

**UTJECAJ TRETIRANJA SJEMENA PLAZMOM
AKTIVIRANOM VODOM I UVJETA UZGOJA NA SADRŽAJ
MINERALA U PLODOVIMA DVIJU SORTI PAPRIKE
(*Capsicum annuum* L.)**

**INFLUENCE OF SEED TREATMENT WITH PLASMA ACTIVATED
WATER AND GROWING CONDITIONS ON THE MINERAL
CONTENT IN THE FRUITS OF TWO PEPPER VARIETIES
(*Capsicum annuum* L.)**

**Iva Knezović, Jela Ćosić, K. Mirosavljević, Nataša Romanjek Fajdetić,
Slavica Antunović, R. Benković, Teuta Benković-Lačić**

SAŽETAK

Paprika je povrtna kultura iz porodice *Solanaceae* koja potječe iz Meksika i Srednje Amerike, a danas je jedna od najčešće konzumiranih namirnica na svijetu. Bogatstvo vitaminima i mineralima te ostalim korisnim sastojcima čini je visoko vrijednim povrćem. Plodovi paprike dobar su izvor minerala poput magnezija, kalcija, kalija, fosfora i željeza. Visokokvalitetno povrće sve je traženije među potrošačima, a kao potpora njegovu rastu koriste se razna gnojiva. Kao alternativa gnojivu pojavila se obećavajuća i još uvijek nova fizikalna metoda - hladna (netopljinska) plazma, koja ima brojne prednosti u poljoprivredi, poput visoke učinkovitosti u klijanju i dezinfekciji sjemena te sigurnosti za okoliš. U kontaktu vode s plazmom nastaje plazmom aktivirana voda (PAW) koja se zbog svoje reaktivne prirode pojavila kao prikladna tehnologija u poljoprivredi. Cilj rada bio je utvrditi učinak tretiranja sjemena plazmom aktiviranom vodom na sadržaj minerala u plodovima paprike pri različitim uvjetima uzgoja. Sjeme dviju sorti paprike natopljeno je PAW-om i biljke su uzgajane do tehnološki zrelih plodova koji su analizirani pomoću ICP-OES spektrometra. Rezultati pokazuju kako se kod plodova čije je sjeme tretirano PAW-om povećao sadržaj svih minerala (osim natrija kod jedne sorte) u odnosu na kontrolnu skupinu. Prema prosječnim vrijednostima sadržaj kalcija povećao se za 11,86 %, magnezija 9,47 %, kalija 10,18 %, natrija 5,37 %, a fosfora 7,83 %. Osim toga, kod kontrolnih plodova paprike veći sadržaj minerala uglavnom su imale paprike uzgojene na polju, dok je kod plodova čije je sjeme tretirano PAW-om veći sadržaj minerala bio u plasteniku u odnosu na polje (osim kod sadržaja natrija).

Ključne riječi: PAW, polje, plastenik, elementi, paprika

ABSTRACT

Pepper is a vegetable crop from the *Solanaceae* family, which originally comes from Mexico and Central America and is now one of the most widely consumed foods in the world. The richness of vitamins and minerals and other beneficial ingredients make them a high-quality vegetable. Peppers are a good source of minerals such as magnesium, calcium, potassium, phosphorus and iron. High-quality vegetables are increasingly in demand by consumers, and various fertilisers are used to support the growth of vegetables. A promising and still new physical method has emerged as an alternative to fertilisers – cold (non-thermal) plasma, which has numerous advantages in agriculture, such as high efficiency in seed germination and disinfection and environmental safety. When water comes into contact with plasma, plasma-activated water (PAW) is formed, which has emerged as a suitable technology in agriculture due to its reactive properties. The aim of the study was to determine the influence of seed treatment with plasma-activated water on the mineral content of pepper fruits under different growing conditions. The seeds of two pepper varieties were soaked in PAW, and the plants were grown to technologically mature fruits, which were analyzed using an ICP-OES spectrometer. The results show that the fruits whose seeds were treated with PAW had an increased content of all minerals (with the exception of sodium in one variety) compared to the control. According to the average values, the calcium content increased by 11,86%, the magnesium content by 9,47%, the potassium content by 10,18%, the sodium content by 5,37% and the phosphorus content by 7,83%. In the control pepper fruits, the higher mineral content was mainly found in peppers grown in the field, while in the fruits whose seeds were treated with PAW, the mineral content was higher in the greenhouse than in the field (except for sodium content).

Key words: PAW, field, greenhouse, bell pepper, greenhouse, elements, field

UVOD

Paprika (*Capsicum annuum* L.) jedna je od najčešće konzumiranih namirnica na svijetu. Pripada porodici *Solanaceae*, a potječe s područja Meksika i Srednje Amerike. Danas se paprika proizvodi gotovo u svakoj zemlji na svijetu (Kelley i sur., 2009.). U Srednjoj Americi najzastupljenija je proizvodnja sitnih ljutih paprika, dok se u Sjevernoj Americi i Zapadnoj

Europi najviše uzgaja tamno zelena krupna paprika zvonolikog oblika. Paprika je jedna od rijetkih povrtnih kultura kod koje postoji velika raznolikost oblika, veličine, boje i okusa plodova. U Hrvatskoj je najrašireniji uzgoj paprike babure, blijedožute boje zvonolikog oblika (Matotan, 2002.). Prema podacima Državnog zavoda za statistiku, ukupna proizvodnja paprike u Republici Hrvatskoj tijekom 2021. godine bila je 17 062 t, 2022. godine je smanjena na 10 451 t, dok je u 2023. godini pala na 9731 t.

U umjerenom klimatskom pojasu uzgaja se kao jednogodišnja kultura zbog svoje osjetljivosti na mraz, iako je zapravo trajnica koja može preživjeti i dati urod nekoliko godina u tropskim klimatskim uvjetima (Abu-Zahra i sur., 2013.). Paprika je kultura s jako visokim zahtjevima prema toplini. Minimalna temperatura potrebna za klijanje iznosi 11 °C, ali najbrže klijanje i nicanje je na temperaturama od 25 do 30 °C koje su optimalne za rast i razvoj biljke (Matotan, 2002.).

