Zaključak

Niacinski status koji se ogleda u NAD:NADP indeksu značajno ukazuje na hepatoprotektivnu funkciju niacina, tako da sa porastom ovog indeksa postoji mnogo veća šansa da se veliki broj biohemijskih parametara nađe u okviru referentne vrednosti nego da njihove vrednosti budu nepovoljne odnosno izvan referentne vrednosti. Niacin pokazuje hepatoprotektivnu ulogu jer: pomaže jetri u očuvanju sekretornog kapaciteta što se vidi kroz vrednosti albumina i glukoze; dovodi do opadanja lipolize, ketogeneze i akumulacije masti u jetri, što se ogleda kroz smanjenje vrednosti NEFA, BHB, porast vrednosti holesterola i triglicerida i povoljniji odnos NEFA:holesterol; smanjuje opterećenje i nekrozu hepatocita i opterećenje žučnih puteva jer dovodi do opadanja aktivnosti jetrinih enzima i koncentracije bilirubina. Odnos verovatnoća je dobar i jednostavan pokazatelj efekta tretmana niacinom kod krava u ranoj laktaciji.

Literatura

- Amjad, S., Nisar, S., Bhat, A. A., Frenneaux, M. P., Fakhro, K. 2021. Role of NAD⁺ in regulating cellular and metabolic signaling pathways. *Molecular Metabolism*, 101195.
- Bender DA. 2003. Niacin. In: *Nutritional biochemistry of the vitamins*. 2ed ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- Berge, R. K., Cacabelos, D., Señaris, R., Nordrehaug, J. E., Nygård, O., Skorve, J., & Bjørndal, B. 2020. Hepatic steatosis induced in C57BL/6 mice by a non- β oxidizable fatty acid analogue is associated with reduced plasma kynurenine metabolites and a modified hepatic NAD⁺/NADH ratio. *Lipids in health and disease*, 19(1), 94.
- Boronovskiy, S. E., Kopylova, V. S., & Nartsissov, Y. R. 2024. Metabolism and receptor mechanisms of niacin action. *Cell and Tissue Biology*, 18(2), 128-147.
- Chen, J., Yang, Z., & Dong, G. 2019. Niacin nutrition and rumen-protected niacin supplementation in dairy cows: an updated review. *British Journal of Nutrition*, 122(10), 1103-1112.
- Chirivi, M., Cortes-Beltran, D., Munsterman, A., O'Connor, A., & Contreras, G. A. 2023. Lipolysis inhibition as a treatment of clinical ketosis in dairy cows: A randomized clinical trial. *Journal of Dairy Science*, 106(12), 9514-9531.
- Cincović MR, Đoković R, Belić B, Lakić I, Stojanac N, Stevančević O, Staničkov N. 2018. Insulin resistance in cows during the periparturient period. *Acta Agric Serb*, 23(46): 233-245.
- Cincović, M. 2016. *Metabolički stres krava*. Monografija. Poljoprivredni fakultet Novi Sad, Departman za veterinarsku medicinu, Novi Sad.
- Cincović, M., Majkić, M., Spasojević, J., Hristov, S., Stanković, B., Nakov, D., Nikolić, S., Stanojević, J. 2023. Heat stress of dairy cows in Serbia. *Acta Agriculturae Serbica*, 28(56), 107-125.
- Dong, J., Yue, K., Loo, J. J., Aboragah, A., Li, G., Chen, L., ... & Li, X. 2022. Increased adipose tissue lipolysis in dairy cows with fatty liver is associated with enhanced autophagy activity. *Journal of Dairy Science*, 105(2), 1731-1742.
- Đoković R.D., Cincović M.R., Belić B.M. 2014. *Fiziologija i patofiziologija metabolizma krava u peripartalnom period*. Novi Sad.
- Faraone, S. V. 2008. Interpreting estimates of treatment effects: implications for managed care. *Pharmacy and Therapeutics*, 33(12), 700.
- Fu CS, Swendseid ME, Jacob RA, McKee RW 1989. Biochemical markers for assessment of niacin status in young men: levels of erythrocyte niacin coenzymes and plasma tryptophan. *J Nutr*. 119:1949–55.
- Gille A, Bodor ET, Ahmed K, Offermanns S. Nicotinic acid 2008. *Pharmacological effects and mechanisms of action*. *Ann Rev Pharmacol Toxicol*, 48:79-106.

- Hara N., Yamada K., Shibata T., Osago H., Hashimoto T., Tsuchiya M. 2007. Elevation of Cellular NAD Levels by Nicotinic Acid and Involvement of Nicotinic Acid Phosphoribosyltransferase in Human Cells. *J. Biol. Chem.* 28:24574-24582.
- Häussler, S., Sadri, H., Ghaffari, M. H., & Sauerwein, H. 2022. Symposium review: Adipose tissue endocrinology in the periparturient period of dairy cows. *Journal of dairy science*, 105(4), 3648-3669.
- Hristovska, T., Cincović, M., Dodovski, P., Karabolovski, N., Pejcinovska, N., Dameski, P., Zdraveski, I., Ristevski, M. 2024. Effects of niacin on blood indicators of lipomobilization and hepatic function in dairy cows during early lactation. *Journal of Hygienic Engineering and Design* 47, 45-50.
- Jacobson E.L., Jacobson M.K. 1997. Tissue NAD as a biochemical measure of niacin status in humans. *Methods Enzymol.* 280:221–230.
- Krnjajić, S., Đoković, R., Majkić, M., Starič, J., Cincović, M. 2024. Uticaj frekvencije muže na povezanost mobilizacije lipida i pokazatelja funkcionalnog statusa jetre kod krava u laktaciji. *Letopis naučnih radova / Annals of Agronomy* 48(1): 1-8.
- Lakić, I., Cincović, M. R., Belić, B., Đoković, R., Majkić, M., Petrović, M. Ž., & Nikolić, S. 2018. Lipolysis and ketogenesis in cows in early lactation. *Acta Agriculturae Serbica*, 23(46), 265-276.
- Loor, J. J., Everts, R. E., Bionaz, M., Dann, H. M., Morin, D. E., Oliveira, R., Lewin, H. A. 2007. Nutrition-induced ketosis alters metabolic and signaling gene networks in liver of periparturient dairy cows. *Physiological genomics*, 32(1), 105-116.
- Majkić, M., Cincović, M., Spasojević, J., Jožef, I., Blond, B., Kovačević, D. 2023. Kriva rezilijentnosti i kumulativni odgovor krava na toplotni stres. *Letopis naučnih radova / Annals of Agronomy* 47(1): 38-46.
- Masia, R., McCarty, W. J., Lahmann, C., Luther, J., Chung, R. T., Yarmush, M. L., & Yellen, G. 2018. Live cell imaging of cytosolic NADH/NAD⁺ ratio in hepatocytes and liver slices. *American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology*, 314(1), G97-G108.
- Murthy, S., Thakur, S., Kumar, A., & Gupta, S. 2021. Nicotinic acid, its mechanism of action and pharmacological effects. *Res. Rev. Int. J. Multidiscip.* 6, 56-62.
- Petrović K, Stojanović D. 2020. Uticaj anti-inflamatornog efekta niacina na enzime jetre i oksidativni stres krava u ranoj laktaciji. *Veterinarski Pregled.* 1(1):105-111.
- Petrović, K., Djoković, R., Cincović, M., Hristovska, T., Lalović, M., Petrović, M., et al. 2022. Niacin status indicators and their relationship with metabolic parameters in dairy cows during early lactation. *Animals*, 12(12), 1524.
- Petrović, K., Stojanovic, D., Cincović, M.R., Belić, B., Lakić, I., Đoković, R. 2021. Influence of niacin application on inflammatory parameters, non-esterified fatty acids and functional status of liver in cows during early lactation. *Large Animal Review*, 27(1), 17-21.
- Pires JAA, Grummer RR. 2007. The use of nicotinic acid to induce sustained low plasma nonesterified fatty acids in feed-restricted Holstein cows. *J Dairy Sci*, 90:3725–3732.
- Rehage J., Qualmann K., Meier C., Stockhofe-Zurwieden N., Hoeltershinken M., Pohlenz J. 1999. Total serum bile acid concentrations in dairy cows with fatty liver and liver failure. *Dtsch. Tierärztl. Wochenschr.* 106:126–129.
- Sadiq, M. B., Zaini, S. S., Mossadeq, W. M. S., Ramanoon, S. Z., & Syed-Hussain, S. S. 2024. Lying and rumination time as predictors of subclinical ketosis, metritis, and hypocalcaemia in dairy cows during the periparturient period: A systematic review and meta-analysis. *Applied Animal Behaviour Science*, 278, 106358.
- Suarez-Trujillo, A., Hoang, N., Robinson, L., McCabe, C. J., Conklin, D., Minor, R. C., ... & Casey, T. M. 2022. Effect of circadian system disruption on the concentration and daily oscillations of cortisol, progesterone, melatonin, serotonin, growth hormone, and core body temperature in periparturient dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 105(3), 2651-2668.
- Titgemeyer E, Spivey K, Mamedova L, Bradford B. 2011. Effects of pharmacological amounts of nicotinic acid on lipolysis and feed intake in cattle. *Int J Dairy Sci*, 6:134–141.
- Titgemeyer E.C., Mamedova L.K., Spivey K.S., Farney J.K., Bradford B.J. 2011a An unusual distribution of the niacin receptor in cattle. *J. Dairy Sci.* 94 :4962–4967.
- Tunaru S, Kero J, Schaub A, Wufka C, Blaukat A, Pfeffer K, Offermanns S. 2003. PUMA-G and HM74 are receptors for nicotinic acid and mediate its anti-lipolytic effect. *Nat Med*, 9:352–355.
- Wang, G., Zhu, Y., Feng, D., Yao, J., Cao, Y., & Deng, L. 2025. Hepatic gluconeogenesis and regulatory mechanisms in lactating ruminants: A literature review. *Animal Research and One Health*, 3(3), 230-239.
- Yamaguchi, S., Yoshino, J. 2017 Adipose tissue NAD(+) biology in obesity and insulin resistance: From mechanism to therapy. *BioEssays: News and Reviews in Molecular, Cellular and Developmental Biology* 39, <https://doi.org/10.1002/bies.201600227>.
- Yoshino, J., Mills, K. F., Yoon, M. J. & Imai, S. 2011. Nicotinamide mononucleotide, a key NAD(+) intermediate, treats the pathophysiology of diet- and age-induced diabetes in mice. *Cell Metab.* 14, 528–536.

Investigation of the effect of niacin treatment on the metabolic stability of cow hepatocytes in early lactation

Mira Marković^a, Dragica Stojanović^a, Talija Hristovska^b, Kosta Petrović^c,

Marko Cincović^a, Mira Majkić^a

^aUniversity of Novi Sad, Faculty of Agriculture, Department of veterinary medicine, Novi Sad, Serbia

^bUniversity „Sv.Kliment Ohridski“, Veterinary faculty Bitolj, N.Macedonia

^c Agricultural School with Student Dormitory Futog

*Corresponding author: miramajkic@gmail.com

ABSTRACT

The aim of this study was to examine the hepatoprotective effect of niacin after its application in the periparturient period by determining the differences in the values of metabolites important for the functional status of hepatocytes in samples from cows that received niacin and those that did not. It also aimed to determine whether the hepatoprotective effect of niacin increases with higher niacin status scores, by establishing the relationship between niacin status values (NAD:NADP) and the likelihood that cows maintain their metabolic parameters within reference ranges. Niacin exhibits a hepatoprotective role by helping the liver preserve its secretory capacity, which is reflected in albumin and glucose values. It also shows a hepatoprotective effect by reducing lipolysis, ketogenesis, and fat accumulation in the liver, as seen through decreased NEFA and BHB values, increased cholesterol and triglyceride levels, and a more favorable NEFA:cholesterol ratio. Niacin reduces the burden and necrosis of hepatocytes and the stress on the bile ducts by lowering liver enzyme activity and bilirubin concentrations. The niacin status, expressed as the NAD:NADP index, is a significant indicator of niacin's hepatoprotective function: as this index increases, the likelihood that a large number of biochemical parameters remain within reference values is much higher than the likelihood of unfavorable (out-of-range) values. The odds ratio is a good and simple indicator of the effect of niacin treatment in cows during early lactation.

KEY WORDS

niacin status, hepatocyte function, blood parameters, odds ratio.

Rad primljen: 17.10.2025.

Ispravljen: 18.11.2025.

Prihvaćen 24.11.2025.

Objavljen: 31.12.2025.



Influence of Origin and Salt Tolerance on Biofilm Formation by Halotolerant Isolates

Dušan Adamov ^{*a}, Dragana Stamenov ^a, Timea Hajnal Jafari ^a and Simonida Đurić ^a

^aUniversity of Novi Sad, Faculty of Agriculture, Department of Field and Vegetable Crops, 21000 Novi Sad, Serbia

^{*}Corresponding author:

dusan.adamov@polj.uns.ac.rs

SAŽETAK

Biofilm production is one of the key adaptive strategies employed by soil microorganisms to withstand abiotic stressors, particularly increased salinity. Moreover, biofilm formation plays an essential role in the colonization of plant roots by rhizobacteria and in establishing beneficial plant-microbe interactions. In this study, we examined the significance of biofilm production as a mechanism enabling bacterial isolates from Solonchak and Molisol soils to tolerate salinity stress, as well as its potential dependence on isolate origin (bulk soil or rhizosphere). Biofilm production was examined using the microtiter plate method. Bacterial cultures were grown in wells containing 50% diluted medium and 50% diluted medium supplemented with 2% NaCl. After incubation, the biofilms formed in the wells were stained with crystal violet, and the optical density (OD) was measured at 595 nm. Since no correlation was observed between salt tolerance and biofilm production, it is likely that other mechanisms, such as osmoprotectant accumulation, contribute to salt tolerance. Conversely, rhizosphere bacteria exhibited higher biofilm production compared to bulk soil isolates, particularly when the medium was supplemented with 2% NaCl, suggesting that biofilm formation is an important strategy for root colonization and this interaction is enhanced under saline conditions. Further, biofilm formation declined by about 49–61% in moderately salt-tolerant isolates but increased by 220% in highly salt-tolerant ones, indicating that these changes occurred under increased salt concentrations. This suggests that biofilm development may become more effective as a protective strategy only at higher salinity levels, but likely in combination with other adaptive mechanisms. Rhizobacterial isolate HT3 showed the highest biofilm production in diluted media (OD₅₉₅ = 1.820), even though this ability decreased in the medium supplemented with 2% NaCl. Notably, only two of 31 isolates (HT2 and HB13) showed increased biofilm production under saline conditions.

Key words

Biofilm, bulk soil, PGPR, rhizosphere, salinity stress.

