



**Sveučilište u Zagrebu**

**Geodetski fakultet**

Luka Pavlović i Dario Ružić

# **Integrirani senzorski sustavi u poljoprivredi**

Integrirani sustavi u geomatici

Seminarski rad

Zagreb, siječanj 2026.

## **Sadržaj**

<b>1. Uvod i problematika suvremene poljoprivrede</b> .....	1
<b>2. Precizna poljoprivreda – koncept, razvoj i temeljna načela</b> .....	3
<b>3. Senzori u poljoprivredi i prikupljanje podataka</b> .....	7
<b>4. Integrirani senzorski sustavi i Internet stvari (IoT)</b> .....	11
<b>5. GIS sustavi i prostorna analiza u preciznoj poljoprivredi</b> .....	14
<b>6. Digitalni dvojnici u poljoprivredi</b> .....	16
<b>7. Platforme za integraciju senzorskih sustava u poljoprivredi</b> .....	19
<b>7.1 John Deere Operations Center</b> .....	20
7.1.1 Problemi suvremene poljoprivrede.....	20
7.1.2 Koncept integriranih senzorskih sustava i tehnologija Sense & Act .....	20
7.1.3 Integrirani senzori i pametno prskanje – See & Spray tehnologija .....	21
7.1.4 Proširenje pametnog prskanja na visokovrijedne kulture – Smart Apply.....	21
7.1.6 Autonomni strojevi .....	22
7.1.7 Digitalne platforme i John Deere Operations Center .....	23
<b>7.2 CLASS connect</b> .....	24
7.2.1 Uloga tvrtke CLASS.....	24
7.2.2 Integrirani senzorski sustavi i umrežavanje strojeva putem CLAAS connect.....	25
7.2.3 Digitalne platforme, analitika i precizna poljoprivreda u CLAAS sustavu.....	26
<b>7.3 Platforma AGRIVI</b> .....	27
7.3.1 AGRIVI – Digitalna platforma za pametnu poljoprivredu.....	27
7.3.2 AGRIVI Connect – integracija senzora i real-time podaci.....	27
7.3.3 Upravljanje podacima i analiza putem AGRIVI 360.....	29
<b>7.4 JetBov - integrirana digitalna platforma namijenjena upravljanju stočarskom proizvodnjom</b> .....	31
<b>8. Benefiti integriranih senzorskih sustava u poljoprivredi</b> .....	33
<b>8.1 Ekonomski benefiti</b> .....	33
<b>8.2 Ekološki benefiti</b> .....	33
<b>8.3 Operativni i organizacijski benefiti</b> .....	34
<b>8.4 Društveni i strateški benefiti</b> .....	34
<b>8.5 Ograničenja i potreba za uravnoteženim pristupom</b> .....	35
<b>9. Izazovi, ograničenja i etički aspekti integriranih senzorskih sustava u poljoprivredi</b> .....	35
<b>9.1 Tehnički izazovi i ograničenja</b> .....	36
<b>9.2 Ekonomska ograničenja i pristupačnost</b> .....	36
<b>9.3 Organizacijski i ljudski faktori</b> .....	36
<b>9.4 Upravljanje podacima i sigurnost</b> .....	37

9.5 Etički i društveni aspekti .....	38
9.6 Potreba za integriranim i održivim pristupom .....	38
<b>10. Budući razvoj i trendovi integriranih senzorskih sustava u poljoprivredi .....</b>	<b>38</b>
10.1 Napredak senzorskih tehnologija.....	38
10.2 Integracija umjetne inteligencije i strojnog učenja .....	39
10.3 Razvoj digitalnih dvojnika .....	39
10.4 Autonomni sustavi i robotika .....	39
10.5 Otvorene platforme i interoperabilnost.....	40
10.6 Uloga politike i društva.....	40
<b>11. Zaključak.....</b>	<b>41</b>
<b>Literatura (odabrani izvori) .....</b>	<b>43</b>
<b>Popis slika.....</b>	<b>44</b>

# 1. Uvod i problematika suvremene poljoprivrede

Poljoprivreda predstavlja jednu od najstarijih i najvažnijih ljudskih djelatnosti, a njezina uloga u osiguravanju hrane, očuvanju ruralnih područja i stabilnosti društva od iznimne je važnosti. Međutim, suvremena poljoprivreda suočava se s brojnim izazovima koji značajno nadilaze tradicionalne proizvodne probleme. Globalni rast stanovništva, klimatske promjene, degradacija tla, ograničeni vodni resursi te rastući zahtjevi za smanjenjem negativnog utjecaja na okoliš stvaraju snažan pritisak na poljoprivredni sektor. U takvom kontekstu, tradicionalni načini upravljanja poljoprivrednom proizvodnjom, temeljeni na iskustvu, intuiciji i prosječnim vrijednostima, sve češće se pokazuju nedostatnima.

Jedan od ključnih problema suvremene poljoprivrede jest izražena prostorna i vremenska varijabilnost proizvodnih uvjeta. Unutar iste poljoprivredne parcele mogu postojati značajne razlike u svojstvima tla, dostupnosti vode, mikroklimatskim uvjetima i stanju usjeva. Konvencionalni pristup, koji podrazumijeva jednaku primjenu gnojiva, pesticida i vode na cijeloj površini, često dovodi do neučinkovitog korištenja resursa. Takav pristup može uzrokovati prekomjernu primjenu inputa na dijelovima polja gdje to nije potrebno, dok istovremeno zanemaruje zone s većim potrebama, što rezultira smanjenjem prinosa i povećanjem troškova.

Klimatske promjene dodatno pojačavaju složenost poljoprivredne proizvodnje. Sve češće pojave ekstremnih vremenskih uvjeta, poput suša, toplinskih valova, obilnih oborina i mrazeva, povećavaju rizik proizvodnje i smanjuju predvidivost prinosa. Poljoprivrednici su prisiljeni donositi odluke u uvjetima visoke nesigurnosti, pri čemu pogrešne odluke mogu imati ozbiljne ekonomske posljedice. U takvom okruženju, dostupnost pravovremenih i točnih informacija postaje ključna za održavanje konkurentnosti i održivosti poljoprivrednih gospodarstava.

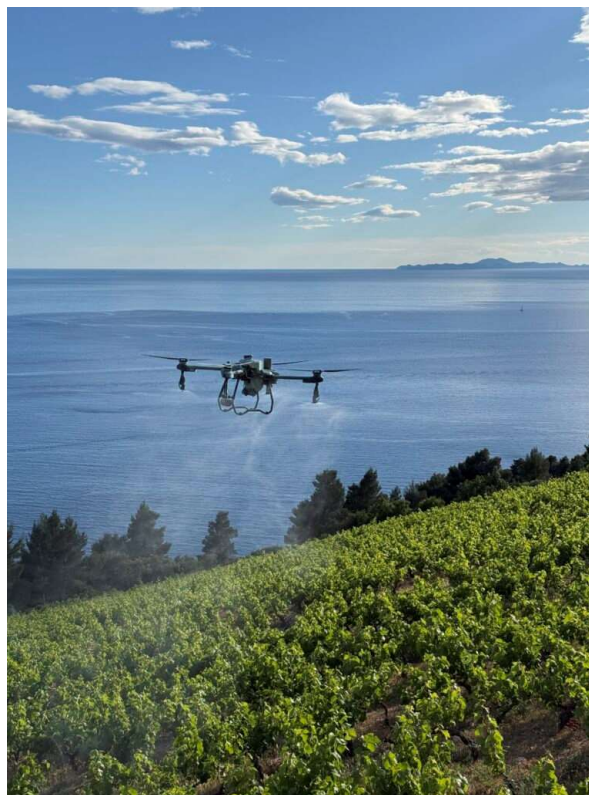


*Slika 1. Suša poljoprivredne kulture*

Osim klimatskih i proizvodnih izazova, suvremena poljoprivreda suočava se i s rastućim zahtjevima društva u pogledu zaštite okoliša i održivog korištenja prirodnih resursa. Prekomjerna uporaba mineralnih gnojiva i pesticida povezuje se s onečišćenjem tla i voda, smanjenjem bioraznolikosti i negativnim utjecajem na zdravlje ljudi. Zbog toga se sve više naglašava potreba za preciznijim, ciljanijim i racionalnijim pristupom poljoprivrednoj proizvodnji, koji omogućuje smanjenje negativnih utjecaja na okoliš bez ugrožavanja prinosa.

U tom kontekstu dolazi do izražaja digitalizacija poljoprivrede, odnosno primjena informacijsko-komunikacijskih tehnologija u svim fazama proizvodnog procesa. Digitalna poljoprivreda obuhvaća širok spektar tehnologija, uključujući senzore, satelitske sustave, bespilotne letjelice (dronove), geografske informacijske sustave (GIS), Internet stvari (IoT), umjetnu inteligenciju i sustave za podršku odlučivanju. Središnje mjesto unutar tog koncepta zauzimaju integrirani senzorski sustavi, koji omogućuju kontinuirano prikupljanje podataka o stanju tla, usjeva, okoliša i poljoprivrednih strojeva.

Integrirani senzorski sustavi predstavljaju tehnološku osnovu za razvoj precizne poljoprivrede, koncepta koji omogućuje prilagodbu agrotehničkih mjera stvarnim potrebama usjeva na određenoj lokaciji i u određenom trenutku. Za razliku od izolirane primjene pojedinih senzora, integrirani sustavi omogućuju objedinjavanje podataka iz različitih izvora i njihovu zajedničku analizu. Takav pristup omogućuje dublje razumijevanje složenih interakcija između tla, biljaka, klime i upravljanja, što je preduvjet za donošenje optimalnih odluka.



*Slika 2. Dron korišten u svrhe poljoprivrede*

Važno je naglasiti da suvremeni integrirani senzorski sustavi nadilaze jednostavno prikupljanje podataka. Oni uključuju digitalne platforme koje objedinjuju senzorske podatke, GIS analizu i modele za predviđanje i optimizaciju. Takve platforme omogućuju stvaranje digitalnih dvojnika poljoprivrednih sustava, odnosno virtualnih modela koji vjerno odražavaju stvarno stanje na terenu. Digitalni dvojnici omogućuju simulaciju različitih scenarija, procjenu učinaka određenih odluka i smanjenje rizika prije njihove primjene u stvarnom okruženju.

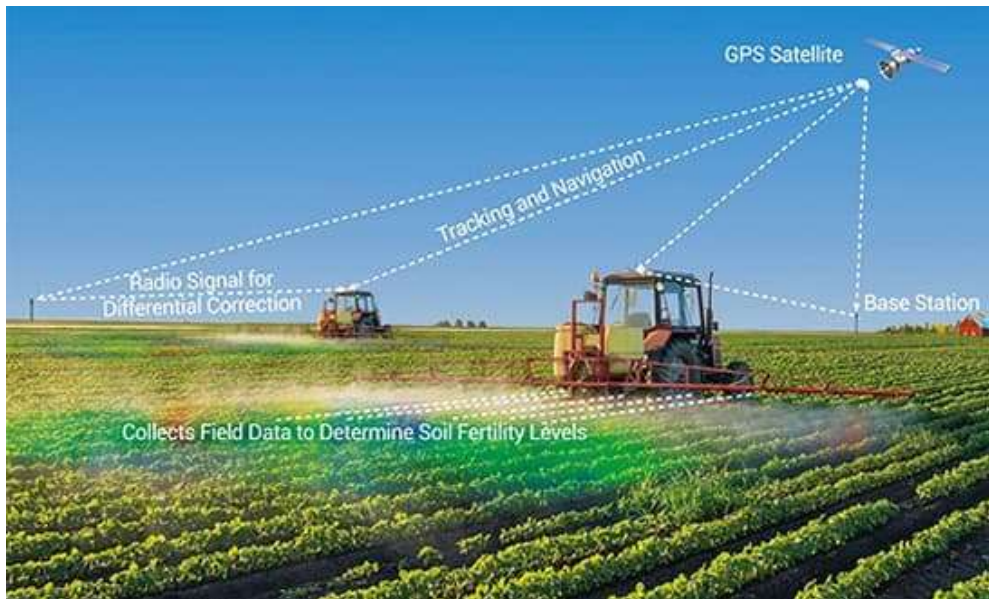
Uloga integriranih senzorskih sustava posebno je važna u kontekstu velikih i srednjih poljoprivrednih gospodarstava, ali sve češće i u malim obiteljskim gospodarstvima. Iako početna ulaganja u senzore i digitalne platforme mogu biti značajna, dugoročne koristi u vidu povećanja učinkovitosti, smanjenja troškova i stabilnijih prinosa opravdavaju njihovu primjenu. Osim toga, razvoj tehnologije i pad cijena senzorske opreme postupno čine ove sustave dostupnijima širem krugu korisnika.

S obzirom na sve navedeno, jasno je da se suvremena poljoprivreda nalazi u fazi prijelaza s tradicionalnih metoda upravljanja na podatkovno vođene, digitalno integrirane sustave. Integrirani senzorski sustavi, u kombinaciji s GIS-om i digitalnim platformama, predstavljaju ključni alat za uspješno suočavanje s izazovima današnje i buduće poljoprivrede. Razumijevanje njihove uloge, strukture i potencijala stoga je od iznimne važnosti za daljnji razvoj poljoprivredne znanosti i prakse.

## **2. Precizna poljoprivreda – koncept, razvoj i temeljna načela**

Precizna poljoprivreda predstavlja suvremeni pristup upravljanju poljoprivrednom proizvodnjom koji se temelji na prikupljanju, analizi i primjeni podataka s ciljem optimizacije proizvodnih procesa. Za razliku od tradicionalne poljoprivrede, koja se oslanja na prosječne vrijednosti i uniformne agrotehničke mjere, precizna poljoprivreda uvažava prostornu i vremensku varijabilnost unutar poljoprivrednih parcela. Temeljna ideja ovog koncepta jest primjena odgovarajuće mjere, u odgovarajuće vrijeme, na odgovarajućem mjestu i u odgovarajućoj količini, čime se postiže veća učinkovitost korištenja resursa, povećanje prinosa i smanjenje negativnog utjecaja na okoliš.

Razvoj precizne poljoprivrede započeo je krajem 20. stoljeća, paralelno s razvojem satelitske navigacije i informacijskih tehnologija. Uvođenje sustava globalnog pozicioniranja (GPS) omogućilo je precizno određivanje položaja poljoprivrednih strojeva i operacija na polju, što je otvorilo put prikupljanju prostornih podataka o prinosima, svojstvima tla i stanju usjeva. Prvi koraci precizne poljoprivrede bili su usmjereni na mapiranje prinosa i varijabilnu primjenu gnojiva, no s vremenom se koncept značajno proširio i obuhvatio širok spektar tehnologija i metoda.



Slika 3. Shema prikupljanja podataka

Jedan od ključnih elemenata precizne poljoprivrede jest upravljanje prostornom varijabilnošću. Poljoprivredna parcela nije homogena cjelina, već kompleksan sustav u kojem se fizička, kemijska i biološka svojstva tla mogu značajno razlikovati na malim udaljenostima. Razlike u teksturi tla, sadržaju hranjiva, pH vrijednosti, kapacitetu zadržavanja vode i mikroreljefu izravno utječu na rast i razvoj biljaka. Precizna poljoprivreda omogućuje identificiranje tih razlika i prilagodbu agrotehničkih mjera stvarnim potrebama pojedinih zona unutar polja.