Paprika se ističe izuzetno visokim sadržajem vitamina, alkaloida, pigmenata i hlapljivih ulja što je čini biološki visoko vrijednim povrćem. To je povrtna kultura koja sadrži najviše vitamina C, a značajan je izvor i karotena kojeg jetra pretvara u vitamin A (Matotan, 2002.). Prema Jadczak i sur. (2010.), plodovi paprike dobar su izvor mineralnih spojeva, posebno magnezija, kalcija, kalija, fosfora i željeza. Unos ovih spojeva hranom važan je čimbenik zaštite zdravlja (Ogunlade i sur., 2012.). Djeluje povoljno na rad srca, bubrega i nadbubrežne žlijezde, poboljšava izlučivanje želučane kiseline i slina te pospješuje probavu. Najveća nutritivna vrijednost paprike je kada se koristi svježa, kao salata (Lešić i sur., 2004.).

Najvažniji izvor mineralnih tvari u ljudskoj prehrani su biljke (Vukadinović i Vukadinović, 2011.). Svi minerali koji su tema ovog rada (Ca, Mg, K, Na, P) esencijalni su elementi jer obavljaju niz bioloških funkcija. Kalcij je izrazito bitan u visokoproduktivnoj povrćarskoj proizvodnji (Parađiković i sur., 2004.). Mineral je koji poboljšava integritet stanične stijenke i membrane, regulira sazrijevanje i starenje lišća te stabilizira pektin središnje lamele čime se smanjuje bubrenje i pucanje plodova (Aghili i sur., 2012.; Lešić i sur., 2004.). Ljudima je kalcij neophodan u formiranju i razvoju kostiju (Ogunlade i sur., 2012.). Vrlo bitnu ulogu ima i u regulaciji i djelovanju hormona (Murray i sur., 2011.). Magnezij je element koji ima važnu ulogu u procesu fotosinteze jer je sastavni dio molekule klorofila. Također je važan i za sintezu drugih pigmenata poput karotena i ksantofila. U biljkama je oko 50 % magnezija u slobodnom

obliku te je Mg^{2+} ion vrlo važan elektrolit. Ovaj element utječe na rad više od 300 enzima u ljudskom tijelu te je kofaktor svih enzima uključenih u procese fosforilacije pomoću ATP-a. (Vukadinović i Vukadinović, 2011.). Kalij je dominantan ion u biljci i potreban joj je u velikim količinama (Lešić i sur., 2004.). Ovaj element ima brojne važne regulatorne uloge u razvoju biljaka te povećava prinos i kvalitetu usjeva, otpornost na bolesti i produljuje rok trajanja voća i povrća koje se koristi za ljudsku prehranu. Ima ključnu ulogu u fotosintezi i metabolizmu biljaka te je važan u razgradnji ugljikohidrata koji osiguravaju energiju za rast biljaka. Također povećava otpornost biljaka na sušu i pomaže u smanjenju gubitka vode (Sinha i Khare, 2018.). Neophodan je u radu mišićnog tkiva, a posljedice nedostatka kalija kod ljudi su grčevi, slabljenje srca te slabija aktivnost crijeva (Vukadinović i Vukadinović, 2011.). Natrij se u biljkama nalazi isključivo kao ion, lako se usvaja te znatno utječe na osmotsku vrijednost i hidratiziranost protoplazme. Kod nekih biljaka natrij može na nespecifičan način zamijeniti kalij regulacijom vodnog režima biljaka. No, može ga zamijeniti u ulozi elektrolita, ali ne može zamijeniti fiziološke funkcije kalija u moduliranju rada enzima. U ljudskom tijelu natrij je nezamjenjiv elektrolit. Uz kalij, ključan je u održavanju transmembranskog potencijala i prijenosu živčanih signala. Utječe na topivost drugih minerala u krvi (Vukadinović i Vukadinović, 2011.). Fosfor je bitan element za rast i produktivnost biljaka. Sudjeluje u nizu staničnih procesa poput održavanja membranskih struktura, sinteze biomolekula i stvaranja visokoenergetskih molekula. Pomaže i u diobi stanica, aktivaciji i inaktivaciji enzima te metabolizmu ugljikohidrata. Na razini cijele biljke potiče klijanje sjemena, razvoj korijena, čvrstoću peteljke i stabljike, formiranje cvijeta i sjemena te prinos i kvalitetu usjeva. Stoga je ovaj element potreban u svim fazama, od klijanja do zrelosti (Malhotra i sur., 2018.). Kod ljudi, fosfor je nezamjenjiv u metabolizmu energije i tvari, funkcioniranju enzima, gradi ATP-a, izgradnji nukleinskih kiselina, fosfolipida i fosfoproteina te velikog broja koenzima (Vukadinović i Vukadinović, 2011.).

Svježi i visokokvalitetni poljoprivredni proizvodi s odgovarajućim sadržajem makro i mikroelemenata vrlo su traženi među potrošačima. Za potporu rastu poljoprivrednih kultura koriste se različita organska i anorganska gnojiva. Osim upotrebe gnojiva, koriste se i neke fizikalne metode, a jedna obećavajuća i još uvijek nova fizikalna metoda predstavlja hladnu (netoplinsku) plazmu (Kučerová i sur., 2021.). Plazma se često naziva četvrtim agregatnim stanjem koje se sastoji od pozitivnih i negativnih iona, pobuđenih i neutralnih

atoma, slobodnih radikala, molekula u osnovnom i pobuđenom stanju te UV fotona. Dijeli se na toplinsku (vruću) i netoplinu (hladnu) plazmu (Thirumdas i sur., 2018.). Netoplinu plazmu (NTP) smatra se učinkovitom tehnologijom za primjenu u poljoprivredi. Jedno od najnovijih istraživanja ukazuje na potencijal netoplinke atmosferske plazme na povećanje biomase, rasta i bioaktivnosti listova pelargonije (Mohamed i sur., 2025.). Kada je plazma u dodiru s vodom, reaktivne kisikove (ROS) i dušikove (RNS) vrste otapaju se u vodi i proizvode plazmom aktiviranu vodu (eng. PAW – Plasma Activated Water). Zbog svoje reaktivne prirode pojavila se kao prikladna tehnologija za klijanje i dezinfekciju sjemena te rast biljke. NTP metode obrade imaju mnoge prednosti u poljoprivredi, zbog rada na niskim temperaturama i kratkog vremena obrade, bez štetnog djelovanja na usjeve, hranu, sjeme, ljude i okoliš (Than i sur., 2022.; Kučerová i sur., 2021.).

