

Primjena umjetnih neuronskih mreža u modeliranju vlage zrna i parametara sušenja

Sažetak

Žitarice imaju ključnu ulogu u prehrani ljudi, proizvodnji stočne hrane i industriji. Nakon žetve, očuvanje kvalitete i trajnosti zrna postiže se sušenjem, kojim se vlaga smanjuje na razinu koja sprječava razvoj mikroorganizama i plijesni. U praksi se koriste različite metode sušenja, pri čemu svaka tehnika ima svoje prednosti u pogledu ravnomjernosti, brzine i očuvanja kvalitete zrna. Optimalna razina vlage za skladištenje žitarica kreće se od 12% do 14%, ovisno o vrsti. Niske temperature i kontrolirana vlaga skladišta ključni su za očuvanje nutritivne vrijednosti i sprječavanje kvarenja. Suvremene inovacije u poljoprivredi, osobito primjena strojnog učenja i umjetnih neuronskih mreža, omogućuju precizno modeliranje i optimizaciju procesa sušenja. Ovi modeli analiziraju velike količine podataka, prepoznaju uzorke i predviđaju optimalne uvjete rada, čime doprinose većoj učinkovitosti, očuvanju kvalitete i smanjenju troškova sušenja.

Ključne riječi: sušenje, žitarice, modeliranje, umjetne neuronske mreže

Uvod

Poljoprivredne žitarice spadaju u jednu od najznačajnijih skupina poljoprivrednih kultura, a njihov značaj proizlazi iz temeljne uloge u ljudskoj prehrani, proizvodnji stočne hrane i različitim industrijskim granama. Kukuruz, pšenica i ječam predstavljaju najzastupljenije žitarice u poljoprivrednoj proizvodnji. Očuvanje i kvaliteta zrna žitarica u posliježetvenim procesima, neophodni su za očuvanje kvalitete i kvantitete sirovine. Procesom sušenja, kao jedna od ključnih operacija u posliježetvenoj doradi zrna, smanjuje se vlaga na razinu kojom se sprječava razvoj štetnih mikroorganizama i pojave plijesni. Na taj način osigurava se sigurnost i dugotrajnost uskladištenog zrna. U praksi se primjenjuju različite tehnike, kao što su konvekcijsko sušenje vrućim zrakom, sušenje u fluidiziranom sloju koje omogućuje ravnomjernu raspodjelu topline, te podtlačno sušenje koje ubrzava isparavanje vode pri nižim temperaturama i tako čuva kvalitetu zrna (Karaboğa i Yıldırım, 2022). Primjenom inovacija u području poljoprivrede, strojno učenje, a osobito modeli poput umjetnih neuronskih mreža prepoznaju se kao koristan alat u optimizaciji složenih procesa poput sušenja žitarica. Navedeni modeli, koji funkcioniraju na principu djelovanja ljudskog mozga, omogućuju preciznu analizu i predviđanje vari-

¹ dr. sc. **Ivan Brandić**, **Karlo Pleskalt**, **Karlo Špelić**, mag. ing. agr., prof. dr. sc. **Ana Matin**, Sveučilište u Zagrebu
Agronomski fakultet, Svetošimunska cesta 25, 10000 Zagreb, Hrvatska

Autor za korespondenciju: ibrandic@agr.hr

jabli procesa koji izravno utječu na učinkovitost sušenja. Učenjem iz datih podataka i generalizacijom, modeli neuronskih mreža mogu prepoznati uzorke te zaključiti optimalne uvjete rada. Na taj način povećava se učinkovitost i kvaliteta sušenja što neposredno dovodi do očuvanja fizikalnih i nutritivnih karakteristika zrna te smanjenje izravnih troškova (Brandić i sur., 2023).

Cilj ovog rada je prikazati i analizirati različite tehnike sušenja uz interakciju matematičkih modela radi modeliranja cjelokupnog procesa sušenja, s posebnim naglaskom na modele umjetnih neuronskih mreža. Također bit će opisani različiti načini sušenja žitarica, uključujući sušenje u fluidiziranom sloju, vakumsko sušenje te konvekcijsko sušenje, s ciljem prikaza njihovih principa rada.

