

ORGANSKI MINERALI U HRANIDBI KOKOŠI NESILICA

ORGANIC MINERALS IN THE FEEDING OF LAYING HENS

D. Bedeković, Katarina Buha, Jasna Pintar, G. Kiš, I. Širić, Z. Janječić

Pregledni znanstveni članak - Review scientific paper
 Primljeno - Received: 11. srpanj - July 2025
 Revidirano - Revised: 21. travanj - April 2026
 Prihvaćeno - Accepted: 12. svibanj - May 2026
<https://doi.org/10.33128/k.68.1.5>
 UDK 636.52/.58.087.7

SAŽETAK

Proizvodnja konzumnih jaja bazira se na uzgoju hibridnih kokoši nesilica čiju se proizvodnju po kljunu neprestano pokušava povećati. Takav proizvodni pritisak negativno djeluje na zdravlje kokoši i kvalitetu proizvoda, prije svega kvalitetu ljuske jaja. Otprilike 10 – 15 % svih gubitaka u proizvodnji izravna je posljedica niske kvalitete ljuske, što predstavlja velik ekonomski gubitak za proizvođače. Stoga najviše pažnje treba posvetiti poboljšanju ljuske jaja kako na području genetike, tako i hranidbe kokoši. Donedavno je fokus bio na poboljšanoj hranidbi kalcijem, fosforom i vitaminom D₃, no posljednjih godina sve se više pažnje posvećuje segmentu korištenja minerala u tragovima (Zn, Mn, Cu, Fe, Se), koji su izravno uključeni u stvaranje ljuske jaja. U hranidbi kokoši nesilica uglavnom se koriste minerali u tragovima u anorganskom obliku kao što su oksidi, karbonati, sulfati i fosfati, koji u pravilu imaju relativno slabu apsorpciju iz probavnog trakta. Uzgajivači pokušavaju nadoknaditi povećane potrebe dajući veće količine anorganskih minerala u krmne smjese. No, to često ima za posljedicu veliku količinu izlučenih minerala putem izmeta i negativan utjecaj na okoliš. Kao rješenje nameću se organski minerali, odnosno minerali povezani s organskim tvarima, najčešće aminokiselinama, peptidima, ugljikohidratima ili kvascima. U takvom obliku imaju bolje iskorištavanje, što omogućuje dodavanje manje količine minerala u krmne smjese, uz pozitivan učinak na kvalitetu ljuske i očuvanje okoliša. Stoga je cilj ovog rada opisati prednosti upotrebe minerala u tragovima organskog podrijetla u hranidbi kokoši nesilica.

Ključne riječi: kokoši nesilice, kvaliteta ljuske jaja, organski minerali

UVOD

Suvremena proizvodnja konzumnih jaja bazira se na uzgoju modernih, takozvanih *long life* hibridnih kokoši nesilica, koje u jednom proizvodnom ciklusu, do dobi od oko 100 tjedana, ostvaruju proizvodnju od preko 480 jaja. U usporedbi s hibridnim nesilicama koje su se donedavno koristile

u proizvodnji konzumnih kokošjih jaja, to je povećanje proizvodnje od gotovo 45 %. Tako velika proizvodnja po kljunu predstavlja velik izazov za nutricioniste, osobito u pogledu zadovoljenja uzdržanih i proizvodnih potreba životinja, a posebno potreba za mineralima, odnosno očuvanja kvalitete ljuske jaja i integriteta kostiju, napose u razdoblju pred kraj proizvodnog ciklusa. Dosadašnja istraživanja većinom

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Bedeković, e-mail: dbedekovic@agr.hr, (ORCID: 0000-0002-7418-3968); Katarina Buha, e-mail: katarina.buha0105@gmail.com; prof. dr. sc. Jasna Pintar, e-mail: jpintar@agr.hr, (ORCID: 0000-0002-2175-1917); prof. dr. sc. Goran Kiš, e-mail: kis@agr.hr, (ORCID: 0000-0001-5781-0264); izv. prof. dr. sc. Ivan Širić, e-mail: isiric@agr.hr, (ORCID: 0000-0003-0560-181X); prof. dr. sc. Zlatko Janječić, e-mail: zjanjecic@agr.hr, (ORCID: 0000-0001-9161-024X); Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet, Svetošimunska cesta 25, 10000 Zagreb, Hrvatska

su bila usmjerena na zadovoljenje potreba za kalcijem (Ca), fosforom (P) i vitaminom D₃ (Świątkiewicz i sur., 2015.). Poznato je da je za formiranje ljuske jednog kokošjeg jajeta prosječne mase 65 grama potrebno oko 2,2 grama Ca, koji mora biti dostupan u cirkulaciji tijekom noćnog odmora, kada je stvaranje ljuske najintenzivnije. Sukladno tome, najnovije preporuke uključuju dostupnost većeg dijela dnevnog obroka (60% obroka) u poslijepodnevnom satima, uvođenje ponoćnog hranjenja te korištenje mineralnih krmiva veličina čestica 2 – 4 mm i slabije topivosti. Unatoč tome, hranidbom se uspijeva namiriti do 2/3 dnevnih potreba za Ca, dok se 1/3 osigurava mobilizacijom Ca iz medularnih kostiju. Najnovija istraživanja u ovom području sve više prepoznaju važnost mikrominerala (minerala u tragovima) kao ključnih čimbenika u očuvanju kvalitete ljuske i zdravlja kostiju, prema kraju proizvodnog ciklusa. Istraživanja ukazuju da su organski izvori minerala također učinkoviti te da uz određene prednosti mogu zamijeniti anorganske oblike minerala u hrani za perad (Al-Bayati i sur., 2025.; Atmaja i sur., 2025.; Mojaveriyan i sur. 2025.; Sarker i sur., 2025.; Zurak i sur., 2025.). Glavna prednost na koju se većina istraživača osvrnula jest mogućnost primjene nižih razina minerala u organskom obliku negoli u anorganskom, što može dodatno smanjiti izlučivanje neapsorbiranih minerala kroz feces peradi te time, osim na fiziološke, ukazuje i na ekološke prednosti (Świątkiewicz i sur., 2014.). Stoga je cilj ovog rada pregledom literaturnih navoda opisati učinkovitost upotrebe minerala u tragovima organskog podrijetla u hranidbi kokoši nesilica.

