Ivan Brandić[1], Karlo Špelić[1], Mateja Grubor[1], Ante Galić[1], Ana Matin[1]

Stručni rad

Primjena strojnog učenja u poljoprivredi

Sažetak

Strojno učenje sve više se primjenjuje u poljoprivredi kao alat za obradu velikih količina podataka i potporu donošenja odluka u poljoprivrednoj proizvodnji. Razvoj precizne i digitalne poljoprivrede omogućio je prikupljanje različitih vrsta podataka putem senzora, meteoroloških stanica, satelitskih snimaka, bespilotnih letjelica, GPS sustava i drugih digitalnih tehnologija. Takvi podaci mogu se koristiti za praćenje stanja tla i usjeva, predviđanje prinosa, optimizaciju navodnjavanja i gnojidbe te učinkovitije upravljanje prirodnim resursima. Kroz stručni rad prikazana je važnost izvora i vrsta podataka u suvremenoj poljoprivredi, osnovna metodologija razvoja modela strojnog učenja te glavne prednosti, ograničenja i izazovi njihove primjene. Iako strojno učenje pruža značajne mogućnosti za povećanje učinkovitosti i održivosti poljoprivredne proizvodnje, njegova primjena zahtijeva pažljivo upravljanje podacima, odgovarajuću računalnu infrastrukturu i stručno razumijevanje proizvodnog sustava.

Ključne riječi: *strojno učenje, poljoprivreda, veliki podaci, precizna poljoprivreda, digitalna poljoprivreda, upravljanje podacima*

Uvod

Poljoprivreda ima važnu ulogu u globalnom gospodarstvu, a pritisak na poljoprivredne sustave dodatno raste zbog kontinuiranog povećanja broja stanovnika. Iz navedenog razloga sve veći značaj dobivaju agrotehnologija, precizna i digitalna poljoprivreda, kao područja koja se temelje na intenzivnom korištenju podataka s ciljem povećanja produktivnosti, učinkovitijeg upravljanja resursima i smanjenja negativnog utjecaja na okoliš. Razvoj tehnologija velikih podataka i visokoučinkovitog računarstva omogućio je širu primjenu strojnog učenja u poljoprivredi, osobito u kontekstu obrade velikih količina podataka i donošenja odluka u ovom multidisciplinarnom području (Benos i sur., 2021). Strojno učenje (engl. machine learning, ML) grana je umjetne inteligencije koja omogućuje analizu podataka bez izričitih uputa za svaki pojedini korak. Temelji se na učenju određenih svojstava i obrazaca iz postojećeg skupa podataka te njihovoj primjeni na nove podatke. Drugim riječima, strojno učenje odnosi se na automatizirano otkrivanje smislenih obrazaca u podacima, pri čemu se prethodno iskustvo koristi za poboljšanje učinkovitosti određenog algoritma (Sadiku i sur., 2025). U poljoprivredi se strojno učenje može primijeniti u različitim područjima, uključujući predviđanje prinosa, procjenu stanja tla i usjeva, prepoznavanje bolesti i korova, optimizaciju navodnjavanja, gnojidbe i zaštite bilja te analizu podataka dobivenih

*1 doc. dr. sc. **Ivan Brandić**, **Karlo Špelić**, mag. ing. agr., dr. sc. **Mateja Grubor**, izv. prof. dr. sc. **Ante Galić**, prof. dr. sc. **Ana Matin**, Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Svetošimunska cesta 25, 10000 Zagreb, Hrvatska*
*Autor za koresponednciju: **ibrandic@agr.hr***

daljinskim istraživanjima. Zbog toga se njegova uloga sve više povezuje s razvojem precizne i održive poljoprivrede. U održivoj poljoprivredi strojno učenje koristi se za povećanje točnosti procjene nutritivnog statusa usjeva, što je važno za učinkovitu primjenu gnojiva i praćenje zdravstvenog stanja biljaka. Primjerice, kombinacija bespilotnih letjelica i tehnika strojnog učenja omogućuje procjenu indeksa ishranjenosti dušikom kod riže. Takav pristup može pridonijeti racionalnijem korištenju resursa i smanjenju negativnih utjecaja na okoliš povezanih s nepravodobnim ili neplanski provedenim agrotehničkim zahvatima (Botero-valencia i sur., 2025). Cilj ovoga rada je prikazati ulogu strojnog učenja u suvremenoj poljoprivredi, s naglaskom na izvore i vrste podataka, osnovne korake razvoja modela te najvažnije prednosti, ograničenja i izazove njihove primjene u poljoprivrednoj proizvodnji.