Introduction

A biofilm is defined as “aggregates of microorganisms in which cells are frequently embedded in a self-produced matrix of extracellular polymeric substances (EPS) that are adherent to each other and/or to a surface” (Vert et al., 2012). Biofilms may consist of a single species, multiple species of the same taxonomic group, or even organisms from different taxonomic groups such as bacteria, fungi, archaea, algae, and yeasts (Sharma et al., 2023). They are ubiquitously distributed and can colonize almost all abiotic and biotic surfaces. They are also widely recognized in food industry facilities, water distribution systems, on the surface of animal tissue and on plant surfaces, particularly on the rhizoplane (Sharma et al., 2023). Like all living organisms, bacteria are continuously exposed to diverse abiotic and biotic stressors, and biofilm formation represents one of their key adaptive strategies to withstand these challenges. Among various stress factors, disbalans in osmotic potential is particularly significant, as it can lead to cytoplasmic lysis and cell death, thereby strongly influencing biofilm development (Cappellari et al., 2023). In saline environments, bacteria secrete EPS and a variety of metabolites that perform multiple protective functions, including reactive oxygen species (ROS) scavenging, osmoprotection, and facilitation of nutrient acquisition (Bhat and Roach, 2025). Biofilm formation is also essential for PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria), as it enables their stable colonization of the rhizosphere and rhizoplane, where fluctuating moisture, salinity, and nutrient conditions can otherwise limit microbial persistence. Within biofilms, rhizobacteria can communicate through quorum sensing, coordinate metabolic activities, and create protective microenvironments that enhance their survival and plant growth-promoting functions (Goszcz et al., 2025). Moreover, biofilms improve the efficiency of root colonization, facilitating nutrient exchange and biocontrol activities that benefit the host plant (Cappellari et al., 2023, Ambarita et al., 2024).

Biofilm-forming PGPR have strong potential to colonize plant roots and enhance plant growth, particularly under salinity stress (Ambarita et al., 2024). For example, bacterial strains from saline and acidic soils that produced IAA and solubilized phosphate significantly promoted maize growth, and

Azotobacter spp. strains with higher biofilm-forming capacity exerted a greater positive effect on maize compared to weaker strains (Cam et al., 2022). However, this trait is not uniformly distributed among rhizobacteria, as only four out of twelve isolates from the Arabian Sea coasts were capable of forming biofilms (Kapadia et al., 2022). Salinity can both stimulate and inhibit biofilm formation depending on the species: elevated NaCl promoted biofilm development in *Pseudomonas* spp. (Cappellari et al., 2023) and *Halomonas aquamarina/meridiana*, whereas *Kushneria indalinina* formed substantial biofilms only under non-saline conditions (Quarashi and Sabri, 2012). Conversely, high salinity suppressed biofilm formation in *Salmonella* Newport 193 (Gu et al., 2020) and reduced it in *Pseudomonas aeruginosa* (Bazire et al., 2007), highlighting species-specific responses to salinity.

This study aims to elucidate the relationship between salt tolerance and biofilm-forming capacity of halotolerant bacterial isolates isolated from bulk soil and rhizosphere samples, as well as to evaluate the effect of isolate origin on biofilm formation.

Material and methods

Isolation of halotolerant isolates

All microorganisms were isolated from either Solonchak or mollisol soils (both from South Bačka region, Vojvodina, Serbia), originating from both bulk soil and rhizosphere samples (Table 1). Serially diluted soil suspensions were inoculated onto Meat Peptone Agar (MPA) (g/L: 3 meat extract, 10 peptone, 20 NaCl, 2.5 K₂HPO₄, 16 Agar) and King B agar (Biolab, Hungary), both supplemented with 2% NaCl. Plates were incubated at 28 °C for 3–5 days, after which morphologically distinct colonies were selected and purified for further analysis. Morphological differentiation of the isolates was based on colony shape, color, margin characteristics, and fluorescence capability.

Table 1.

List of bacterial isolates with their origin and isolation medium.

| Isolates | Sample origin | Medium used for isolation |
|-------------|---|---------------------------|
| HB1–HB14 | Bulk Solonchak soil | MPA + 2% NaCl |
| HB15–HB17 | Bulk Solonchak soil | KingB agar + 2% NaCl |
| HT1 and HT2 | <i>Trifolium</i> sp. rhizosphere soil on Solonchak | MPA + 2% NaCl |
| HT3 | <i>Trifolium</i> sp. rhizosphere soil on Solonchak | KingB agar + 2% NaCl |
| HE1 and HE2 | <i>Eragrostis</i> sp. rhizosphere soil on Solonchak | MPA + 2% NaCl |
| HE3 and HE4 | <i>Eragrostis</i> sp. rhizosphere soil on Solonchak | KingB agar + 2% NaCl |
| HC1 and HC2 | <i>Cynodon</i> sp. rhizosphere soil on Solonchak | MPA + 2% NaCl |
| HC3 and HC4 | <i>Cynodon</i> sp. rhizosphere soil on Solonchak | KingB agar + 2% NaCl |
| HP1 and HP2 | <i>Capsicum annuum</i> rhizosphere soil on Molisol | MPA + 2% NaCl |
| HP3 | <i>Capsicum annuum</i> rhizosphere soil on Molisol | KingB agar + 2% NaCl |

Salt tolerance assay

All isolates were inoculated onto MPA or King B agar plates (depending on the isolate; the isolates demonstrating fluorescence capacity were inoculated onto King B agar medium) supplemented with varying NaCl concentrations (2%, 3%, 4%, 5%, 6%, and 7%) and incubated for 24 h at 28 °C. The highest NaCl concentration at which visible growth was observed (one level below the concentration that completely inhibited growth) was considered the upper salt tolerance limit for each isolate.

Biofilm formation microtiter plate assay

All isolates were evaluated for biofilm formation using a microplate assay following the method of Djordjevic et al. (2002), with modifications adapted for this study. Each isolate was first cultured in 50 mL of Meat Peptone broth (MPB) or King B broth (depending on the isolate) and incubated for 24 h at 28 °C on an orbital shaker. Subsequently, 150 µL of a 50% diluted medium (MPB or King B broth) was inoculated into the wells of a microtiter plate. The 50% diluted medium was experimentally determined as the optimal nutrient concentration for inducing biofilm formation in the selected isolates (data not shown). To assess the effect of salinity on biofilm formation, NaCl was added to achieve a final concentration of 2% in the test wells. Thus, two experimental treatments were established: diluted medium alone and diluted medium supplemented with 2% NaCl, each in duplicate. The microtiter plates were then incubated for 24 h at 28 °C.

Medium was removed from wells and microtiter plate wells were washed five times with sterile distilled water to remove loosely associated bacteria. Plates were air dried for 45 min and each well was stained with 150 µL of 1% crystal violet solution in water for 45 min. After staining, plates were washed with sterile distilled water five times. The quantitative analysis of biofilm production was

performed by adding 200 μL of 95% ethanol to destain the wells. One hundred microliters from each well was transferred to a new microtiter plate and the level (OD) of the crystal violet present in the destaining solution was measured at 595 nm.

Statistical analysis

Spearman's rank correlation was used to assess the relationship between salt tolerance and biofilm production in diluted medium and diluted medium supplemented with 2% NaCl. Analysis of variance (ANOVA) was applied to evaluate the effect of isolate origin (bulk soil or rhizosphere) on biofilm formation under both conditions. All statistical analyses were performed using STATISTICA 14.1. software (Tibco software inc.).

Results and discussion

Biofilm formation represents an important adaptive strategy of soil microorganisms to withstand abiotic stressors such as salinity. This protection is largely mediated by the extracellular polysaccharide matrix, which provides structural stability, resilience, and defense against environmental stress. The presence of these polysaccharides was detected using the crystal violet assay, where crystal violet binds to the biofilm matrix, forming a complex that produces a characteristic purple coloration in the wells. Salt tolerance and biofilm production in diluted media and diluted media supplemented with 2% NaCl for all bacterial isolates are presented in Table 2.

Table 2.
Biofilm production (OD_{595}) and salt tolerance of isolates

| Isolate | Biofilm (OD_{595}^*) in diluted media | Biofilm (OD_{595}) in diluted media + 2% NaCl | Upper salt tolerance (%) |
|---------|--|--|--------------------------|
| HB1 | -0.001 | -0.026 | 2 |
| HB2 | -0.002 | -0.031 | 7 |
| HB3 | 0.003 | -0.018 | 4 |
| HB4 | 0.303 | 0.421 | 3 |
| HB5 | 1.016 | 0.056 | 3 |
| HB6 | 0.000 | -0.039 | 4 |
| HB7 | 0.005 | -0.035 | 7 |
| HB8 | 0.009 | -0.025 | 5 |
| HB9 | 0.298 | -0.027 | 5 |
| HB10 | -0.009 | 0.034 | 7 |
| HB11 | 0.044 | -0.022 | 3 |
| HB12 | -0.005 | -0.008 | 2 |
| HB13 | 0.105 | 0.311 | 7 |
| HB14 | 0.018 | 0.013 | 7 |
| HB15 | 0.005 | -0.019 | 5 |
| HB16 | 0.001 | 0.003 | 3 |
| HB17 | 0.290 | 0.052 | 3 |
| HT1 | 0.891 | 0.915 | 7 |
| HT2 | 0.217 | 0.892 | 7 |
| HT3 | 1.193 | 0.317 | 2 |
| HE1 | 0.063 | 0.010 | 7 |
| HE2 | 0.010 | 0.005 | 7 |
| HE3 | -0.020 | 0.005 | 7 |
| HE4 | 1.820 | 0.761 | 3 |
| HC1 | 0.015 | 0.025 | 7 |
| HC2 | 0.042 | 0.027 | 7 |
| HC3 | 0.012 | 0.024 | 2 |
| HC4 | 0.098 | 0.215 | 3 |
| HP1 | 0.986 | 0.715 | 2 |
| HP2 | 0.866 | 0.174 | 2 |
| HP3 | 0.037 | 0.001 | 2 |

* The final OD_{595} value is calculated by subtracting the OD_{595} of the control (non-inoculated medium) from the measured OD_{595} of the sample.

Reduced nutrient availability was one of the factors used to induce biofilm formation in the study of

Djordjevic et al. (2002). In addition to this condition, 2% salinity was introduced to further stimulate biofilm production in halotolerant isolates. However, the correlation between salt tolerance and biofilm formation in diluted media, as well as between salt tolerance and biofilm formation in diluted media supplemented with 2% NaCl, was not significant ($r = -0.179$, $p = 0.325$; $r = -0.030$, $p = 0.829$, respectively). This lack of correlation suggests that these isolates may employ alternative mechanisms to cope with salinity stress, such as the production of osmoprotectants, metabolic adjustments, modifications of cell membranes and walls (e.g., alterations in mechanosensitive channels), or increased potassium uptake (Goszcz et al., 2025). In line with this, Kapadia et al. (2022) reported that only a few isolated strains exhibited biofilm-forming ability, attributing this to the genetic determination of biofilm production or its dependence on specific culture conditions.

Although the correlation between salt tolerance and biofilm production was not statistically significant, grouping the isolates according to their salt tolerance ability revealed a notable trend (Figure 1, Figure 2). This trend was particularly evident in rhizosphere isolates, where the average OD_{595} values of isolates tolerant to 2% and 3% NaCl were higher in the diluted medium (0.51 and 0.96, respectively) compared to the diluted medium supplemented with 2% NaCl (0.20 and 0.49, respectively) (Figure 2). In contrast, isolates capable of tolerating higher salt concentrations exhibited increased biofilm production in the salt-supplemented medium (from 0.05 to 0.16). This suggests that isolates with lower salt tolerance may rely more heavily on biofilm formation as a protective mechanism, which appears insufficient under higher salinity levels. Conversely, isolates tolerant to higher salt concentrations may employ biofilm formation as an additional mechanism alongside other adaptive strategies, as evidenced by their biofilm production exclusively in the salt-supplemented medium.

ANOVA showed that isolate origin had a significant effect on biofilm formation, particularly in diluted media supplemented with 2% NaCl, where a statistically significant difference was observed ($p = 0.017$). On the other hand, an isolate origin had no statistically significant effect on biofilm formation in diluted media ($\alpha = 0.05$, $p = 0.051$), although a trend was observed. This finding suggests that biofilm production plays an important role in the adhesion of rhizoplane microorganisms, especially in saline soils such as Solonchak. Ambarita et al. (2024) demonstrated that biofilm-forming halotolerant strains capable of solubilizing phosphate and producing auxins enhanced maize seedling height under saline conditions. Although biofilm formation is an important trait for effective root colonization, plant growth promotion ultimately depends on additional plant growth-promoting characteristics of PGPR. Similarly, the biofilm-forming halotolerant rhizobacterium *Pantoea agglomerans* FAP10 exhibited increased biofilm production at 125 and 250 mM NaCl, which enabled efficient colonization of the wheat rhizosphere and promoted plant growth and yield under saline conditions (Ansari et al., 2024). In our study, the rhizobacterial isolate HE4 exhibited the highest biofilm production ($OD_{595} = 1.820$). However, this ability decreased in the medium supplemented with 2% NaCl. In contrast, isolates HT2 and HB13 showed increased biofilm production under saline conditions, supporting the findings of Kapadia et al. (2022), who reported that growth conditions can significantly influence biofilm formation.