Temelj precizne poljoprivrede čine podaci, a njihovo prikupljanje provodi se putem različitih senzora i sustava. Podaci se mogu prikupljati s tla, iz zraka ili putem satelita, a obuhvaćaju informacije o vlažnosti tla, temperaturi, električnoj vodljivosti, biomasi usjeva, indeksu vegetacije, meteorološkim uvjetima i radu poljoprivrednih strojeva. Međutim, sama dostupnost podataka nije dovoljna. Ključna vrijednost precizne poljoprivrede proizlazi iz sposobnosti analize i interpretacije tih podataka te njihove primjene u donošenju odluka.

U tom kontekstu važno je razlikovati preciznu poljoprivredu od pukog korištenja napredne mehanizacije. Iako su suvremeni poljoprivredni strojevi važan dio sustava, precizna poljoprivreda nije ograničena na vozila i opremu. Ona predstavlja integrirani sustav koji povezuje senzore, informacijske tehnologije, GIS sustave i platforme za podršku odlučivanju. Upravo ta integracija omogućuje stvaranje cjelovite slike poljoprivrednog sustava i prelazak s reaktivnog na proaktivno upravljanje proizvodnjom.

Jedno od temeljnih načela precizne poljoprivrede jest varijabilna primjena inputa. Na temelju prikupljenih i analiziranih podataka moguće je prilagoditi količinu sjemena, gnojiva, pesticida i vode specifičnim potrebama pojedinih zona unutar polja. Na primjer, dijelovi polja s većim potencijalom prinosa mogu dobiti veće količine hranjiva, dok se na slabijim zonama primjena može smanjiti ili prilagoditi. Time se ne samo povećava učinkovitost proizvodnje, već se smanjuju i troškovi te negativni utjecaji na okoliš.

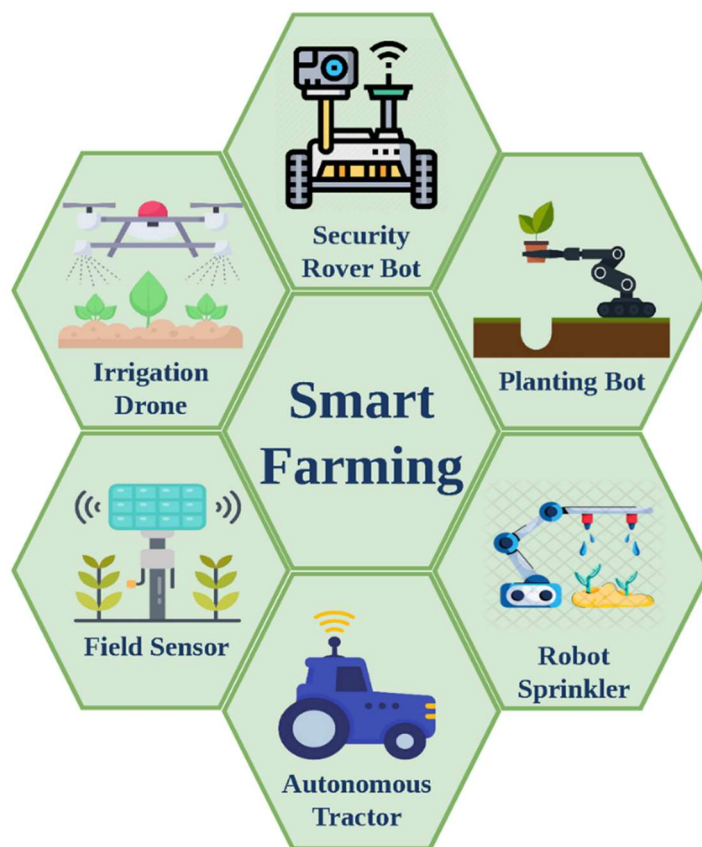
Drugo važno načelo precizne poljoprivrede jest pravovremenost. Mnogi procesi u poljoprivredi izrazito su osjetljivi na vrijeme primjene agrotehničkih mjera. Kašnjenje u gnojidbi, navodnjavanju ili zaštiti bilja može značajno smanjiti prinos i kvalitetu proizvoda. Integrirani senzorski sustavi omogućuju kontinuirano praćenje stanja usjeva i okoliša, čime se osigurava pravovremena reakcija na promjene i stresne uvjete.



*Slika 4. Gnojidba*

Precizna poljoprivreda također se temelji na sustavnom upravljanju znanjem. Prikupljeni podaci ne koriste se samo za donošenje kratkoročnih odluka, već i za dugoročno planiranje i optimizaciju proizvodnje. Analiza višegodišnjih podataka o prinosima, vremenskim uvjetima i primijenjenim mjerama omogućuje identifikaciju trendova i uzoraka, što je od velike važnosti za strateško upravljanje poljoprivrednim gospodarstvom.

Razvojem digitalnih tehnologija, precizna poljoprivreda sve se više povezuje s konceptima pametne poljoprivrede (smart farming) i digitalne poljoprivrede. Dok se precizna poljoprivreda primarno fokusira na optimizaciju proizvodnje na razini parcele, pametna poljoprivreda obuhvaća širi sustav koji uključuje automatizaciju, autonomne strojeve, umjetnu inteligenciju i integraciju s tržištem i lancima opskrbe. U tom smislu, precizna poljoprivreda predstavlja temeljni korak prema potpunoj digitalnoj transformaciji poljoprivrednog sektora.



Slika 5. Komponente pametne poljoprivrede

Važno je naglasiti i socioekonomski aspekt precizne poljoprivrede. Iako tehnologija nudi brojne prednosti, njezina uspješna primjena ovisi o znanju, vještinama i spremnosti poljoprivrednika na promjene. Edukacija i savjetodavne službe imaju ključnu ulogu u prijenosu znanja i podršci korisnicima u implementaciji novih tehnologija. Također, pristup preciznoj poljoprivredi mora biti prilagođen različitim veličinama i tipovima poljoprivrednih gospodarstava kako bi se izbjeglo produblјivanje digitalnog jaza između velikih i malih proizvođača.

Ukratko, precizna poljoprivreda predstavlja odgovor na ključne izazove suvremene poljoprivrede. Temeljena na podacima, tehnologiji i integriranom pristupu, ona omogućuje učinkovitije korištenje resursa, povećanje produktivnosti i smanjenje negativnog utjecaja na okoliš. Razumijevanje koncepta, razvoja i temeljnih načela precizne poljoprivrede ključno je za daljnju analizu uloge senzora, integriranih sustava i digitalnih platformi, koji će biti detaljno razmotreni u sljedećim poglavljima.

### 3. Senzori u poljoprivredi i prikupljanje podataka

Senzori predstavljaju temeljnu komponentu precizne i digitalne poljoprivrede jer omogućuju objektivno, kontinuirano i prostorno precizno prikupljanje podataka o stanju poljoprivrednog sustava. Bez pouzdanih senzorskih podataka nije moguće učinkovito upravljanje prostornom i vremenskom varijabilnošću proizvodnih uvjeta, niti donošenje odluka temeljenih na stvarnom stanju na terenu. Razvoj senzorske tehnologije posljednjih desetljeća značajno je unaprijedio mogućnosti praćenja tla, usjeva, okoliša i poljoprivrednih strojeva, čime je stvoren tehnološki temelj za integrirane senzorske sustave i digitalne platforme.

U poljoprivredi se koristi širok spektar senzora koji se mogu klasificirati prema mjerenom parametru, načinu rada ili mjestu primjene. Najčešće se razlikuju senzori tla, senzori usjeva, meteorološki senzori te senzori ugrađeni u poljoprivredne strojeve i opremu. Svaka od ovih skupina ima specifičnu ulogu u prikupljanju podataka i doprinosi cjelovitom razumijevanju proizvodnog sustava.

Senzori tla koriste se za mjerenje fizikalnih i kemijskih svojstava tla koja izravno utječu na rast i razvoj biljaka. Među najvažnijim parametrima su vlažnost tla, temperatura, električna vodljivost, pH vrijednost i sadržaj hranjiva. Senzori vlažnosti tla omogućuju praćenje dostupnosti vode u zoni korijena i ključni su za optimizaciju navodnjavanja. Na temelju tih podataka moguće je smanjiti potrošnju vode i izbjeći stres biljaka uzrokovan nedostatkom ili viškom vlage. Senzori električne vodljivosti tla često se koriste za procjenu teksture i prostorne varijabilnosti tla, što je važno za zoniranje polja i prilagodbu agrotehničkih mjera.



Slika 6. Senzor tla

Kemijski senzori tla, iako još uvijek tehnološki izazovni i skuplji, omogućuju mjerenje koncentracije pojedinih hranjiva i pH vrijednosti u stvarnom vremenu. Njihova primjena otvara mogućnost precizne i varijabilne gnojidbe, čime se smanjuje gubitak hranjiva i onečišćenje okoliša. Međutim, zbog zahtjevne kalibracije i osjetljivosti na uvjete okoliša, ovi senzori često se koriste u kombinaciji s laboratorijskim analizama i modelima procjene.

Senzori usjeva usmjereni su na praćenje stanja i vitalnosti biljaka tijekom vegetacije. Najčešće se koriste optički senzori koji mjere refleksiju svjetlosti u različitim dijelovima elektromagnetskog spektra. Na temelju tih mjerenja izračunavaju se vegetacijski indeksi, poput NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), koji pružaju informacije o biomasi, fotosintetskoj aktivnosti i stresu biljaka. Takvi senzori mogu biti postavljeni na poljoprivredne strojeve, dronove ili satelite, čime se omogućuje praćenje velikih površina u relativno kratkom vremenu.

Optički senzori omogućuju rano otkrivanje problema u usjevima, poput nedostatka hranjiva, bolesti ili štetnika, često prije nego što su simptomi vidljivi golim okom. Pravovremena identifikacija problema omogućuje ciljanu primjenu zaštitnih sredstava i smanjenje ukupne količine pesticida. Osim optičkih senzora, sve se više koriste i termalni senzori koji mjere temperaturu krošnje biljaka i mogu ukazivati na vodni stres.



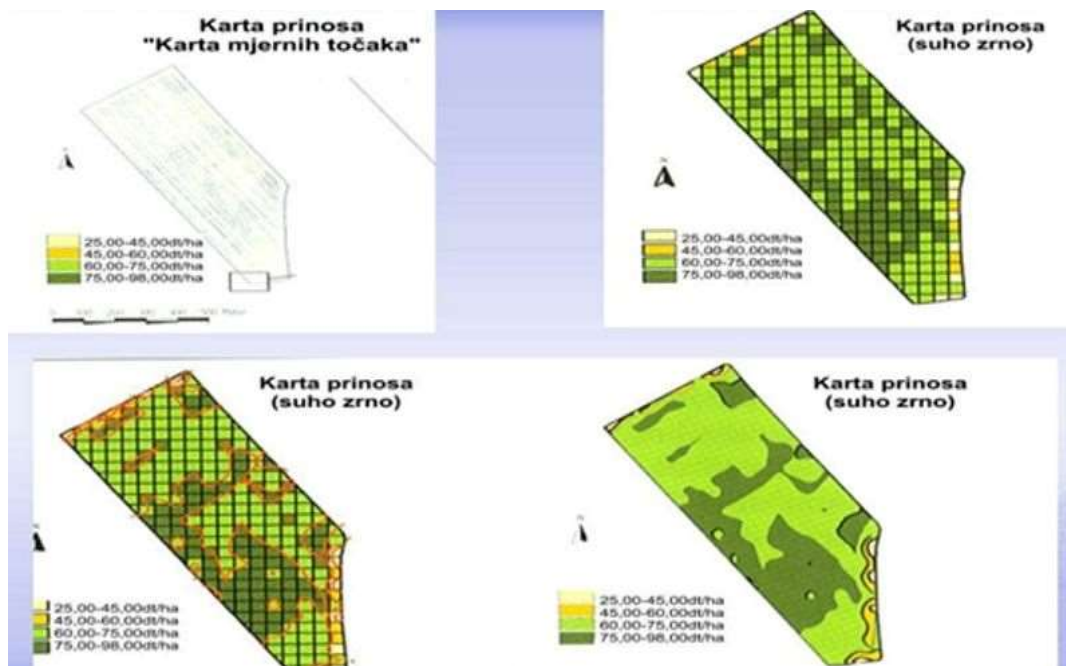
*Slika 7. Senzor usjeva*

Meteorološki senzori imaju ključnu ulogu u prikupljanju podataka o okolišnim uvjetima koji utječu na rast biljaka i razvoj bolesti. Automatizirane meteorološke postaje mjere parametre poput temperature zraka, relativne vlažnosti, oborina, brzine i smjera vjetra te sunčevog zračenja. Ovi podaci koriste se za modeliranje rasta usjeva, prognoziranje pojave bolesti i štetnika te planiranje agrotehničkih zahvata. Lokalni meteorološki podaci posebno su važni jer se uvjeti mogu značajno razlikovati od onih zabilježenih na udaljenim službenim postajama.



Slika 8. Meteorološki senzor

Posebnu kategoriju čine senzori integrirani u poljoprivredne strojeve, koji omogućuju prikupljanje podataka tijekom izvođenja poljoprivrednih operacija. Primjerice, senzori prinosa ugrađeni u kombajne mjere količinu i vlažnost ubranog zrna, čime se stvaraju karte prinosa visoke prostorne rezolucije. Senzori položaja i brzine omogućuju precizno mapiranje operacija, dok senzori potrošnje goriva i opterećenja stroja pružaju informacije o učinkovitosti rada.



Slika 9. Karte prinosa

Važan aspekt senzorskog prikupljanja podataka jest točnost i pouzdanost mjerenja. Senzori moraju biti pravilno kalibrirani i održavani kako bi se osigurala kvaliteta podataka. Pogrešni ili nekonzistentni podaci mogu dovesti do pogrešnih odluka i smanjenja učinkovitosti sustava. Stoga je upravljanje kvalitetom podataka ključno u preciznoj poljoprivredi i uključuje provjeru, filtriranje i validaciju senzorskih mjerenja.

Prikupljeni podaci sami po sebi nemaju veliku vrijednost ako nisu pravilno pohranjeni, obrađeni i analizirani. U suvremenim sustavima podaci se najčešće prikupljaju putem bežičnih mreža i prenose u centralne baze podataka ili cloud platforme. Tamo se podaci integriraju s prostornim informacijama iz GIS sustava i dodatnim izvorima, poput satelitskih snimaka ili povijesnih zapisa. Takva integracija omogućuje višedimenzionalnu analizu i stvaranje informacija koje su razumljive i korisne krajnjim korisnicima.

Razvoj senzorske tehnologije i smanjenje cijena opreme omogućili su širu primjenu senzora u poljoprivredi, uključujući i mala gospodarstva. Međutim, izazovi i dalje postoje, osobito u pogledu interoperabilnosti različitih senzora i sustava različitih proizvođača. Standardizacija komunikacijskih protokola i formata podataka ključna je za uspješnu integraciju senzora u jedinstvene platforme.