MINERALNE TVARI

Proizvodni i reproduktivni maksimum suvremenih pasmina peradi moguće je postići jedino optimalnim zadovoljenjem kvalitativnih i kvantitativnih esencijalnih hranjivih tvari, čija je svrha da se, prolazeći kroz probavni sustav, razgrade do kemijski jednostavnijih tvari, pogodnih za resorpciju u organizmu (Domaćinović i sur., 2015.). Minerali se, iako potrebni u vrlo malim količinama, svejedno ubrajaju u esencijalne mikronutrijente, imaju ključnu ulogu u mnogim biološkim procesima te su nužni za pravilno funkcioniranje organizma, a kao takvi prisutni su u tlu, vodi i hrani. Imaju brojne funkcije u životinjskom organizmu od velike važnosti, poput strukturne funkcije (formiranje kostiju i zubi), metaboličke funkcije

(potiču sintezu i enzimske reakcije u metaboličkim procesima), fiziološke funkcije (apsorpcija hranjivih tvari), prijenosa živčanih i mišićnih funkcija (prijenos živčanih signala i mišićne kontrakcije i opuštanja), održavanja acido-bazne ravnoteže, hormonske regulacije, sudjelovanja u imunološkom odgovoru i reprodukciji, krvotvorne funkcije te sinteze proteina i enzima. Minerale dijelimo na makroelemente, kao primarno strukturne tvari, i mikroelemente, s primarnom funkcijom katalizatora enzimskih staničnih sustava s jako raširenim rasponom funkcija (Vieira, 2008.). Stoga makrominerali poput kalcija, fosfora i magnezija imaju ključnu ulogu u održavanju strukturne i funkcionalne ravnoteže tijela te ih je u organizam potrebno unositi u količini iznad 100 mg dnevno. Mikroelementi poput bakra, selen, mangana, cinka, iako prisutni u znatno manjim koncentracijama, esencijalni su za brojne enzimske, imunološke i metaboličke procese koji utječu i na homeostazu makrominerala. Time valja zaključiti da optimalna biološka funkcija organizma životinja zahtijeva uravnotežen unos obiju skupina minerala. U životinjskim se tkivima mineralne tvari nalaze u različitim koncentracijama i u relativno malim količinama, svega 3 – 5 % ukupne tjelesne mase (Domaćinović, 2006.). Bez obzira na male koncentracije minerala u organizmu, nedovoljan, a isto tako i pretjeran unos mineralnih tvari, može nepovoljno djelovati na organizam ili čak uzrokovati toksičnost ako su životinje tijekom duljeg razdoblja izložene tim uvjetima ili unose prevelike količine minerala (Vieira, 2008.). Stoga je važno hranidbom izbalansirati potrebne minerale koji sudjeluju u brojnim funkcijama. S obzirom na različite interakcije između mineralnih tvari, deficit ili suficit jednog redovito utječe i na resorpciju drugih minerala u organizmu (Mihajlović, 2017.).

ORGANSKI MINERALI

Izvor minerala od presudne je važnosti. Osim što se razlikuju po tipu, organski i anorganski minerali također se razlikuju po mogućnosti apsorpcije u organizmu životinje (Byrne i Murphy, 2022.). S obzirom na to da je iskoristivost minerala iz krmiva biljnog podrijetla, kao i iz tradicionalnih anorganskih izvora poput oksida, sulfata ili karbonata, relativno niska, dok su zahtjevi modernih, visokoproduktivnih linija nesilica i brojlera za mikroelementima vrlo visoki, organski su minerali postali predmet sve opsežnijega istraživanja (Świątkiewicz i

sur., 2014.). Kako napreduju istraživačke tehnike i podatci dobiveni iz *in vitro* i *in vivo* istraživanja posljednjih godina, razlike između anorganskih i organskih minerala u tragovima postale su značajnije (Byrne i Murphy, 2022.). Temeljna je razlika između organskih i anorganskih minerala u njihovu izvoru, kemijskom obliku, čistoći minerala te načinu na koji ih organizam apsorbira i koristi. Organski su minerali kompleksi esencijalnih elemenata povezanih s organskim molekulama poput aminokiselina, proteina i peptida ili s nekim drugim organskim spojevima. Kemijski oblik organskih minerala može se opisati kao spojevi koji sadrže središnji metalni atom kao prihvatitelj elektrona, zajedno s ligandima (proteinima, aminokiselinama, ugljikohidratima ili lipidima) koji sadrže barem jedan atomski ligand (O, N ili S) s nesparenim elektronskim parom (Świątkiewicz i sur., 2014.). Organizam ih lakše apsorbira jer su stabilniji i kompatibilniji biološkom sustavu životinja. Koriste se u ovom obliku kako bi se iskoristila njihova veća bioraspoloživost i apsorpcija u organizmu životinja. Ugljikohidrati i proteini najčešći su spojevi u kombinacijama organskih minerala. Kelirani minerali, primjerice, predstavljaju specifičnu skupinu organskih minerala u kojima je metal koordinacijski vezan za organski ligand, no važno je napomenuti da nisu svi organski minerali kelati, niti su svi vezani koordinacijskim vezama (Santos i sur., 2024.).