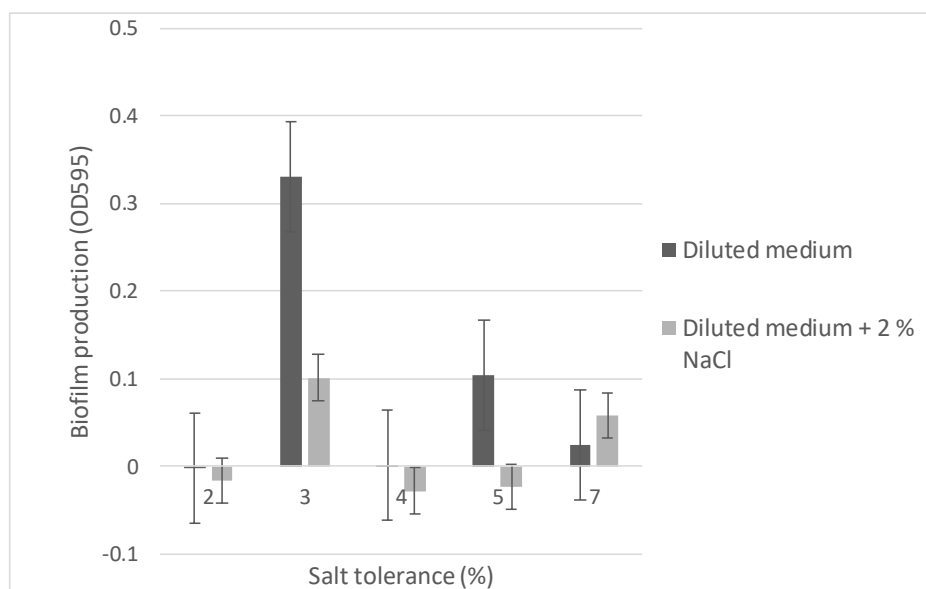


Figure 1. Average biofilm production of bulk soil isolates grouped according to their salt tolerance

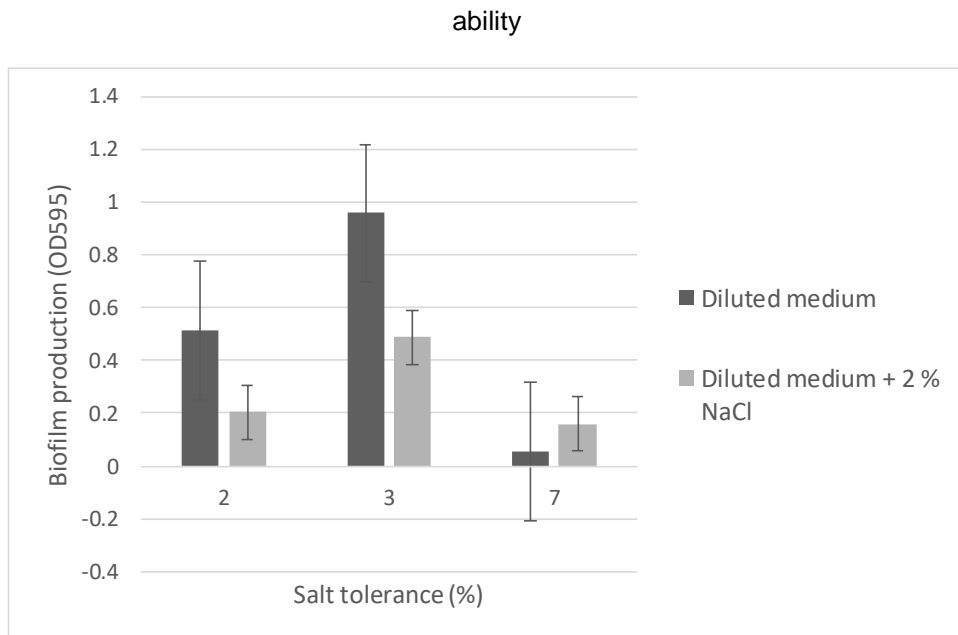


Figure 2. Average biofilm production of rhizosphere isolates grouped according to their salt tolerance ability

Conclusions

The results of our study demonstrated that salinity tolerance of the halotolerant isolates was not correlated with biofilm production, suggesting that these bacteria may rely on other mechanisms to cope with salt stress, such as osmoprotectant synthesis. Conversely, isolates from the rhizosphere exhibited enhanced biofilm formation when exposed to 2% NaCl, indicating that biofilm development may play an important role in root colonization and provide protection to both bacteria and plant roots in saline soils, such as Solonchak. The rhizobacterial isolate HE4 exhibited the highest biofilm production ($OD_{595} = 1.820$). However, this ability decreased in the medium supplemented with 2% NaCl. In contrast, isolates HT2 and HB13 exhibited increased biofilm production under saline conditions; however, only two out of 31 isolates displayed this response, which was a lower number than expected. In summary, biofilm formation declined by about 49–61% in moderately salt-tolerant isolates but increased by 220% in highly salt-tolerant ones, indicating that these changes occurred under increased salt concentrations. This suggests that biofilm development may become more effective as a protective strategy only at higher salinity levels, but likely in combination with other adaptive mechanisms. The effect of salinity and other abiotic stressors on biofilm production by the isolates should be further investigated in future studies aiming to elucidate the role of halotolerant bacteria in mitigating the impacts of abiotic stress on crops, as biofilm formation is crucial for successful colonization, particularly in harsh soil environments.

References

- Ambarita, D. D. M., Mora, E., Fitriatin, B. N., Ruswandi, D., Simarmata, T. (2024). Biochemical traits and biological assessment of indigenous biofilm-forming rhizosphosphate bacteria isolated from salinity and acidity stressed soils to enhance maize growth. *J. Ecol. Eng.* 25(9), 328-339. DOI: 10.12911/22998993/191150
- Ansari, F. A., Ahmad, I., Pichtel, J., Husain, F. M. (2024). *Pantoea agglomerans* FAP10: A novel biofilm-producing PGPR strain improves wheat growth and soil resilience under salinity stress. *Environ. Exp. Bot.* 222, 105759. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105759>
- Bazire, A., Diab, F., Jebbar, M., Haras, D. (2007). Influence of high salinity on biofilm formation and benzoate assimilation by *Pseudomonas aeruginosa*. *J. ind. microbiol. biotech.* 34(1), 5-8. <https://doi.org/10.1007/s10295-006-0087-2>
- Bhat, S. P., Roach, D. J. (2025). Bioactivity of microbial biofilms in extreme environments. *Front. Microbiol.* 16, 1602583. doi: 10.3389/fmicb.2025.1602583
- Çam, S., Küçük, Ç., Cevheri, C. (2022). The effect of salinity-resistant biofilm-forming *Azotobacter* spp. on salt tolerance in maize growth. *Zemdirbyste-Agriculture*, 109(4). DOI 10.13080/z-a.2022.109.045
- Cappellari, L. D. R., Bogino, P. C., Nievas, F., Giordano, W., Banchio, E. (2023). Exploring the differential impact of salt stress on root colonization adaptation mechanisms in plant growth-promoting rhizobacteria. *Plants*, 12(23), 4059. <https://doi.org/10.3390/plants12234059>

- Djordjevic, D., Wiedmann, M., McLandsborough, L. A. (2002). Microtiter plate assay for assessment of *Listeria monocytogenes* biofilm formation. *Appl. Environ. Microbiol.* 68(6), 2950-2958. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.6.2950-2958.2002>
- Goszcz, A., Furtak, K., Stasiuk, R., Wójtowicz, J., Musiałowski, M., Schiavon, M., Dębiec-Andrzejewska, K. (2025). Bacterial osmoprotectants—a way to survive in saline conditions and potential crop allies. *FEMS Microbiol. Rev.* fuaf020. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuaf020>
- Gu, L., Chen, Q., Guo, A., Liu, W., Ruan, Y., Zhang, X., Nou, X. (2020). Differential effects of growth medium salinity on biofilm formation of two *Salmonella enterica* strains. *J. Food Prot.* 83(2), 196-203. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-19-418>
- Kapadia, C., Patel, N., Rana, A., Vaidya, H., Alfarraj, S., Ansari, M. J., et al. (2022). Evaluation of plant growth-promoting and salinity ameliorating potential of halophilic bacteria isolated from saline soil. *Front. Plant Sci.* 13, 946217. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.946217>
- Qurashi, A. W., Sabri, A. N. (2012). Biofilm formation in moderately halophilic bacteria is influenced by varying salinity levels. *J. Basic Microbiol.* 52(5), 566-572. <https://doi.org/10.1002/jobm.201100253>
- Sharma, S., Mohler, J., Mahajan, S. D., Schwartz, S. A., Bruggemann, L., Aalinker, R. (2023). Microbial biofilm: a review on formation, infection, antibiotic resistance, control measures, and innovative treatment. *Microorganisms.* 11(6), 1614. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11061614>
- Vert, M., Doi, Y., Hellwich, K. H., Hess, M., Hodge, P., Kubisa, P., et al. (2012). Terminology for biorelated polymers and applications (IUPAC Recommendations 2012). *Pure Appl. Chem.* 84(2), 377-410. <http://dx.doi.org/10.1351/PAC-REC-10-12-04>

Uticaj porekla i stepena tolerancije saliniteta na produkciju biofilma halotolerantnih izolata

Dušan Adamov^{*a}, Dragana Stamenov^a, Timea Hajnal Jafari^a and Simonida Đurić^a

^aPoljoprivredni fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Departman za ratarstvo i povrtarstvo, 21000 Novi Sad, Srbija

*Kontakt autor: dušan.adamov@polj.uns.ac.rs

Sažetak

Produkcija biofilma predstavlja jednu od ključnih adaptivnih strategija koje mikroorganizmi u zemljištu koriste za prevazilaženje abiotskih stresova, posebno povećane saliniteta. Pored toga, formiranje biofilma ima ključnu ulogu u kolonizaciji korena biljaka od strane rizobakterija i uspostavljanju korisnih interakcija između biljaka i mikroorganizama. U ovom istraživanju ispitan je značaj formiranja biofilma kao mehanizma koji omogućava bakterijskim izolatima iz zemljišta tipa Solončak i Molisol da tolerišu stres izazvan salinitetom, kao i moguća zavisnost ovog procesa od porekla izolata (rizosferno ili nerizosferno zemljište). Produkcija biofilma ispitana je metodom u mikrotitar ploči. Bakterijske kulture su gajene u bunarčićima koji su sadržali 50% razblažen medijum i 50% razblažen medijum sa dodatkom 2% NaCl. Nakon inkubacije, formirani biofilmovi su obojeni kristal-violetom, a optička gustina (OD) je merena na 595 nm. Kako nije utvrđena korelacija između tolerantnosti na so i formiranja biofilma, verovatno je da drugi mehanizmi, poput akumulacije osmoprotektanata, doprinose tolerantnosti na so. S druge strane, rizosferne bakterije su pokazale veću produkciju biofilma u poređenju sa izolatima iz nerizosfernog zemljišta, naročito u medijumu sa dodatkom 2% NaCl, što ukazuje na to da je formiranje biofilma važna strategija za kolonizaciju korena i da je ova interakcija pojačana u uslovima povišenog saliniteta. Dalje, formiranje biofilma je opalo za oko 49–61% kod umereno halotolerantnih izolata, dok je povećano za 220% kod visoko halotolerantnih. Ovi rezultati sugerišu da biofilm postaje efikasniji kao zaštitni mehanizam tek pri većim nivoima saliniteta, verovatno u kombinaciji sa drugim adaptivnim mehanizmima. Rizosferni izolat HT3 pokazao je najveću produkciju biofilma u razblaženom medijumu (OD₅₉₅ = 1.820), iako je ta sposobnost opala u medijumu sa 2% NaCl. Važno je istaći to da su samo dva od ukupno 31 izolata (HT2 i HB13) pokazala povećanu produkciju biofilma u uslovima saliniteta

Ključne reči

Biofilm, zemljište, PGPR, rizosfera, osmotski stres.

Rad primljen: 25.10.2025.

Ispravljen: 03.12.2025.

Prihvaćen 08.12.2025.

Objavljen: 31.12.2025.



Kosmajski rudnici kao primer rudarskog nasleđa: Primena GIS-a u karakterizaciji prostora

Ana Paravinja^{a*}, Pavel Benka^b, Boško Blagojević^b, Nina Nikolić^a

^aUniverzitet u Beogradu, Institut za multidisciplinarna istraživanja, Odsek za biljne, zemljišne i nano sisteme, Beograd, Srbija

^bUniverzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Departman za uređenje voda, Novi Sad, Srbija

*Autor za kontakt: ana.paravinja@imsi.bg.ac.rs

SAŽETAK

Očuvanje kvaliteta životne sredine predstavlja jedan od ključnih izazova savremenog društva, naročito u oblastima koje su bile pod intenzivnim uticajem rudarskih aktivnosti. Rudarenje i metalurške prakse kroz istoriju ostavile su dubok trag u prostoru, izazivajući degradaciju zemljišta, gubitak vegetacije i trajnu kontaminaciju teškim metalima. Istraživanje područja nekadašnjih rudarskih kompleksa omogućava uvid u dugoročne ekološke posledice i procenu rizika po ekosisteme i ljudsko zdravlje. Predmet ovog rada je preliminarno proučavanje antičkog rudarskog lokaliteta na prostoru Kosmaja, u okviru beogradske opštine Sopot, koji je u rimskom periodu bio jedno od značajnih ležišta srebronosnog olova. Tokom viševekovne eksploatacije i prerade rude, na lokalitetu su formirani obimni depoziti metalurške šljake, čiji sastav i potencijal do sada nisu bili predmet istraživanja. Kombinacijom terenskih obilazaka, dostupnih podloga i prostorne analize izvršeno je preliminarno mapiranje i identifikacija karakterističnih elemenata prostora. Dobijeni rezultati pružaju početni uvid u stanje zemljišta i vegetacije i predstavljaju osnovu za buduća multidisciplinarna istraživanja. Ovim radom ukazuje se na potrebu sistematske karakterizacije rudarskog nasleđa Kosmaja, radi razumevanja interakcije između antropogene degradacije i prirodnih procesa obnove. Istraživanje doprinosi inicijalnom naučnom vrednovanju lokaliteta koji poseduje arheološki, ekološki i potencijalno ekonomski značaj.

KLJUČNE REČI

Kosmaj, rimski rudnici, depoziti šljake, olovo, erozija

Uvod

Očuvanje kvaliteta životne sredine danas predstavlja jedan od najznačajnijih globalnih izazova, s obzirom na to da su prirodni resursi sve intenzivnije izloženi antropogenom pritisku. Među brojnim izvorima zagađenja, rudarske aktivnosti i ekstrakcija metala, izdvajaju se kao jedan od najintenzivnijih oblika negativnog uticaja na životnu sredinu. Ovi procesi dovode do gubitka zemljišta i vegetacionog pokrivača, stvaranja velikih količina opasnog otpada i dugotrajne kontaminacije teškim metalima. Kroz istoriju, stara ljudska društva intenzivno su eksploatisala mineralne resurse širom sveta, čak i na prostorima koji se danas smatraju zaštićenim. Posledice takvih rudarskih aktivnosti i danas su vidljive u prirodi čak i nakon što se vegetacija zagađenog ekosistema tokom dugog vremenskog perioda prirodno obnovi do te mere da tragovi rudarenja postanu gotovo neprepoznatljivi i zaboravljeni, povišen sadržaj metala poput olova i dalje može predstavljati ozbiljan rizik za životnu sredinu. Istraživanje ovakvih lokaliteta omogućava bolje razumevanje dugoročne sudbine metala u životnoj sredini i potencijalnih rizika po ekosisteme i ljudsko zdravlje (Camizuli et al., 2018). Rudarska industrija na globalnom nivou godišnje generiše oko 700 miliona tona metalogenog otpada, pri čemu je do sada trajno degradirala najmanje jedan procenat kopnene površine Zemlje (Cooke, 1999).