Izvori i vrste podataka u suvremenoj poljoprivredi

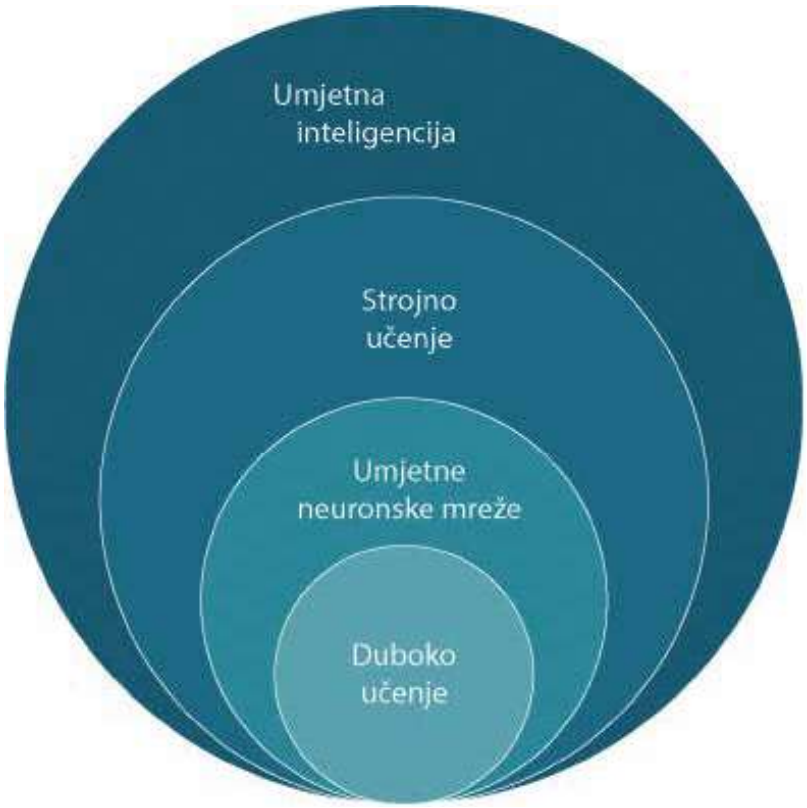
Podaci koji nastaju u suvremenoj poljoprivrednoj proizvodnji najčešće se prikupljaju različitim senzorima, uređajima i digitalnim sustavima. Takvi podaci omogućuju bolje razumijevanje proizvodnog okruženja, uključujući međudjelovanje usjeva, tla i vremenskih uvjeta, ali i samog proizvodnog procesa. Na temelju toga moguće je donositi brže i informiranije odluke u poljoprivrednoj proizvodnji (Benos i sur., 2021). Veliki podaci označavaju skupove strukturiranih i nestrukturiranih podataka koji nastaju i povećavaju se velikom, često teško predvidljivom brzinom. Riječ je o vrlo velikim količinama (digitalnih) podataka koje je teško pohraniti, obraditi i analizirati primjenom uobičajenih programskih alata i tradicionalnih tehnologija. Pojam „veliki podaci“(eng. Big data) često se koriste za opis suvremenog pristupa u kojem se napredne tehnologije i analitičke metode kombiniraju kako bi se velike količine podataka obradile na učinkovit i korisniku primjenjiv način (Madhuri i Indiramma, 2019). U preciznoj poljoprivredi koriste se različite vrste senzora za prikupljanje podataka o tlu, biljkama, mikroklimatskim uvjetima i prostornom položaju usjeva. U tablici 1 prikazani su primjeri najčešćih vrsta podataka i pripadajućih senzora koji se koriste u sustavima precizne i digitalne poljoprivrede (Triantafyllou i sur., 2019).