MINERALI U TRAGOVIMA

Izraz „minerali u tragovima“ koristi se kao opis važnih nutritivnih elemenata koji se u vrlo malim količinama dodaju u hranu za životinje, a nazivaju se još i mikromineralima (Byrne i Murphy, 2022.). Imaju strukturnu, fiziološku, regulatornu i katalitičku funkciju i stoga ih je jako važno u dostatnoj količini osigurati životinjama putem hrane. Brugger i sur. (2022.) navode kako su, prema Državnome vijeću za znanstvena istraživanja (National Research Council, 2005.), koncentracije određenih elemenata u tragovima u organizmu najčešće ispod 50 mg/kg tjelesne mase, izuzev željeza, koje je potrebno unositi u puno većim količinama. Minerali u tragovima u biti su mikroelementi poput željeza, bakra, selena, mangana, cinka, joda, kroma, a esencijalni su za brojne enzimске, imunološke i metaboličke procese koji utječu i na homeostazu makromineralna. Govoreći o organskim mineralima u tragovima, na temelju vrste liganda koji se kori-

sti za vezanje s mineralom komercijalno je dostupno nekoliko vrsta, poput aminokiselina, peptida, polisaharida ili organskih kiselina (Byrne i Murphy, 2022.). Sve se više promatra povećana bioraspoloživost kelata i kompleksa minerala s organskim ligandima. Vezivanjem minerala za organske komponente može se potaknuti pasivna apsorpcija u crijevima smanjenjem njihove interakcije s drugim potencijalnim kelatorima u crijevnom lumenu. Time se sprječava nastanak netopljivih kompleksa s tvarima poput hidroksida, karbonata, fosfata, oksalata i fitata, koji bi inače ograničili dostupnost minerala za apsorpciju (Byrne i Murphy, 2022.). Isto tako, rezultati istraživanja Świątkiewicza i sur. (2014.) pokazuju da organski oblici minerala u tragovima imaju veću stabilnost u probavnome sustavu, zaštićeni su od stvaranja netopljivih kompleksa s antinutritivnim spojevima u crijevima te smanjuju negativne učinke međusobnih mineralnih antagonizama.

BIORASPOLOŽIVOST MINERALA

Bioraspoloživost minerala može se definirati kao potencijal minerala za opskrbu fizioloških funkcija koje zavise o tom elementu u metaboličkom sustavu životinje (Suttle, 2022.). Bilo bi pogrešno pojam bioraspoloživosti poistovjetiti s pojmom apsorpcije, jer implicira da su elementi u tragovima 100 % bioraspoloživi dokle god su prisutni u gastrointestinalnom traktu kao dostupni kemijski spojevi, što nije točno (Brugger i sur., 2022.). Zadržavanje elemenata u tragovima u organizmu ne znači nužno da se oni koriste u metaboličkim procesima, a to potvrđuju i neki minerali (Fe, Cu, Se) s visokim potencijalom nakupljanja u tkivima. Fiziološke funkcije usko su povezane s ukupnim potrebama organizma i kinetikom elemenata unutar organizma. Tijekom probave nekog minerala u tragovima na njegovu bioraspoloživost znatno utječu specifična svojstva minerala, poput količine unosa minerala, njegov kemijski i molekularni oblik, količina unosa minerala, veličina čestica, sinergističko ili antagonističko djelovanje s ostalim mineralima ili hranjivim tvarima, kelatori, inhibitori, uvjeti probave, fiziološko stanje životinje, domaćina, dob i vrsta životinje (Mihajlović, 2017.).

Mineralni kelati spojevi su koji se posljednjih godina sve više istražuju kao izvor organskih minerala. Rezultati brojnih istraživanja kelata ukazuju na

značajno bolje iskorištavanje i veću bioraspoloživost minerala u tom obliku, kao i znatno manje izlučenih količina minerala u fecesu. Kako navodi Vieira (2008.), naziv *kelat* podrijetlo vuče iz grčkog jezika: riječ *chele* u prijevodu znači „pinceta“, „pandža“ ili „mala kliješta“. Ova riječ odgovara opisu strukture kelata koji nastaju dijeljenjem elektrona između metala i liganda. Ligand je najčešće anion ili neutralna molekula koja posjeduje slobodan elektronski par spreman za vezanje na metalni ion. Uobičajeni ligandi, radi svoje elektronske konfiguracije, sadrže elemente poput kisika, dušika, sumpora ili halogena, pojedinačno ili u kombinaciji.