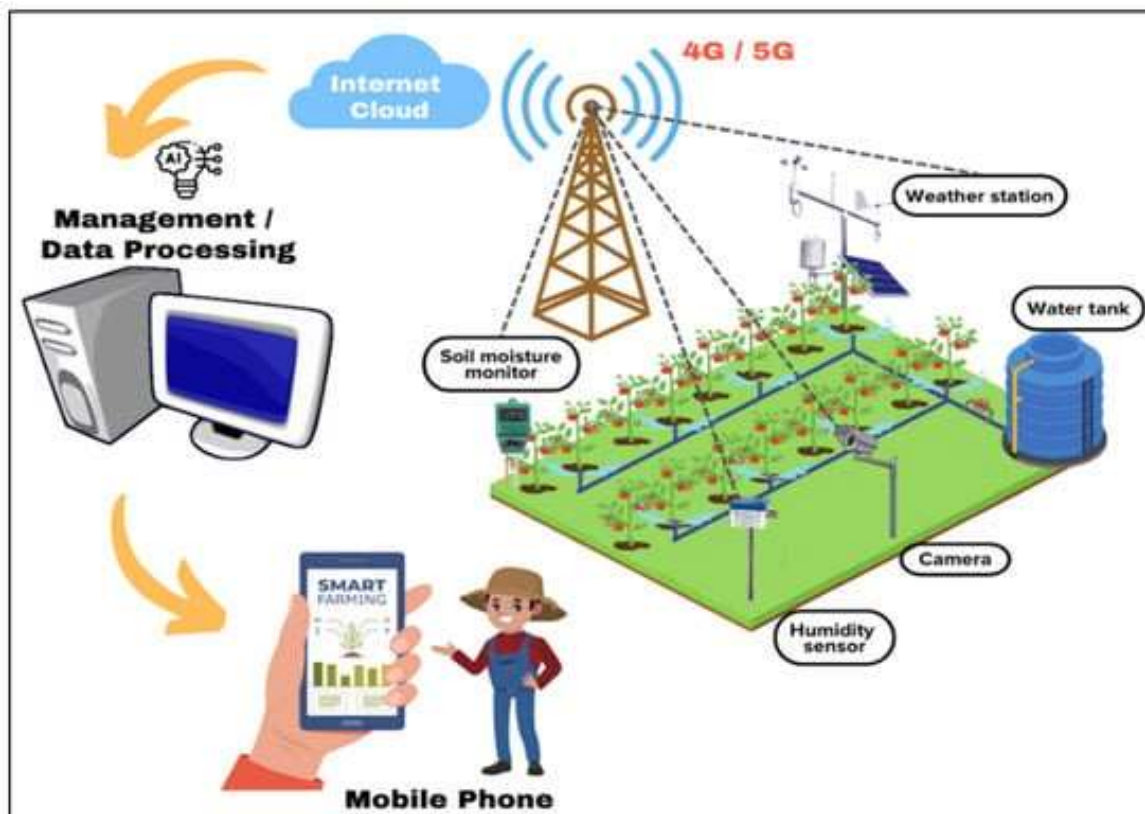
*Slika 10. Real-time stvaranje karte prinosa*

Senzori predstavljaju osnovni izvor podataka za preciznu poljoprivredu i integrirane senzorske sustave. Njihova raznolika primjena omogućuje detaljno praćenje tla, usjeva, okoliša i rada strojeva, čime se stvara temelj za donošenje informiranih i pravovremenih odluka. U sljedećem poglavlju bit će razmotreno kako se pojedinačni senzori povezuju u integrirane senzorske sustave i kako Internet stvari (IoT) omogućuje njihovu učinkovitu komunikaciju i upravljanje.

## 4. Integrirani senzorski sustavi i Internet stvari (IoT)

Integrirani senzorski sustavi predstavljaju sljedeći razvojni korak u primjeni senzorske tehnologije u poljoprivredi. Za razliku od izoliranog korištenja pojedinačnih senzora, integrirani sustavi povezuju različite senzorske izvore u jedinstvenu cjelinu koja omogućuje objedinjeno prikupljanje, prijenos, pohranu i analizu podataka. Takav pristup ključan je za učinkovitu primjenu precizne poljoprivrede jer omogućuje cjelovito sagledavanje složenih interakcija između tla, biljaka, okoliša i poljoprivrednih operacija. U središtu ovih sustava nalazi se koncept Interneta stvari (IoT), koji omogućuje međusobnu komunikaciju senzora, uređaja i digitalnih platformi.

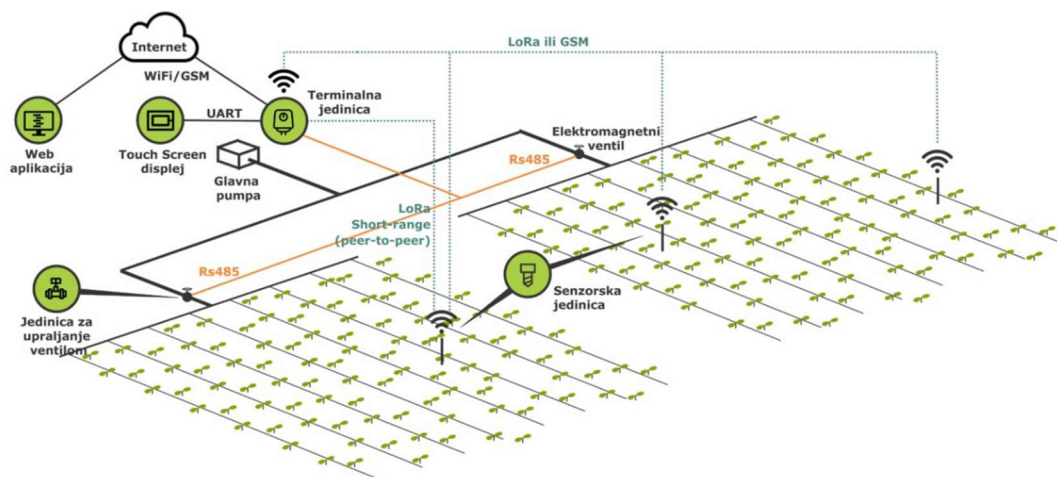
Internet stvari u poljoprivredi obuhvaća mrežu fizičkih uređaja opremljenih sensorima, komunikacijskim modulima i softverom, koji omogućuju automatsko prikupljanje i razmjenu podataka bez potrebe za stalnom ljudskom intervencijom. IoT sustavi u poljoprivredi uključuju senzore tla i usjeva, meteorološke postaje, pametne sustave navodnjavanja, poljoprivredne strojeve te centralne platforme za obradu podataka. Integracija ovih komponenti omogućuje stvaranje inteligentnih sustava sposobnih za nadzor, analizu i podršku odlučivanju u realnom vremenu.



Slika 11. Shema IoT-a u pametnoj poljoprivredi

Arhitektura integriranih senzorskih sustava u poljoprivredi obično se sastoji od nekoliko razina. Senzorska razina obuhvaća fizičke senzore koji mjere različite parametre, poput vlažnosti tla, temperature, stanja usjeva i meteoroloških uvjeta. Ovi senzori mogu biti statični, postavljeni na određenim lokacijama, ili mobilni, ugrađeni u poljoprivredne strojeve ili bespilotne letjelice. Komunikacijska razina omogućuje prijenos podataka sa senzora do centralnog sustava, dok razina obrade i aplikacija obuhvaća pohranu, analizu i vizualizaciju podataka te generiranje preporuka za korisnike.

Komunikacija između senzora i centralnih sustava ključna je komponenta IoT arhitekture. U poljoprivredi se koriste različite komunikacijske tehnologije, ovisno o potrebama sustava, udaljenosti i dostupnosti infrastrukture. Bežične tehnologije kratkog dometa, poput Wi-Fi i Bluetootha, koriste se u ograničenim područjima, dok se za veće površine često primjenjuju tehnologije dugog dometa i niske potrošnje energije, poput LoRaWAN-a i NB-IoT-a. Mobilne mreže (3G, 4G i 5G) također imaju važnu ulogu, osobito u prijenosu velikih količina podataka i integraciji s cloud platformama.



Slika 12. Komunikacija putem LoRaWAN-a

Jedna od ključnih prednosti integriranih senzorskih sustava jest automatizacija prikupljanja i obrade podataka. Tradicionalni pristupi često su zahtijevali ručno očitavanje senzora i unos podataka, što je bilo vremenski zahtjevno i podložno pogreškama. IoT sustavi omogućuju kontinuirano i automatsko prikupljanje podataka u stvarnom vremenu, čime se povećava točnost i pouzdanost informacija. Osim toga, automatizacija omogućuje brzu reakciju na promjene u proizvodnim uvjetima, što je posebno važno u situacijama poput naglog pada vlažnosti tla ili pojave povoljnih uvjeta za razvoj bolesti.

Integrirani senzorski sustavi također omogućuju povezivanje s upravljačkim sustavima, čime se ostvaruje zatvorena petlja upravljanja. Na primjer, podaci o vlažnosti tla mogu se koristiti za automatsko upravljanje sustavima navodnjavanja, pri čemu se navodnjavanje aktivira samo kada je to potrebno i u količini koja odgovara stvarnim potrebama biljaka. Slično tome, podaci o stanju usjeva mogu se koristiti za prilagodbu gnojidbe ili primjene zaštitnih sredstava. Takav pristup značajno povećava učinkovitost i smanjuje potrošnju resursa.



*Slika 13. Automatski sustav navodnjavanja*

Važan aspekt integriranih senzorskih sustava jest interoperabilnost, odnosno sposobnost različitih uređaja i sustava da međusobno komuniciraju i razmjenjuju podatke. U praksi, poljoprivrednici često koriste senzore i opremu različitih proizvođača, što može otežati integraciju podataka. Nedostatak standardizacije predstavlja jedan od glavnih izazova u razvoju IoT sustava u poljoprivredi. Zbog toga se sve više pažnje posvećuje razvoju otvorenih standarda i sučelja koji omogućuju lakšu integraciju i razmjenu podataka.

S rastom količine prikupljenih podataka, pitanje sigurnosti i privatnosti podataka postaje sve važnije. Podaci o poljoprivrednoj proizvodnji imaju značajnu ekonomsku vrijednost i mogu otkriti osjetljive informacije o poslovanju gospodarstva. Integrirani senzorski sustavi moraju osigurati zaštitu podataka tijekom prijenosa i pohrane, kao i jasno definirati vlasništvo nad podacima i prava pristupa. Povjerenje korisnika u sustav ključno je za njegovu široku primjenu.

Integrirani senzorski sustavi i IoT također omogućuju skalabilnost poljoprivrednih sustava. Sustavi se mogu postupno proširivati dodavanjem novih senzora i funkcionalnosti, bez potrebe za potpunom promjenom postojeće infrastrukture. Takva fleksibilnost omogućuje prilagodbu sustava specifičnim potrebama i mogućnostima pojedinog gospodarstva.

Razvoj integriranih senzorskih sustava otvorio je put primjeni naprednih analitičkih metoda, uključujući umjetnu inteligenciju i strojno učenje. Analizom velikih skupova podataka moguće je prepoznati složene obrasce i odnose koji nisu očiti na temelju pojedinačnih mjerenja. Ovi modeli omogućuju predviđanje prinosa, optimizaciju agrotehničkih mjera i procjenu rizika, čime se dodatno povećava vrijednost integriranih senzorskih sustava.

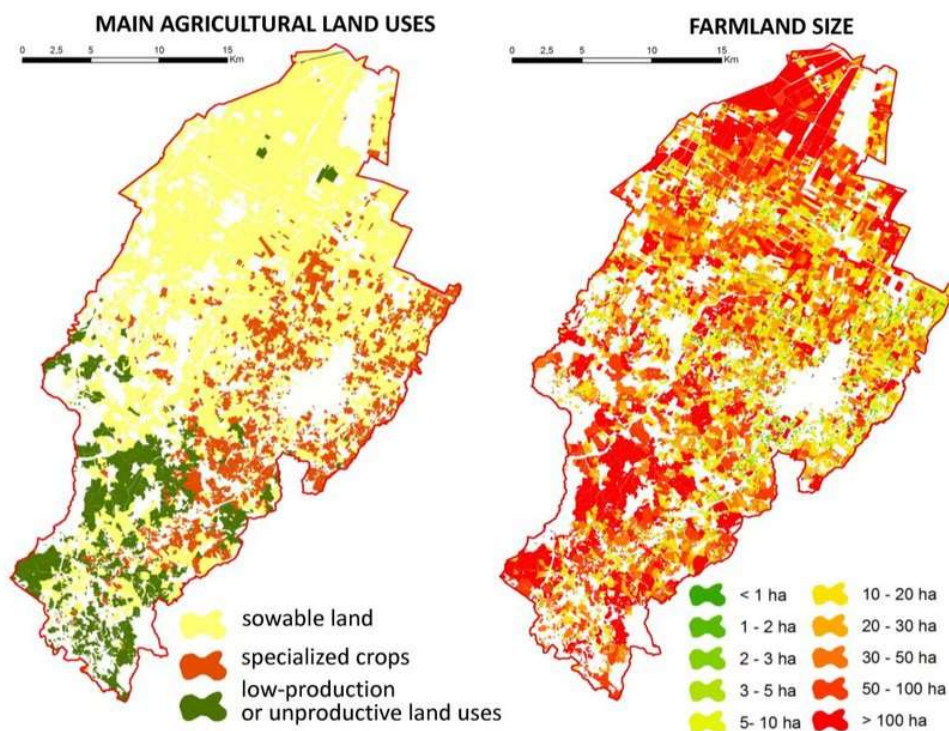
Ukratko, integrirani senzorski sustavi i Internet stvari predstavljaju ključnu tehnološku osnovu suvremene precizne poljoprivrede. Povezivanjem različitih senzora, automatizacijom prikupljanja podataka i integracijom s digitalnim platformama omogućuju učinkovitije, preciznije i održivije upravljanje poljoprivrednom proizvodnjom. U sljedećem poglavlju bit će detaljno razmotrena uloga GIS sustava u prostornoj analizi i interpretaciji podataka prikupljenih integriranim senzorskim sustavima.

## 5. GIS sustavi i prostorna analiza u preciznoj poljoprivredi

Geografski informacijski sustavi (GIS) predstavljaju jednu od ključnih komponenti suvremene precizne poljoprivrede jer omogućuju prostorno utemeljeno prikupljanje, pohranu, obradu, analizu i vizualizaciju podataka. Poljoprivredna proizvodnja je izrazito prostorno ovisna djelatnost, budući da se svi procesi odvijaju na određenoj lokaciji i pod utjecajem lokalnih uvjeta. Upravo zbog toga GIS sustavi imaju iznimno važnu ulogu u integraciji senzorskih podataka i njihovoj interpretaciji u kontekstu stvarnog prostora.

Temeljna značajka GIS sustava jest sposobnost povezivanja prostornih podataka (koji opisuju lokaciju i geometriju objekata) s atributnim podacima (koji opisuju svojstva tih objekata). U poljoprivredi to znači da se podaci o tlu, usjevima, prinosima, meteorološkim uvjetima i agrotehničkim mjerama mogu povezati s točnom geografskom lokacijom unutar parcele. Takva povezanost omogućuje detaljno razumijevanje prostorne varijabilnosti proizvodnih uvjeta i donošenje odluka koje su prilagođene specifičnostima pojedinih dijelova polja.

Jedna od najvažnijih primjena GIS sustava u preciznoj poljoprivredi jest mapiranje poljoprivrednih parcela. Digitalne karte parcela predstavljaju osnovu za sve daljnje analize i omogućuju precizno planiranje i praćenje proizvodnih aktivnosti. Korištenjem GPS tehnologije moguće je točno definirati granice parcela, položaj infrastrukture i unutarnju podjelu polja na zone upravljanja. Takve karte služe kao temelj za integraciju senzorskih podataka i njihovu prostornu analizu.