Tablica 1. Primjeri vrsta podataka i senzora u preciznoj poljoprivredi (Triantafyllou i sur., 2019)
Table 1. Examples of data types and sensors in precision agriculture (Triantafyllou et al., 2019)

Vrsta podatka	Vrsta senzora
Vlaga i temperatura tla	Zemaljski senzori
Boja tla	Senzori bespilotnih letjelica
Vlažnost i temperatura okoliša	Zemaljski senzori ili senzori bespilotnih letjelica
Vlažnost lista	Zemaljski senzori ili senzori bespilotnih letjelica
Električna vodljivost	Elektrokemijski senzori
Brzina i smjer vjetra	Meteorološke stanice
Barometarski tlak	Meteorološke stanice
Ugljikov dioksid	Elektrokemijski senzori
pH vrijednost	Elektrokemijski senzori
Intenzitet svjetlosti	Meteorološke stanice ili zemaljski senzori
Sunčevo zračenje	Meteorološke stanice ili zemaljski senzori

Vrsta podatka	Vrsta senzora
Oborine	Meteorološke stanice
Veličina usjeva	Senzori bespilotnih letjelica
Oblik usjeva	Senzori bespilotnih letjelica
Debljina stabljike biljke	Senzori bespilotnih letjelica
Geografska širina, geografska dužina i nadmorska visina biljaka	Lokacijski senzori

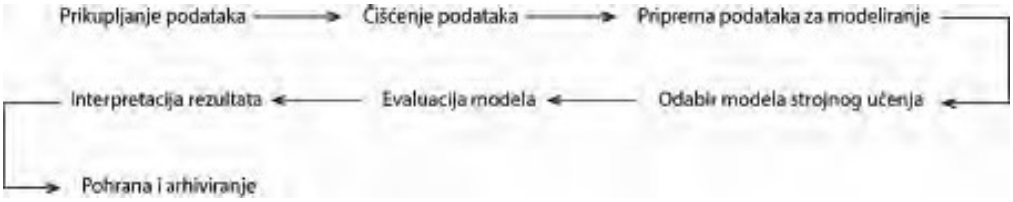
U praksi se navedeni izvori podataka najčešće kombiniraju kako bi se povećala pouzdanost modela strojnog učenja. Upravljanje podacima obuhvaća prikupljanje, pohranu, analizu i dijeljenje podataka unutar određene organizacije ili sustava. Analitika podataka definira se kao proces ispitivanja skupova podataka s ciljem prepoznavanja trendova, obrazaca i donošenja zaključaka na temelju informacija koje ti podaci sadržavaju. Uobičajeno se razlikuju četiri osnovne vrste analitike podataka: deskriptivna, dijagnostička, prediktivna i preskriptivna analitika (Tekinerdogan, 2023). U kontekstu poljoprivrede, pravilno upravljanje i analiza podataka predstavljaju temelj za primjenu strojnog učenja jer omogućuju pretvaranje velikih količina sirovih podataka u korisne informacije za donošenje odluka.



Slika 1. Hijerarhijski odnos umjetne inteligencije, strojnog učenja, umjetnih neuronskih mreža i dubokog učenja
Figure 1 The hierarchical relationship between artificial intelligence, machine learning, artificial neural networks, and deep learning.
Izvor/ Source: https://www.qlik.com/us/augmented-analytics/machine-learning-vs-ai

Metodologija razvoja modela strojnog učenja

Razvoj modela strojnog učenja u poljoprivredi može se prikazati kroz nekoliko osnovnih faza koje obuhvaćaju rad s podacima, kreiranje modela i interpretaciju dobivenih rezultata (Brandić i sur., 2023, 2025). Takav metodološki pristup omogućuje sustavnu obradu poljoprivrednih podataka i njihovo pretvaranje u korisne informacije za donošenje odluka. Na slici 2. prikazana je pojednostavljena shema operacija vezanih uz razvoj takvih modela.