NAJZNAČAJNIJI MINERALI U TRAGOVIMA U HRANIDBI PERADI

CINK

Cink (Zn) je esencijalan mikroelement koji ima ključnu ulogu u brojnim biološkim funkcijama životinjskog organizma. Prisutan je kao kofaktor u više od 300 metaloenzima, uključujući sve klase enzima, te sudjeluje u sintezi proteina, metabolizmu ugljikohidrata, replikaciji stanica te razvoju hrskavice i kostiju (Świątkiewicz i sur., 2014.). Nadalje, cink je ključan i u procesima rasta životinje, razvoju i funkciji imunološkog sustava, reprodukciji, regulaciji gena, održavanju zdravlja kože i perja te zaštiti od oksidativnog stresa (Richards i sur., 2010.). Dva su ključna enzima koja ovise o sintezi cinka, kolagen i keratin, i to kolagen kao temeljni strukturni protein rožine perja, kože i kljuna, a keratin kao osnovna komponenta izvanstaničnog matriksa i vezivnog tkiva (Richards i sur., 2010.). Nedostatak cinka može smanjiti sintezu ovih proteina, što dovodi do ozbiljnih problema poput abnormalnosti skeleta, alopecije, dermatitisa, abnormalnog razvoja perja te zbog negativnog utjecaja na metabolizam proteina i ugljikohidrata može uzrokovati i razne druge zdravstvene probleme poput usporenog rasta, smanjene konzumacije hrane, slabe iskoristivosti hrane, smanjene plodnosti, parakeratoze, proljeva i atrofije timusa, kao i smanjene valivosti jaja i abnormalnosti fetusa (Świątkiewicz i sur., 2014; Byrne i Murphy, 2022.). Byrne i Murphy (2022.) su apsorpciju cinka u crijevima opisali tako da se odvija pretežno u tankom crijevu putem transcelularnog transportnog procesa. Glavni mehanizam unosa cinka u enterocite uključuje ZIP4 protein, koji omogućuje prijenos

ioniziranog cinka iz crijevnog lumena u stanicu, dok se njegov izvoz iz stanice prema portalnoj cirkulaciji odvija preko ZnT-1 proteina, smještenog na bazolateralnoj membrani enterocita. ZIP4 smatra se ključnim crijevnim transporterom za unos cinka. Kada su razine cinka u organizmu dovoljne, ekspresija ZIP4 na apikalnoj membrani enterocita se smanjuje, a stanice počinju pojačano proizvoditi metalotionein (MT), koji veže višak Zn^{2+} i time regulira njegovu dostupnost. Dostupnost cinka iz hrane značajno ovisi o njegovu kemijskom obliku. Organski oblici cinka (npr. cink-metionin, cink-proteinat) pokazali su višu bioraspoloživost u usporedbi s anorganskim oblicima (npr. cink-oksidi, cink-sulfat), što znači da se učinkovitije apsorbiraju i iskorištavaju u organizmu (Świątkiewicz i sur., 2014.). Tako su Wedekind i sur. (1992.) na temelju koncentracije cinka u tibiji, kao pokazatelja bioraspoloživosti, utvrdili da se relativna bioraspoloživost cink-metionina u odnosu na cink-sulfat kod brojlera kreće između 117 % i 206 %, ovisno o sastavu obroka. U istraživanju Manangija i sur. (2012.) dokazano je također da primjena keliranih minerala može poboljšati strukturnu čvrstoću tkiva čak i pri nižim dozama. U istraživanju provedenom na brojlerima, ptice koje su dobivale smanjene količine cinka, bakra i mangana (32 ppm, 8 ppm i 32 ppm) u obliku HMTBa-kelata pokazale su znatno bolju kvalitetu jastučića stopala u usporedbi s onima koje su hranjene znatno većim količinama istih minerala (100 ppm, 125 ppm i 90 ppm) u obliku sulfata. Zanimljivo je da nije zabilježena razlika u prirastu mase između skupina, dok je izlučivanje tih elemenata bilo smanjeno u skupini koja je primala kelirani oblik (Heravi i Kermanshahi, 2025.).

ŽELJEZO

Željezo (Fe) je esencijalan mineral s ključnom ulogom u brojnim fiziološkim procesima. Najvažniju funkciju ima u sastavu hemoglobina, krvnog pigmenta, u kojem hemska komponenta omogućuje prijenos kisika iz pluća do svih tjelesnih tkiva (Noaman, 2025.). Osim toga, željezo je sastavni dio mitohondrijskih enzima koji sudjeluju u oksidativnoj proizvodnji stanične energije kroz Krebsov ciklus, kao i mioglobina koji prenosi kisik do mišićnih stanica (Byrne i Murphy, 2022.). Također je važno za normalno funkcioniranje imunološkog sustava da sudjeluje u metabolizmu lipida, čime dodatno doprinosi održavanju zdravlja i vitalnosti organizma. Znakovi koji upućuju na nedostatak željeza su usporen

rast i potisnut volumen krvi, gubitak apetita i težine, smanjene performanse životinje i spazmatično dišanje, što može rezultirati smrću. Anemija je bolest koju najčešće povezujemo s nedostatkom željeza, te je važno istaknuti zapažanje Cao i sur. (1996.) da se apsorpcija i općenito metabolizam željeza mijenja s dobi broilera. Trovalentno željezo (Fe^{3+}) u obliku željeznog oksida vrlo se slabo iskorištava, naročito kod ptica (Henry i Miller, 1995.). Dvovalentni oblik željeza (Fe^{2+}) najčešće se tijekom probave veže za kelator (npr. histidin, mucin, fruktoza) te se time pojačava njegova apsorpcija u organizmu (Byrne i Murphy, 2022.). Isto tako, stvaranje kompleksa Fe-aminokiselina također omogućuje željezu korištenje transportera aminokiselina za kretanje kroz crijevo. Željezo također može stvarati komplekse sa želučanim sekretima, što mu omogućuje da ostane topljiv, te time i lakšu apsorpciju u neutralnijim pH okruženjima crijeva (Byrne i Murphy, 2022.). Kako Byrne i Murphy (2022.) zaključuju, dvovalentni metalni transporter 1 (DMT1) ključan je prijenosnik željeza preko apikalne membrane enterocita i specifičan je za Fe^{2+} . Prije samoga transporta, enzimi ferireduktaze, poput duodenalnog citokroma B (DcytB), reduciraju Fe^{3+} u Fe^{2+} na apikalnoj površini crijevnih stanica. U uvjetima smanjenih zaliha željeza razina DMT1 također se smanjuje. Enterociti sintetiziraju feritin (FRT), koji veže i pohranjuje većinu Fe^{2+} unesenog kroz apikalnu membranu. Budući da alkalna reakcija u donjim dijelovima crijeva uzrokuje njegovo taloženje, apsorpcija željeza odvija se primarno u gornjem dijelu dvanaesnika, čime postaje neiskoristiv za organizam. Kada je unos željeza u hranidbi pretjeran, dolazi do stvaranja neapsorbirajućeg željeznog fosfata u crijevima, što može smanjiti razinu fosfora u krvi i dovesti do pojave rahitisa (Özlü, 2024.). S druge strane, ako se fosfor unese u velikim količinama, ometa apsorpciju željeza vežući se za njega i uzrokuje anemiju, a time se može zaključiti da je fosfor antagonist željezu.