Sušenje kukuruza, ječma i pšenice

Sušenje predstavlja osnovni postupak u očuvanju kvalitete i trajnosti zrna nakon žetve. Proces sušenja kukuruza započinje prijenosom radnog medija kroz masu kojim se prvo uklanja slobodna voda prisutna u zrnu, pri sadržaju vlage većem od 27%. U ovoj fazi potrebna je relativno mala količina energije jer je riječ o vodi koja nije čvrsto vezana unutar strukture zrna. Nakon isparavanja slobodne vode iz zrna, daljnjim sušenjem isparava voda smještena u kapilarama unutar zrna. Sušenje kukuruza se provodi sve dok se ne postigne optimalni prag stabilnosti vlage, obično oko 13%. Kada se postigne uravnotežena vlaga, preostala voda ostaje kemijski povezana s komponentama zrna, što čini njezino uklanjanje energetski i ekonomski neisplativo (Mancheno i sur., 2024). Sušenje pšenice provodi se kada je žetva obavljena u vlažnim uvjetima i zrno ima visoki sadržaj vlage. Pšenica s višim početnim udjelom vlage teško prirodno gubi vlagu pa ju je potrebno sušiti pri visokim temperaturama i velikom protoku zraka. Za skladištenje je potrebno postići vlagu od 13 % do 14 %. Rana žetva i naknadno umjetno sušenje omogućuju postizanje više kvalitete zrna te smanjuju rizik od oštećenja usjeva (Doder i Đaković, 2022). Prerada zrna ječma uključuje uklanjanje nečistoća, pročišćavanje i sušenje, čime se osigurava njegova kvaliteta. Vlažnost ječma treba se smanjiti do 12% kako bi se uravnotežila s uvjetima okoline u kojoj će se skladištiti, čime se dugoročno očuvaju fizičke i kemijske osobine zrna te klijavost sjemena (Soares i sur., 2016).

Niske razine vlage i temperature smatraju se najpovoljnijim uvjetima skladištenja za očuvanje hranjive vrijednosti zrna. Prosječna unutarnja temperatura skladišta trebala bi biti 4 °C. Kako se količina uskladištene mase povećava, potrebno je prilagoditi ventilaciju ili premjestiti robu u druga skladišta s odgovarajućim temperaturnim uvjetima (Polat, 2015).

Najčešće se koriste podna skladišta i silosi različitih konstrukcija, dok se najbolje čuvanje zrna postiže u hladnim, suhim i čistim uvjetima (Krajčović i sur., 2016).



Slika 1. Kukuruz, ječam i pšenica

Figure 1. Maize, barley and wheat

Izvor/Source: Vlastita arhiva / Personal archive

Konvekcijsko sušenje

Konvekcijsko sušenje smatra se najraširenijom metodom sušenja žitarica radi praktičnosti i jednostavnog upravljanja procesom (Khokha i sur., 2021). Uvjeti sušenja, osobito temperatura, mogu se kontrolirati kako bi se postigla konstantna i brža stopa sušenja. Sušenje uključuje prijenos topline i mase radi uklanjanja vlage iz krutog materijala. U konvekcijskom sušenju, toplina se prenosi u materijal strujanjem vrućeg zraka kako bi isparila vlaga iz zrna. Vlaga prolazi kroz materijal i na sučelju krute tvari i zraka prenosi se kao para u zrak koji struji preko materijala. Stoga su parametri prijenosa vlage, kao i parametri procesa sušenja ključni za projektiranje, analizu i optimizaciju sustava za konvekcijsko sušenje (Agbede i sur., 2024).



Slika 2. Konvekcijska sušnica

Figure 2. Convection dryer

Izvor/Source: <https://shorturl.at/o35iJ>



Slika 3. Sušenje u fluidnom sloju

Figure 3. Fluidized bed dryer

Izvor/Source: Vlastita arhiva
Personal archive

Sušenje u fluidnom sloju

Sušenje u fluidiziranom sloju predstavlja učinkovitu metodu za sušenje praškastih i zrnastih materijala. Proces uključuje upuhivanje vrućeg zraka kroz sloj čestica, čime dolazi do njihove suspenzije ili „fluidizacije“, što poboljšava prijenos topline i mase između zraka i materijala. Tehnika fluidizacije sastoji se u cirkulaciji fluida kroz sloj čvrstih čestica pri dovoljnoj brzini kako bi se svaka čestica suspendirala. Fluidizirani sloj omogućuje veliku izmjenjivačku površinu između fluida i čvrste faze, visok intenzitet prijenosa topline između fluida i čestica te između sloja i stijenke reaktora. Time se postiže ujednačenost temperature unutar sloja te se olakšava regulacija temperature dodavanjem ili uklanjanjem topline. Osim toga, brzine prijenosa tvari između plina i čestica su vrlo visoke (Amira i sur., 2025).