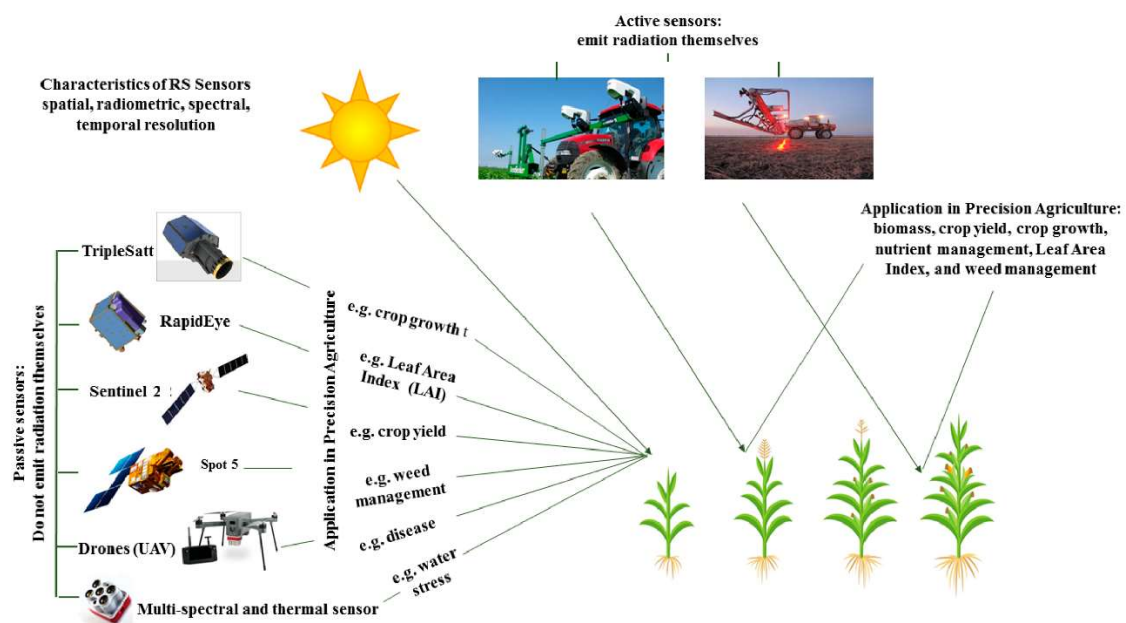
Slika 14. Mapiranje poljoprivrednih parcela

GIS sustavi omogućuju izradu različitih tematskih karata koje prikazuju prostornu raspodjelu određenih parametara. Primjeri uključuju karte vlažnosti tla, karte sadržaja hranjiva, karte električne vodljivosti tla, karte vegetacijskih indeksa i karte prinosa. Ove karte pružaju vizualni uvid u prostornu varijabilnost i omogućuju poljoprivrednicima i stručnjacima da brzo identificiraju problematična područja ili zone s visokim potencijalom. Vizualizacija podataka jedan je od ključnih aspekata GIS sustava jer olakšava razumijevanje složenih informacija i njihovu primjenu u praksi.

Posebno važna primjena GIS sustava jest analiza prinosa. Podaci prikupljeni sensorima prinosa na kombajnima omogućuju izradu karata prinosa visoke prostorne rezolucije. Analizom ovih karata moguće je identificirati prostorne obrasce prinosa i povezati ih s drugim čimbenicima, poput svojstava tla, topografije ili primijenjenih agrotehničkih mjera. Takve analize omogućuju donošenje informiranih odluka o budućem upravljanju poljem i optimizaciji proizvodnje.

GIS sustavi također imaju ključnu ulogu u zoniranju poljoprivrednih parcela. Zoniranje podrazumijeva podjelu polja na relativno homogene zone na temelju određenih kriterija, poput plodnosti tla, vlažnosti ili potencijala prinosa. Zone upravljanja omogućuju primjenu varijabilnih agrotehničkih mjera koje su prilagođene stvarnim potrebama pojedinih dijelova polja. GIS alati omogućuju integraciju različitih slojeva podataka i njihovu analizu kako bi se definirale optimalne zone upravljanja.

U preciznoj poljoprivredi GIS se često koristi u kombinaciji s daljinskim istraživanjima (remote sensing). Satelitske i zračne snimke pružaju prostorno kontinuirane podatke o velikim površinama, što je osobito korisno za praćenje usjeva tijekom vegetacije. GIS sustavi omogućuju obradu i analizu ovih snimki, uključujući izračun vegetacijskih indeksa i praćenje promjena kroz vrijeme. Integracijom podataka s terenskih senzora i daljinskih istraživanja dobiva se sveobuhvatna slika stanja usjeva.



Slika 15. Daljinska istraživanja u preciznoj poljoprivredi

Vremenska komponenta podataka također je iznimno važna u poljoprivredi, a GIS sustavi omogućuju analizu promjena kroz vrijeme. Praćenjem istih lokacija tijekom više vegetacijskih sezona moguće je identificirati dugoročne trendove i promjene u plodnosti tla, produktivnosti usjeva i učinkovitosti primijenjenih mjera. Takve analize pružaju vrijedne informacije za dugoročno planiranje i održivo upravljanje poljoprivrednim gospodarstvom.

GIS sustavi imaju i važnu ulogu u planiranju i optimizaciji poljoprivrednih operacija. Analizom terena, nagiba i pristupačnosti moguće je optimizirati rute kretanja poljoprivrednih strojeva, smanjiti potrošnju goriva i izbjeći nepotrebno zbijanje tla. Također, GIS se koristi za planiranje sustava navodnjavanja i odvodnje, uzimajući u obzir topografiju i hidrologiju područja.

Integracija GIS sustava s integriranim senzorskim sustavima i IoT tehnologijama omogućuje stvaranje dinamičkih i interaktivnih sustava za podršku odlučivanju. Podaci prikupljeni u stvarnom vremenu mogu se automatski prikazivati na kartama i analizirati u prostornom kontekstu. Takvi sustavi omogućuju brzu identifikaciju problema i pravovremenu reakciju, što je ključno u uvjetima promjenjivih klimatskih i proizvodnih uvjeta.

Unatoč brojnim prednostima, primjena GIS sustava u poljoprivredi suočava se i s određenim izazovima. Potrebna su specijalizirana znanja za rad s GIS alatima, a kvaliteta rezultata uvelike ovisi o kvaliteti ulaznih podataka. Osim toga, integracija podataka iz različitih izvora i različitih formata može biti tehnički zahtjevna. Međutim, razvoj korisnički prilagođenih platformi i automatiziranih alata postupno smanjuje ove prepreke i omogućuje širu primjenu GIS tehnologija u poljoprivredi.

GIS sustavi predstavljaju nezamjenjiv alat u preciznoj poljoprivredi jer omogućuju prostorno utemeljenu analizu i interpretaciju podataka prikupljenih senzorskim sustavima. Njihova sposobnost integracije različitih izvora podataka, vizualizacije prostornih obrazaca i podrške donošenju odluka čini ih ključnom komponentom integriranih senzorskih sustava. U sljedećem poglavlju bit će detaljno razmotren koncept digitalnih dvojnika u poljoprivredi, koji se u velikoj mjeri oslanja upravo na GIS i senzorske podatke.

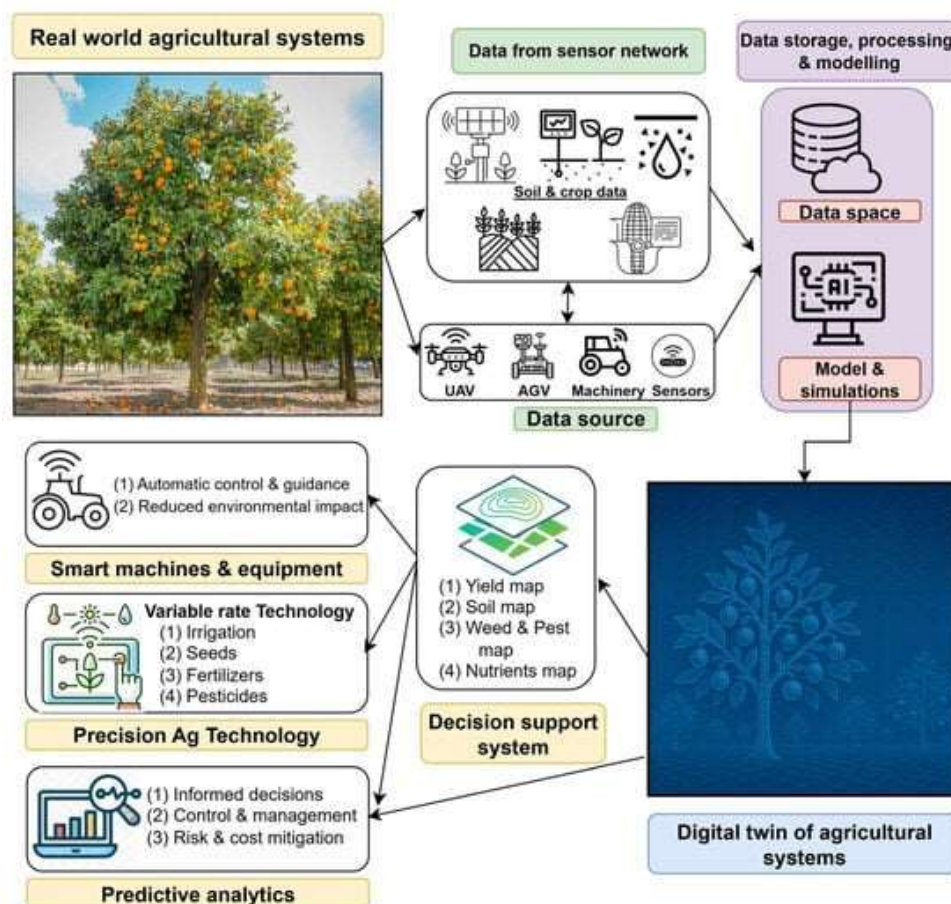
## 6. Digitalni dvojnici u poljoprivredi

Koncept digitalnih dvojnika (engl. *digital twins*) predstavlja jedan od najnaprednijih pristupa digitalnoj transformaciji poljoprivrede. Digitalni blizanac može se definirati kao virtualna, digitalna reprezentacija fizičkog sustava koja je dinamički povezana sa stvarnim objektom putem kontinuiranog protoka podataka. U kontekstu poljoprivrede, digitalni dvojnici omogućuju stvaranje virtualnog modela poljoprivrednog gospodarstva, parcele, usjeva ili čak pojedinačne biljke, koji se ažurira u stvarnom vremenu na temelju podataka prikupljenih integriranim senzorskim sustavima i GIS tehnologijama.

Temeljna ideja digitalnih dvojnika proizlazi iz potrebe za boljim razumijevanjem složenih i dinamičkih poljoprivrednih sustava. Poljoprivreda je obilježena brojnim međusobno povezanim procesima koji ovise o velikom broju varijabli, uključujući klimatske uvjete, svojstva tla, biološke karakteristike usjeva i ljudske intervencije.

Tradicionalni modeli često se temelje na pojednostavljenim pretpostavkama i ne uzimaju u obzir prostornu i vremensku varijabilnost. Digitalni dvojnici omogućuju integraciju velikog broja podataka i stvaranje realističnih, prilagodljivih modela koji vjernije odražavaju stvarno stanje na terenu.

U poljoprivredi, digitalni bliznac se obično sastoji od nekoliko ključnih komponenti. Prva komponenta je fizički sustav, koji uključuje poljoprivredno zemljište, usjeve, strojeve i infrastrukturu. Druga komponenta je senzorski sustav, koji prikuplja podatke o stanju fizičkog sustava u stvarnom vremenu. Treća komponenta je digitalni model, koji integrira senzorske podatke s prostornim informacijama iz GIS sustava i matematičkim ili simulacijskim modelima. Konačno, četvrta komponenta je platforma za analizu i vizualizaciju, koja omogućuje korisnicima interakciju s digitalnim blizancem i donošenje odluka.



Slika 16. Shema nastanka digitalnog dvojnika

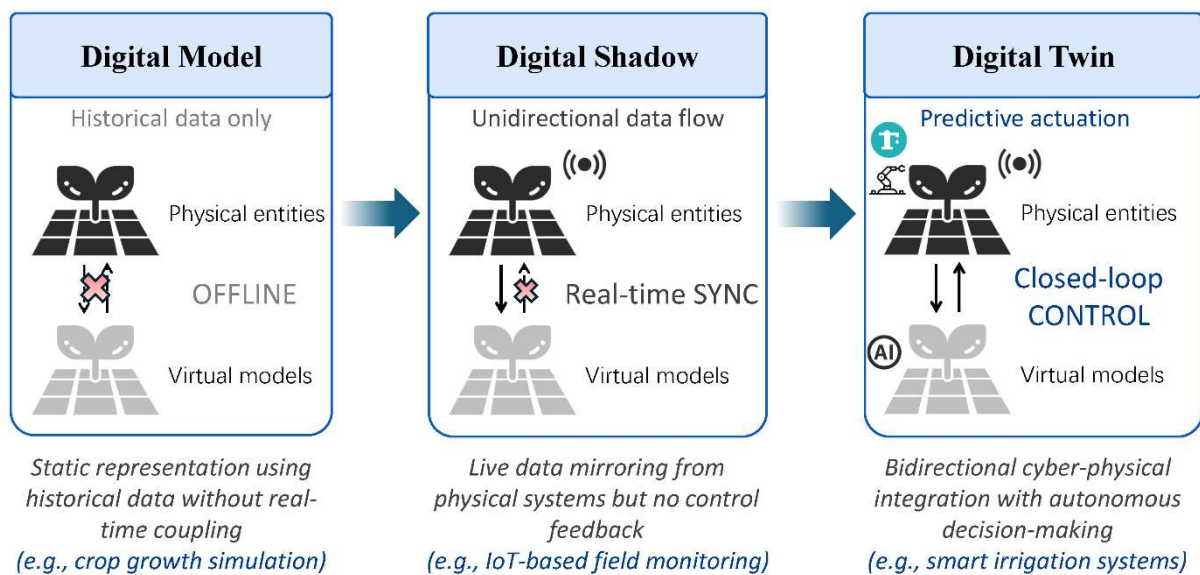
Jedna od ključnih prednosti digitalnih dvojnika jest mogućnost simulacije i predviđanja. Na temelju digitalnog modela moguće je simulirati različite scenarije upravljanja, poput promjene režima navodnjavanja, gnojidbe ili sjetve, i procijeniti njihov utjecaj na prinos, potrošnju resursa i okoliš. Takve simulacije omogućuju donošenje odluka temeljenih na analizi rizika i smanjenje neizvjesnosti, što je od iznimne važnosti u uvjetima klimatskih promjena i tržišnih oscilacija.

Digitalni dvojnici također omogućuju praćenje stanja i rano otkrivanje problema. Kontinuirana usporedba podataka iz stvarnog sustava s predviđenim vrijednostima digitalnog modela omogućuje identifikaciju odstupanja koja mogu ukazivati na pojavu stresa, bolesti ili drugih problema. Na primjer, ako digitalni blizanac predviđa određenu razinu rasta usjeva, a stvarni senzorski podaci pokazuju značajno odstupanje, sustav može generirati upozorenje i preporučiti daljnje korake.

Važna uloga digitalnih dvojnika je i optimizacija resursa. Integracijom podataka o tlu, usjevima i vremenskim uvjetima, digitalni blizanci omogućuju precizno planiranje primjene vode, gnojiva i pesticida. Takav pristup doprinosi smanjenju troškova proizvodnje i negativnog utjecaja na okoliš, što je jedan od ključnih ciljeva održive poljoprivrede. Osim toga, digitalni dvojnici mogu se koristiti za optimizaciju rada poljoprivrednih strojeva i logistike, čime se povećava ukupna učinkovitost gospodarstva.