BAKAR

Bakar (Cu) je esencijalni mikroelement koji sudjeluje kao kofaktor u brojnim enzimskim sustavima, uključujući superoksid dismutazu, citokrom oksidazu, lizil oksidazu i ceruloplazmin, čime je ključan za metabolizam energije, stvaranje vezivnog tkiva, hemoglobina, pigmentaciju tkiva te obranu od oksidativnog stresa (Świątkiewicz i sur., 2014; Byrne i Murphy, 2022.). Poput cinka, bakar ima ključnu

ulogu u brojnim funkcijama važnima za zdravlje i proizvodne sposobnosti životinja. Djelovanje cinka često se nadopunjuje enzimima koji zahtijevaju prisutnost bakra. Jedan je od takvih enzima lizil-oksidaza, koji je nužan za povezivanje kolagenskih podjedinica u stabilne i čvrste strukture, a sudjeluje i u formiranju poprečnih veza u elastinu (Richards i sur., 2010.). U uvjetima nedostatka bakra, sinteza i stabilnost kolagena i elastina ozbiljno su narušene, jer je bakar esencijalan za aktivnost enzima lizil-oksidaze, koji katalizira umrežavanje vlakana ovih proteina. Posljedično, kolagen i elastin gube potrebnu čvrstoću i elastičnost, pa ne mogu učinkovito izdržati mehaničke napore karakteristične za koštani i kardiovaskularni sustav (Ciosek i sur., 1923.). U težim slučajevima, takav deficit može dovesti do pucanja aorte kod više vrsta, dok kosti postaju lomljive i osjetljive na prijelome (Richards i sur., 2010.). U tijelu životinja apsorpcija bakra odvija se primarno u želudcu i tankom crijevu putem transcelularnog transporta. Najvažniji transporteri za unos Cu^{+} iona su CTR1 i ATP7A za njegov prijenos unutar stanice. Bakrene metalorektaze (R) pretvaraju Cu^{2+} iz hrane u Cu^{+} , a proteinski transporter Cu (CTR1) olakšava difuziju Cu^{+} kroz apikalnu membranu, na kojoj se veže za proteinski šaperon Cu (Atox1). Proteinski šaperoni su molekule koje pomažu pri pravilnom savijanju, stabilizaciji i transportu proteina sprječavajući njihovu agregaciju, osobito u uvjetima stresa. Na taj način održavaju proteinsku homeostazu u stanici. Važno je naglasiti da sami ne postaju dio konačne strukture funkcionalnog proteina, već djeluju privremeno i regulatorno (Hartl i sur. 2011.). Proteinski šaperoni, poput Atox1, prenose bakar intracelularno, dok se višak veže na metalotionein (MT), čime se regulira homeostaza (Byrne i Murphy, 2022.). Apsorpcija je dodatno složena zbog mogućnosti interakcije s cinkom i ligandima, koji mogu utjecati na unos. Nedostatak bakra dovodi do ozbiljnih poremećaja poput mišićne slabosti, anemije (često povezane s nedostatkom željeza), hipopigmentacije, deformacije kostiju, neuroloških oštećenja, poremećaja vezivnog tkiva i srčane funkcije te promjena metabolizma lipida (Byrne i Murphy, 2022.). Što se tiče bioraspoloživosti, brojna istraživanja potvrđuju višu ili jednaku učinkovitost organskih oblika bakra (npr. Cu-Met, Cu-Lys, Cu-aminokiselinski kelati, proteini) u odnosu na standardni anorganski bakrov sulfat (Domel i sur., 2024.; Mojaveriyan i sur., 2025.; Rouhanipour i sur. 2025.). Najčešće korištena meto-

da procjene relativne bioraspoloživosti jest metoda omjera nagiba, pri čemu organski oblici često pokazuju bioraspoloživost iznad 100 %. Organski izvori bakra, osim veće bioraspoloživosti, mogu smanjiti interakcije s antagonistima te poboljšati performanse i zdravlje peradi, ali i drugih životinja. Budući da nije sastavni dio same molekule hemoglobina (da Silva i sur., 2024.), bakar, primjerice, ima ulogu katalizatora u pretvorbi anorganskog željeza u hemoglobin te je potreban u vrlo malim količinama. Međutim, bez bakra organizam ne može iskoristiti željezo za sintezu krvnih stanica, čak i ako su njegove zalihe pohranjene u jetri. Iako je željezo potrebno u znatno većim količinama negoli bakar, nedostatak jednog ili oba minerala uzrokuje nutritivnu anemiju (Lafta i sur., 2025.).