Početak rudarstva, geoloških i metalurških aktivnosti na prostoru Srbije seže do praiistorije što potvrđuju brojna arheološka nalazišta. Jedan od rudarskih centara od najvećeg značaja za vreme vladavine Rimljana bio je na Kosmaju (Vujić, 2014). Rimski rudnici koji su obuhvatali atare sela Stojnik, Guberevac, Parcani i Babe predstavljali su najznačajnije izvore olova i srebra u oblasti *Metalla Tricornensia*, jednoj od četiri rudarske teritorije Gornje Mezije. Kosmajska rudarska oblast ubraja se među područja sa najdužom tradicijom arheoloških istraživanja u Srbiji, gde su otkriveni najstariji arheološki tragovi rudarsko-topioničarskih aktivnosti, kao i najobimniji depoziti antičke šljake (Crnobrnja, 2017).

Za potrebe predloženog istraživanja izabran je lokalitet koji pripada antičkom kompleksu rudnika metala (tzv. Kosmajski rudnici) na teritoriji beogradske opštine Sopot. Geoarheološka istraživanja pokazala su da je na ovom prostoru eksploatisano srebronosno olovo, dobijano iz galenita (PbS) i ceruzita (PbCO₃), koji su vađeni sa dubina i do 120 metara. Šljaka nastala u procesu topljenja i

prerade metala vekovima je deponovana u okviru samog lokaliteta (Milovanović, 2017). Biopristupačne koncentracije metala iz deponovane šljake, koje bi mogle imati direktno dejstvo na živi svet, nisu do sada publikovane.

Istraživanje predstavljeno u ovom radu odnosi se na jedan lokalitet koji je do sada, osim nekih arheoloških istraživanja, bio sasvim zapostavljen, iako poseduje izuzetan potencijal za multidisciplinarna proučavanja. Uprkos istorijskoj i ekološkoj značajnosti, ovaj lokalitet nije bio predmet sistematskog istraživanja, niti postoje detaljni podaci o njegovim ekološkim, pedološkim i biološkim karakteristikama. Zbog toga je ovo ujedno i prvi pokušaj karakterizacije ovog područja putem sistematizacije postojećih prostornih podataka i njihove interpretacije u GIS okruženju, sa ciljem da se utvrde osnovne prirodne i/ili društveno-ekološke osobine lokaliteta, identifikuju zone od značaja i postave osnove za buduća istraživanja. Predloženo istraživanje ima zadatak da pruži prvi sistematski uvid u stanje zemljišta i vegetacije na području Kosmajskih rudnika kao specifičnom primeru rudarskog nasleđa, a rezultati ovog rada predstavljaju početni, ali važan korak u sistematskoj karakterizaciji jednog jedinstvenog prostora od istovremeno arheološkog, ekološkog i potencijalno ekonomskog značaja.

Material i metod rada

Prema dostupnim podacima, skoro isključivo iz arheoloških istraživanja, površina predela koja je bila u različitoj meri izmenjena rudarskim aktivnostima rimske epohe je zapravo veoma velika, po nekim procenama i preko 60 km² (dr Adam Crnobrnja, personalna komunikacija). Za potrebe ovog istraživanja prvo je bilo potrebno odabrati reprezentativnu lokaciju manje površine na kojoj će se dalje sprovoditi detaljnija istraživanja. Usled nedostatka dostupnih sistematizovanih podataka o ovom širem predelu, selekcija lokaliteta se prvenstveno oslanjala na detaljno rekognosciranje terena tokom većeg broja obilazaka. Kriterijumi za odabir jednog model lokaliteta za ovo istraživanje su uključivali: postojanje naslaga rudničkog otpada bez vegetacije (goleti); postojanje različitih stadijuma spontane vegetacije – od pionirske zeljaste, preko žbunaste, sve do šumskih sastojina; heterogenost reljefa a posebno nagiba; kao i postojanje poljoprivrednih površina u neposrednom okruženju, na koje bi ovaj otpad eventualno mogao uticati. Nakon selekcije istraživačkog lokaliteta korišćeni su I sekundarni podaci različitih dostupnih podloga: topografske karte, satelitski snimci i arhivski izvori. Kombinovanjem ovih izvora sa podacima dobijenim direktnim obilaskom terena, omogućeno je da se izvrši osnovna analiza i predloži prva sistematizacija karakteristika lokaliteta.

Za analizu osnovnih fizičko–geografskih parametara istraživnog lokaliteta korišćene su topografska karta i digitalni model terena (DMT). Topografska karta je izrađena na osnovu fotografije preuzete sa platforme *Google Earth* (<https://earth.google.com/web/>), pri čemu su koordinate karakterističnih tačaka izdvojene i digitalizovane. Na taj način je dobijena topografska karta koja je korišćena kao osnovna podloga za dalje analize prostora. Digitalni model terena *SRTM 1 Arc-Second Global* preuzet je sa zvaničnog portala *United States Geological Survey – USGS Earth Explorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), koji je poslužio kao osnova za dalje analize i obradu podataka.

Takođe, za potrebe ovog rada korišćene su Osnovna geološka karta Srbije (<https://geoliss.mre.gov.rs/>) u razmeri 1:100.000, kao i Pedološka karta Jugoslavije u razmeri 1:1.000.000, izdanje Jugoslovenskog društva za proučavanje zemljišta iz 1959. godine. Karta načina korišćenja zemljišta izrađena je kombinacijom podataka dobijenih interpretacijom topografske karte i rezultata terenskih obilazaka sa neposrednim evidentiranjem zatečenog stanja. Sve prethodno navedene karte i baze podataka analizirane su u GIS okruženju, primenom softvera *ArcMap 10.3.1*.

Procena stanja erozivnih procesa na istraživnom lokalitetu urađena je uz pomoć Metode potencijala erozije prema prof. Gavriloviću. Ova metoda ne proučava fizičke mehanizme erozionih procesa, što je čini posebno pogodnom za primenu u oblastima sa ograničenom količinom podataka gde nedostaju prethodna istraživanja erozije (Dragičević et al., 2016). Erozijski fenomen i prikazuje se kartama na osnovu klasifikacije koja je zasnovana na analitički izračunatom koeficijentu erozije (Z). Ovaj koeficijent zavisi od osobina zemljišta, vegetacionog pokrivača, reljefa i vidljive pojave erozivnih procesa (Polovina et al., 2024). Koeficijent erozije dobija se iz sledeće jednačine (Gavrilović, 1972):

$$Z = Y \cdot X \cdot a \cdot (\varphi + \sqrt{I_{sr}})$$

Gde je: Z – koeficijent erozije područja; Y – recipročna vrednost koeficijenta otpora zemljišta na eroziju; $X \cdot a$ – koeficijent uređenja sliva; φ – brojni ekvivalent vidljivih i jasno izraženih procesa erozije na slivu; I_{sr} – srednji nagib područja za koje se računa koeficijent erozije.

Kategorizacija erozionih procesa vrši se prema dobijenim vrednostima koeficijenta erozije (Tabela 1), koji se određuje analitičkim putem ili procenom prilikom terenskog obilaska cilnog područja (Kostadinov, 2008). Koeficijent otpornosti zemljišta na eroziju (Y) predstavlja recipročnu vrednost koeficijenta otpora zemljišta na eroziju i uslovljen je geološkim, pedološkim i klimatskim karakteristikama istraživanog područja. Vrednosti ovog koeficijenta kreću se od 0,25 za gole i kompaktne stene do 2,0 za fine sedimente i rastresita zemljišta bez sposobnosti da se odupru eroziji (Kostadinov, 2008).

Koeficijent uređenja sliva ($X \cdot a$) odražava stepen zaštićenosti zemljišta od uticaja atmosferskih faktora i erozije prirodnim putem uz pomoć vegetacije (H) i primenom tehničkih i bioloških antierozionih mera (a). Vrednosti proizvoda ova dva koeficijenta kreću se u rasponu od 0,01 što ukazuje na dobro zaštićeno zemljište, do 1,0 što karakteriše potpuno голу i nezaštićenu površinu. Koeficijent φ predstavlja numerički izraz vidljivih erozionih procesa na slivu (vrednost 0,10 za područje bez vidljivih tragova erozije do 1,0 za područje potpuno obuhvaćeno dubinskom erozijom), dok srednji nagib terena (I_{sr}) odražava uticaj topografskih karakteristika područja (Kostadinov, 2008). Prema originalnoj metodi, vrednosti koeficijenta erozije nekog područja kreću se od 0,1 (područja bez vidljivih znakova erozije) do 1,0 (područja zahvaćena jakim erozijom) (Gavrilović, 1972).

Tabela 1

Kategorije erozije na osnovu vrednosti koeficijenta erozije

Table 1

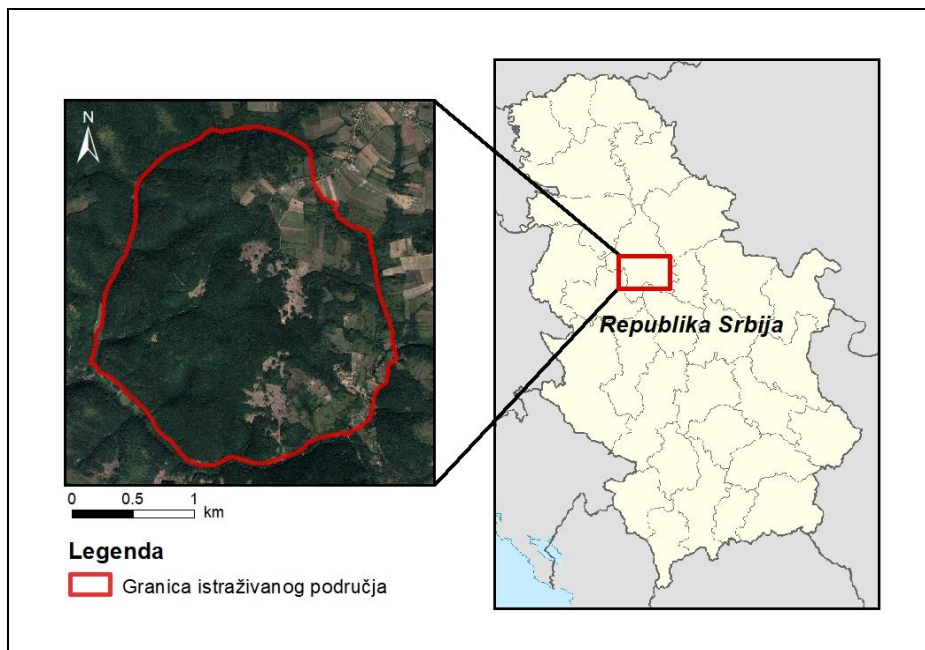
Categories of erosion based on the values of the erosion coefficient

| Kategorija razornosti (erozivnosti) | Jačina erozionih procesa | Tip vladajuće erozije | Koeficijent erozije | Srednja vrednost koeficijenta erozije |
|-------------------------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------------------------|
| I | Ekscesivna erozija | Dubinska | > 1,51 | 1,25 |
| | | Mešovita | 1,21–1,50 | |
| | | Površinska | 1,01–1,20 | |
| II | Jaka erozija | Dubinska | 0,91–1,00 | 0,85 |
| | | Mešovita | 0,81–0,90 | |
| | | Površinska | 0,71–0,80 | |
| III | Osrednja erozija | Dubinska | 0,61–0,70 | 0,55 |
| | | Mešovita | 0,51–0,60 | |
| | | Površinska | 0,41–0,50 | |
| IV | Slaba erozija | Dubinska | 0,31–0,40 | 0,30 |
| | | Mešovita | 0,25–0,30 | |
| | | Površinska | 0,20–0,24 | |
| V | Vrlo slaba erozija | Tragovi erozije | 0,01–0,19 i manje | 0,01 |

Izvor: Gavrilović, 1972

Rezultati i diskusija

Lokalitet izabran za ovo istraživanje nalazi se na području opštine Sopot, u centralnoj Srbiji (Slika 1). Nalazi se na uzvišenju između sela Guberevac, Parcani, Babe i Stojnik. Nalazi se južno od Parcanskog visa, ograničeno je poljoprivrednim zemljištem sela Parcani na severu, rečicom Pruten na jugu, potokom Zmijinjak na istoku, i potokom Celevac na zapadu. Površina ovog uzvišenja iznosi približno 4,94 km², a najviša kota je 378 m. n. v.



Slika 1. Geografski položaj istraživanog lokaliteta
Figure 1. Geographical position of the studied area

Ovo područje se nalazi u sklopu Guberevačkih šuma i danas se prvenstveno koristi za šumarsku proizvodnju. Pored toga, prisutne su manje poljoprivredne površine, ali i različiti sukcesioni stadijumi, od travno–žbunastih formacija do stabilnijih šumskih zajednica (Slika 2). Upečatljivo je i postojanje golih naslaga antičke šljake (0,21 km² ukupne površine istraživanog područja) na kojima se i posle 15 vekova nije uspostavila nikakva vegetacija, što ukazuje na krajnje nepovoljne uslove za obnovu ekosistema, a prvenstveno uspostavljanje vegetacionog pokrivača.



Slika 2. Gradijent vegetacije (sukcesija od golih naslaga jalovine do šumskih sastojina)
Figure 2. Vegetation gradient (succession from bare tailings to forest stands)

Prilikom određivanja koeficijenta erozije važno je proučiti nadmorsku visinu terena te je utvrđeno da je raspon nadmorskih visina oko 154 m (od 224 do 378 m. n. v.). Srednja nadmorska visina iznosi 316,6 m. n. v. Pored nadmorske visine, potrebno je odrediti i nagib terena. Uz pomoć GIS softvera i analiza nagiba terena (Slika 3), određeno je da većinsku površinu istraživanog područja čine zemljište strmog i umerenog nagiba, a sporadično se javljaju i tereni sa usponima preko 30% (Tabela 2).