GIS sustavi imaju središnju ulogu u razvoju digitalnih dvojnika u poljoprivredi. Prostorna dimenzija omogućuje detaljno mapiranje i analizu varijabilnosti unutar parcela, što je ključno za stvaranje realističnih digitalnih modela. Integracija GIS-a s IoT senzorskim sustavima omogućuje dinamičko ažuriranje digitalnog blizanca i njegovo prilagođavanje promjenama u stvarnom okruženju. Na taj način digitalni blizanac postaje živi sustav koji se razvija zajedno s fizičkim sustavom.

Razvoj digitalnih dvojnika u poljoprivredi usko je povezan s primjenom umjetne inteligencije i strojnog učenja. Algoritmi strojnog učenja omogućuju analizu velikih količina podataka i izgradnju prediktivnih modela koji se kontinuirano poboljšavaju kako se prikuplja više podataka. Takvi modeli mogu predviđati prinos, pojavu bolesti, optimalno vrijeme sjetve ili žetve te druge ključne aspekte proizvodnje. Integracija umjetne inteligencije dodatno povećava vrijednost digitalnih dvojnika i njihovu sposobnost prilagodbe složenim i promjenjivim uvjetima.



Slika 17. Usporedba digitalnog modela, sjene i dvojnika

Unatoč velikom potencijalu, primjena digitalnih dvojnika u poljoprivredi još uvijek je u relativno ranoj fazi razvoja. Glavni izazovi uključuju visoke troškove implementacije, potrebu za velikim količinama kvalitetnih podataka te složenost izgradnje i održavanja digitalnih modela. Osim toga, uspješna primjena digitalnih dvojnika zahtijeva interdisciplinarnu suradnju stručnjaka iz područja agronomije, informatike, geoinformatike i inženjerstva.

Važno je istaknuti i ulogu digitalnih dvojnika u edukaciji i prijenosu znanja. Virtualni modeli omogućuju simulaciju različitih scenarija i njihovu analizu bez rizika za stvarnu proizvodnju. Takav pristup može biti koristan u edukaciji poljoprivrednika, studenata i savjetodavnih službi, kao i u testiranju novih tehnologija i metoda prije njihove primjene u praksi.

Ukratko, digitalni dvojnici predstavljaju snažan alat za unapređenje upravljanja poljoprivrednom proizvodnjom. Integracijom senzorskih podataka, GIS sustava i naprednih analitičkih metoda omogućuju detaljno razumijevanje i optimizaciju složenih poljoprivrednih sustava. U sljedećem poglavlju bit će razmotrene konkretne digitalne platforme koje integriraju senzorske sustave, GIS i digitalne blizance te omogućuju njihovu praktičnu primjenu u preciznoj poljoprivredi.

## **7. Platforme za integraciju senzorskih sustava u poljoprivredi**

Platforme za integraciju senzorskih sustava predstavljaju operativnu jezgru suvremene precizne i digitalne poljoprivrede. Dok senzori, IoT mreže, GIS sustavi i digitalni modeli predstavljaju pojedinačne tehnološke komponente, integracijske platforme omogućuju njihovo objedinjavanje u funkcionalnu cjelinu koja korisnicima pruža jasne informacije i preporuke za upravljanje poljoprivrednim gospodarstvom. Bez takvih platformi, velika količina prikupljenih podataka bi ostala neiskorištena i teško primjenjiva.

Glavni zadatak integracijskih platformi je centralizirano upravljanje podacima. Platforme prikupljaju podatke iz različitih izvora, uključujući već spomenute senzore tla i usjeva, meteorološke postaje, poljoprivredne strojeve, satelitske i zračne snimke i dr. Ti se podaci potom pohranjuju u centralnu bazu, najčešće u oblak, gdje se povezuju s prostornim informacijama, a ponekad i s povijesnim zapisima. Centralizacija podataka omogućuje njihovu dugoročnu analizu, usporedbu i korištenje u procesima odlučivanja.

Struktura današnjih platformi za preciznu poljoprivredu se temelji na cloud tehnologijama koje omogućuju skalabilnost, dostupnost i sigurnost podataka. Cloud pristup omogućuje korisnicima pristup podacima s različitih uređaja, uključujući računala, tablete i pametne telefone, što je osobito važno za operativno upravljanje na terenu. Osim toga, cloud platforme olakšavaju integraciju s vanjskim izvorima podataka i analitičkim alatima.

Jedna od glavnih funkcionalnosti integracijskih platformi je smisljena vizualizacija podataka. Korištenjem GIS alata i interaktivnih karata, platforme omogućuju prikaz prostorne varijabilnosti tla, usjeva i prinosa na intuitivan i razumljiv način. Vizualni prikaz podataka pomaže korisnicima da brzo identificiraju problematična područja i na osnovu toga donesu pametne i smislene odluke. Osim karata, platforme često nude i grafičke prikaze vremenskih serija, statističke analize i izvještaje.



Slika 18. Vizualizacija podataka

Integracijske platforme ne služe samo za prikaz podataka, već i za podršku odlučivanju. Na osnovi prikupljenih podataka i izrađenih modela, platforme mogu stvoriti preporuke za gnojidbu, navodnjavanje, zaštitu bilja ili druge radnje. U naprednijim sustavima, ove preporuke temelje se na analizi velikih skupova podataka i primjeni algoritma umjetne inteligencije. Takvi sustavi omogućuju prelazak s reaktivnog na proaktivno upravljanje poljoprivrednom proizvodnjom.

## 7.1 John Deere Operations Center

### 7.1.1 Problemi suvremene poljoprivrede

Suvremena poljoprivreda suočena je s mnogim izazovima, među kojima se ističu rast svjetske populacije, ograničeni prirodni resursi, klimatske promjene i nedostatak radne snage. Procjenjuje se da će u nadolazećim desetljećima biti potrebno povećati poljoprivrednu proizvodnju za oko 60 % kako bi se zadovoljile potrebe rastuće populacije. Također je potrebna i modernizacija proizvodnih procesa te razvoj nove infrastrukture za distribuciju hrane. U tom kontekstu, digitalizacija poljoprivrede i primjena integriranih senzorskih sustava postaju ključni elementi održivog razvoja čemu tvrtka John Deere i teži.

### 7.1.2 Koncept integriranih senzorskih sustava i tehnologija Sense & Act

Osnovni tehnološki koncept u John Deere-ovim rješenjima predstavlja sustav Sense & Act, koji omogućuje strojevima da aktivno percipiraju okolinu i reagiraju na nju. Ovaj koncept temelji se na integraciji različitih senzora i naprednih algoritama, čime se postiže sposobnost stroja da prepozna objekte, procijeni situaciju i donese odluke o daljnjim radnjama.

Senzorski sustavi uključuju kamere visoke rezolucije, radare, optičke senzore i druge mjerne uređaje koji kontinuirano prikupljaju podatke iz okoline samog stroja. Ti se podaci obrađuju real-time pomoću ugrađenih računalnih sustava, što omogućuje trenutnu reakciju bez potrebe za stalnom povezanošću s udaljenim poslužiteljima. To je posebno važno jer u poljoprivrednim uvjetima postoje mogućnosti problema s internetskom vezom koja može biti slaba ili ograničena.

### 7.1.3 Integrirani senzori i pametno prskanje – See & Spray tehnologija

Jedan od najrazvijenijih primjera integriranih senzorskih sustava u poljoprivredi je tehnologija See & Spray. Ovaj sustav koristi 36 kamera raspoređenih duž raspršivačke 'grane' kako bi se u stvarnom vremenu analizirala površina polja. Kamere kontinuirano snimaju tlo i vegetaciju te omogućuju razlikovanje uzgajane biljke od korova.

Prikupljeni slikovni podaci obrađuju se pomoću algoritama strojnog učenja, koji su prethodno trenirani na velikom broju uzoraka različitih biljnih vrsta i uvjeta rasta. Sustav donosi odluku o prskanju unutar približno 200 milisekundi, pri čemu se herbicidi primjenjuju isključivo na prepoznati korov. Takav selektivni pristup omogućuje smanjenje potrošnje herbicida za više od dvije trećine, ovisno o vrsti kulture i stanju polja.

Osim smanjenja troškova, ovaj sustav doprinosi i zaštiti okoliša, jer se smanjuje količina kemijskih sredstava koja dospijevaju u tlo i podzemne vode. Integracija senzora, kamera i softvera čini See & Spray sustav primjerom visoko učinkovitog integriranog senzorskog rješenja u preciznoj poljoprivredi.



*Prikaz 1. Pametno prskanje*

### 7.1.4 Proširenje pametnog prskanja na visokovrijedne kulture – Smart Apply

Integrirani senzorski sustavi tvrtke John Deere prošireni su i na područje visokovrijednih kultura, poput voćnjaka, vinograda i ratarskih kultura, kroz tehnologiju Smart Apply Intelligent Spray Control System. Ovaj sustav koristi senzore za detekciju krošnje i vegetacije te prilagođava količinu i smjer prskanja stvarnom obliku i gustoći biljaka.

Za razliku od klasičnog prskanja, gdje se kemikalije ravnomjerno raspršuju bez obzira na stvarne potrebe, Smart Apply omogućuje preciznu i ciljanu primjenu. Time se postižu značajne uštede resursa, uključujući smanjenje potrošnje vode i zaštitnih sredstava do 50 %, smanjenje puštanja kemikalija u zrak do 87 % te smanjenje kemijskog otjecanja do 93 %.

Sustav istovremeno prikuplja i pohranjuje detaljne podatke o tretiranju, uključujući vrijeme i trajanje prskanja, količinu utrošenih sredstava, površinu tretiranog područja i volumen krošnje. Ovi podaci dodatno povećavaju vrijednost sustava jer omogućuju detaljnu analizu proizvodnje i planiranje budućih aktivnosti.

### **7.1.5 Rubno računalstvo (Edge Computing) i obrada podataka u stvarnom vremenu**

Ključnu ulogu u funkcioniranju integriranih senzorskih sustava ima rubno računalstvo (edge computing). Umjesto slanja svih podataka u oblak, obrada se odvija izravno na stroju, čime se omogućuje brza i pouzdana reakcija sustava. Ovakav pristup posebno je važan za radnje koje zahtijevaju momentalno donošenje odluka, poput autonomne vožnje ili selektivnog prskanja.

John Deere-ovi sustavi koriste izuzetno brze procesorske jedinice koje su sposobne obavljati desetke bilijuna operacija u sekundi. Time se omogućuje obrada velike količine podataka sa senzora i kamera bez kašnjenja, što je ključno za sigurnost i učinkovitost rada strojeva.



*Slika 19. Interijer traktora tvrtke John Deere*

### **7.1.6 Autonomni strojevi**

Razvoj integriranih senzorskih sustava omogućio je i razvoj autonomnih poljoprivrednih strojeva, poput autonomnog traktora John Deere 8R. Ovaj stroj opremljen je naprednim sustavom kamera koji pruža 360° pregled okoline, čime se omogućuje prepoznavanje prepreka i sigurno kretanje bez prisutnosti operatera.

Sustav koristi neuronske mreže za analizu slikovnih podataka i donošenje odluka o nastavku kretanja ili zaustavljanju unutar približno 100 milisekundi. Autonomni traktor može raditi danju i noću, obrađujući do 325 hektara u 24 sata, čime se značajno povećava produktivnost i smanjuje ovisnost o dostupnosti radne snage.



*Slika 20. Napredni sustav kamera*

### **7.1.7 Digitalne platforme i John Deere Operations Center**

Digitalna platforma John Deere Operations Center predstavlja središnji element integracije podataka u suvremenoj preciznoj poljoprivredi. Svi podaci prikupljeni putem integriranih senzorskih sustava, uključujući senzore na poljoprivrednim strojevima, kamere, sustave za prskanje, navigacijske GNSS uređaje i druge mjerne uređaje, objedinuju se unutar ove platforme. Na taj način Operations Center funkcionira kao digitalni blizanac poljoprivrednog gospodarstva, odnosno virtualna reprezentacija stvarnog proizvodnog sustava.

Platforma omogućuje centralizirano upravljanje poljoprivrednim strojevima i operacijama, pri čemu korisnici imaju uvid u rad strojeva u stvarnom vremenu, uključujući njihovu lokaciju, radni status, brzinu, potrošnju goriva i učinkovitost obavljenih operacija. Integracijom podataka iz različitih izvora stvara se cjelovit pregled proizvodnog procesa, što omogućuje pravovremeno prepoznavanje eventualnih problema i optimizaciju rada.

Jedna od ključnih prednosti ove platforme je mogućnost analize povijesnih podataka. Sustav pohranjuje podatke o prethodnim operacijama, primjeni gnojiva i pesticida, prinosima, stanju usjeva te vremenskim uvjetima. Analizom tih podataka korisnici mogu uspoređivati različite sezone, procjenjivati učinkovitost primijenjenih mjera te planirati buduće radnje na temelju stvarnih rezultata.

Operations Center također omogućuje planiranje i upravljanje poljoprivrednim operacijama. Korisnici mogu unaprijed definirati zadatke, odrediti raspored rada strojeva i pratiti izvršenje planiranih aktivnosti. Time se smanjuju preklapanja, nepotrebne kretnje strojeva i gubitak vremena, što izravno doprinosi povećanju produktivnosti i smanjenju troškova.

Važan aspekt platforme jest i dijeljenje podataka s drugim službama, poput agronoma, savjetodavnih službi, distributera i servisnih centara. Kontrolirano dijeljenje podataka omogućuje stručnjacima da analiziraju stanje gospodarstva i pruže ciljana savjetovanja temeljena na stvarnim podacima s terena. Time se dodatno povećava vrijednost integriranih senzorskih sustava jer podaci postaju temelj suradnje i stručne podrške.

Povezivanjem senzora, strojeva i računalnog oblaka ostvaruje se potpuna integracija fizičkog i digitalnog sustava. Senzori prikupljaju podatke na terenu, rubno računalstvo omogućuje njihovu brzu obradu, dok Operations Center služi kao centralna platforma za pohranu, vizualizaciju i analizu. Ovakav protok podataka omogućuje donošenje odluka u stvarnom vremenu, ali i dugoročno strateško planiranje.

Dodatno, platforma podržava koncept prediktivnog održavanja, pri čemu se na temelju podataka o radu strojeva mogu unaprijed identificirati potencijalni kvarovi. Time se smanjuje rizik od neplaniranih zastoja i povećava raspoloživost mehanizacije tijekom najvažnijih faza poljoprivredne proizvodnje.



Slika 21. Sučelje Operations Center-a

## 7.2 CLASS connect

### 7.2.1 Uloga tvrtke CLASS

Tvrtka CLAAS, kao jedan od vodećih proizvođača poljoprivredne mehanizacije u Europi i svijetu, razvila je digitalnu platformu CLAAS connect s ciljem potpune digitalne integracije strojeva, podataka i korisnika. CLAAS connect predstavlja temelj za primjenu koncepta Smart Farming-a, omogućujući poljoprivrednicima da svoje poslovanje organiziraju na pametan, umrežen i smislen način. Platforma je dostupna putem računala i mobilnih uređaja, čime se osigurava stalna dostupnost informacija o strojevima i poljoprivrednim operacijama.

### 7.2.2 Integrirani senzorski sustavi i umrežavanje strojeva putem CLAAS connect

Središnja komponenta sustava CLAAS connect su integrirani senzorski sustavi ugrađeni u poljoprivredne strojeve, koji kontinuirano prikupljaju podatke o radu, performansama i stanju stroja. Ti senzori prate parametre poput lokacije stroja, radnog opterećenja, potrošnje goriva, učinkovitosti rada, servisnih intervala i tehničkog stanja.