Cilj ovog rada je utvrditi učinak plazmom aktivirane vode na sadržaj minerala (Ca, Mg, K, Na, P) u plodovima paprike pri različitim uvjetima uzgoja.

MATERIJALI I METODE

Priprema plazmom aktivirane vode (PAW)

U plazma reaktoru koji se temelji na jednoelektrodnom atmosferskom tlačnom mlazu plazme stvaraju se aktivne tvari u plazmom aktiviranoj vodi (eng. PAW – Plasma Activated Water). Mlaz plazme pod atmosferskim tlakom sastoji se od kvarcne cijevi vanjskog promjera 1,5 mm i unutarnjeg promjera 1 mm i bakrene žice promjera 100 μm , umetnute u kapilaru koja služi kao elektroda. Elektroda se napaja valnim oblikom sinusoidnog napona od 28 kHz s maksimalnim naponom od 12 kV (PVM500-2500 Plasma Power Generator, Information Unlimited) koji je odabran na temelju prethodnog rada na optimizaciji (Kutasi i sur., 2021), a isporučena snaga je oko 15 W. Pražnjenje se stvara u plinovitom dušiku (99,996 % čistoće) koji se u kapilaru dovodi pri brzini protoka od 500 cm^3/min . Uzorak od 215 mL u Berzeliusovoj čaši dovodi se u kontakt s mlazom plazme postavljanjem površine tekućine na udaljenost od 5 mm od otvora kapilare, čime se osigurava usporediva proizvodnja H_2O_2 i NO_2^- u plazmom aktiviranoj vodi. Koristi se komercijalno pročišćena voda farmaceutske kvalitete (Pharmacopoeia Europaea, Ph. Eur. 9) s pH vrijednosti 6,5 i vodljivošću 0,98 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Vrijeme tretmana mlazom dušične plazme iznosi 40 minuta. Uzorci aktivirani plazmom analiziraju se neposredno nakon tretmana

te nekoliko puta tijekom skladištenja. Koncentracija NO_2^- , NO_3^- i H_2O_2 , kao i pH vrijednosti uzoraka, mjere se QUANTOFIX test trakama (nitrat/nitrit 500, 10-500 mg/L NO_3^- , 1-80 mg/L NO_2^- , nitrat/nitrit 100, 5-100 mg/L NO_3^- , 0,5-50 mg/L NO_2^- , vodikov peroksid H_2O_2 25, 0,5-25 mg/L, vodikov peroksid H_2O_2 100, 0,5-25 mg/L; pH 2-9). Trake se procjenjuju pomoću QUANTOFIX Relax jediničnog optičkog čitača (proizvođača Macherey-Nagel, GmbH, Düren, Njemačka) koji omogućuje kvantitativnu analizu visoke točnosti. Trake za nitrat/nitrit kalibrirane su otopinama NaNO_2 i NH_4NO_3 , a kalibracija je provedena mjerenjima UV-VIS apsorpcijskom spektroskopijom. Uporaba traka omogućuje praćenje uzorka s vremenskom rezolucijom od jedne minute bez značajne potrošnje uzorka. Pogreška mjerenja postavljena je na manje od 10 %. Dinamika starenja PAW-a ovisi o pH vrijednosti koja se kontrolira dodavanjem koncentracija metalnih iona u vodu (Kutasi i sur., 2019.; Kutasi i sur. 2023.). Ioni magnezija dodani su umetanjem čvrstog komada magnezija mase 5 g neposredno tijekom obrade plazmom te ostavljeni u tekućini jedan sat nakon obrade. Vodljivost PAW-a mjerena je nakon tretmana te tijekom starenja pomoću sonde za vodljivost (Metrohm 914 pH /DO /Conductometer Pt 1000 /B /O). Nakon obrade plazma mlazom, vodljivost uzorka raste na otprilike 27 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Svaki tretman praćen je optičkom emisijskom spektroskopijom (OES). Spektri pokazuju prisutnost NO i N_2 . Koncentracije vodikovog peroksida, nitrata/nitrita i pH mjerene su u intervalima od 10 minuta tijekom tretmana kako bi se osigurala dosljednost ponovljenog tretmana. Tri tretmana PAW-om izvedeni su u volumenima od 215 mL, pomiješani u boci od 2 L i razdvojeni u spremnike od 200 mL za skladištenje i transport. Plazmom aktivirana voda pripremljena je na Institutu za fiziku u Zagrebu.

Postavljanje eksperimenta

Eksperiment je postavljen tijekom ožujka 2021. godine u klima komori te kasnije u plasteniku i na polju pokušališta Sveučilišta u Slavonskom Brodu u Slobodnici (koordinate: 45°09'57"N i 17°57'08"E, nadmorska visina 87 m). Brodsko-posavska županija ima umjereno kontinentalnu klimu s toplim ljetima te umjereno hladnim zimama (Benković-Lačić i sur., 2023.). U istraživanju su korištene dvije sorte paprike (Bibic (Lot: H-22-118/0065, Mađarska) i Bernita (Lot: H-21-118/0167)). Provedeno je tretiranje sjemena kontrolnom (netretiranom) vodom i plazmom aktiviranom vodom te su praćeni uvjeti rasta (otvoreno polje i plastenik). Plazmom aktivirana voda pripremljena je na Institutu za fiziku u Zagrebu te je dostavljena u Slavonski Brod dan prije sjetve povrtnih kultura. Sjemenke ispitivanih sorti natopljene su u PAW-u jedan sat i