MANGAN

Mangan (Mn) je ključan esencijalan mineral za rast, plodnost i pravilan razvoj kostiju kod životinja, uključujući embrionalni razvoj (Richards i sur., 2010.). Mangan je važna komponenta brojnih enzima koji su uključeni u antioksidativni obrambeni sustav, u metabolizam proteina i formiranje kostiju (Świątkiewicz i sur., 2014.). Nedostatak mangana može dovesti do bolesti kao što su hondrodistrofija i perozis, moguća je smanjena proizvodnja jaja te pojava tanke i nekvalitetne ljuske jaja; međutim, dokazano je da se navedeno može spriječiti dodavanjem mangana u hranu (Byrne i Murphy, 2022.). Mangan, zajedno s cinkom i bakrom, ima ključnu ulogu u borbi protiv oksidativnog stresa. Što se tiče bioraspoloživosti različitih oblika mangana, utvrđeno je da su sulfat i klorid visoko dostupni oblici, dok su karbonat, dioksid i neki monoksidi znatno manje učinkoviti. U pokusima na pilićima organski oblici mangana (poput proteinata i methionina) pokazali su bolju apsorpciju i veću učinkovitost, posebno pod uvjetima toplinskog stresa (Byrne i Murphy, 2022.). Dodatci mangana u organskom obliku također su poboljšali kvalitetu ljuske jaja kod nesilica, a pozitivni učinci zabilježeni su i na koncentracije mangana u kostima, bubrezima i jetri. U istraživanju na nesilicama hibrida *ISA brown* Klecker i sur. (1997.) zabilježili su poboljšanu kvalitetu ljuske jaja dodatkom organskog proteiranog oblika mangana i cinka u hranu. Miles (1998.) također je primjenom kombinacije proteiranog mangana, cinka i bakra primijetio povećanu debljinu ljuske jaja kod nesilica hibrida Leghorn.

SELEN

Selen je esencijalan mikroelement u hranidbi peradi, a njegova biološka učinkovitost (bioraspoloživost) ovisi o kemijskom obliku u kojem se nalazi. Dva su glavna izvora selena za perad, u anorganskom obliku najčešće se koriste selenit i selenat, dok se u organskom obliku najviše upotrebljava selenometionin (SeMet) i selenov kvasac (Surai i sur., 2018.). Posljednjih godina sve više istraživanja ukazuje na to da organski oblici selena imaju značajne prednosti zbog bolje apsorpcije i učinkovitosti u organizmu, usporedno s anorganskim oblikom koji se tradicionalno dodavao (Miles i Henry, 2000.). Tako Wei i sur. (2024.) navode da dodavanje selena u hranidbi brojlera može poboljšati više parametara kvalitete mesa, a njegova primjena u kombinaciji s drugim mineralima preporučuje se radi unaprjeđenja kvalitete mesa, produljenja roka trajanja i povećanja ekonomske vrijednosti proizvoda od pilećeg mesa. Selen je ključan za mnoge biokemijske procese jer je sastavni dio selenoproteina. Surai i sur. (2018.) navode kako je kod peradi identificirano 26 gena za selenoproteine koji sadrže selenocistein, te više od polovice tih proteina ima ulogu u antioksidativnoj obrani i održavanju stanične redoks-ravnoteže. Sudjeluju u procesima poput uklanjanja hidroperoksida, regulacije hormona štitnjače i popravka oštećenih proteina. Njihova ekspresija ovisi o količini selena u organizmu, specifična je za različita tkiva, može biti hormonski regulirana i važna je za zdravlje crijeva i imunološki sustav (Surai i sur., 2018.). Nedostatak selena može dovesti do različitih poremećaja te smanjene proizvodne i reproduktivne učinkovitosti. U stresnim uvjetima, kada je zbog pojačane ekspresije selenoproteina potrebna veća količina selena, a konzumacija hrane se obično smanjuje, tjelesne zalihe selena koje su prvenstveno pohranjene u mišićima mogu doprinijeti održavanju učinkovite antioksidativne obrane i spriječiti posljedice stresa (Surai i sur., 2018.). Miles i Henry (2000.) istraživanjem su dobili rezultate da je selenometionin bio učinkovitiji od anorganskog oblika selena u prevenciji nutritivne atrofije gušterače kod peradi.

ZAKLJUČAK

Cink (Zn), željezo (Fe), bakar (Cu), mangan (Mn) i selen (Se), kao esencijalni elementi u tragovima, imaju ključnu ulogu u brojnim biološkim i fiziološkim procesima koji su važni za rast i zdravlje životinja.

Njihovo sudjelovanje u mehanizmima antioksidativne zaštite, regeneraciji DNK, formiranju kostiju i tkiva te u pravilnom funkcioniranju imunološkog sustava samo su neki od važnih funkcija koje obavljaju esencijalni mikroelementi. Važnost mikroelemenata u stočarskoj proizvodnji jest općeprihvaćena, zbog čega se u većini hranidbenih smjesa standardno dodaju. Na temelju analize podataka provedenih istraživanja, može se zaključiti da većina novijih istraživanja u području peradarstva ukazuje na veću bioraspoloživost i učinkovitost organskih oblika spomenutih minerala u usporedbi s tradicionalno korištenim anorganskim izvorima tih mikroelemenata u hranidbi peradi. Zahvaljujući tome, moguće je primijeniti niže količine organskih elemenata u tragovima bez negativnog utjecaja na rast, proizvodne pokazatelje, kvalitetu mesa i jaja te opće zdravstveno i metaboličko stanje peradi. Ovakav pristup također pridonosi smanjenju izlučivanja minerala putem izmeta, čime se smanjuje potencijalni negativni utjecaj intenzivne peradarske proizvodnje na okoliš.