*Slika 22. Prikaz podataka prikupljenih od senzora u vozilu tvrtke CLAAS*

Putem funkcije Machine connect, prikupljeni podaci automatski se prenose u digitalnu platformu, gdje korisnici dobivaju pravovremeni uvid u stanje svih strojeva. Sustav omogućuje očitavanje grešaka, usporedbu parametara rada strojeva te razmjenu podataka između stroja i digitalne platforme. Time se postiže visoka razina kontrole nad mehanizacijom, uz smanjenje rizika od neplaniranih zastoja.

Posebna prednost CLAAS connect sustava je mogućnost integracije strojeva različitih proizvođača, uključujući i već spomenuti John Deere, čime se omogućuje jedinstveno upravljanje voznim parkom. Na taj način digitalna platforma ne funkcionira isključivo kao alat za CLAAS strojeve, već kao univerzalno rješenje za upravljanje poljoprivrednom mehanizacijom.

Povezanost sa servisnim partnerima dodatno povećava vrijednost sustava, jer omogućuje brzo naručivanje rezervnih dijelova i tehničkih usluga, kao i pravovremeno planiranje održavanja. Integrirani senzori i digitalna platforma zajedno stvaraju osnovu za prediktivno održavanje, pri čemu se potencijalni kvarovi mogu prepoznati prije nego što dođe do ozbiljnijih problema.

### 7.2.3 Digitalne platforme, analitika i precizna poljoprivreda u CLAAS sustavu

CLAAS connect ne služi isključivo za praćenje strojeva, već i kao platforma za analizu podataka i optimizaciju poljoprivrednih procesa. Sustav omogućuje izradu detaljnih analiza i izvješća o učinkovitosti rada ljudi i strojeva, čime se olakšava donošenje odluka temeljenih na stvarnim podacima.

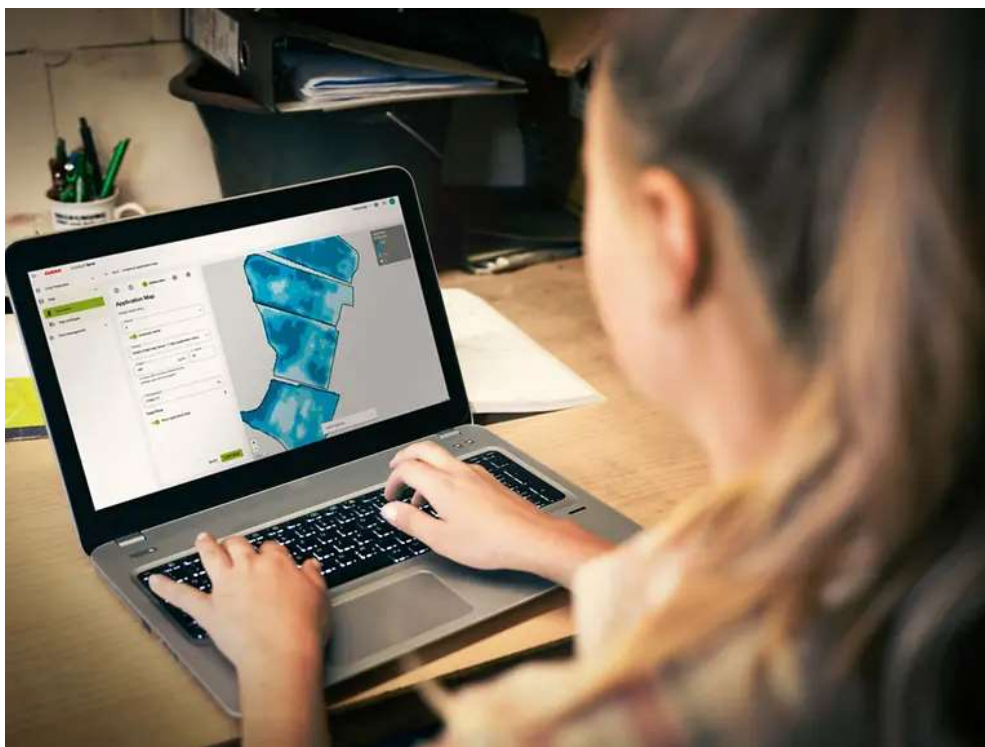
U sklopu digitalnog paketa integriran je i CEMOS Advisor, inteligentni sustav za optimizaciju rada strojeva, posebno kombajna. Ovaj sustav koristi podatke senzora za davanje preporuka o optimalnim postavkama stroja, čime se povećava učinkovitost žetve, smanjuju gubici i prilagođava potrošnja resursa.

Platforma također omogućuje digitalno upravljanje poljima i dokumentaciju radova putem funkcije Farm connect. Automatiziranim prikupljanjem podataka o radovima na polju smanjuje se administrativno opterećenje poljoprivrednika, dok se istovremeno osigurava precizna evidencija potrebna za zakonske i financijske svrhe.



Slika 23. Sučelje CLASS Connect-a

Važan element sustava je i Digitalni geocentar, koji omogućuje primjenu principa precizne poljoprivrede. Korištenjem satelitskih snimaka, karata prinosa i podataka uzorkovanja tla izrađuju se karte primjene za varijabilnu gnojidbu i zaštitu bilja. Time se integrirani senzorski sustavi i prostorni podaci povezuju u jedinstven digitalni sustav, koji omogućuje preciznije upravljanje poljoprivrednim površinama i racionalnije korištenje resursa.



*Slika 24. Karta primjene izrađena pomoću Digitalnog geocentra*

## **7.3 Platforma AGRIVI**

### **7.3.1 AGRIVI – Digitalna platforma za pametnu poljoprivredu**

AGRIVI je globalna digitalna platforma za poljoprivredu koja nudi rješenja za digitalizaciju poljoprivrednog poslovanja, optimizaciju proizvodnih procesa i podršku u donošenju odluka temeljenih na podacima. Platforma je dizajnirana za poljoprivredna gospodarstva svih veličina s ciljem povećanja učinkovitosti, održivosti i transparentnosti proizvodnje hrane. Primarna filozofija AGRIVI-a jest objedinjavanje svih relevantnih podataka o proizvodnji i okolišu u jednu centraliziranu platformu koja omogućuje jednostavan pristup, analizu i planiranje poljoprivrednih aktivnosti u stvarnom vremenu.

### **7.3.2 AGRIVI Connect – integracija senzora i real-time podaci**

Jedna od glavnih komponenti AGRIVI platforme je modul AGRIVI Connect, koji omogućuje integraciju senzora, mehanizacije, meteoroloških stanica i ERP (Enterprise Resource Planning) sustava u jedinstveno, online upravljanje podacima. Ova komponenta omogućuje poljoprivrednicima da povežu senzore tla, vremenske senzore i druge IoT uređaje s AGRIVI softverom, čime se prikupljaju i sinkroniziraju podaci s polja u stvarnom vremenu.

AGRIVI Connect omogućuje ugradnju integriranih senzora tla koji mjere kritične parametre kao što su: vlažnost tla (ključna za pravilno planiranje navodnjavanja), temperatura tla (važna za procese rasta biljaka) te električna vodljivost (indikativna o stanju hranjiva i teksturi tla).

Ti podaci omogućuju poljoprivrednicima da prate stanje tla u realnom vremenu, bez potrebe za ručnim mjerenjima ili laboratorijskim analizama, čime se povećava preciznost odluka i optimizacija resursa poput vode i gnojiva.

Integracija senzora tla u AGRIVI sustav omogućuje učinkovitije upravljanje navodnjavanjem jer omogućava planiranje navodnjavanja na temelju stvarnih vrijednosti vlažnosti tla, umjesto oslanjanja na neučinkovite procjene. Na taj način poljoprivrednici mogu štedjeti vodu, smanjiti troškove i spriječiti stres biljaka uslijed nepravilnog navodnjavanja.



*Slika 25. Sučelje AGRIVI Connect Meteo-a - profesionalne poljoprivredne meteorološke stanice*



Slika 26. Sučelje AGRIVI Connect Soil-a

### 7.3.3 Upravljanje podacima i analiza putem AGRIVI 360

Osim senzora, AGRIVI platforma nudi i napredne alate za upravljanje farmom i analitiku, objedinjene kroz softver AGRIVI 360 Farm Enterprise. Ovaj modul omogućuje: povezivanje mehanizacije, IoT uređaja i ERP sustava (Enterprise resource planning), što omogućuje automatiziranu razmjenu podataka između strojeva, senzora i softvera, čime se eliminira ručni unos i smanjuju pogreške te analizu povijesnih i realnih podataka kako bi se identificirali najbolji načini upravljanja resursima, procijenili rezultati primijenjenih agrotehničkih mjera i planirali budući radovi.



Slika 27. AGRIVI 360 Farm Insights

AGRIVI platforma omogućuje plug & play povezivanje različitih senzora i uređaja, uključujući meteorološke stanice i senzore tla, bez obzira na proizvođača. Podaci prikupljeni s terena automatski se sinkroniziraju u centralnu bazu, gdje ih poljoprivrednik može vizualizirati, analizirati i koristiti za donošenje odluka.

Pored nadzora senzora, AGRIVI nudi vizualne prikaze koji omogućuju jednostavno praćenje trendova, usporedbu sezona i identifikaciju obrazaca u podacima. Time se potiče korištenje podatkovno vođenog pristupa umjesto intuitivnog odlučivanja, čime se povećava preciznost i efikasnost poljoprivredne proizvodnje.



Prikaz 2. AGRIVI 360 Farm enterprise

## 7.4 JetBov - integrirana digitalna platforma namijenjena upravljanju stočarskom proizvodnjom

Poljoprivreda ne obuhvaća isključivo ratarstvo i voćarstvo. Važan i neizostavan segment predstavlja i stočarstvo, koje se u suvremenim proizvodnim sustavima sve više razvija u smjeru digitalizacije i automatizacije. U kontekstu rastućih potreba za hranom, nedostatka radne snage i sve strožih zahtjeva vezanih uz održivost i dobrobit životinja, stočarska proizvodnja zahtijeva primjenu naprednih tehnoloških rješenja koja omogućuju precizno upravljanje proizvodnim procesima. Upravo se iz tog razloga razvija koncept preciznog stočarstva, koji se temelji na prikupljanju, obradi i analizi podataka pomoću integriranih senzorskih sustava i digitalnih platformi.

Jedan od konkretnih primjera takvog pristupa je JetBov, integrirana digitalna platforma namijenjena upravljanju stočarskom proizvodnjom, prvenstveno u govedarstvu. JetBov omogućuje centralizirano vođenje evidencije o svakoj životinji, uključujući podatke o identifikaciji, starosti, reprodukciji, zdravstvenom stanju, hranidbi i proizvodnim rezultatima.

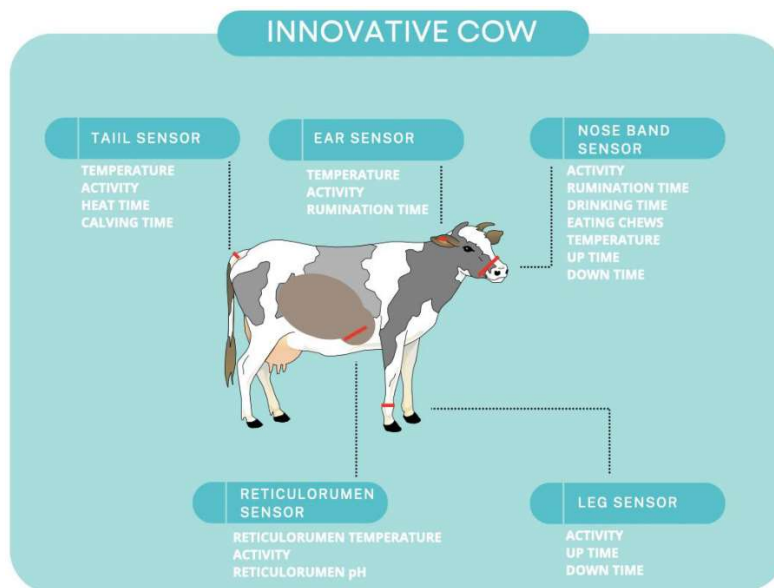
Ključnu ulogu u funkcioniranju sustava imaju integrirani senzorski sustavi, poput RFID (Radio Frequency Identification) ušnih oznaka, GPS uređaja te drugih IoT senzora, koji omogućuju automatsko i kontinuirano prikupljanje podataka iz stvarnog okruženja. Na taj se način fizički procesi na farmi izravno povezuju s digitalnom platformom, čime se povećava pouzdanost podataka i smanjuje mogućnost ljudske pogreške.



Slika 28. Logo tvrtke JetBov

Svi podaci prikupljeni putem senzora i korisničkih unosa obrađuju se unutar JetBov platforme, koja djeluje kao digitalni blizanac stočarskog gospodarstva. Platforma omogućuje praćenje stanja stada u stvarnom vremenu, analizu povijesnih podataka te prepoznavanje obrazaca koji upućuju na promjene u ponašanju ili zdravstvenom stanju životinja. Integracija senzora, mobilnih aplikacija i računalstva u oblaku omogućuje pristup podacima s različitih uređaja, neovisno o lokaciji korisnika, što dodatno povećava fleksibilnost i učinkovitost upravljanja farmom.

Osim operativnog upravljanja, JetBov platforma ima važnu ulogu u donošenju strateških odluka. Analizom prikupljenih senzorskih podataka moguće je optimizirati hranidbu, planirati reprodukciju, pratiti produktivnost pojedinih životinja te pravodobno uočiti potencijalne zdravstvene probleme. Time se ostvaruju ekonomske koristi kroz smanjenje troškova, ali i društvene i okolišne koristi kroz poboljšanje dobrobiti životinja i učinkovitije korištenje resursa. Integrirani senzorski sustavi i digitalne platforme poput JetBov sustava jasno pokazuju da suvremeno stočarstvo postaje ravnopravan i tehnološki napredan dio digitalne poljoprivrede.



Slika 29. Tipovi senzora koji se koriste u stočarstvu

Platforme za integraciju senzorskih sustava predstavljaju ključnu poveznicu između tehnologije i praktične primjene precizne poljoprivrede. One omogućuju objedinjavanje podataka, njihovu analizu i pretvaranje u konkretne preporuke za upravljanje poljoprivrednom proizvodnjom. U sljedećem poglavlju bit će detaljno analizirani benefiti integriranih senzorskih sustava i platformi, s posebnim naglaskom na ekonomske, ekološke i operativne učinke.

## **8. Benefiti integriranih senzorskih sustava u poljoprivredi**

Primjena integriranih senzorskih sustava u poljoprivredi donosi brojne koristi koje se očituju na ekonomskom, ekološkom, operativnom i društvenom planu. Za razliku od parcijalnih tehnoloških rješenja, integrirani sustavi omogućuju sveobuhvatno upravljanje proizvodnjom temeljeno na podacima, čime se povećava učinkovitost, smanjuju rizici i unapređuje održivost poljoprivrednih gospodarstava. U uvjetima sve izraženijih klimatskih promjena, rasta cijena ulaganja i povećanih zahtjeva tržišta, ovi benefiti postaju ključni za dugoročnu konkurentnost poljoprivrednog sektora.