Podtlačno sušenje

Princip rada podtlačnog sušenja temelji se na stvaranju uvjeta sniženog tlaka unutar komore sušenja, koji je niži od atmosferskog tlaka. Prilikom takvih uvjeta, tijekom procesa sušenja, vodena para izlazi iz unutrašnjosti materijala u okolinu zbog razlike u parcijalnim tlakovima vodene pare između materijala i okoline. Budući da je tlak vodene pare unutar materijala veći od tlaka u okolini, vodena para izlazi

u okolinu. Zbog sniženog tlaka u vakuumskoj komori dolazi i do smanjenja vrelišta vode, što dodatno olakšava proces isparavanja i omogućuje uklanjanje vlage na nižim temperaturama (Bambang i sur., 2022). Prednost takvog načina sušenja ogleda se u očuvanju kvalitete te nutritivne vrijednosti osušenih proizvoda (Karaboğa i Yildirim, 2022).

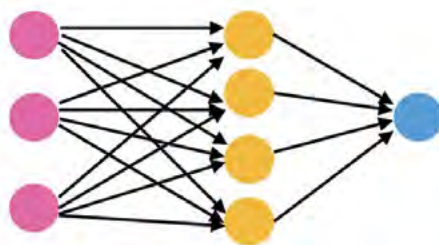


Slika 4. Podtlačna sušnica

Figure 4. Vacuum dryer

Izvor/Source: Vlastita arhiva

Personal archive



Slika 5. Pojednostavljen prikaz modela

umjetnih neuronskih mreža / **Figure 5.**

Simplified scheme of artificial neural network

model *Izvor/Source: <https://shorturl.at/AAPLW>*

Ipak, dugotrajno sušenje troši veliku količinu energije, što može dovesti do urušavanja stanične strukture materijala tijekom procesa, a posljedično i do smanjene kvalitete osušenog proizvoda (Khokha i sur., 2021). Iz navedenih razloga potrebno je proces optimizirati, podešavanjem ključnih parametara. Upravo iz tih razloga, u području sušenja sve se više koriste tehnike strojnog učenja osobito modeli umjetnih neuronskih mreža.

Primjena umjetnih neuronskih mreža u modeliranju parametara sušenja

Umjetne neuronske mreže spadaju u kategoriju strojnog učenja, a u posljednjih nekoliko desetljeća sve se više koriste kao alati koji omogućuju vrlo precizne procjene. Neuronske mreže imaju nekoliko osnovnih prednosti u odnosu na konvencionalne metode za procjenu. Sposobne su obrađivati velike količine skupnih podataka te otkrivati nelinearne odnose između zavisnih i nezavisnih varijabli, kao i moguće međusobne interakcije među varijablama prepoznavanjem uzoraka (Subramanyam i Narayanan, 2022). Tijekom procesa učenja modela, izlazne vrijednosti jednog ciklusa uspoređuju se s stvarnim rezultatima kako bi se izračunala vrijednost definirane funkcije pogreške, nakon čega se pogreška unosi natrag u model. Temeljem dobivenih informacija, algoritam modela prilagođava težine svih veza s ciljem smanjenja pogreške. Ovaj se proces ponavlja kroz veći broj ciklusa (iteracija) učenja, koji se nazivaju epohe (Khanikar i sur., 2022).

Primjena ANN-a u modeliranju procesa sušenja, iako iznimno korisna, nosi i određene izazove, osobito u odabiru optimalne mrežne strukture i odgovarajućih parametara modela. U pojedinim slučajevima, radi olakšavanja treniranja neuronskih mreža koriste se kombinirani pristupi gdje se za izradu ulaznih podataka upotrebljavaju fizikalni modeli zajedno s podacima dobivenim laboratorijskim ili

terenskim mjerenjima (Farkas, 2024). Primjena ANN modela omogućava uspješno savladavanje složenosti i nelinearnosti procesa sušenja, gdje su varijable međusobno u visokom stupnju korelacije. U industrijskim procesima sušenja, gdje vanjski uvjeti (temperatura i vlažnost zraka) variraju i teško su podložni kontroli, ANN može značajno povećati učinkovitost procesa točnim predviđanjem ponašanja sustava, uzimajući u obzir varijacije ambijentalnih uvjeta (Li i sur., 2020).

Zaključak

Konvencionalne metode sušenja, poput konvekcijskog, sušenja u fluidiziranom sloju i podtlačnog sušenja, omogućuju učinkovito smanjenje vlage i očuvanje kvalitete zrna, ali zahtijevaju precizno upravljanje brojnim parametrima kako bi se izbjegla oštećenja i nepotrebni energetski troškovi. Upravo zato, primjenom strojnog učenja, osobito modelima umjetnih neuronskih mreža omogućuje se precizno modeliranje vlage i fizikalnih svojstava zrna, identifikacija optimalnih uvjeta procesa što izravno vodi do bolje kvalitete i očuvanja nutritivnih vrijednosti, smanjenja potrošnje energije i troškova kroz optimizaciju radnih parametara.