LITERATURA

- Al-Bayati, S.S., Al-Mahdawy, R.S. and Rahman, A.R.F.A. (2025.): Effect of Adding Different Levels of Organic Minerals Zn, Cr, Mn and Their Mixture to Laying Hens' Diet on Egg Quality and PH. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, (Vol. 1487, No. 1, p. 012167). IOP Publishing.
- Atmaja, B.M., Hidayatulloh, R., Ali, M.I., Hutabarat, A.L.R., Lestari, W.M., Agasi, S.Y. and Shihah, H.D. (2024.): Optimizing Laying Hen Productivity and Egg Quality through Combination of Inorganic and Organic Trace Minerals Supplementation. Jurnal Ternak, 15(2), 54-59.
- Brugger, D., Wagner, B., Windisch, W. M., Schekel, H., Schulz, K., Südekum, K.-H., Berk, A., Pieper, R., Kowalczyk, J. and Spolders, M. (2022.): Bioavailability of trace elements in farm animals: definition and practical considerations for improved assessment of efficacy and safety, Animal, The international journal of animal biosciences, 16 (8), 100598.
- Byrne L. and Murphy R. A. (2022.): Relative Bioavailability of Trace Minerals in Production Animal Nutrition: A Review, Animals 2022, 12, 1981.
- Cao, J., Luo, X.G., Henry, P.R., Ammerman, C.B., Littell, R.C. and Miles, R.D. (1996.): Effect of dietary iron concentration, age, and length of iron feeding on feed intake and tissue iron concentration of broiler chicks for use as a bioassay of supplemental iron sources. Poultry Science, 75(4), 495-504.
- Ciosek, Ž., Kot, K. and Rotter, I., (2023.): Iron, zinc, copper, cadmium, mercury, and bone tissue. International journal of environmental research and public health, 20(3), 2197.
- da Silva, G.D., Maia, J., da Silva Costa, L., de Oliveira Sa, G.F., Mendes, M.T.O.G., Chaves, N.R.B., Fonseca, B.B. and Vieira, B.S. (2024.): Organic or inorganic zinc for laying hens? A systematic review and meta-analysis of the effects of zinc sources on laying performance, egg quality, and zinc excretion. Biological trace element research, 202(6), 2812-2827.
- Domaćinović, M. (2006.): Hranidba domaćih životinja, Osijek.
- Domaćinović, M., Antunović, Z., Džomba, E., Opačak, A., i Baban, M. (2015.): Specijalna hranidba domaćih životinja, Poljoprivredni fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera, Osijek.
- Domel, J.R., House, G.M., Sobotik, E.B. and Archer, G.S. (2024.): Evaluation of Egg Quality and Performance in Late-Lay Hens Fed Different Combinations of Copper, Manganese, and Zinc Complexed with Sulfate or Amino Acid Ion. Poultry, 3(1), 36-46.
- Edens, F. W. (1996.): Organic selenium: From feathers to muscle integrity to drip loss, Five years onward: No more selenite. Proceedings of the 12th Annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry. (T. P. Lyons and K. A. Jacques, Eds.) Nottingham University Press Loughborough, Leics, UK. 165-185.
- Hartl, F., Bracher, A. & Hayer-Hartl, M. (2011.): Molecular chaperones in protein folding and proteostasis. Nature 475, 324–332.
- Henry, P. R., and Miller, E. R. (1995.): Iron bioavailability. In Bioavailability of nutrients for animals. Academic Press, 169-199.
- Heravi, R.M. and Kermanshahi, H., (2025.): Investigating the Effects of Different Sources and Levels of Zinc, Copper, Manganese, and Iron on the Performance, Blood Parameters, and Tibia Characteristics of Broiler Chickens During the Grower and Finisher Periods. Iranian Journal of Animal Science Research/ Pizhūhishhā-Yi 'ulum-i Dāmī-i Īrān, 17(1).
- Klecker, D., Zemar, L., Siske, V., and Basauri, G. J. (1997.): Influence of trace mineral proteinate supplementation on egg shell quality. Poultry Sci, 76 (Suppl 1), 131.
- Lafta, B.H., Ghadir, G.K., Mustafa, H.A., Yousif, W.H., Abdul-Hur, G.N., Jawad, M.A., Henedy, S.N. and Abdullah, H. (2025.): Role of organic mineral supplements in enhancing poultry performance. J. Anim. Health Prod, 13(s1), 319-326.