zatim posijane u kontejnere (Pöpellmann TEKU (BP3153/60) 53 cm × 31 cm × 5,6 cm) sa 60 sjetvenih mjesta (volumen svakog mjesta 76 mL) ispunjenog supstratom Potgrond P (Klasmann-Deilmann). Sjemenke ispitivanih sorti natopljene su i u netretiranoj (kontrolnoj) vodi i posijane u isto vrijeme. Kontejneri s posijanim sjemenom postavljeni su u kontrolirane uvjete u komori za rast (Memmert ICH260L) s fotoperiodom od 16/8 sati, temperaturom 22/18°C (dan/noć) i relativnom vlagom od 60 %. Nakon što su presadnice dosegle potrebnu fazu rasta, presađene su u posude (Pöpellmann TEKU VTG 9) 9 cm × 6,8 cm (0,27 L). Za presađivanje je korišten ProLine Herb supstrat (Rp No 693), pogodan za ekološku proizvodnju paprike u malim posudama uz dodatak organskog gnojiva Stallatico Pellettato (0,18-0,23 kg/ha). Biljke su testirane u različitim uvjetima uzgoja. Polovina biljaka svake sorte paprika, čije je sjeme tretirano PAW-om postavljena je u plasteniku, a druga polovina na otvorenom polju. Kontrolna skupina također je uzgajana u plasteniku i na polju. Plastenik nije grijan niti hlađen, već je prema potrebi danju otvaran, a noću zatvaran. Temperature su mjerene dnevno, a iznosile su od 10 °C noću do 23 °C danju. Biljke su zalijevane po potrebi, u skladu s oborinama i specifičnostima pokusa na otvorenom polju. Nakon što su plodovi paprike dosegli komercijalnu zrelost, ubrani su 7. srpnja 2021. godine te su po četiri ploda od svake sorte i svakog tretmana (KU – kontrolne biljke uzgojene u plasteniku, KV – kontrolne biljke uzgojene u polju, PU – biljke tretirane plazmom aktiviranom vodom uzgojene u plasteniku i PV – biljke tretirane plazmom aktiviranom vodom uzgojene u polju) poslani na analizu.

Mjerenje sadržaja makroelemenata

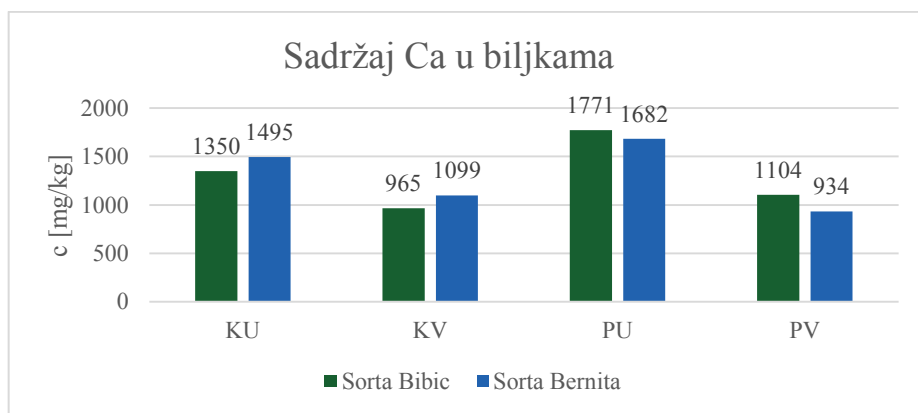
Mjerenje je provedeno na Fakultetu agrobiotehničkih znanosti u Osijeku. Uzorci paprike digestirani su u mikrovalnoj pećnici CEM Mars 6. Odvagano je 0,5 g uzorka na 50 ml te pomiješano sa 6 ml 68 %-tne HNO₃ (Fisher) + 2 ml H₂O₂ (Fisher). Potom je izvršena analiza na PerkinElmer Optima 2100 DV ICP-OES spektrometru.

REZULTATI I RASPRAVA

U ovom istraživanju promatran je učinak plazmom aktivirane vode na sadržaj minerala u plodovima paprike. Grafikoni prikazuju sadržaj minerala izražen u mg/kg suhe tvari (ST) u plodovima dviju sorata paprike ovisno o uvjetima uzgoja i tretiranju sjemena.

Grafikon 1. prikazuje sadržaj kalcija u plodovima paprike. Najveći sadržaj kalcija u obje sorte identificiran je kod biljaka uzgojenih u plasteniku, čije je sjeme tretirano PAW-om. Najmanji sadržaj kalcija (934 mg/kg ST) zabilježen je u plodovima sorte Bernita uzgojenima na polju i tretiranima PAW-om, dok je najveći sadržaj kalcija (1771 mg/kg ST) utvrđen u plodovima sorte Bibic uzgojenima u plasteniku i tretiranima PAW-om. Usporedive količine (949 - 1679 mg/kg ST) utvrdili su Guilherme i sur. (2020.) te Zaki i sur. (2013.) (prosječno oko 1131 mg/kg ST). Prema Jadczak i sur. (2010.), sadržaj kalcija u paprikama kreće se između 2330 i 2620 mg/kg suhe tvari, dok su Buczkowska i Michałojć (2012.) izvijestile da je sadržaj kalcija 390-580 mg/kg suhe tvari.

Sadržaj kalcija veći je u obje sorte i obje vrste tretiranja sjemena (kontrola i PAW) kod biljaka uzgojenih u plasteniku u odnosu na biljke uzgojene na polju. Buczkowska i Michałojć (2012.) također su utvrdile nešto veći sadržaj kalcija u plodovima paprike uzgojenima u plasteniku, dok su Aghili i sur. (2012.) zabilježili bolje rezultate kod paprika uzgojenih u polju.

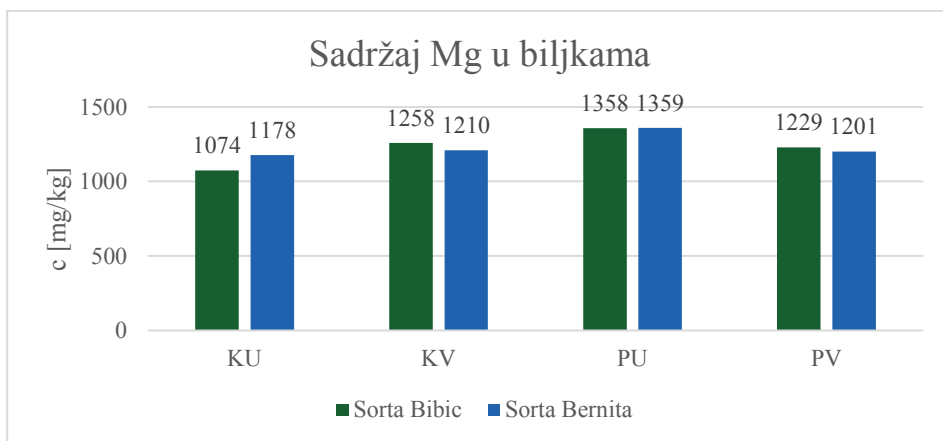


Grafikon 1. Sadržaj kalcija u plodovima dviju sorti paprike: kontrolnih uzgojenih u plasteniku (KU), kontrolnih uzgojenih u polju (KV), paprika uzgojenih u plasteniku čije je sjeme tretirano PAW-om (PU) i paprika uzgajanih na polju čije je sjeme tretirano PAW-om (PV)