Literatura

- Agbede, O., Oyewo, F., Aworanti, O., Alagbe, S., Ogunkunle, O., Laseinde, O. (2024)** Convective drying characteristics and moisture transfer properties of *Jatropha curcas* L. seeds. *Scientific African*. 23: e02122. DOI:10.1016/j.sciaf.2024.e02122.
- Amira, T., Gritli, S., Taieb, A. (2025)** Mathematical modeling of batch fluidized bed drying of alumina. *American Journal of Mechanics and Applications*. 12: 11–21. DOI:10.11648/j.ajma.20251201.12.
- Bambang, S., Rohim, A., Filayati, M. (2022)** Vacuum drying as a natural preservation method of post-harvest lemon might accelerate drying duration and produce the high-quality of dried lemon slices. *Food Science and Technology*. 42. DOI:10.1590/fst.58722.
- Brandić, I., Pezo, L., Bilandžija, N., Peter, A., Šurić, J., Voća, N. (2023)** Comparison of different machine learning models for modelling the higher heating value of biomass. *Mathematics*. 11. DOI:https://doi.org/10.3390/math11092098.
- Doder, Đ., Đaković, D. (2022)** The application of intermittent regimes for wheat grains batch drying. *Procesna Tehnika*. 33: 26–28.
- Farkas, I. (2024)** Use of artificial intelligence methods for modelling of drying processes. *E3S Web of Conferences*. 484. DOI:10.1051/e3sconf/202448401028.
- Karaboğa, Z., Yıldırım, A. (2022)** Change in some physical characteristics of ultrasound pre-treated corn during hot-air convection and vacuum drying. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*. 26: 118–132. DOI:10.18016/ksutarimdog. vi.970780.
- Khanikar, D., Phookan, A., Gogoi, A. (2022)** Artificial neural networks – an introduction and application in animal breeding and production: A review. *Agricultural Reviews*. DOI:10.18805/ag.R-2421.
- Khokha, M., Boulekbache-Makhlouf, L., Mehaba, W., Himed-Idir, H., Madani, K. (2021)** Convective and microwave drying of coriander leaves: Kinetics characteristics and modeling, phenolic contents, antioxidant activity, and principal component analysis. *Journal of Food Process Engineering*. 45: 13932. DOI:10.1111/jfpe.13932.
- Krajčovič, T., Psota, V., Sachambula, L., Mareček, J. (2016)** The effect of long-term storage on quality of malting barley grain and malt. *Journal of Central European Agriculture*. 17: 917–931. DOI:https://doi.org/10.5513/JCEA01/17.4.1791.
- Li, B., Li, C., Huang, J., Li, C. (2020)** Application of artificial neural network for prediction of key indexes of corn industrial drying by considering the ambient conditions. *Applied Sciences*. 10: 5659. DOI:10.3390/app10165659

- Mancheno, M., Moreira, M., Jácome, W., Tigse, N., Vásquez, J. (2024)** Characterization of hard corn drying systems. *Novasinerгия Revista Digital de Ciencia Ingeniería y Tecnología*. 7: 136–148. DOI:10.37135/ns.01.13.08.
- Polat, H. (2015)** Effects of different storage conditions on the nutritional qualities of barley and maize. *Tarım Bilimleri Dergisi*. 21: 246. DOI:10.15832/tbd.02887.
- Soares, M., Jorge, L., Montanuci, F. (2016)** Drying kinetics of barley grains and effects on the germination index. *Food Science and Technology (Campinas)*. 36. DOI:10.1590/1678-457X.11916.
- Subramanyam, R., Narayanan, M. (2022)** Artificial neural network modeling for drying kinetics of paddy using a cabinet tray dryer. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*. 29: 17. DOI:10.2298/CICEQ220106017S.

Prispjelo/Received: 11.6.2025.

Prihvaćeno/Accepted: 12.7.2025.

Professional paper

Application of artificial neural networks in the modelling of grain moisture and drying parameters

Abstract

Cereals play an important role in human nutrition, animal feed production and industry. After harvesting, the quality and shelf life of the grain is maintained by drying, which reduces the moisture to a level that prevents the development of microorganisms and mould. In practise, various drying methods are used, with each technique having its own advantages in terms of uniformity, speed and preservation of grain quality. The optimum moisture content for grain storage is between 12% and 14%, depending on the variety. Low temperatures and controlled humidity during storage are key to preserving nutritional value and preventing spoilage. Modern innovations in agriculture, in particular the use of machine learning and artificial neural networks, enable precise modelling and optimisation of the drying process. These models analyse large amounts of data, recognise patterns and predict optimal operating conditions, thus contributing to greater efficiency, quality preservation and lower drying costs.

Keywords: drying, cereals, modelling, artificial neural networks