Slika 2. Pojednostavljen prikaz metodologije razvoja strojnog učenja
Figure 2 Simplified overview of the machine learning development methodology
Izvor/ Source: Vlastiti izvor / personal source

Prva faza uključuje prikupljanje relevantnih podataka iz različitih izvora, poput senzora tla, meteoroloških stanica, satelitskih snimaka, bespilotnih letjelica, laboratorijskih analiza i proizvodnih evidencija. U poljoprivredi ti podaci mogu obuhvaćati informacije o tlu, vremenskim uvjetima, stanju usjeva, primjeni agrotehničkih mjera i ostvarenim prinosima. Nakon prikupljanja potrebno je provesti čišćenje podataka jer sirovi podaci često sadržavaju pogreške, nedostajuće vrijednosti, duplicirane zapise ili nelogične vrijednosti. Ova faza važna je jer kvaliteta ulaznih podataka izravno utječe na pouzdanost i točnost modela strojnog učenja. Priprema podataka uključuje njihovo oblikovanje u format prikladan za primjenu algoritama strojnog učenja. U ovoj fazi mogu se provoditi standardizacija mjernih jedinica, normalizacija vrijednosti, kodiranje kategorijskih varijabli te odabir značajki koje su važne za modeliranje. Nakon pripreme podataka odabire se odgovarajući model strojnog učenja ovisno o cilju analize. Primjerice, za predviđanje prinosa mogu se koristiti regresijski modeli, dok se za prepoznavanje bolesti, korova ili stanja usjeva mogu koristiti klasifikacijski modeli. Evaluacija modela provodi se kako bi se procijenila njegova točnost, pouzdanost i primjenjivost na novim podacima. Ovisno o vrsti problema, mogu se koristiti različiti pokazatelji uspješnosti, primjerice koeficijent determinacije, srednja apsolutna pogreška, točnost, preciznost i sl. Dobivene rezultate potrebno je pravilno interpretirati u agronomskom i proizvodnom kontekstu. Model strojnog učenja ne daje vrijednost samo kroz brojčanu predikciju, nego kroz mogućnost da se rezultati povežu s konkretnim odlukama, primjerice o navodnjavanju, gnojidbi, zaštiti bilja ili planiranju proizvodnje. Završna faza odnosi se na pohranu i arhiviranje podataka, modela i rezultata analize. Time se omogućuje ponovna provjera rezultata, usporedba s budućim podacima i daljnje poboljšavanje modela kroz nove proizvodne sezone.

Prednosti, ograničenja i izazovi primjene strojnog učenja

Primjena strojnog učenja u okruženju velikih podataka omogućuje izdvajanje korisnih informacija iz velikih i složenih skupova podataka, izradu predikcija i potporu donošenja odluka. Međutim takva primjena uključuje značajne izazove povezane sa skalabilnošću algoritama, kvalitetom podataka, interpretabilnošću modela, problematikom privatnosti i sigurnosti te obradom raznolikih i brzo nastajućih podataka (Dritsas i Trigka, 2025). Poseban izazov pred-

stavlja činjenica da tradicionalni algoritmi strojnog učenja često nisu razvijeni za obradu (današnjih) vrlo velikih skupova podataka. Kako se povećavaju broj uzoraka i broj značajki, rastu računalni zahtjevi i potreba za pohranom. Osim toga, veliki podaci često uključuju strukturirane, polustrukturirane i nestrukturirane podatke, što dodatno otežava njihovu pripremu i zajedničku analizu. Kvaliteta podataka jedan je od ključnih preduvjeta pouzdane primjene strojnog učenja. Veliki skupovi podataka često mogu sadržavati nedostajuće vrijednosti, šum, pogreške, duplicirane zapise i nedosljednosti. Zbog toga su prije modeliranja potrebni postupci čišćenja, integracije, transformacije, normalizacije izbor značajki. Dodatno ograničenje odnosi se na interpretabilnosti modela. Složeni modeli mogu postići veliku prediktivnu točnost, ali je često teško objasniti način na koji dolaze do određenih odluka. U kontekstu velikih podataka važni su i privatnost, sigurnost te etički aspekti. Korištenje velikih količina podataka može otvoriti pitanja zaštite osjetljivih informacija, usklađenosti s propisima, pristranosti modela, odgovornosti i pravednosti. Autori također ističu okolišni aspekt, odnosno povećanu potrošnju energije povezanu s treniranjem velikih i računalno zahtjevnih modela (Dritsas i Trigka, 2025).