Graph 1 Calcium content in the fruits of two pepper varieties: control in the greenhouse (KU), control in the field (KV), pepper in the greenhouse whose seeds were treated with PAW (PU) and pepper in the field whose seeds were treated with PAW (PV)

Sadržaj magnezija u plodovima paprike prikazan je u grafikonu 2. U obje sorte, kod paprika tretiranih PAW-om i uzgojenih u plasteniku utvrđen je najviši sadržaj magnezija (sorta Bibic 1358 mg/kg ST; sorta Bernita 1359 mg/kg ST). Najmanji sadržaj magnezija (1074 mg/kg ST) utvrđen je kod kontrolnih biljaka sorte Bibic uzgojenih u plasteniku. Usporedive količine magnezija u paprici (750-1250 mg/kg ST) utvrdili su Jadcak i sur. (2010.), Martínez i sur. (2007.) (1200-1600 mg/kg ST) te Zaki i sur. (2013.) (prosječno 1387 mg/kg ST), dok se prema Buczkowska i Michałojć (2012.) sadržaj magnezija kreće od 700 do 970 mg/kg ST.

Kontrolne biljke obje sorte uzgojene na polju imaju nešto veći sadržaj magnezija u odnosu na one uzgojene u plasteniku, dok je kod biljaka čije je sjeme tretirano PAW-om sadržaj magnezija veći u plasteniku. Aghili i sur. (2012.) utvrdili su veći sadržaj magnezija kod biljaka koje su uzgojene na otvorenom polju, dok su Buczkowska i Michałojć (2012.) zabilježile veći sadržaj magnezija kod biljaka uzgojenih u plasteniku.

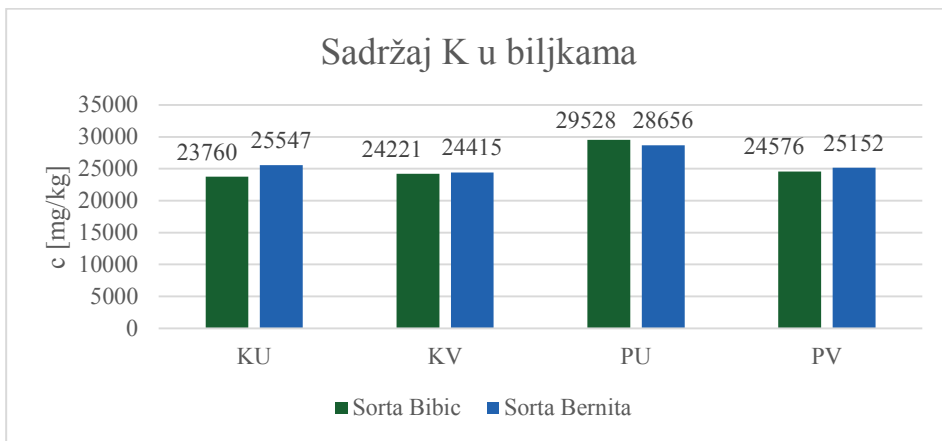


Grafikon 2. Sadržaj magnezija u plodovima dviju sorti paprike: kontrolnih uzgojenih u plasteniku (KU), kontrolnih uzgojenih u polju (KV), paprika uzgojenih u plasteniku čije je sjeme tretirano PAW-om (PU) i paprika uzgajanih na polju čije je sjeme tretirano PAW-om (PV)

Graph 2 Magnesium content in the fruits of two pepper varieties: control in the greenhouse (KU), control in the field (KV), pepper in the greenhouse whose seeds were treated with PAW (PU) and pepper in the field whose seeds were treated with PAW (PV)

U grafikonu 3. prikazan je sadržaj kalija u plodovima paprike. Rezultati pokazuju kako u obje sorte biljke uzgajane u plasteniku i tretirane PAW-om imaju najveći sadržaj kalija (sorta Bibic 29 528 mg/kg ST; sorta Bernita 28 656 mg/kg ST). Najmanji sadržaj kalija utvrđen je kod kontrolnih biljaka sorte Bibic uzgojenih u plasteniku (23 760 mg/kg ST), dok najveći sadržaj pokazuju biljke sorte Bibic uzgojene u plasteniku čije je sjeme tretirano PAW-om (29528 mg/kg ST). Slične rezultate utvrdili su Buczkowska i Michałojć (2012.) (20 200-26 870 mg/kg ST), Zaki i sur. (2013.) (prosječno 23 877 mg/kg ST), kao i Buczkowska i sur. (2015) (20 300-27 300 mg/kg ST), dok su Jadcak i sur. (2010.) identificirali nešto niže vrijednosti (19 240-23 220 mg/kg ST). Martínez i sur. (2007.) utvrdili su vrijednosti od 27 000 do 31 200 mg/kg ST koje su usporedive s vrijednostima izmjenjenim na plodovima uzgajanim u plasteniku čije je sjeme tretirano PAW-om.