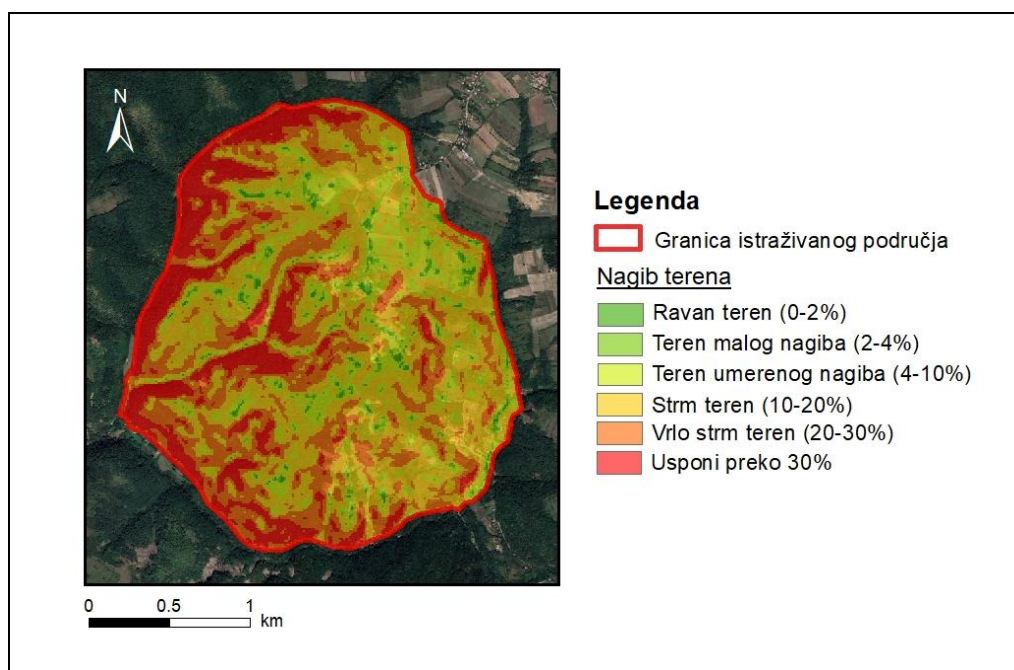
Tabela 2

Procentualna zastupljenost prisutnih klasa nagiba terena na istraživanom lokalitetu

Table 2

Percentage representation of the present slope classes at the studied area

| Klasa nagiba terena | Vrednost nagiba terena | Površina |
|---------------------------|------------------------|----------|
| | % | % |
| Ravno zemljište | 0–2 | 2,2 |
| Zemljište malog nagiba | 2–4 | 5,8 |
| Zemljište umerenog nagiba | 4–10 | 42 |
| Strmo zemljište | 10–20 | 43 |
| Vrlo strmo zemljište | 20–30 | 7,2 |
| Usponi preko 30% | >30 | 0,22 |



Slika 3. Prostorni raspored nagiba terena istraživanog lokaliteta
Figure 3. Spatial distribution of slope gradients at the studied site

Na teritoriji istraživanog područja zastupljen je samo jedan tip prirodnog zemljišta, a to je gajnjača. Gajnjače su zemljišta visoke ekološko–produktivne vrednosti. Njihova velika dubina, relativno povoljan mehanički sastav i druge fizičke osobine, utiču na intenzivan razvoj vegetacije. A ograničavajući faktor mogu biti klimatske karakteristike, relativno visoka godišnja temperatura i male padavine (Antić et al., 1980). Međutim, na najvećoj površini istraživanog lokaliteta prirodna zemljišta više ne postoje; zamenjena su naslagama otpada od ekstrakcije i topljenja rude tzv. tehnosolima za koje u literaturi ne postoji precizno definisana vrednost koeficijenta otpornosti zemljišta.

Na istraživanom lokalitetu u najvećoj meri su zastupljene šume, koje u ukupnom zbiru čine 86,5% lokaliteta. Najmanju prostornu zastupljenost imaju naseljena mesta i prateća infrastruktura (Slika 4). U Tabeli 3 prikazana je procentualna zastupljenost određenih načina korišćenja zemljišta.

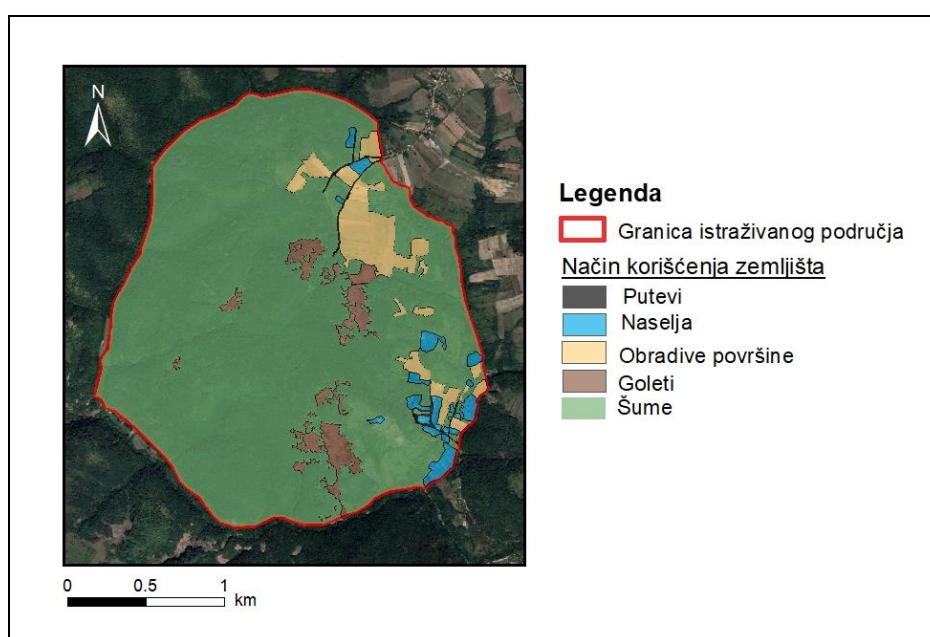
Tabela 3

Procentualna zastupljenost različitih načina korišćenja zemljišta na istraživanom lokalitetu

Table 3

Percentage representation of different land use types at the studied area

| Način korišćenja | Površina | |
|-------------------|-----------------|------|
| | km ² | % |
| Goleti | 0,21 | 4,3 |
| Obradive površine | 0,32 | 6,4 |
| Šume | 4,28 | 86,5 |
| Naselja | 0,12 | 2,4 |
| Putevi | 0,02 | 0,33 |
| Ukupno | 4,9 | 100 |



Slika 4. Prostorni raspored načina korišćenja zemljišta istraživanog lokaliteta
Figure 4. Spatial distribution of land use at the studied area

Prilikom rekognosciranja terena, utvrđeno je da je reljef disektiran, sa različitim nagibima i ekspozicijama, i vidljivim prisustvom erozije. Za procenu intenziteta erozije na istraživanom području izračunat je koeficijent erozije (Z). Koeficijent otpornosti zemljišta (Y) određen je na osnovu tipa zemljišta tj. geološke podloge. Prema geološkoj karti ovo područje pripada grupi fliševa (peščari, alevroliti, glinci, laporci), prema pedološkoj karti pripada gajnjačama, a terenskim obilaskom je utvrđeno da je podloga nastala deponovanjem otpada od rudarenja. Ove naslage predstavljaju veoma nepovoljnu sredinu za razvoj biljaka, jer sadrže visoke koncentracije olova, siromašne su hranljivim materijama i odlikuju se malom dubinom koja ograničava ukorenjivanje biljaka. Stoga je najpribližnije bilo koristiti vrednost koeficijenta $Y=1,2$ za kategoriju raspadnutih krečnjaka i laporaca prema originalnoj metodi. Koeficijent uređenja sliva varira u zavisnosti od načina korišćenja zemljišta (od goleti do šuma), te je za svaku kategoriju određen posebno. Koeficijent ϕ izabran je na osnovu zapaženih erozionih procesa prilikom obilaska terena. Srednji nagib terena dobijen je uz pomoć digitalnog modela terena u GIS okruženju, tako što su prilikom proračuna korišćene vrednosti svake klase nagiba terena kako bi se dobila što preciznija vrednost koeficijenta erozije.

Dobijena srednja vrednost koeficijenta erozije za istraživano područje iznosi $Z_{sr}=0,54$ što ukazuje na to da je istraživano područje pod uticajem erozije srednjeg intenziteta (Tabela 4).

Tabela 4

Zastupljenost kategorija erozije na istraživanom lokalitetu

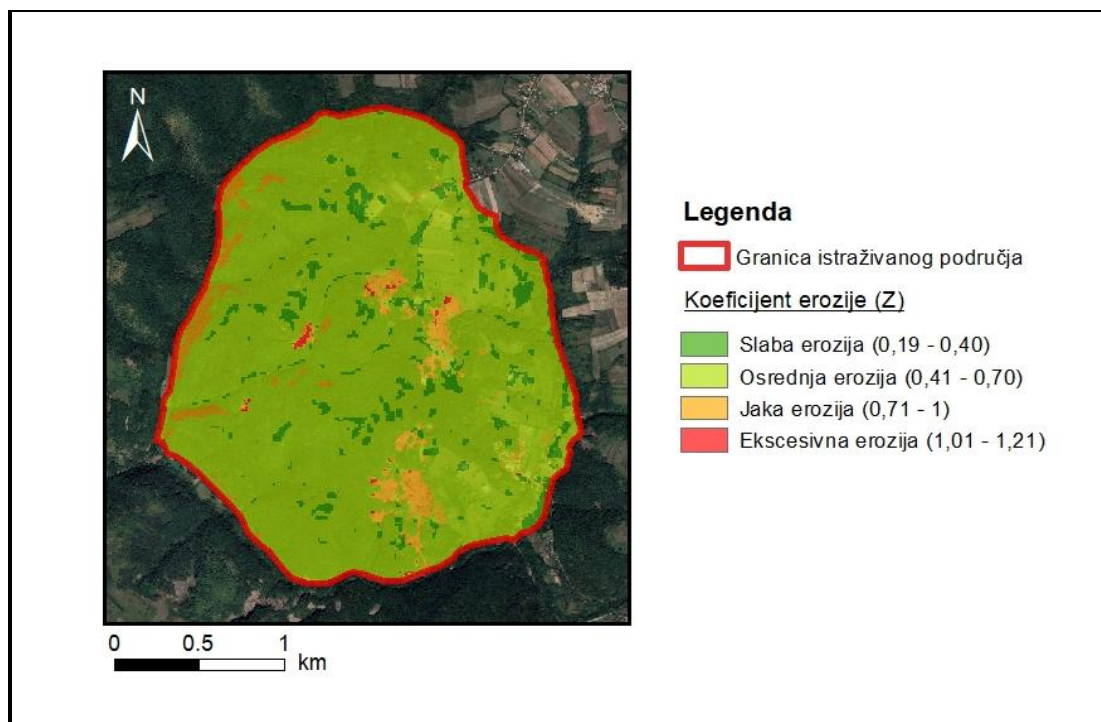
Table 4

Representation of erosion categories in the studied area

| Kategorije razornosti | Jačina erozivnih procesa | Zastupljenost | |
|-----------------------|--------------------------|-----------------|------|
| | | km ² | % |
| I | Ekscesivna erozija | 0,01 | 0,30 |
| II | Jaka erozija | 0,30 | 6,11 |
| III | Osrednja erozija | 4,26 | 86,5 |
| IV | Slaba erozija | 0,35 | 7,08 |
| Ukupno | | 4,9 | 100 |

Srednja vrednost koeficijenta erozije je $Z_{sr}=0,54$

Površine pod intenzivnim erozionim procesima ($Z > 0,70$), koje odgovaraju jakim i ekcesivnim oblicima erozije, javljaju se pre svega na goletima bez vegetacionog pokrivača, gde su jasno vidljivi procesi brazdaste i jaružaste erozije sa dubokim usecima i velikim nagibima terena. Pored toga, javljaju se i na rubnim delovima područja na mestima gde je nagib terena izraženiji. Na najvećem delu teritorije, koju čine šumske i poljoprivredne površine, prisutni su procesi erozije srednjeg intenziteta, kao i mozaične površine pod slabom erozijom (Slika 5).

**Slika 5.** Prostorni prikaz vrednosti koeficijenta erozije na istraživanom lokalitetu**Figure 5.** Spatial distribution of the erosion coefficient values at the studied area

Zaključci

Istraživanje degradiranih područja, posebno onih koja su u prošlosti bila predmet intenzivnih rudarskih aktivnosti, predstavlja korak u razumevanju procesa prirodne obnove i mogućnosti korišćenja takvih lokaliteta u budućnosti. Lokalitet Kosmajskih rudnika, na kom su još u rimskom periodu vršene ekstrakcija i topljenje rude olova, predstavlja karakterističan primer takvog prostora. Posledice dugotrajnog antropogenog delovanja prisutne su i danas u velikim količinama deponovanog rudarskog otpada, koji i dalje ima uticaja na osobine zemljišta i uslove za razvoj vegetacije, čineći ovaj lokalitet pogodnim modelom za ispitivanje odnosa između degradacije nastale ljudskim delovanjem i prirodnih procesa sukcesije.

Na osnovu kombinacije terenskih opažanja i raspoloživih podloga, urađeno je preliminarno mapiranje i identifikacija karakterističnih prostornih elemenata. Istraživani lokalitet nalazi se u okviru Guberevačkih šuma i danas se pretežno koristi za šumarsku proizvodnju, uz prisustvo manjih poljoprivrednih površina i različitih sukcesionih stadijuma vegetacije, dok su posebno izražene gole naslage antičke šljake. Prostorna analiza reljefa i erozionih procesa ukazuje na disektiran teren sa srednjim intenzitetom erozije ($Z_{sr}=0,54$), pri čemu se najintenzivniji oblici erozije javljaju na neobraslim goletima i strmijim rubnim delovima područja, dok su šumske i poljoprivredne površine uglavnom zahvaćene erozijom srednjeg do slabog intenziteta.

Rezultati predstavljeni u ovom radu mogu se smatrati početnim, ali značajnim doprinosom boljem razumevanju ovog područja, s obzirom na očigledan nedostatak prethodnih naučnih podataka. Prvo rekognosciranje terena omogućilo je geografsku i prostornu orijentaciju u odnosu na ključne površine (depozite antičke šljake i postojeću vegetaciju). Sagledano u celini, ovaj rad predstavlja polazište za detaljnija i metodološki sveobuhvatnija istraživanja koja će omogućiti da lokalitet Kosmajskih rudnika bude u potpunosti naučno valorizovan.

Literatura

- Antić, M., Jović, N., Avdalović, V. (1980). Pedologija. Naučna knjiga, Beograd, 602 p.
- Camizuli, E., Scheifler, R., Garnier, S. et al. (2018). Trace metals from historical mining sites and past metallurgical activity remain bioavailable to wildlife today. *Scientific Reports* 8: 3436.
- Cooke, J.A. (1999). Mining. In: Walker, L.R. (Ed.) *Ecosystems of disturbed ground*. *Ecosystems of the World* 16. Elsevier, Amsterdam, pp. 365–384.
- Crnobrnja, A. (2017). Revizno arheološko rekognosciranje uže zone rimskih kosmajskih rudnika. *Zbornik narodnog muzeja – Arheologija* 23: 237–265.
- Dragičević, N., Karleuša, B., Ožanić, N. (2016). A review of the Gavrilović Method (Erosion Potential Method) application. *Građevinar* 68: 715–725.
- Gavrilović, S. (1972). Inženjering o bujičnim tokovima i eroziji. Izgradnja, Beograd.
- Kostadinov, S. (2008). Bujični tokovi i erozija. Univerzitetski udžbenik. Šumarski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 505 p.
- Milovanović, B. (2017). Rudarsko-metalurški kompleksi i predmeti od olova u rimskim provincijama na tlu Srbije. Posebna izdanja 65. Arheološki institut, Beograd.
- Polovina, S., Radić, B., Ristić, R., Milčanović, V. (2024). Application of remote sensing for identifying soil erosion processes on a regional scale: An innovative approach to enhance the erosion potential model. *Remote Sensing* 16(13): 2390.
- Vujić, S. (2014). Istorija srpskog rudarstva. In: *Srpsko rudarstvo i geologija u drugoj polovini XX veka*, Koreni. Akademija inženjerskih nauka Srbije, Matica srpska i Rudarski institut, Beograd, pp. 1–38.