Zaključak

Strojno učenje predstavlja važan alat u razvoju suvremene, precizne i digitalne poljoprivrede. Njegova primjena omogućuje obradu velikih količina podataka prikupljenih iz različitih izvora, poput senzora, meteoroloških stanica, satelitskih snimaka, bespilotnih letjelica i proizvodnih evidencija. Modeli strojnog učenja mogu se koristiti za praćenje stanja usjeva, predviđanje prinosa, optimizaciju navodnjavanja i gnojidbe, detekciju bolesti i korova te učinkovitije upravljanje proizvodnim resursima. Uspješnost primjene strojnog učenja u velikoj mjeri ovisi o kvaliteti podataka, njihovom pravilnom čišćenju, pripremi, pohrani i analizi. Posebni izazovi odnose se na nedostajuće i neujednačene podatke, šum u podacima, raznolikost izvora podataka, računalne zahtjeve, interpretabilnost modela te pitanja privatnosti i sigurnosti. Strojno učenje ne treba promatrati kao zamjenu za agronomsko znanje, nego kao alat za podršku odlučivanju u poljoprivrednoj proizvodnji. Daljnji razvoj ovoga područja ovisit će o dostupnosti kvalitetnih podataka, razvoju pouzdanih i razumljivih modela te njihovoj primjeni u stvarnim proizvodnim uvjetima.

Literatura

Benos, L., Tagarakis, A. C., Dolias, G., Berruto, R., Kateris, D., Bochtis, D. (2021) *Machine learning in agriculture: A comprehensive updated review. Sensors, 21 (11), 1–55. DOI: https://doi.org/10.3390/s21113758*

Botero-Valencia, J., García-Pineda, V., Valencia-Arias, A., Valencia, J., Reyes-Vera, E., Mejia-Herrera, M., Hernández-García, R. (2025) *Machine learning in sustainable agriculture: Systematic review and research perspectives, 1–37.*

Brandić, I., Matin, A., Špelić, K., Jovičić, N., Matin, B., Grubor, M., Voća, N. (2025) *Generalized ANN model for predicting the energy potential of heterogeneous waste, 1–12.*

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 (9). DOI: https://doi.org/10.3390/math11092098*

Dritsas, E., Trigka, M. (2025) *Exploring the intersection of machine learning and big data: A survey.*

Madhuri, J., Indiramma, M. (2019) *Role of big data in agriculture. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 2, 3811–3821. DOI: https://doi.org/10.35940/ijitee.A5346.129219*

Sadiku, M. N. O., Ajayi, S. A., Sadiku, J. O. (2025) *Machine learning: An overview, 9 (5).*

Tekinerdogan, B. (2023) *Data management in precision agriculture.*
Triantafyllou, A., Sarigiannidis, P., Bibi, S. (2019) *Precision agriculture: A remote sensing monitoring system architecture. Information, 10 (11). DOI: https://doi.org/10.3390/info10110348*

Prispjelo/Received: 2.7.2026. ***Prihvaćeno/Accepted: 7.9.2026.***

Professional paper

Application of Machine Learning in Agriculture

Abstract
Machine learning is increasingly applied in agriculture as a tool for processing large volumes of data and supporting decision-making in agricultural production. The development of precision and digital agriculture has enabled the collection of various types of data through sensors, weather stations, satellite imagery, unmanned aerial vehicles, GPS systems, and other digital technologies. Such data can be used to monitor soil and crop conditions, predict yields, optimise irrigation and fertilisation, and manage natural resources more efficiently. This paper outlines the importance of data sources and types in modern agriculture, the basic methodology for developing machine learning models, and the key advantages, limitations, and challenges associated with their application. Although machine learning offers significant opportunities to enhance the efficiency and sustainability of agricultural production, its implementation requires careful data management, appropriate computing infrastructure, and expert understanding of the production system.
Keywords: *machine learning, agriculture, big data, precision agriculture, digital agriculture, data management*