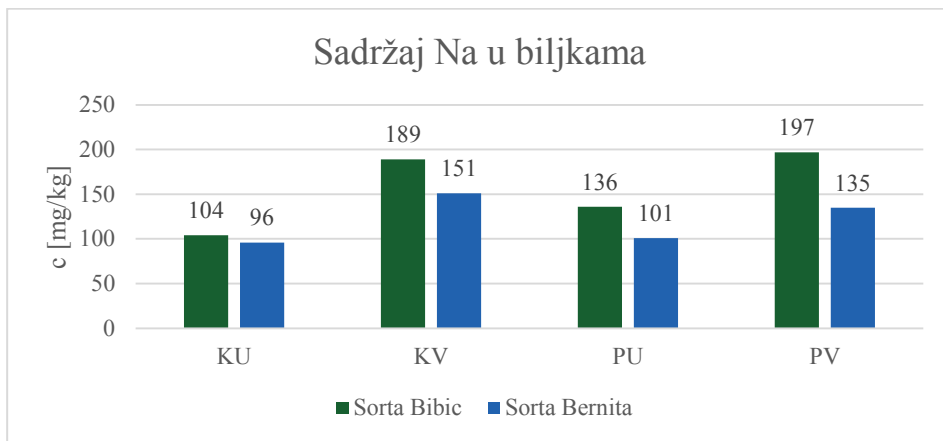
Kod sorte Bibic, kontrolne biljke uzgojene na polju imaju nešto veći sadržaj kalija u odnosu na one u plasteniku, dok kod PAW tretmana biljke iz plastenika imaju značajno veći sadržaj kalija u odnosu na one s polja. Kod sorte Bernita veći sadržaj kalija imaju biljke uzgojene u plasteniku u oba načina tretiranja sjemena. Rezultate usporedive sa sortom Bernita utvrdili su Buczkowska i Michałojć (2012.) dok su Aghili i sur. (2012.) utvrdili veći sadržaj kalija na biljkama u polju.



Grafikon 3. Sadržaj kalija u plodovima dviju sorti paprike: kontrolnih uzgojenih u plasteniku (KU), kontrolnih uzgojenih u polju (KV), paprika uzgojenih u plasteniku čije je sjeme tretirano PAW-om (PU) i paprika uzgajanih na polju čije je sjeme tretirano PAW-om (PV)

Graph 3 Potassium content in the fruits of two pepper varieties: control in the greenhouse (KU), control in the field (KV), pepper in the greenhouse whose seeds were treated with PAW (PU) and pepper in the field whose seeds were treated with PAW (PV)

Grafikon 4. prikazuje sadržaj natrija u plodovima paprike. Prema Jadczak i sur. (2010.) sadržaj natrija kreće se između 170 i 250 mg/kg ST. Rezultati prikazani u grafikonu 4. pokazuju da najveći sadržaj natrija imaju paprike sorte Bibic tretirane PAW-om i uzgojene u polju (197 mg/kg ST). Kod sorte Bernita najveći sadržaj natrija utvrđen je kod kontrolnih biljaka uzgojenih na otvorenom (151 mg/kg ST). U obje sorte i obje vrste tretiranja sjemena (kontrola i PAW) sadržaj natrija veći kod uzgoja na otvorenom u odnosu na uzgoj u zaštićenim uvjetima (plasteniku). Najmanji sadržaj natrija utvrđen je kod kontrolnih biljaka sorte Bernita uzgojenih u plasteniku (96 mg/kg ST). Usporedive rezultate (130-180 mg/kg ST) utvrdili su i Martínez i sur. (2007.).

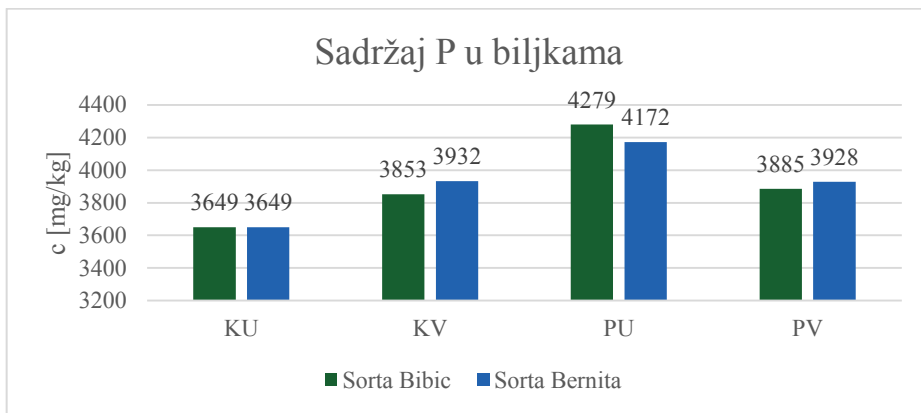


Grafikon 4. Sadržaj natrija u plodovima dviju sorti paprike: kontrolnih uzgojenih u plasteniku (KU), kontrolnih uzgojenih u polju (KV), paprika uzgojenih u plasteniku čije je sjeme tretirano PAW-om (PU) i paprika uzgajanih na polju čije je sjeme tretirano PAW-om (PV)

Graph 4 Sodium content in the fruits of two pepper varieties: control in the greenhouse (KU), control in the field (KV), pepper in the greenhouse whose seeds were treated with PAW (PU) and pepper in the field whose seeds were treated with PAW (PV)

Sadržaj fosfora u plodovima paprike prikazan je u grafikonu 5. U obje sorte paprika najveći sadržaj fosfora utvrđen je kod biljaka uzgajanih u plasteniku čije je sjeme tretirano PAW-om (sorta Bibic 4279 mg/kg ST; sorta Bernita 4179 mg/kg ST). Najmanji sadržaj fosfora u obje sorte utvrđen je kod kontrolnih biljaka uzgojenih u plasteniku (3649 mg/kg ST). Slične vrijednosti (3020-3600 mg/kg ST) identificirali su Jadcak i sur. (2010.) te Zaki i sur. (2013.) (prosječno 4080 mg/kg ST), dok su nešto niže vrijednosti utvrdili Buczkowska i Michałojć (2011.) (1900-2200 mg/kg ST), Buczkowska i sur. (2015.) (2220-2660 mg/kg ST) te Guilherme i sur. (2020.) (1762-2325 mg/kg ST).

U kontrolnoj skupini obje sorte paprike, veći je sadržaj fosfora u biljkama uzgojenim na polju u odnosu na one u plasteniku, dok je kod biljaka tretiranih PAW-om uzgoj u zaštićenim uvjetima dao veći sadržaj fosfora. Uzgoj u plasteniku pokazuje veći sadržaj fosfora i kod Aghili i sur. (2012.) te Buczkowska i i Michałojć (2011.).