Kosmaj mines as an example of mining heritage: Application of GIS in spatial characterization

Ana Paravinja^{a*}, Pavel Benka^b, Boško Blagojević^b, Nina Nikolić^a

^aUniversity of Belgrade, Institute for Multidisciplinary Research, Department of Plant-Soil and Nano Systems, Belgrade, Serbia

^bUniversity of Novi Sad, Faculty of Agriculture, Department of Water Management, Novi Sad, Serbia

*Corresponding author: ana.paravinja@imsi.bg.ac.rs

ABSTRACT

Preserving environmental quality is one of the key challenges of modern society, particularly in areas that have been severely altered by intensive mining activities. Mining and metallurgical practices throughout history have left a profound impact on the landscape, causing soil degradation, loss of vegetation, and long-term contamination with heavy metals. The investigation of historic post-mining complexes provides valuable insight into long-term ecological consequences and the evaluation of risks to ecosystems and human health. This paper presents a preliminary study of an ancient mining site in the Kosmaj area, within the municipality of Sopot (near Belgrade) which was one of the major deposits of silver-bearing lead during the Roman period. Over centuries of ore extraction and smelting, extensive deposits of metallurgical slag accumulated at the site, whose composition and potential ecological impact have not yet been examined. By combining field observations, available geological data, and spatial analysis, a preliminary mapping and identification of characteristic spatial elements were conducted. The obtained results provide an initial understanding of the current condition of soils and vegetation and serve as a basis for future multidisciplinary research. This study emphasizes the need for systematic characterization of the Kosmaj mining heritage to better understand the interaction between anthropogenic degradation and natural recovery processes. The research contributes to the initial scientific evaluation of a locality of archaeological, ecological, and potentially economic significance.

KEY WORDS

Kosmaj, Roman mines, slag deposits, lead, erosion

Rad primljen: 26.11.2025.

Ispravljen: 24.12.2025.

Prihvaćen 26.12.2025.

Objavljen: 31.12.2025.



Kvantitativno-kvalitativna analiza stočarske proizvodnje u Srbiji 2017-2024, sa projekcijom i preporukama do 2030. godine

Snežana B. Aleksić

Univerzitet MB, Poslovni i pravni fakultet, Beograd, Srbija
Kontakt: snezanaaleksic3@gmail.com

SAŽETAK

Cilj ovog rada jeste da se sprovede sveobuhvatna kvantitativno–kvalitativna analiza stočarske proizvodnje u Republici Srbiji u periodu 2017–2024. godine, zasnovana na zvaničnim podacima Republičkog zavoda za statistiku. Analiza obuhvata analizu trenda, komparativnu, strukturnu i dinamičku analizu, kao i klstersko grupisanje regiona. Na osnovu vremenskih serija izvedene su projekcije broja goveda, svinja, ovaca, koza i živine do 2030. godine primenom linearne regresije. Kvalitativni deo rada uključuje političko–ekonomsku interpretaciju uočenih trendova, identifikaciju ključnih uzročnika pada stočarskog fonda i formulaciju preporuka javnih politika. Rezultati pokazuju dugoročan pad goveda i svinja, stabilan rast ovaca, snažan pad kozarstva i volatilnost živinarstva. Projekcije ukazuju na dalja pogoršanja do 2030. godine ukoliko ne dođe do sistemskih intervencija, dok predložene mere mogu doprineti stabilizaciji i revitalizaciji stočarske proizvodnje u narednoj deceniji.

KLJUČNE REČI

Stočarska proizvodnja; kvantitativna analiza; strukturna analiza; projekcije; javne politike

Uvod

Stočarska proizvodnja predstavlja jedan od ključnih stubova poljoprivredne ekonomije, ruralnog razvoja i prehrambene sigurnosti Republike Srbije. Uprkos povoljnim agroekološkim uslovima i dugoj tradiciji u stočarstvu, poslednje dve decenije obeležene su nestabilnošću proizvodnje, padom broja grla i smanjenjem konkurentnosti u odnosu na evropsko i regionalno tržište. Na ove trendove utiče niz faktora: demografski procesi, pre svega depopulacija ruralnih područja; ekonomske oscilacije cena stočne hrane; tehnološki nedostatak modernizacije; zdravstveni rizici poput afričke kuge svinja; kao i politički izazovi povezani sa nedovoljno efikasnim javnim politikama. U takvom kontekstu, analiza kretanja stočarskog fonda postaje neophodna za planiranje, donošenje odluka i oblikovanje intervencija do 2030. godine.

Materijal i metod rada

Rad se zasniva na podacima objavljenim u godišnjim publikacijama Regioni Srbije Republičkog zavoda za statistiku za period 2017–2024. godine (Tabele 1-5). Cilj je da se kvantitativno i kvalitativno ispita kretanje broja goveda, svinja, ovaca, koza i živine na nacionalnom i regionalnom nivou. Istraživačka pitanja usmerena su na identifikovanje osnovnih trendova, razlika između regiona, potencijalnih strukturnih problema i faktora koji oblikuju dinamiku stočarske proizvodnje. Ciljevi rada obuhvataju utvrđivanje tokova i promena u broju stoke u posmatranom periodu, sprovođenje kvantitativnih analiza (trendovske, komparativne i strukturne), konstruisanje projekcija kretanja stočnog fonda do 2030. godine, kao i formulaciju preporuka javnih politika zasnovanih na empirijskim pokazateljima i projekcijama. Metodološki okvir obuhvata analizu vremenskih serija, komparativnu i strukturnu analizu, uz dopunske kvalitativne interpretacije. Analiza obuhvata pet kategorija stočnog fonda: goveda, svinje, ovce, koze i živinu. Podaci su sistematizovani na dva nivoa – nacionalnom i regionalnom – kako bi se omogućilo poređenje ukupnih kretanja sa specifičnostima pojedinih oblasti. Tabela 1 prikazuje godišnje kretanje ukupnog broja stoke u Republici Srbiji (bez Kosova i Metohije), dok su u Tabelama 2–5 dati podaci za četiri regiona: Beogradski region, Vojvodinu, Šumadiju i Zapadnu Srbiju, te Južnu i Istočnu Srbiju. Ovakva struktura omogućava sagledavanje opštih trendova na nacionalnom nivou, ali i identifikovanje regionalnih razlika u dinamici stočarske proizvodnje.

Tabela 1: Godišnje kretanje ukupnog broja stoke u Republici Srbiji (bez Kosova i Metohije) od 2017. do 2024. godine**Table 1:** Annual livestock numbers in the Republic of Serbia (excluding Kosovo and Metohija), 2017–2024

| Godina | Goveda | Svinje | Ovce | Koze | Živina |
|--------|---------|-----------|-----------|---------|------------|
| 2017 | 899.000 | 2.911.000 | 1.703.000 | 182.000 | 16.338.000 |
| 2018 | 878.000 | 2.782.000 | 1.712.000 | 196.000 | 16.232.000 |
| 2019 | 898.000 | 2.903.000 | 1.642.000 | 192.000 | 15.779.000 |
| 2020 | 887.000 | 2.983.000 | 1.685.000 | 202.000 | 15.249.000 |
| 2021 | 860.000 | 2.867.000 | 1.696.000 | 195.000 | 15.348.000 |
| 2022 | 799.000 | 2.666.000 | 1.721.000 | 192.000 | 14.817.000 |
| 2023 | 725.000 | 2.142.000 | 1.717.000 | 148.000 | 14.279.000 |
| 2024 | 698.000 | 2.349.000 | 1.760.000 | 119.000 | 14.774.000 |

Izvor: Republički zavod za statistiku. 2017–2024.

Tabela 2: Ukupan broj stoke u Beogradskom regionu od 2017. do 2024. godine**Table 2:** Total livestock numbers in the Belgrade region from 2017 to 2024

| Godina | Goveda | Svinje | Ovce | Koze | Živina |
|--------|--------|---------|--------|-------|-----------|
| 2017 | 48.000 | 160.000 | 59.000 | 8.000 | 1.148.000 |
| 2018 | 47.000 | 146.000 | 73.000 | 9.000 | 822.000 |
| 2019 | 46.000 | 144.000 | 68.000 | 8.000 | 769.000 |
| 2020 | 46.000 | 144.000 | 70.000 | 7.000 | 705.000 |
| 2021 | 46.000 | 133.000 | 65.000 | 7.000 | 677.000 |
| 2022 | 41.000 | 115.000 | 62.000 | 7.000 | 621.000 |
| 2023 | 35.000 | 104.000 | 77.000 | 7.000 | 640.000 |
| 2024 | 33.000 | 108.000 | 75.000 | 5.000 | 636.000 |

Izvor: Republički zavod za statistiku. 2017–2024.

Tabela 3: Ukupan broj stoke u Regionu Vojvodine od 2017. do 2024. godine**Table 3:** Total livestock numbers in the Vojvodina region from 2017 to 2024

| Godina | Goveda | Svinje | Ovce | Koze | Živina |
|--------|---------|-----------|---------|--------|-----------|
| 2017 | 260.000 | 1.220.000 | 301.000 | 46.000 | 5.479.000 |
| 2018 | 258.000 | 1.233.000 | 291.000 | 48.000 | 5.702.000 |
| 2019 | 264.000 | 1.230.000 | 286.000 | 46.000 | 5.844.000 |
| 2020 | 260.000 | 1.261.000 | 277.000 | 50.000 | 5.462.000 |
| 2021 | 257.000 | 1.212.000 | 279.000 | 49.000 | 5.611.000 |
| 2022 | 244.000 | 1.132.000 | 282.000 | 48.000 | 5.649.000 |
| 2023 | 230.000 | 940.000 | 315.000 | 31.000 | 5.938.000 |
| 2024 | 228.000 | 1.027.000 | 315.000 | 24.000 | 6.436.000 |

Izvor: Republički zavod za statistiku. 2017–2024.

Tabela 4: Ukupan broj stoke u Regionu Šumadije i Zapadne Srbije od 2017. do 2024. godine
Table 4: Total livestock numbers in the Region of Šumadija and Western Serbia from 2017 to 2024

| Godina | Goveda | Svinje | Ovce | Koze | Živina |
|--------|---------|-----------|-----------|--------|-----------|
| 2017 | 412.000 | 988.000 | 1.031.000 | 52.000 | 6.476.000 |
| 2018 | 407.000 | 922.000 | 1.050.000 | 70.000 | 7.222.000 |
| 2019 | 415.000 | 1.006.000 | 1.005.000 | 68.000 | 6.731.000 |
| 2020 | 411.000 | 1.029.000 | 1.042.000 | 70.000 | 6.553.000 |
| 2021 | 392.000 | 978.000 | 1.054.000 | 67.000 | 6.485.000 |
| 2022 | 361.000 | 922.000 | 1.076.000 | 67.000 | 6.099.000 |
| 2023 | 330.000 | 742.000 | 1.047.000 | 52.000 | 5.030.000 |
| 2024 | 318.000 | 828.000 | 1.082.000 | 45.000 | 4.993.000 |

Izvor: Republički zavod za statistiku. 2017–2024.

Tabela 5: Ukupan broj stoke u Regionu Južne i Istočne Srbije od 2017. do 2024. godine
Table 5: Total livestock numbers in the Region of Southern and Eastern Serbia from 2017 to 2024

| Godina | Goveda | Svinje | Ovce | Koze | Živina |
|--------|---------|---------|---------|--------|-----------|
| 2017 | 179.000 | 543.000 | 312.000 | 76.000 | 3.235.000 |
| 2018 | 166.000 | 481.000 | 298.000 | 69.000 | 2.486.000 |
| 2019 | 173.000 | 523.000 | 283.000 | 70.000 | 2.435.000 |
| 2020 | 170.000 | 549.000 | 296.000 | 75.000 | 2.529.000 |
| 2021 | 165.000 | 544.000 | 298.000 | 72.000 | 2.575.000 |
| 2022 | 153.000 | 497.000 | 301.000 | 70.000 | 2.448.000 |
| 2023 | 130.000 | 356.000 | 278.000 | 58.000 | 2.671.000 |
| 2024 | 119.000 | 386.000 | 288.000 | 45.000 | 2.709.000 |

Izvor: Republički zavod za statistiku. 2017–2024.

Rezultati i diskusija

Analiza trenda predstavlja metod analize vremenskih serija kojim se utvrđuje smer i intenzitet promena posmatrane pojave tokom vremena. U ovom radu trend analiza primenjena je na godišnje vrednosti broja stoke u periodu 2017–2024, gde su procenjeni dugoročni smerovi kretanja za svaku vrstu stoke, kako na nacionalnom tako i na regionalnom nivou. Analiza je zasnovana na utvrđivanju procentualnih promena, apsolutnih razlika po godinama, te vizuelnom i numeričkom određivanju uzlaznog, silaznog ili stabilnog trenda. Na osnovu podataka iz Tabele 1 moguće je identifikovati jasne i konzistentne tokove:

- (1) Govedarstvo. Broj goveda pokazuje dugoročni negativni trend, posebno izražen posle 2021. godine. U periodu od 2017. (899.000) do 2024. godine (698.000) zabeležen je pad od 22%, što ukazuje na sistemske izazove u sektoru mlečnog i tovnog govedarstva.
- (2) Svinjarstvo. Najveći pad registrovan je 2023. godine, što se može povezati sa tržišnim šokovima i zdravstvenim rizicima, prvenstveno afričkom kugom svinja. U poređenju 2017. (2.911.000) i 2024. godine (2.349.000) evidentiran je pad od –19%.
- (3) Ovčarstvo. Jedina kategorija sa stabilnim i blagim rastom. Broj ovaca porastao je sa 1.703.000 (2017) na 1.760.000 (2024), što predstavlja rast od +3%.
- (4) Kozarstvo. Nakon početnog rasta, kozarstvo beleži intenzivan i kontinuiran pad. Broj koza smanjio se sa 182.000 (2017) na 119.000 (2024), što predstavlja pad od –34%.
- (5) Živinarstvo. Uočljiv pad do 2023. godine, a zatim oporavak 2024. godine. Ipak, ukupan trend za posmatrani period je negativan: sa 16.338.000 (2017) na 14.774.000 (2024), što je pad od –10%.