### **8.1 Ekonomski benefiti**

Jedan od najvažnijih motiva za uvođenje integriranih senzorskih sustava jest ostvarenje ekonomskih koristi. Precizno prikupljanje i analiza podataka omogućuju planiranje korištenja potrebnih količina sjemena, gnojiva, pesticida i vode. Varijabilna primjena inputa, temeljena na stvarnim potrebama usjeva i svojstvima tla, dovodi do smanjenja nepotrebnih troškova i povećanja povrata ulaganja. Istraživanja pokazuju da precizna gnojidba i navodnjavanje mogu rezultirati značajnim uštedama, uz istodobno povećanje ili stabilizaciju prinosa.

Integrirani senzorski sustavi također doprinose povećanju prinosa i kvalitete proizvoda. Pravovremeno prepoznavanje stresnih uvjeta, bolesti ili nedostatka hranjiva omogućuje brzu intervenciju i sprječavanje većih gubitaka. Povećanje prinosa ne proizlazi samo iz većih količina proizvodnje, već i iz bolje kvalitete proizvoda, što može rezultirati višim tržišnim cijenama i većom konkurentnošću na tržištu.

Važan ekonomski aspekt je i smanjenje rizika proizvodnje. Integrirani sustavi omogućuju praćenje vremenskih uvjeta, modeliranje scenarija i predviđanje potencijalnih problema. Takav pristup omogućuje poljoprivrednicima donošenje informiranih odluka i smanjenje neizvjesnosti povezane s klimatskim i tržišnim promjenama. Dugoročno gledano, smanjenje rizika doprinosi stabilnosti prihoda i održivosti gospodarstva.

### **8.2 Ekološki benefiti**

Osim ekonomskih koristi, integrirani senzorski sustavi imaju značajan pozitivan utjecaj na okoliš. Precizna primjena gnojiva i pesticida smanjuje njihov višak u okolišu, čime se smanjuje rizik od onečišćenja tla i voda. Time se izravno doprinosi zaštiti prirodnih resursa i očuvanju bioraznolikosti.

Optimizacija navodnjavanja, temeljena na podacima o vlažnosti tla i meteorološkim uvjetima, omogućuje učinkovitije korištenje vodnih resursa. U područjima s ograničenim zalihama vode, ova prednost ima posebno veliku važnost. Smanjena potrošnja vode ne samo da smanjuje troškove, već i doprinosi održivom upravljanju vodnim resursima na regionalnoj i globalnoj razini.

Integrirani senzorski sustavi također omogućuju smanjenje emisija stakleničkih plinova. Preciznije upravljanje gnojidbom i obradom tla može smanjiti emisije dušikovih spojeva i ugljikova dioksida. Osim toga, optimizacija rada poljoprivrednih strojeva i smanjenje nepotrebnih prolaza po polju dovodi do smanjenja potrošnje goriva i povezanih emisija.

### **8.3 Operativni i organizacijski benefiti**

Integrirani senzorski sustavi značajno unapređuju operativnu učinkovitost poljoprivrednih gospodarstava. Automatizirano prikupljanje podataka smanjuje potrebu za ručnim mjerenjima i administrativnim poslovima, čime se štedi vrijeme i smanjuje mogućnost pogrešaka. Digitalne platforme omogućuju centralizirani pregled svih relevantnih informacija, što olakšava planiranje i koordinaciju poljoprivrednih aktivnosti.

Jedna od važnih operativnih prednosti jest bolja organizacija rada. Praćenje rada strojeva, potrošnje goriva i učinkovitosti operacija omogućuje optimizaciju radnih procesa i smanjenje zastoja. Integrirani sustavi također omogućuju dokumentiranje svih aktivnosti, što je važno za praćenje troškova, planiranje budućih sezona i ispunjavanje regulatornih zahtjeva.

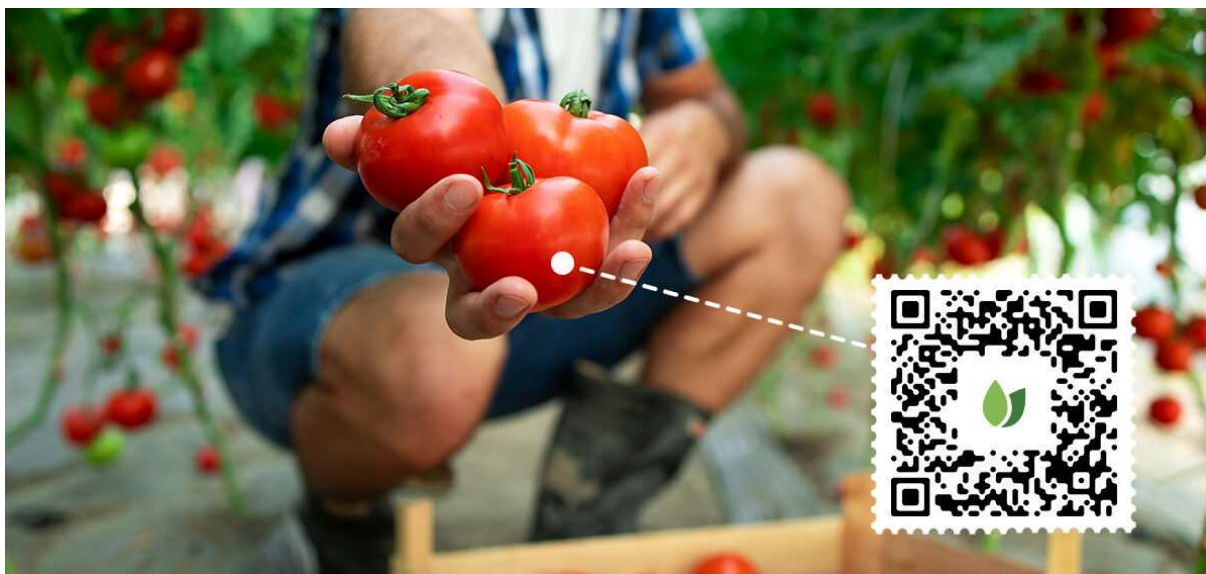
Integrirani senzorski sustavi omogućuju i bržu i precizniju komunikaciju između različitih dionika, uključujući poljoprivrednike, agronome, savjetodavne službe i dobavljače. Dijeljenje podataka i analiza u realnom vremenu omogućuju zajedničko donošenje odluka i bolju koordinaciju, što dodatno povećava učinkovitost proizvodnje.

### **8.4 Društveni i strateški benefiti**

Primjena integriranih senzorskih sustava ima i šire društvene implikacije. Održiva i učinkovita poljoprivreda doprinosi sigurnosti hrane i stabilnosti ruralnih zajednica. Digitalizacija poljoprivrede može povećati atraktivnost ovog sektora za mlađe generacije i doprinijeti zadržavanju stanovništva u ruralnim područjima.

Integrirani sustavi također omogućuju transparentnost i sljedivost proizvodnje, što postaje sve važnije u suvremenim lancima opskrbe hranom. Detaljna evidencija proizvodnih aktivnosti omogućuje dokazivanje podrijetla i kvalitete proizvoda, što može povećati povjerenje potrošača i otvoriti nova tržišta.

Na strateškoj razini, primjena integriranih senzorskih sustava omogućuje bolje planiranje i donošenje politika. Agregirani podaci s velikog broja gospodarstava mogu se koristiti za analizu trendova, procjenu učinaka politika i planiranje razvoja poljoprivrednog sektora. Takvi podaci mogu doprinijeti učinkovitijem upravljanju resursima na nacionalnoj i regionalnoj razini.



*Slika 30. Sljedivost proizvodnje pomoću AGRIVI-ja*

## **8.5 Ograničenja i potreba za uravnoteženim pristupom**

Iako su benefiti integriranih senzorskih sustava brojni, važno je naglasiti da njihova uspješna primjena zahtijeva uravnotežen pristup. Početna ulaganja, potreba za edukacijom korisnika i tehnička složenost sustava predstavljaju izazove koje ne treba zanemariti.

Vidljivo je da integrirani senzorski sustavi donose višestruke koristi koje nadilaze puko povećanje produktivnosti. Oni omogućuju održivije, učinkovitije i otpornije poljoprivredne sustave, prilagođene izazovima suvremenog svijeta. U sljedećem poglavlju bit će razmotreni izazovi, ograničenja i etički aspekti primjene ovih sustava, kako bi se pružila uravnotežena i cjelovita slika njihove uloge u suvremenoj poljoprivredi.

## **9. Izazovi, ograničenja i etički aspekti integriranih senzorskih sustava u poljoprivredi**

Unatoč brojnim prednostima i sve većoj primjeni, integrirani senzorski sustavi u poljoprivredi suočavaju se s nizom izazova i ograničenja koja mogu usporiti ili otežati njihovu implementaciju. Ovi izazovi obuhvaćaju tehničke, ekonomske, organizacijske i društveno-etičke aspekte, a njihovo razumijevanje ključno je za realnu procjenu potencijala i održivosti ovih tehnologija. Bez sustavnog pristupa rješavanju navedenih pitanja, postoji rizik da integrirani senzorski sustavi ostanu ograničeni na tehnološki napredna gospodarstva, dok manji i slabije razvijeni proizvođači ostanu izvan digitalne transformacije.

## 9.1 Tehnički izazovi i ograničenja

Jedan od osnovnih tehničkih izazova odnosi se na pouzdanost i točnost senzora. Iako suvremeni senzori omogućuju visoku razinu preciznosti, njihova mjerenja mogu biti podložna pogreškama uzrokovanim okolišnim uvjetima, degradacijom opreme ili nepravilnom kalibracijom. U poljoprivrednom okruženju, gdje su senzori izloženi vlazi, prašini, temperaturnim ekstremima i mehaničkim oštećenjima, održavanje njihove funkcionalnosti predstavlja značajan izazov.

Integracija podataka iz različitih senzora i sustava također predstavlja tehničku složenost. Različiti proizvođači koriste različite komunikacijske protokole, formate podataka i standarde, što može otežati interoperabilnost sustava. Nedostatak univerzalnih standarda može dovesti do fragmentacije sustava i povećanja troškova integracije. Osim toga, obrada velikih količina podataka zahtijeva značajne računalne resurse i pouzdanu komunikacijsku infrastrukturu, što može biti problem u ruralnim područjima s ograničenim pristupom internetu.

## 9.2 Ekonomska ograničenja i pristupačnost

Visoki početni troškovi predstavljaju jednu od glavnih prepreka širem prihvaćanju integriranih senzorskih sustava. Nabava senzora, komunikacijske opreme, softverskih platformi i potrebne infrastrukture može biti financijski zahtjevna, osobito za mala i srednja poljoprivredna gospodarstva. Iako dugoročne koristi često nadmašuju početna ulaganja, mnogi poljoprivrednici nemaju dovoljno kapitala ili sigurnosti za takva ulaganja.

Osim početnih troškova, potrebno je uzeti u obzir i troškove održavanja i nadogradnje sustava. Tehnološki napredak dovodi do brzog zastarijevanja opreme i softvera, što zahtijeva kontinuirana ulaganja. Bez odgovarajuće financijske i tehničke podrške, postoji rizik da sustavi postanu nefunkcionalni ili nedovoljno iskorišteni.

## 9.3 Organizacijski i ljudski faktori

Uspješna implementacija integriranih senzorskih sustava zahtijeva promjene u organizaciji rada i načinu donošenja odluka. Mnogi poljoprivrednici navikli su na tradicionalne metode upravljanja, temeljene na iskustvu i intuiciji. Prelazak na upravljanje temeljeno na podacima zahtijeva edukaciju i promjenu načina razmišljanja, što može predstavljati značajan izazov.

Nedostatak digitalnih vještina među poljoprivrednicima i radnom snagom dodatno otežava primjenu ovih sustava. Bez odgovarajuće podrške i edukacije, postoji rizik da se tehnologija koristi površno ili pogrešno, što može dovesti do nezadovoljavajućih rezultata. U tom kontekstu, uloga savjetodavnih službi i edukacijskih programa postaje iznimno važna.

## 9.4 Upravljanje podacima i sigurnost

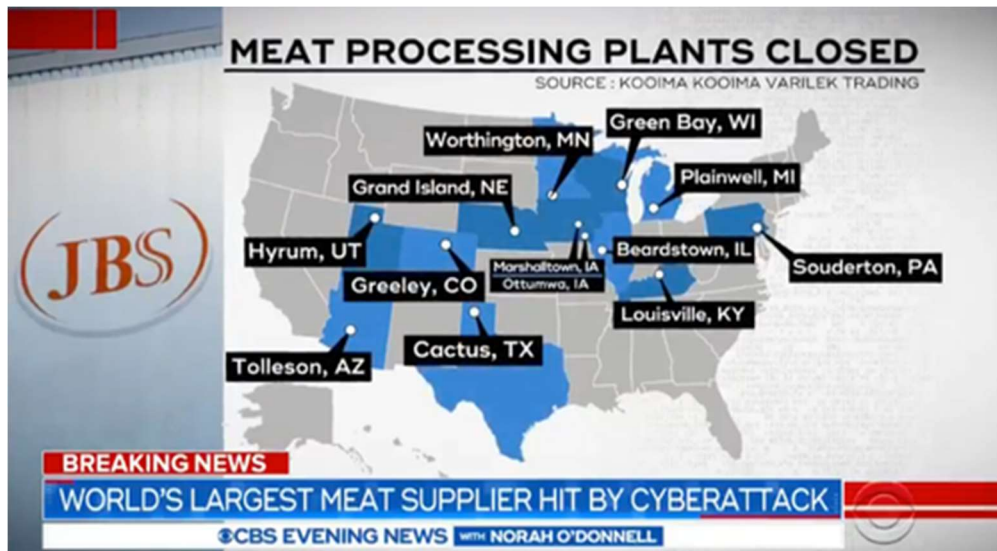
Jedan od najvažnijih suvremenih izazova odnosi se na vlasništvo, sigurnost i privatnost podataka. Integrirani senzorski sustavi generiraju velike količine osjetljivih podataka o proizvodnji, lokaciji i poslovanju poljoprivrednih gospodarstava. Pitanje tko ima pravo pristupa tim podacima, kako se oni koriste i u koje svrhe, postaje ključno.

Centralizirana pohrana podataka u cloud sustavima nosi rizik od neovlaštenog pristupa, gubitka podataka ili cyber napada. Osiguranje visoke razine sigurnosti i povjerenja korisnika zahtijeva primjenu naprednih sigurnosnih mjera, ali i jasne pravne okvire koji reguliraju upravljanje podacima.

Jedan od primjera bio je ransomware napad (ucjenjivački softver) na malog poljoprivrednika u Švicarskoj. Računalo na gospodarstvu bilo je zaključano, a pristup podacima iz sustava za mužnju onemogućen. Bez ključnih informacija za svakodnevni rad, poljoprivrednik je odlučio kupiti novo računalo. No tijekom zastoja u radu uginula je jedna krava, a šteta je procijenjena na oko 6.000 eura. Primjer jasno pokazuje da kibernetički napad ne mora pogoditi veliku tvrtku kako bi imao ozbiljne posljedice. Ponekad su dovoljni jedan računalni sustav i jedan dan prekida rada.

Na znatno većoj razini bio je napad na tvrtku JBS, jednog od najvećih svjetskih prerađivača mesa. Ransomware je onеспособio sustave upravljanja u klaonicama u više zemalja, zbog čega su pogoni morali obustaviti rad. Oko 10.000 zaposlenika nije moglo obavljati svoje poslove, a tvrtka je odlučila platiti otkupninu veću od 11 milijuna dolara.

Posljedice su se osjetile i na tržištu: u roku od nekoliko tjedana veleprodajne cijene mesa u SAD-u porasle su za oko 25 %.