Grafikon 5. Sadržaj fosfora u plodovima dviju sorti paprike: kontrolnih uzgojenih u plasteniku (KU), kontrolnih uzgojenih u polju (KV), paprika uzgojenih u plasteniku čije je sjeme tretirano PAW-om (PU) i paprika uzgajanih na polju čije je sjeme tretirano PAW-om (PV)

Graph 5 Phosphorus content in the fruits of two pepper varieties: control in the greenhouse (KU), control in the field (KV), pepper in the greenhouse whose seeds were treated with PAW (PU) and pepper in the field whose seeds were treated with PAW (PV)

Brojna istraživanja ukazuju na činjenicu da je plazmom aktivirana voda učinkovita u povećanju stope klijavosti te rasta i prinosa samih biljaka (Kučerová i sur., 2019.; Japundžić-Palenkić i sur., 2022.; Guragain i sur., 2023.; Chalise i sur., 2024.). Kuzin i sur. (2024.) istraživali su utjecaj dviju vrsta plazmom aktivirane vode na usvajanje minerala (posebno kalcija i mikroelemenata). Rezultati su pokazali da PAW značajno poboljšava apsorpciju kalcija i mikroelemenata, osobito kad se koristi s folijarnim gnojivima. Trenutačno je dostupno vrlo malo istraživanja koja kvantitativno analiziraju sadržaj minerala u biljkama nakon tretmana plazmom aktiviranom vodom.

Paprika je jedna od najčešćih kultura koje se uzgajaju u plasticima zbog duge vegetacije te zbog *povoljne* mikroklimе za rast. Budući da je toplisezonsko povrće, niska temperatura predstavlja jedan od najvažnijih abiotičkih čimbenika koji ograničavaju optimalnu proizvodnju (Kurtović, 2008.; Japundžić-Palenkić i sur., 2022.). Ovo istraživanje ukazuje da bi plazmom aktivirana voda mogla biti korisna tehnika za uzgoj paprike u plasticima u smislu poboljšanja nutritivne kvalitete plodova.

ZAKLJUČAK

U ovom je istraživanju ispitivan utjecaj vode aktivirane plazmom na sadržaj minerala (Ca, Mg, K, Na, i P) u plodovima dviju sorata paprike pri različitim uvjetima uzgoja. Rezultati pokazuju kako je najveći sadržaj svih minerala (Ca, Mg, K, Na i P), osim natrija kod sorte Bernita, utvrđen u plodovima paprika čije je sjeme bilo tretirano vodom aktiviranom plazmom, a koje su uzgojene u zaštićenim uvjetima, tj. u plasteniku. Sadržaj natrija kod sorte Bibic također je najveći u plodovima paprika čije je sjeme tretirano PAW-om, ali koje su uzgojene na polju. Prema prosječnim vrijednostima, sadržaj kalcija povećao se za 11,86%, kalija za 10,18%, magnezija za 9,47%, fosfora za 7,83%, a natrija za 5,37%.

Osim toga, može se zaključiti i da uvjeti uzgoja imaju ulogu u sadržaju nutritivnog statusa paprika. Sadržaj kalcija kod kontrole u obje sorte bio je veći u plodovima uzgojenim u plasteniku u odnosu na one uzgojene na otvorenom polju, te je isto tako i kod biljaka čije je sjeme bilo tretirano vodom aktiviranom plazmom. U slučaju magnezija, kalija (osim sorte Bernita) i fosfora, kontrolne biljke u obje sorte uzgojene na polju imale su veći sadržaj makroelemenata u odnosu na one iz plastenika, dok kod biljaka čije je sjeme tretirano PAW-om veći sadržaj makroelemenata imaju one uzgojene u plasteniku. Sadržaj natrija u obje sorte bio je veći u vanjskim uvjetima u oba uvjeta uzgoja.

LITERATURA

1. Abu-Zahra, T.R., Ta'any, R.A., Tahboub, A.B., Abu-Baker, S.M. (2013.): Influence of Agricultural Practices on Soil Properties and Fruit Nutrient Contents of Bell Pepper. *Biosciences Biotechnology Research Asia*. 10(2), 489-498.
2. Aghili, F., Khoshgoftarmanesh, A.H., Afyuni, M., Mobli, M. (2012.): Mineral and Ascorbic Acid Concentrations of Greenhouse- and Field-Grown Vegetables: Implications for Human Health. *International Journal of Vegetable Science*. 18(1), 64-77.
3. Benković-Lačić, T., Orehovec, I., Miroslavljević, K., Benković, R., Čavar Zeljković, S., Štefelová, N., Tarkowski, P., Salopek-Sondi, B. (2023.): Effect of Drying Methods on Chemical Profile of Chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) Flowers. *Sustainability*. 15, 15373.
4. Buczkowska, H., Michałojć, Z. (2012.): Comparison of qualitative traits, biological value, chemical compounds of sweet pepper fruit. *Journal of Elementology*. 367-377.

5. Buczkowska, H., Michałojć, Z., Konopińska, J., Kowalik, P. (2015.): Content of macro- and microelements in sweet pepper fruits depending on foliar feeding with calcium. *Journal of Elementology*. 20(2), 261-272.
6. Chalise, R., Tamang, A., Kattel, A., Sharma, S., Basnet, S., Khanal, R. (2024.): Impact of plasma-activated water on germination, growth, and production of green leafy vegetables. *AIP Advances*. 14, 065318.
7. Državni zavod za statistiku (2023.): Proizvodnja povrća, voća i grožđa u 2022. – privremeni podaci. URL: <https://podaci.dzs.hr/2022/hr/29338> [29.10.2024.]
8. Državni zavod za statistiku (2024.): Proizvodnja povrća, voća i grožđa u 2023. – privremeni podaci. URL: <https://podaci.dzs.hr/2023/hr/58459> [29.10.2024.]
9. Guilherme, R., Reboredo, F., Guerra, M., Ressurreição, S., Alvarenga, N. (2020.): Elemental Composition and Some Nutritional Parameters of Sweet Pepper from Organic and Conventional Agriculture. *Plants*. 9, 863.
10. Guragain, R.P., Baniya, H.B., Shrestha, B., Guragain, D.P., Subedi, D.P. (2023.): Improvements in Germination and Growth of Sprouts Irrigated Using Plasma Activated Water (PAW). *Water*. 15(4), 744.
11. Jadcza, D., Grzeszczuk, M., Kosecka, D. (2010.): Quality characteristics and content of mineral compounds in fruit of some cultivars of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Elementology*. 15(3), 509-515.
12. Japundžić-Palenkić, B., Benković, R., Benković-Lačić, T., Antunović, S., Japundžić, M., Romanjek Fajdetic, N., Mirosavljević, K. (2022.): Pepper Growing Modified by Plasma Activated Water and Growth Conditions. *Sustainability*. 14, 15967.
13. Kelley, W.T., Boyhan, G.E., Harrison, K.A., Granberry, D.M., Langston, D.B., Sparks, A.N., Culpepper, S., Hurst, W.C., Fonsag, E.G. (2009.): Commercial pepper production handbook. University of Georgia.
14. Kučerová, K., Henselová, M., Slováková, L., Bačovinová, M., Hensel, K. (2021.): Effect of Plasma Activated Water, Hydrogen Peroxide, and Nitrates on Lettuce Growth and Its Physiological Parameters. *Applied Sciences*. 11(5), 1985.
15. Kučerová, K., Henselová, M., Slováková, L., Hensel, K. (2019.): Effects of plasma activated water on wheat: Germination, growth parameters, photosynthetic pigments, soluble protein content, and antioxidant enzymes activity. *Plasma Processes and Polymers*. 16(3), 1800131.
16. Kurtović, O. (2008.): Proizvodnja u plastenicima. Penn. Tuzla.
17. Kutasi, K., Bencs, L., Tóth, Z., Milošević, S. (2023.): The role of metals in the deposition of long-lived reactive oxygen and nitrogen species into the plasma-activated liquids. *Plasma Processes and Polymers*. 20(3), 2200143.