U Beogradskom regionu stočarski fond pokazuje opadajuće tendencije u gotovo svim kategorijama. Broj goveda je smanjen sa 48.000 na 33.000, dok je fond svinja pao sa 160.000 na 108.000. Živinarstvo je prepolovljeno, sa 1.148.000 na 636.000, dok se jedino ovčarstvo izdvaja blagim rastom. Region Vojvodine se pokazao kao najstabilniji, sa relativno ujednačenim kretanjima. Broj goveda beleži blagi pad, dok je svinjarstvo bilo stabilno do 2021. godine, nakon čega je usledio pad. Ovčarstvo je zadržalo stabilnost uz rast u poslednje dve godine, a živinarstvo je u porastu tokom poslednje tri godine, što ukazuje na industrijsku snagu ovog regiona (Đurić et al, 2020). Šumadija i Zapadna Srbija ostaju dominantni stočarski region, ali i ovde se uočava regresija u govedarstvu i svinjarstvu. Broj goveda kontinuirano opada, dok je svinjski fond počeo da se smanjuje nakon 2021. godine. Ovčarstvo beleži lagani rast, ali živinarstvo pokazuje izrazit pad u periodu 2018–2024, što ukazuje na strukturne slabosti u ovom segmentu. Najizraženiji pad govedarstva zabeležen je u Južnoj i Istočnoj Srbiji, gde je broj grla smanjen sa 179.000 na 119.000. Svinjarstvo je u stabilnom padu, dok je ovčarstvo relativno stabilno. Kozarstvo je održavalo stabilnost do 2022. godine, ali je potom ušlo u fazu opadanja. Živinarstvo u ovom regionu beleži umereni rast u poslednje dve godine, što donekle ublažava negativne trendove.

Komparativna analiza, kao metod upoređivanja različitih regiona, omogućava sagledavanje razlika u strukturi, intenzitetu i trendovima stočarske proizvodnje. Na osnovu raspodele stočnog fonda jasno se izdvajaju dominantni regioni po vrstama stoke. Šumadija i Zapadna Srbija prednjače u govedarstvu i ovčarstvu, dok Vojvodina zauzima vodeću poziciju u svinjarstvu. Južna i Istočna Srbija, posmatrano proporcionalno, imaju najveći udeo u kozarstvu, dok se živinarstvo koncentrisalo u Vojvodini i Šumadiji/Zapadnoj Srbiji, koje zajedno nose najveći deo ukupne proizvodnje živine u zemlji. Ovakva raspodela potvrđuje da upravo Vojvodina i Šumadija/Zapadna Srbija predstavljaju ključne stočarske regione Srbije. Kada se posmatraju promene tokom perioda 2017–2024, najizraženiji pad beleži Južna i Istočna Srbija, gde je broj goveda smanjen za 34%, dok je Beogradski region gotovo prepolovio svoj stočni fond usled urbanizacije i strukturnog povlačenja poljoprivredne proizvodnje. Suprotno tome, Vojvodina pokazuje relativnu stabilnost u svinjarskoj i živinarskoj proizvodnji, dok ovčarstvo beleži blagi rast u svim regionima, što ga čini jedinom kategorijom sa konzistentnim pozitivnim trendom.

Strukturna analiza omogućava sagledavanje unutrašnje raspodele stočnog fonda Srbije i udeo pojedinih regiona u ukupnoj proizvodnji. Na primeru 2024. godine jasno se uočava regionalna specijalizacija i koncentracija određenih vrsta stoke. U govedarstvu, Srbija je imala ukupno 698.000 grla, od čega je najveći deo koncentrisan u Šumadiji i Zapadnoj Srbiji (318.000, odnosno 46%). Vojvodina je učestvovala sa 228.000 grla (33%), dok su Južna i Istočna Srbija imale 119.000 (17%), a Beograd svega 33.000 (5%). Ovi podaci potvrđuju da Šumadija i Zapadna Srbija dominiraju u govedarstvu. Svinjarstvo je u 2024. godini brojalo 2.349.000 grla, pri čemu je Vojvodina imala vodeću poziciju sa 1.027.000 svinja (44%). Šumadija i Zapadna Srbija su učestvovala sa 828.000 (35%), dok su ostali regioni imali znatno manji udeo. Ovakva struktura jasno pokazuje da Vojvodina dominira u svinjarstvu. Živinarstvo je u istom periodu obuhvatalo 14.774.000 grla, od čega je Vojvodina imala 6.436.000 (44%), a Šumadija i Zapadna Srbija 4.993.000 (34%). Zajedno, ova dva regiona čine oko 78% ukupne živinarske proizvodnje u Srbiji, što ukazuje na snažnu koncentraciju i regionalnu specijalizaciju.

Dinamička analiza podrazumeva ispitivanje promene stočnog fonda kroz vreme, sa naglaskom na godišnje stope rasta, kumulativne promene i prosečne godišnje stope rasta [CAGR – Compound Annual Growth Rate] (Shammy, 2023). U ovom radu ona je izvedena na osnovu relativnih godišnjih promena između dve uzastopne godine, kao i prosečnih stopa rasta za ceo period 2017–2024.

Formula za godišnju stopu rasta glasi:

$$\text{Stopa rasta (t)} = (X_t - X_{t-1}) / X_{t-1} \times 100$$

Prosečna godišnja stopa rasta (CAGR) računa se kao:

$$\text{CAGR} = (X_{2024} / X_{2017})^{(1/7)} - 1$$

Rezultati pokazuju da je govedarstvo beležilo kontinuirani pad, sa najizraženijim smanjenjem u periodu 2021–2023, kada je broj grla opao za gotovo 16% kumulativno. Prosečna godišnja stopa rasta goveda iznosila je oko –3,4%, što ukazuje na dugoročnu regresiju ovog sektora. Svinjarstvo je takođe beležilo negativan trend, sa prosečnim padom od –2,7% godišnje, dok je živinarstvo imalo blaži, ali ipak negativan trend od –1,3% godišnje. Kozarstvo je pokazalo najizraženiji pad, sa prosečnim

smanjenjem od -6% godišnje, što ga čini najugroženijim sektorom. Suprotno tome, ovčarstvo je jedina kategorija koja je beležila stabilan rast. Broj ovaca se u posmatranom periodu povećavao za oko 0,5% godišnje, što potvrđuje da ovčarstvo predstavlja jedini segment stočarstva u Srbiji sa pozitivnim dinamičkim trendom u periodu 2017–2024.

Regionalna analiza intenziteta ispituje relativni doprinos pojedinih regiona u ukupnom stočnom fondu Srbije, kao i obrasce specijalizacije i dinamike proizvodnje. Rezultati pokazuju jasne regionalne razlike u strukturi stočarstva. Vojvodina se izdvaja kao region sa najrazvijenijom proizvodnjom, posebno u svinjarstvu i živinarstvu, gde dominira stabilna i tržišno orijentisana industrijska proizvodnja (Đurić et al, 2020). Suprotno tome, Šumadija i Zapadna Srbija imaju vodeću ulogu u govedarstvu i ovčarstvu, ali se proizvodnja u ovom regionu uglavnom zasniva na ekstenzivnim gazdinstvima, što ukazuje na tradicionalni karakter stočarstva (Zekić et al, 2025). Južna i Istočna Srbija beleže značajniji udeo u kozarstvu, ali istovremeno pokazuju i najveći relativni pad stočnog fonda u poslednjem periodu, što ukazuje na strukturne slabosti i demografske izazove (Ilić i Stamenković, 2020). Beogradski region, sa najmanjim ukupnim stočnim fondom, beleži najbrži pad, prvenstveno usled urbanizacije i preusmeravanja zemljišta na nepoljoprivredne delatnosti (Aleksić, 2024).

Projekcije za 2025-2030 (Linearni trend). Projekcije predstavljaju matematičke procene budućih vrednosti na osnovu prethodnih podataka. U ovom radu primenjen je linearni regresioni model, zasnovan na formuli:

$$X_t = a + b \cdot t$$

gde je X_t vrednost posmatrane pojave u godini t (broj grla stoke), a - konstanta ili početni nivo trenda (vrednost kada je $t=0$), b - koeficijent trenda (prosečna godišnja promena — povećanje ili smanjenje), t - vreme (godina, period). Linearna regresija je odabrana zbog svoje transparentnosti i praktične upotrebljivosti u kratkim vremenskim serijama (2017–2024), gde se jasno uočavaju opadajući ili rastući trendovi.

Složeniji modeli, poput ARIMA (Mgaya, 2019), nisu korišćeni zbog ograničenog broja posmatranja i radi očuvanja metodološke konzistentnosti i proverljivosti rezultata. Projekcije su date za nivo Republike Srbije.

Tabela 6: Projekcija broja stoke u Srbiji

Table 6: Projection of livestock numbers in Serbia

| Godina | Goveda | Svinje | Ovce | Koze | Živina |
|--------|---------|-----------|-----------|---------|------------|
| 2024 | 698.000 | 2.349.000 | 1.760.000 | 119.000 | 14.774.000 |
| 2025 | 673.000 | 2.260.000 | 1.767.000 | 111.000 | 14.750.000 |
| 2026 | 648.000 | 2.170.000 | 1.774.000 | 103.000 | 14.720.000 |
| 2027 | 623.000 | 2.080.000 | 1.781.000 | 95.000 | 14.670.000 |
| 2028 | 598.000 | 1.990.000 | 1.788.000 | 87.000 | 14.610.000 |
| 2029 | 573.000 | 1.900.000 | 1.795.000 | 79.000 | 14.530.000 |
| 2030 | 548.000 | 1.820.000 | 1.802.000 | 71.000 | 14.450.000 |

Zaključci po vrstama:

- Goveda: stabilan pad od ~25.000 grla godišnje; ispod 600.000 već 2028.
- Svinje: prosečan pad od ~80.000 godišnje; ispod 2.000.000 2028.
- Ovce: jedina vrsta sa stabilnim rastom (+7.000 godišnje).
- Koze: ubrzan pad, ispod 75.000 do 2030.
- Živina: relativno stabilna, sa blagim opadanjem.

Klaster analiza grupiše regione prema njihovim sličnostima u obimu i strukturi stočarstva, pri čemu se najčešće primenjuju metode k-sredina (k-means) ili hijerarhijsko klasterisanje. Na osnovu raspoloživih podataka, regioni Srbije mogu se svrstati u tri karakteristična klastera. Prvi klaster, nazvan „stočni regioni“, obuhvata Vojvodinu i Šumadiju sa Zapadnom Srbijom. Ovi regioni imaju najveći stočni fond, strukturu proizvodnje orijentisanu na tržište i razvijenu industrijsku proizvodnju svinja i živine, što ih čini ključnim nosiocima stočarstva u zemlji. Drugi klaster, „regionalni pad ruralne stočarske proizvodnje“, obuhvata Južnu i Istočnu Srbiju. Ovaj region karakteriše snažan pad goveda, koza i svinja, pri čemu depopulacija sela direktno utiče na smanjenje proizvodnje i održivost

stočarstva. Treći klaster, „urbanizovani region minimalne stočarske proizvodnje“, odnosi se na Beogradski region. On ima najmanji stočni fond i beleži najbrži pad u svim vrstama stoke, što je posledica visoke urbanizacije i preusmeravanja zemljišta na nepoljoprivredne delatnosti.

Političko-ekonomska analiza omogućava sagledavanje šireg institucionalnog, tržišnog i demografskog okvira u kojem se odvijaju kvantitativne promene u stočarskoj proizvodnji Srbije u periodu 2017–2024 (Milićević et al., 2025). Na osnovu statističkih pokazatelja i projekcija do 2030. godine mogu se identifikovati ključni činoci koji determinišu pravce kretanja stočnog fonda. Demografski faktori predstavljaju jednu od najsnažnijih determinanti pada stočarstva. Depopulacija ruralnih područja (Vukašinović et al, 2024) direktno smanjuje dostupnost radne snage, naročito za radno intenzivne vrste poput goveda i koza, što se jasno vidi u padu broja goveda od 22% i koza od 34%. Nedostatak radne snage uslovio je prelazak na manje zahtevne sisteme, pa ovčarstvo beleži relativnu stabilnost i blagi rast od oko 3%. Urbanizacija, naročito u Beogradskom regionu, dovela je do strukturnog povlačenja stočarske proizvodnje u korist urbanih delatnosti, što se ogleda u drastičnim padovima svih kategorija stoke. Ekonomski i tržišni faktori dodatno su oblikovali negativne trendove (Milićević et al, 2025). Rast cena stočne hrane od 2020. godine povećao je troškove proizvodnje u govedarstvu i svinjarstvu, što je rezultiralo smanjenjem svinjskog fonda za 19% i kontinuiranim padom goveda. Niska otkupna cena mleka demotivisala je mlečno govedarstvo i dovela do gašenja manjih farmi (Škrbić et al., 2023). Suprotno tome, relativna cenovna dostupnost živinarske proizvodnje omogućila je očuvanje ovog sektora, jer je reč o najjeftinijoj vrsti proizvodnje po jedinici proizvoda. Oslanjanje na uvoz mesa dodatno je potisnulo domaću proizvodnju, naročito u periodima kada su uvozne cene bile niže od domaćih troškova (Branković et al, 2023; Aleksić, 2025). Poljoprivredne politike pokazale su se pretežno reaktivnim, usmerenim na „gašenje požara“ umesto na strateško planiranje, naročito u sektoru svinja i goveda. Subvencije su nedovoljno ciljane, a ulaganja u reprodukciju stada nisu bila dovoljna da preokrenu negativne trendove. Nedostatak dugoročnog programa revitalizacije govedarstva i kozarstva čini ove sektore sistemski ranjivim. Međunarodne okolnosti dodatno su pogoršale stanje. Afrička kuga svinja od 2021. godine najdirektnije je uticala na pad svinjarstva, što je naročito vidljivo u oštrm padu tokom 2023. godine (Ministarstvo poljoprivrede RS). Povećanje uvoza mesa i strogi EU standardi ograničili su konkurentnost domaće proizvodnje i izvoz, dok su globalni poremećaji nakon pandemije – rast troškova energije i transporta – dodatno oslabili stočarsku ekonomiju Srbije.

Sve prethodno izneto ukazuje na nužnost sprovođenja reformi, a projekcije su u direktnoj korelaciji sa kvalitetom nužnih reformi. Ako se trendovi iz 2024. nastave bez intervencija, goveda i svinje će nastaviti ubrzan pad, živinarstvo će ostati stabilno, ovčarstvo će zadržati blagi rast, dok je kozarstvo najugroženije i moglo bi pasti ispod 70 hiljada grla do kraja decenije. U slučaju sprovođenja strukturnih reformi, pad bi mogao biti zaustavljen u roku od tri do četiri godine. Najveći potencijal oporavka ima govedarstvo u Šumadiji i Zapadnoj Srbiji, dok kozarstvo ostaje visokorizični sektor, naročito u južnim regionima.