17. Manangi, M. K., Vazquez-Anon, M., Richards, J. D., Carter, S., Buresh, R. E., and Christensen, K. D. (2012.): Impact of feeding lower levels of chelated trace minerals versus industry levels of inorganic trace minerals on broiler performance, yield, footpad health, and litter mineral concentration. *Journal of Applied Poultry Research*, 21(4), 881-890.
18. Mihajlović, R. (2017.): Značaj organskih minerala u hranidbi peradi, Osijek.
19. Miles, R. D. (1998.): The influence of Eggshell-49 on shell quality of hens grouped by their shell quality. *Poultry Sci*, 77(Suppl 1), 43.
20. Miles, R. D. and Henry, P. R. (2000.): Relative trace mineral bioavailability, *Ciência Animal Brasileira/Brazilian Animal Science*, 1(2), 73-93.
21. Mojaveriyan, S.A., Gharahveysi, S. and Hajipour, M. (2025.): Investigating the effects of organic and inorganic forms of zinc, copper, and manganese on the productive trait and reproductive performance of broiler breeder hens. *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society*, 76(2), 9115-9128.
22. National Research Council, Division on Earth, Life Studies, Committee on Minerals, Toxic Substances in Diets, and Water for Animals. (2006.): Mineral tolerance of animals: 2005. National Academies Press.
23. Noaman, H.A. and Mohammed, D.J. (2025.): Organic Vs. Inorganic Mineral Supplements in Poultry: Availability and Physiological Effects: Subject Review. *American Journal of Biology and Natural Sciences*, 2(7), 165-175
24. Özlü, Ş., Darmawan, A. and Ozturk, E. (2024.): Use of micro mineral sin laying hen diets with current approaches: A Review. *Vitamins and Minerals in Poultry*, Ch.3., Iksad publishing house, Ankara, Türkiye
25. Richards, J. D., Zhao, J., Harrell, R. J., Atwell, C. A., and Dibner, J. J. (2010.): Trace mineral nutrition in poultry and swine, *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 23(11), 1527-1534.
26. Rouhanipour, H., Ashayerizadeh, O., Sharifi, S.D. and Dastar, B. (2025.): The effect of dietary copper and L-Arginine supplementation on production performance, egg quality parameters, and serum biochemical metabolites of laying hens at 22 to 30 weeks of age. *Journal of Animal Production*, Print ISSN: 2008-6776., Online ISSN: 2382-994X, 27(2), 173-188.
27. Santos, M.J., Rabello, C.B., Wanderley, J.S., Ludke, M.C., Barros, M.R., Costa, F.S., Santos, C.S. and Fireman, A.K., (2024.): Levels of substitution of inorganic mineral to amino acids complexed minerals on old laying hens. *Scientific Reports*, 14(1), 24803.
28. Sarker, M.S.K., Sharmin, F., Khatun, J., Sultana, N., Faruque, S., Ety, U.S., Lisa, N.N. and Islam, A., (2025.): 177 Effect of dietary feed additives in laying chicken on egg production, nutrient content, yolk cholesterol, and egg quality traits. *Journal of Animal Science*, 103(Supplement_1), 179-180.
29. Surai, P. F., Kochish, I. I., Fisinin, V. I., and Velichko, O. A. (2018.). Selenium in poultry nutrition: From sodium selenite to organic selenium sources, *The journal of poultry science*, 55(2), 79-93.
30. Suttle, N. (2022.): Mineral nutrition of livestock. CABI International, UK
31. Świątkiewicz S., Arczewska-Włosek A. and Józefiak D. (2014.): The efficacy of organic minerals in poultry nutrition: review and implications of recent studies, *World's Poultry Science Journal* 475-485.
32. Świątkiewicz, S., Arczewska-Włosek, A., Krawczyk, J., Puchała, M., and Jozefiak, D. (2015.): Dietary factors improving eggshell quality: An updated review with special emphasis on microelements and feed additives. *World's Poultry Science Journal*, 71(1), 83-94.
33. Vieira, S. L., (2008.): Chelated Minerals for Poultry, *Brazilian Journal of Poultry Science* 10 (2): 73-79.
34. Wedekind, K. J., Hortin, A., and Baker, D. H. (1992.): Methodology for assessing zinc bioavailability: efficacy estimates for zinc-methionine, zinc sulfate, and zinc oxide. *Journal of animal science*, 70(1), 178-187.
35. Wei, C., Wang, S., Wang, C., Zhao, Y. and Zhang, Y., (2024.): Meta-analysis of selenium effects on the meat quality of broilers. *Poultry Science*, 103(4), p.103523.
36. Zurak, D., Svečnjak, Z., Kiš, G., Pirgozliev, V., Grbeša, D. and Kljak, K. (2025.): Effect of supplementing corn diet for laying hens with vitamin A and trace minerals on carotenoid content and deposition efficiency in egg yolk. *Poultry science*, 104(3), p.104843.

SUMMARY

Table egg production depends on the breeding of hybrid laying hens, with the ongoing efforts invested in increasing the egg production per hen. This production pressure negatively affects both hen health and the quality of product, particularly the eggshell quality. Approximately 10–15% of all production losses are directly attributable to a poor eggshell quality, representing a significant economic loss for producers. Therefore, improving the eggshell quality should be prioritized through both genetics and hen nutrition. Until recently, the focus was placed on enhancing nutrition with calcium, phosphorus, and vitamin D3, but, in recent years, greater attention has been given to the use of trace minerals (Zn, Mn, Cu, Fe, Se) that are directly involved in eggshell formation. In laying hen feeding, trace minerals are primarily used in inorganic forms, such as oxides, carbonates, sulphates, and phosphates, which generally have a relatively poor absorption from the digestive tract. Breeders attempt to meet the increased requirements by providing larger quantities of inorganic minerals in feed mixes. However, this often leads to the excretion of large amounts of minerals in feces, negatively impacting the environment. As a solution, organic minerals, that is, minerals bound to the organic substances, most often amino acids, proteins, carbohydrates or yeasts, have been adopted. In this form, they are better utilized, which allows for the inclusion of smaller amounts of minerals in feed mixes, with a positive effect on eggshell quality and environmental preservation. Therefore, the aim of this paper is to describe the advantages of using the trace minerals of organic origin in laying hen nutrition.

Keywords: laying hens, eggshell quality, organic minerals