18. Kutasi, K., Krstulović, N., Jurov, A., Salamon, K., Popović, D., Milošević, S. (2021.): Controlling: the composition of plasma-activated water by Cu ions. *Plasma Sources Science and Technology*. 30(4), 045015.
19. Kutasi, K., Popović, D., Krstulović, N., Milošević, S. (2019.): Tuning the composition of plasma-activated water by a surface-wave microwave discharge and a kHz plasma jet. *Plasma Sources Science and Technology*. 28, 095010.
20. Kuzin, A.I., Kashirskaya, N.Y., Solovchenko, A.E., Kochkina, A.M., Stepanstova, L.V., Krasin, V.N., Konchekov, E.M., Lukanin, V.I., Sergeichev, K.F., Gudkova, V.V., Khort, D.O., Smirnov, I.G. (2024.): Influence of Plasma-Activated Water on Foliar and Fruit Micronutrient Content and Plant Protection Efficiency. *Horticulturae*. 10(1), 55.
21. Lešić, R., Borošić, J., Buturac, I., Herak-Čustić, M., Poljak, M., Romić, D. (2004.): Povrćarstvo. 2. dopunjeno izdanje. Zrinski d.d. Čakovec.
22. Malhotra, H., Vandana, Sharma, S., Pandey, R. (2018.): Phosphorus Nutrition: Plant Growth in Response to Deficiency and Excess. *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance*. 7, 171-190.
23. Martínez, S., Curros, A., Bermúdez, J., Carballo, J., Franco, I. (2007.): The composition of Arnoia peppers (*Capsicum annuum* L.) at different stages of maturity. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*. 58(2), 150-161.
24. Matotan, Z. (2002.): Proizvodnja paprike. Hrvatski zadružni savez. Zagreb.
25. Mohamed, H.S., Shehata, D., Mahmoud, A.M., Khalaf, M.H., Okla, M.K., El-Tayeb, M.A., Alwasel, Y.A., Alaraidh, I.A., El-Keblawy, A., Josko, I., Sheteiwy, M.S. (2025.): Non-thermal atmospheric plasma treatments enhance the growth, photosynthesis, metabolite accumulation, and nutritional value of geranium (*Pelargonium graveolens* L'herit) leaves. *BMC Plant Biology*. 25:109.
26. Murray, R.K., Bender, D.A., Botham, K.M., Kennelly, P.J., Rodwell, V.W., Weil, P.A. (2011.): Harperova ilustrirana biokemija. 28. izdanje. Medicinska naklada. Zagreb.
27. Ogunlade, I., Alebiosu, A.A., Osasona, A.I. (2012.): Proximate, mineral composition, antioxidant activity, and total phenolic content of some pepper varieties (*Capsicum species*). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. 6(5), 2221-2227.
28. Parađiković, N., Lončarić, Z., Bertić, B., Vukadinović, V. (2004.): Influence of Ca-foliar application on yield and quality of sweet pepper in glasshouse conditions. *Poljoprivreda*. 10(2), 24-27.
29. Sinha, K., Khare, V. (2018.): Role of potassium in plants. *Indian Farmer*. 5(02), 181-186.

30. Than, H.A.Q., Pham, T.H., Nguyen, D.K.V., Pham, T.H., Khacef, A. (2022.): Non-thermal Plasma Activated Water for Increasing Germination and Plant Growth of *Lactuca sativa* L. Plasma Chemistry and Plasma Processing. 42, 73-89.
31. Thirumdas, R., Kothakota, A., Annapure, U., Siliveru, K., Blundell, R., Gatt, R., Valdramidis, V.P. (2018.): Plasma activated water (PAW): Chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture. Trends in Food Science & Technology. 77, 21-31.
32. Vukadinović, V., Vukadinović, V. (2011.): Ishrana bilja. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Poljoprivredni fakultet u Osijeku.

Adrese autora – Author's addresses:

Iva Knezović, univ. mag. nutr.
e-mail: iknezovic@unisb.hr,
Jela Ćosić, univ. mag. chem.
e-mail: jcasic2@unisb.hr
izv. prof. dr. sc. Krunoslav Mirosavljević
e-mail: kmirosavljevic@unisb.hr
doc. dr. sc. Nataša Romanjek Fajdetić
e-mail: nrfajdetic@unisb.hr
doc. dr. sc. Slavica Antunović
e-mail: santunovic@unisb.hr
doc. dr. sc. Robert Benković
e-mail: rbenkovic@unisb.hr
doc. dr. sc. Teuta Benković-Lačić
e-mail: tblacic@unisb.hr

Primljeno – received:

10.03.2025.

Revidirano – revised:

25.06.2025.

Prihvaćeno – accepted:

30.06.2025.

Sveučilište u Slavonskom Brodu, Biotehnički odjel
Ulica 108. brigade ZNG 20,
35000 Slavonski Brod