Na osnovu dobijenih rezultata istraživanja u ovom radu, u cilju zaustavljanja daljeg pada stočarske proizvodnje, moguće je predložiti preporuke za javne politike u stočarstvu Srbije do 2030. godine, u pet nivoa: strateški ciljevi, sektorske intervencije, ekonomske mere, institucionalne reforme i regionalne politike. Akcenat je neophodno staviti na mere koje su izvodljive, ciljane i zasnovane na kvantitativnim nalazima. Na makro-nivou, potrebno je postaviti strateške ciljeve tako da obuhvataju zaustavljanje pada broja goveda i svinja do 2027. godine, uz preokret trenda do 2030. godine. Neophodno je stabilizovati tržište mesa, mleka i stočne hrane kroz integrisane mere, povećati produktivnost primenom savremenih tehnologija, genetike i modela većih farmi, te podržati demografsku revitalizaciju ruralnih područja povezivanjem stočarstva sa politikama zapošljavanja. Modernizacijom otkupa, prerade i logističkih lanaca, uključujući sertifikaciju i izvoz, stvoriti uslove za dugoročni razvoj. Na sektorskom nivou, govedarstvo se izdvaja kao najugroženiji strateški sektor, sa padom od 22% u posmatranom periodu. Preporučene mere uključuju povećanje premija po grlu za 30–40% u periodu 2025–2030, sprovođenje programa „Farma 2030“ (IPARD III program u Srbiji) koji podrazumeva robotizaciju muže, modernizaciju štala i automatizovanu ishranu, uvođenje garantovane minimalne otkupne cene mleka, subvencionisane kredite sa kamatom manjom od 1% za proširenje stada, kao i jačanje domaće reprodukcije kroz subvencije za priplodne junice. Cilj je povratak na oko 750 hiljada goveda do 2030. godine. Svinjarstvo se suočava sa visokim rizikom usled afričke kuge svinja i tržišne volatilnosti. Preporučuje se uspostavljanje nacionalnog programa biosigurnosti, formiranje kompenzacionog fonda za brzu isplatu štete, poreske olakšice za investicije u nove farme, kao i jačanje vertikalne integracije sa klanicama i prerađivačima. Cilj je stabilizacija fonda na 2,5–2,7 miliona svinja do 2030. godine. Ovčarstvo, jedini sektor sa stabilnim rastom od oko 3%, predstavlja razvojni potencijal. Preporuke uključuju izgradnju infrastrukture za izvoz jagnjadi, razvoj industrije ovčijeg sira i suhomesnatih proizvoda, kao i osnivanje regionalnih stočarskih klastera. Cilj je

povećanje broja ovaca na 1,9 miliona do 2030. godine. Kozarstvo je najugroženiji sektor, sa padom od 34%, naročito u južnim regionima. Potrebno je uvesti posebne subvencije za kozarstvo, odvojene od ovčarstva, razviti tržište kozijeg mleka kroz turizam, zdravstvo i specijalizovane proizvode, te podržati mini-mlekare i zadruga. Cilj je zaustavljanje pada do 2026. godine i oporavak na 130 hiljada koza do 2030. godine. Živinarstvo ostaje stabilan sektor visokog kapaciteta. Preporučene mere obuhvataju investicije u hladne lance i logistiku, podsticaje za izvoz, naročito prema tržištima CEFTA, UAE i Kine, kao i sertifikaciju visokih standarda zdravstvene bezbednosti. Cilj je stabilan rast od 1–2% godišnje.

Ekonomske mere 2025-2030: U teoriji ekonomije, ekonomske mere predstavljaju instrumente ekonomske politike kojima država utiče na troškove, prihode i investicione odluke proizvođača. Njihova svrha je da obezbede stabilnost tržišta, smanje rizike i povećaju konkurentnost sektora. U kontekstu stočarstva, ove mere direktno oblikuju profitabilnost farmi i održivost proizvodnje (Novaković et al, 2024). Reforma sistema subvencija podrazumeva prelazak sa tradicionalnog modela „po grlu“ na sistem zasnovan na količini proizvedenog mesa i mleka, čime se nagrađuje produktivnost, a ne samo brojnost stada. Automatizacija isplata kroz platformu eAgrar (eAgrar, 2025) dodatno bi smanjila administrativne troškove i povećala transparentnost. Smanjenje troškova proizvodnje zahteva subvencionisani dizel za stočarstvo, podsticaje za proizvodnju kukuruza i soje kao osnovne stočne hrane, kao i smanjenje doprinosa za radnike na farmama. Time bi se direktno uticalo na smanjenje ulaznih troškova i povećanje konkurentnosti domaćih proizvođača. Jačanje prerađivačkog sektora obuhvata podsticaje za mini-mlekare i lokalne klanice, razvoj zadrugarstva i strategiju izvoza koja bi bila usmerena na jagnjad (Turska), živinu (Ujedinjeni Arapski Emirati i Saudijska Arabija) i mlečne proizvode (Evropska unija).

Institucionalne mere 2025-2030: institucionalne reforme odnose se na organizaciju, zakonodavstvo i javne službe koje oblikuju okvir proizvodnje. Njihova funkcija je da obezbede efikasnu institucionalnu infrastrukturu, smanje transakcione troškove i povećaju poverenje proizvođača u sistem. Genetsko unapređenje podrazumeva jačanje nacionalnih centara za reprodukciju, uvoz visokokvalitetne genetike i digitalnu evidenciju porekla putem „blockchain“ tehnologije. Obuka i savetodavne službe zahtevaju povećanje broja savetodavaca na oko 2.000 do 2030. godine, uz obavezne obuke o biosigurnosti i upravljanju stadima. Reforma veterinarskog sistema uključuje brzu dijagnostiku afričke kuge svinja i drugih bolesti, kao i uvođenje digitalnih pasoša za sve kategorije stoke.

Regionalne ciljne mere 2025-2030: regionalne politike prilagođavaju se specifičnostima pojedinih geografskih područja. U Vojvodini se prioritet daje svinjarstvu i živinarstvu, uz modernizaciju velikih farmi, navodnjavanje stočne hrane i jačanje izvoza. Šumadija i Zapadna Srbija fokusiraju se na govedarstvo i ovčarstvo, uz razvoj mini-mlekara i pogona za proizvodnju sira, kao i podsticaje za stada u brdsko-planinskim krajevima. Južna i Istočna Srbija zahtevaju revitalizaciju kozarstva, ulaganja u lokalne pijace i preradu, kao i razvoj agroturizma zasnovanog na kozjim i ovčijim proizvodima. Beograd, kao urbanizovani region, usmerava se na podršku mikro-farmama, modernizaciju preživelih gazdinstava i razvoj visokokvalitetnih proizvoda poput organskih jaja i kozjeg sira.

Prioritetne intervencije 2025-2030: označavaju urgentne i strateški najvažnije akcije koje se moraju sprovesti u kratkom roku kako bi se sprečio dalji pad proizvodnje. Ključne mere uključuju garantovanje minimalne otkupne cene mleka i stabilan otkup, sprovođenje programa „2000 novih farmi“ (Agrosmart, 2025) kao podsticaja mladima i povratnicima, formiranje nacionalnog fonda za afričku kugu svinja i biosigurnost, reformu sistema subvencija sa fokusom na produktivnost, podsticaje za domaću stočnu hranu, digitalizaciju stočarske proizvodnje kroz institucionalne platforme poput eAgrar (2025), kao i primenu novih tehnologija AL nadzora i blockchain-a (Chen and Tao, 2024; Miličević et al., 2025; Stevanović et al, 2025), koji predstavlja ključnu pretpostavku za održivost sektora, kao i dogovor o minimalnim maržama trgovinskih lanaca za domaće proizvode.

Zaključci

Rezultati pokazuju da je stočarska proizvodnja Srbije u dubokom strukturnom padu, posebno u govedarstvu, kozarstvu i svinjarstvu. Ako se trenutne politike nastave, broj goveda će pasti ispod 600.000 do 2028. godine, a broj svinja ispod 2 miliona do 2030. Kozarstvo se prepolovljuje. Istovremeno, ovčarstvo ostaje jedini stabilan sektor, a živina pokazuje umerenu otpornost. Ipak, ukoliko se sprovedu predložene mere — posebno u domenu subvencija, biosigurnosti, otkupa, genetike i modernizacije — moguće je stabilizovati ključne sektore do 2027. i ostvariti oporavak do 2030. godine. Stočarstvo Srbije poseduje značajan potencijal, ali zahteva hitne, koordinisane i dugoročne javne politike kako bi postalo održivo, produktivno i konkurentno u narednoj deceniji.

Literatura

- Agrosmart. (2025). Država daje po milion dinara za domaće traktore, a za nove farme 3,5 miliona, <https://agrosmart.net/2025/03/07/drzava-daje-po-milion-dinara-za-domace-tractore-a-za-nove-farme-35-miliona/>. Pristupljeno 30. novembra 2025.
- Aleksić, S.B. (2025). "Expo 2027" and the positioning of the Republic of Serbia in the bipolar World. Book of Proceedings 127th esd Belgrade. In: Miladinovic Bogavac, et al. (Eds.): Economic and Social Development in bipolar and multipolar environment, pp. 491-500. https://www.researchgate.net/publication/396358646_EXPO_2027_AND_THE_POSITIONING_OF_THE_REPUBLIC_OF_SERBIA_IN_THE_BIPOLAR_WORLD. Pristupljeno 29. novembra 2025.
- Aleksić, S.B. (2024). Bezbednost i urbani razvoj Surčina – izazovi izgradnje kompleksa "Expo 2027". Urbana bezbednost i urbani razvoj, Zbornik radova sa treće naučne konferencije, Beograd, pp. 107-117. <https://doi.org/10.5937/UBUR24107A>
- Branković Lazić, I., Baltić, M.Ž., Simunović, S., Ćirić, J., Baltić, T., Jovanović, J., Đorđević, V.Ž. (2023). Examination of the volume of meat production and the value of meat imports to Serbia from 2012 to 2021. *Meat Technology*, 64(2): 96–110. <https://doi.org/10.18485/meattech.2023.64.2.96>
- Chen, Z., Tao, Z. (2024). Application of Blockchain Technology in Agricultural Supply Chain Management: Economic Implications and Challenges. *Environment and Social Psychology*, 9(8): 2991. <https://doi.org/10.59429/esp.v9i8.2991>
- Đurić, K., Prodanović, R., Čavlin, M., Lukač Bulatić. (2020). Ekonomske performanse agroindustrije u A.P. Vojvodini. *Oditor*, 6(2): 7-19. <https://doi.org/10.5937/Oditor2002007D>
- eAgrar. (2025). Elektronska platforma za poljoprivredu Republike Srbije. Ministarstvo poljoprivrede, šumarstva i vodoprivrede Republike Srbije, <https://eagrar.gov.rs/>. Pristupljeno 30. novembra 2025.
- Ilić, D., Stamenković, P. (2020). Demografske karakteristike kao faktor turisričke ponude u Južnoj i Istočnoj Srbiji. Conference: Regionalni razvoj i demografski tokovi zemalja jugoistočne Evrope, Univerzitet u Nišu, no 1. decembra 2025.
- Mgaya, J.F. (2019). Application of ARIMA models in forecasting livestock products consumption in Tanzania. *Cogent Food & Agriculture*, 5(1): 1607430. doi/full/10.1080/23311932.2019.1607430
- Milićević, D., Samolovac, Lj., Lukić, M., Milićević, D. (2025). Livestock Sector in Serbia: Challenges, Structural Gaps, and Strategic Pathways Towards Sustainability. *Sustainability*, 17(17): 7751. <https://doi.org/10.3390/su17177751>
- Ministarstvo poljoprivrede, šumarstva i vodoprivrede Republike Srbije. (n.d.). Afrička kuga svinja – aktuelne informacije. <https://www.vet.minpolj.gov.rs>. Pristupljeno 28. novembra 2025.
- Novaković, T., Tomaš Simin, M., Novaković, D., Mutavdžić, B. (2024). Analysis of the Gross Added Value of Agricultural Production in the Republic of Serbia. *Ekonomika poljoprivrede*, 71(4). <https://doi.org/10.59267/ekoPolj24041383N>
- Stevanović, S., Minović, J., Hanić, A., Mitić, P. (2025). Environmental Efficiency of Agricultural Enterprises in Serbia: A Panel Regression Approach. *Agriculture (MDPI)*, 15(20): 2119. <https://doi.org/10.3390/agriculture15202119>
- Shammy, T. (2023). Basic Econometrics (JEEC61). Directorate of Distance and Continuing Education, Manonmaniam Sundaranar Univesrity.
- Škrbić, Z. (2023). Modern trends in livestock production. Proceedinst.14th International symposium. https://listocar.bg.ac.rs/wp-content/uploads/2023/10/Proceedings-2023.pdf?utm_source=chatgpt.com. Pristupljeno 17. decembra 2025.
- Republički zavod za statistiku. 2017-2024. Regioni u Srbiji. Beograd: Republički zavod za statistiku.
- Vukašinović, S., Đukić, D. (2024). Ruralna depopulacija i ruralno stanovanje – izazov savremenih demografskih tokova. XXIX naučni skup "Regionalni razvoj i demografski tokovi zemalja jugoistočne Evrope", 28. jun 2024., Niš, Republika Srbija.
- Zekić, V., Trkulja, G., Tomaš Simin, M., Pihler, I., Milić, D. (2025). Ekonomska obeležja ekstenzivne ovčarske proizvodnje. *Agroekonomika*, 54(106): 23-29.

Quantitative–Qualitative Analysis of Livestock Production in Serbia, 2017–2024, with Projection and Policy Recommendations until 2030

Snežana B. Aleksić

MB University, Faculty of Business and Law, Belgrade, Serbia
Corresponding author: snezanaaleksic3@gmail.com

ABSTRACT

The aim of this paper is to conduct a comprehensive quantitative–qualitative analysis of livestock production in the Republic of Serbia during the period 2017–2024, based on official data from the Statistical Office of the Republic of Serbia. The analysis encompasses trend, comparative, structural, and dynamic approaches, as well as cluster grouping of regions. Based on time series, projections of the number of cattle, pigs, sheep, goats, and poultry until 2030 were derived using linear regression. The qualitative part of the study includes a politico-economic interpretation of the observed trends, identification of key drivers of the decline in livestock numbers, and formulation of public policy recommendations. The results indicate a long-term decline in cattle and pigs, stable growth in sheep, a sharp decrease in goat farming, and volatility in poultry production. The projections point to further deterioration by 2030 unless systemic interventions are introduced, while the proposed measures may contribute to the stabilization and revitalization of livestock production in the coming decade.

KEY WORDS

Livestock production, Quantitative analysis, Structural analysis, Projections, Public policies

Rad primljen: 03.12.2025.
Ispravljen: 17.12.2025.
Prihvaćen: 26.11.2025.
Objavljen: 31.12.2025.