Slika 31. Zatvorene tvornice nakon napada

## **9.5 Etički i društveni aspekti**

Primjena integriranih senzorskih sustava otvara i niz etičkih pitanja. Automatizacija i digitalizacija poljoprivrede mogu dovesti do smanjenja potrebe za radnom snagom, što može imati negativne posljedice za ruralne zajednice. Iako tehnologija može povećati učinkovitost, važno je osigurati da njezina primjena ne dovede do socijalne isključenosti određenih skupina.

Postoji i rizik od digitalne nejednakosti, gdje samo tehnološki napredna gospodarstva imaju pristup suvremenim rješenjima, dok manji proizvođači zaostaju. Takva situacija može dodatno produbiti postojeće razlike u produktivnosti i konkurentnosti unutar poljoprivrednog sektora.

## **9.6 Potreba za integriranim i održivim pristupom**

Kako bi se prevladali navedeni izazovi, potrebno je usvojiti integrirani i održivi pristup razvoju i primjeni senzorskih sustava. To uključuje razvoj standarda, poticanje interoperabilnosti, pružanje financijske i edukacijske potpore te uključivanje svih dionika u proces digitalne transformacije. Samo takav pristup može osigurati da integrirani senzorski sustavi postanu alat za unapređenje održive poljoprivrede.

Izazovi i ograničenja integriranih senzorskih sustava ne umanjuju njihov potencijal, već naglašavaju potrebu za pažljivim planiranjem i odgovornom primjenom. U sljedećem poglavlju razmotrit će se budući razvoj i trendovi u području integriranih senzorskih sustava i digitalne poljoprivrede.

# **10. Budući razvoj i trendovi integriranih senzorskih sustava u poljoprivredi**

Razvoj integriranih senzorskih sustava u poljoprivredi odvija se u kontekstu brzog tehnološkog napretka, klimatskih promjena i rastućih zahtjeva za održivom proizvodnjom hrane. Budući trendovi ukazuju na daljnju digitalizaciju, automatizaciju i integraciju različitih tehnologija, s ciljem stvaranja inteligentnih i prilagodljivih poljoprivrednih sustava. Ovi trendovi neće samo unaprijediti učinkovitost proizvodnje, već će i promijeniti način na koji se poljoprivreda percipira i upravlja.

## **10.1 Napredak senzorskih tehnologija**

Jedan od ključnih trendova jest daljnji razvoj senzorskih tehnologija. Senzori postaju sve manji, jeftiniji i energetski učinkovitiji, što omogućuje njihovu širu primjenu i gusto raspoređivanje na poljoprivrednim površinama. Razvoj višefunkcionalnih senzora, koji mogu istovremeno mjeriti više parametara, dodatno će povećati količinu i kvalitetu prikupljenih podataka.

Poseban naglasak stavlja se na razvoj biosenzora i senzora temeljenih na nanotehnologiji, koji omogućuju izravno praćenje fizioloških procesa u biljkama i tlu. Takvi senzori omogućuju ranu detekciju stresa, bolesti i nedostatka hranjiva, čime se dodatno povećava preciznost upravljanja.

## **10.2 Integracija umjetne inteligencije i strojnog učenja**

Umjetna inteligencija i strojno učenje igrat će sve važniju ulogu u analizi podataka i donošenju odluka. Integrirani senzorski sustavi generiraju velike količine podataka, čija ručna analiza postaje nepraktična. Algoritmi umjetne inteligencije omogućuju automatiziranu analizu, prepoznavanje obrazaca i predviđanje budućih događaja.

Primjena umjetne inteligencije omogućit će razvoj autonomnih sustava odlučivanja, koji mogu samostalno prilagoditi agrotehničke mjere u realnom vremenu. Takvi sustavi predstavljaju korak prema potpuno automatiziranoj poljoprivredi, u kojoj se odluke donose na temelju kontinuirane analize podataka.

## **10.3 Razvoj digitalnih dvojnika**

Digitalni dvojnici postat će središnji element budućih integriranih senzorskih sustava. Razvoj naprednih modela omogućit će stvaranje sve preciznijih virtualnih prikaza poljoprivrednih sustava, koji se kontinuirano ažuriraju stvarnim podacima sa senzora. Digitalni dvojnici omogućit će simulaciju različitih scenarija, procjenu rizika i optimizaciju upravljanja prije primjene u stvarnom okruženju.

Integracija digitalnih dvojnika s platformama za upravljanje omogućit će poljoprivrednicima testiranje novih strategija proizvodnje, prilagodbu klimatskim promjenama i dugoročno planiranje. Ovaj pristup predstavlja značajan iskorak u smjeru prediktivne i preventivne poljoprivrede.

## **10.4 Autonomni sustavi i robotika**

Razvoj autonomnih poljoprivrednih strojeva i robota predstavlja jedan od najdinamičnijih trendova u suvremenoj poljoprivredi. Integracija senzorskih sustava s autonomnim vozilima omogućit će precizno izvođenje poljoprivrednih operacija uz minimalnu ljudsku intervenciju. Autonomni sustavi mogu reagirati na promjene u okolišu u realnom vremenu, čime se povećava učinkovitost i smanjuju pogreške.

Robotika će igrati važnu ulogu u obavljanju radno intenzivnih i preciznih zadataka, poput selektivne berbe, uklanjanja korova i precizne primjene zaštitnih sredstava. Ovi sustavi oslanjaju se na integraciju senzora, računalnog vida i algoritama umjetne inteligencije.



*Slika 32. Robotika u poljoprivredi*

## **10.5 Otvorene platforme i interoperabilnost**

Budući razvoj integriranih senzorskih sustava zahtijevat će povećanu razinu interoperabilnosti i standardizacije. Razvoj otvorenih platformi omogućit će integraciju senzora i sustava različitih proizvođača, čime se smanjuje ovisnost o jednom dobavljaču i povećava fleksibilnost sustava. Standardizacija komunikacijskih protokola i formata podataka bit će ključna za daljnji razvoj ekosustava digitalne poljoprivrede.

## **10.6 Uloga politike i društva**

Razvoj integriranih senzorskih sustava neće biti vođen isključivo tehnološkim napretkom, već i politikama, regulativama i društvenim očekivanjima. Potpora javnih institucija, kroz financijske poticaje i edukacijske programe, bit će ključna za širu primjenu ovih tehnologija. Istovremeno, važno je osigurati da razvoj tehnologije bude usklađen s ciljevima održivosti i društvene odgovornosti.

Budućnost integriranih senzorskih sustava u poljoprivredi obilježena je snažnom integracijom tehnologija, automatizacijom i primjenom umjetne inteligencije. Ovi trendovi imaju potencijal transformirati poljoprivredu u visoko učinkovitu, održivu i otpornu djelatnost, spremnu odgovoriti na izazove budućnosti. U sljedećem poglavlju bit će iznesen zaključak rada, koji će objediniti ključne spoznaje i naglasiti važnost integriranih senzorskih sustava u suvremenoj poljoprivredi.

## 11. Zaključak

Integrirani senzorski sustavi predstavljaju temelj suvremene precizne poljoprivrede i jedan od ključnih elemenata digitalne transformacije poljoprivrednog sektora. Kroz ovaj rad analizirani su konceptualni, tehnološki i primijenjeni aspekti njihove primjene, s naglaskom na ulogu senzora, GIS sustava, digitalnih dvojnika i integracijskih platformi u optimizaciji poljoprivredne proizvodnje. Na temelju provedenog pregleda može se zaključiti da integrirani senzorski sustavi omogućuju prelazak s tradicionalnih, iskustveno vođenih metoda upravljanja na sustave temeljene na podacima, analizi i prediktivnom planiranju.

Jedan od glavnih zaključaka rada jest da vrijednost integriranih senzorskih sustava ne proizlazi iz pojedinačnih tehnologija, već iz njihove međusobne integracije. Senzori tla, usjeva, atmosfere i mehanizacije sami po sebi pružaju korisne informacije, ali tek njihovo objedinjavanje u integriranim platformama omogućuje cjelovito razumijevanje proizvodnog sustava. GIS sustavi omogućuju prostornu analizu i vizualizaciju podataka, dok digitalni dvojnici pružaju okvir za simulaciju i predviđanje budućih stanja. Takav sveobuhvatan pristup omogućuje učinkovitije upravljanje resursima i donošenje informiranih odluka.

Analiza benefita integriranih senzorskih sustava pokazala je da njihova primjena donosi višestruke koristi. Ekonomski benefiti očituju se u smanjenju troškova inputa, povećanju prinosa i stabilnosti proizvodnje te smanjenju rizika povezanih s klimatskim i tržišnim promjenama. Ekološki benefiti uključuju smanjenje negativnog utjecaja poljoprivrede na okoliš, racionalnije korištenje vode i gnojiva te smanjenje emisija stakleničkih plinova. Operativni benefiti ogledaju se u boljoj organizaciji rada, automatizaciji procesa i učinkovitijoj komunikaciji između dionika. Društveni benefiti, iako često manje naglašeni, imaju dugoročno važnu ulogu u održivosti ruralnih zajednica i sigurnosti hrane.

Ipak, rad je pokazao da implementacija integriranih senzorskih sustava donosi i određene izazove. Tehnička složenost, visoki početni troškovi, potreba za edukacijom korisnika te pitanja sigurnosti i vlasništva nad podacima predstavljaju značajne prepreke koje je potrebno sustavno rješavati.

Posebno je važno istaknuti rizik digitalne nejednakosti, gdje manja i financijski slabija gospodarstva mogu zaostajati u primjeni suvremenih tehnologija. Stoga je nužno osigurati potporne mjere, edukacijske programe i razvoj pristupačnih rješenja kako bi se omogućila inkluzivna digitalna transformacija poljoprivrede.

Razmatranjem budućih trendova uočen je snažan smjer razvoja prema većoj automatizaciji, primjeni umjetne inteligencije i razvoju digitalnih dvojnika. Integracija ovih tehnologija omogućit će razvoj inteligentnih poljoprivrednih sustava sposobnih za samostalno prilagođavanje promjenjivim uvjetima. Takvi sustavi imaju potencijal značajno povećati otpornost poljoprivrede na klimatske promjene i druge vanjske izazove. Međutim, njihova uspješna primjena zahtijeva interdisciplinarni pristup i suradnju između poljoprivrednika, znanstvenika, tehnoloških tvrtki i donositelja politika.

Zaključno, integrirani senzorski sustavi predstavljaju ključni alat za ostvarenje održive, učinkovite i konkurentne poljoprivrede u 21. stoljeću. Njihova primjena omogućuje bolje razumijevanje složenih poljoprivrednih sustava i pruža osnovu za donošenje odluka temeljenih na podacima. Iako postoje brojni izazovi, kontinuirani tehnološki razvoj i rastuća svijest o potrebi održive proizvodnje stvaraju povoljne uvjete za daljnju implementaciju ovih sustava. U konačnici, integrirani senzorski sustavi ne predstavljaju samo tehnološku inovaciju, već i promjenu načina razmišljanja u procesima upravljanja poljoprivredom, s potencijalom da značajno doprinesu globalnoj sigurnosti hrane i očuvanju prirodnih resursa.

## Literatura (odabrani izvori)

1. Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). *Precision agriculture and food security*. Science.
2. McBratney, A., Whelan, B., Ancev, T., & Bouma, J. (2005). *Future directions of precision agriculture*. Precision Agriculture.
3. Mulla, D. J. (2013). *Twenty five years of remote sensing in precision agriculture*. Biosystems Engineering.
4. Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). *Big data in smart farming*. Agricultural Systems.
5. Azeem Ayaz Mirani, Muhammad Suleman Memon. (2021). *Machine learning in agriculture: A review*.
6. Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic Information Science and Systems*.
7. Verdouw, C. N., Wolfert, J., Beulens, A. J. M., & Rialland, A. (2015). *Virtualization of food supply chains with the Internet of Things*. Journal of Food Engineering.
8. Grieves, M., & Vickers, J. (2017). *Digital twin: Mitigating unpredictable behavior in complex systems*. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems.
9. Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2017). *Internet of Things in agriculture*. Biosystems Engineering.
10. FAO. (2017). *Information and Communication Technology (ICT) in Agriculture*. FAO, Rome.
11. John Deere. (2023). *John Deere Operations Center – Digital farming platform documentation*.
12. AGRIVI. (2023). *AGRIVI Farm Management Software – Technical overview*.
13. CLAAS Group. (2023). *CLAAS connect – Digital solutions for agriculture*.
14. JetBov. *Digitalna platforma za upravljanje stočarskom proizvodnjom*. Dostupno na: <https://www.jetbov.com>
15. The Future of Agricultural Technology: Precision Farming. Dostupno na: <https://medium.com/@michellehhan/the-future-of-agricultural-technology-precision-farming-658f8c5226fe>
16. Optimizing Agricultural Data Analysis Techniques through AI-Powered Decision-Making Processes. Dostupno na: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/17/8018>
17. Senzori i IoT uređaji u poljoprivredi. Dostupno na: <https://mojeselo.tech/senzori-i-iot-uredaji-u-poljoprivredi/>

18. Remote Sensing Applied on the Agriculture. Dostupno na:  
<https://encyclopedia.pub/entry/55171>
19. A Comprehensive Review of Digital Twins Technology in Agriculture. Dostupno na:  
<https://www.mdpi.com/2077-0472/15/9/903>
20. <https://www.agrivi.com/hr/>

## Popis slika

Slika 1. Suša poljoprivredne kulture .....	1
Slika 2. Dron korišten u svrhe poljoprivrede.....	2
Slika 3. Shema prikupljanja podataka .....	4
Slika 4. Gnojidba .....	5
Slika 5. Komponente pametne poljoprivrede .....	6
Slika 6. Senzor tla .....	7
Slika 7. Senzor usjeva .....	8
Slika 8. Meteorološki senzor .....	9
Slika 9. Karte prinosa .....	9
Slika 10. Real-time stvaranje karte prinosa.....	10
Slika 11. Shema IoT-a u pametnoj poljoprivredi.....	11
Slika 12. Komunikacija putem LoRaWAN-a .....	12
Slika 13. Automatski sustav navodnjavanja .....	13
Slika 14. Mapiranje poljoprivrednih parcela .....	14
Slika 15. Daljinska istraživanja u preciznoj poljoprivredi.....	15
Slika 16. Shema nastanka digitalnog dvojnika .....	17
Slika 17. Usporedba digitalnog modela, sjene i dvojnika.....	18
Slika 18. Vizualizacija podataka .....	20
Slika 19. Interijer traktora tvrtke John Deere .....	22
Slika 20. Napredni sustav kamera .....	23
Slika 21. Sučelje Operations Center-a.....	24
Slika 22. Prikaz podataka prikupljenih od senzora u vozilu tvrtke CLAAS.....	25
Slika 23. Sučelje CLASS Connect-a.....	26
Slika 24. Karta primjene izrađena pomoću Digitalnog geocentra.....	27
Slika 25. Sučelje AGRIVI Connect Meteo-a - profesionalne poljoprivredne meteorološke stanice ....	28
Slika 26. Sučelje AGRIVI Connect Soil-a .....	29
Slika 27. AGRIVI 360 Farm Insights.....	30
Slika 28. Logo tvrtke JetBov .....	31
Slika 29. Tipovi senzora koji se koriste u stočarstvu .....	32
Slika 30. Sljedivost proizvodnje pomoću AGRIVI-ja.....	35
Slika 31. Zatvorene tvornice nakon napada .....	37
Slika 32. Robotika u poljoprivredi.....	40