



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEODETSKI FAKULTET**

**SEMINARSKI RAD**

**INTEGRIRANI SENZORSKI SUSTAVI U  
POLJOPRIVREDI**

**Mirko Kunac  
Matej Marinković**

Zagreb, 2026.

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. TEORIJSKI OKVIR .....	2
2.1. VRSTE SENZORA .....	2
2.1.1 Senzori tla .....	2
2.1.2 Biljni senzori .....	3
2.1.3 Senzori radnih parametara poljoprivredne mehanizacije.....	4
2.1.4 Pozicijski i navigacijski senzori.....	4
2.2. INTEGRACIJA SENZORA .....	5
2.3. DIGITALNI BLIZANAC .....	7
3. PRIMJENA INTEGRIRANIH SENZORSKIH SUSTAVA U PRECIZNOJ POLJOPRIVREDI .....	9
3.1. PAMETNI INTEGRIRANI SUSTAV U PRECIZNOM UZGOJU JAGODA.....	9
3.1.1. Arhitektura pametnog sustava.....	10
3.1.2. Senzorski i komunikacijski dio sustava .....	10
3.1.3. Edge obrada podataka i računalni vid.....	11
3.1.4. YOLO model .....	12
3.1.5. Rezultati i isplativost.....	13
3.2. PAMETNI INTEGRIRANI SUSTAV U PRECIZNOM STOČARSTVU .....	14
3.2.1. Opći opis istraživanja.....	14
3.2.2. Senzorski sustav i vrste senzora.....	14
3.2.3. Integracija podataka i obrada.....	16
3.2.4. Rezultati istraživanja i isplativost .....	17
4. FINANCIJSKA ISPLATIVOST INTEGRACIJE SENZORA.....	18
5. ZAKLJUČAK .....	20
6. LITERATURA.....	21
7. POPIS SLIKA .....	22

# 1. UVOD

Razvoj suvremenih tehnologija, u kombinaciji s napretkom senzorskih sustava i komunikacijskih mreža, značajno je unaprijedio načine prikupljanja, obrade i analize prostornih podataka. Integrirani sustavi u geoinformatici danas predstavljaju temelj za učinkovito upravljanje prostorom i resursima, osobito u kontekstu složenih i dinamičnih sustava kakvi se javljaju u poljoprivredi i stočarstvu. Precizna poljoprivreda, kao interdisciplinarno područje koje objedinjuje geodeziju, geoinformatiku, agronomiju i informatiku, sve se više oslanja na integraciju podataka dobivenih iz različitih izvora, uključujući satelitska i bespilotna snimanja, terestričke senzore te sustave Interneta stvari (IoT).

U tom kontekstu, senzorski sustavi imaju ključnu ulogu u kontinuiranom praćenju stanja tla, biljaka i atmosferskih uvjeta, dok geoinformacijski sustavi (GIS) omogućuju prostornu analizu, vizualizaciju i donošenje odluka temeljenih na lokacijski referenciranim podacima. Poseban iskorak u integraciji navedenih tehnologija predstavlja koncept digitalnog blizanca, koji podrazumijeva virtualni prikaz stvarnog sustava temeljen na višeslojnim prostornim i vremenskim podacima, s ciljem simulacije, predikcije i optimizacije upravljanja resursima.

Cilj ovoga seminarskog rada jest prikazati koncept integriranih senzorskih sustava u preciznoj poljoprivredi, s naglaskom na ulogu GIS-a u integraciji različitih vrsta podataka te primjenu digitalnog blizanca kao naprednog alata za prostorno odlučivanje. Istražit će se relevantna znanstvena i stručna literatura te analizirati suvremene primjene koje ukazuju na prednosti, ograničenja i buduće smjerove razvoja integriranih geoinformatičkih sustava. Kroz rad će se proučiti i ekonomska opravdanost i financijski benefiti korištenjem integriranih sustava u području precizne poljoprivrede.

## 2. TEORIJSKI OKVIR

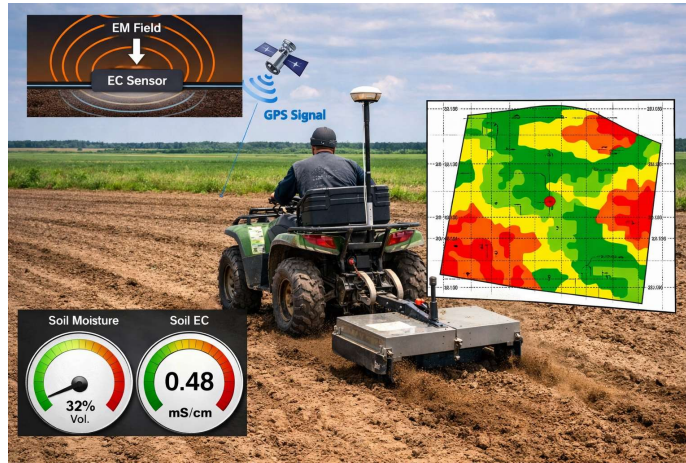
### 2.1. VRSTE SENZORA

Senzorski sustavi predstavljaju temelj suvremene precizne poljoprivrede i ključnu komponentu integriranih sustava u geomatici. Njihova primjena u poljoprivrednoj mehanizaciji omogućuje prikupljanje prostorno i vremenski referenciranih podataka tijekom izvođenja agrotehničkih operacija, čime se ostvaruje visoka razina automatizacije i preciznosti. S inženjerskog aspekta, senzori u poljoprivrednoj mehanizaciji mogu se klasificirati u četiri osnovne skupine: (1) senzore tla, (2) biljne senzore, (3) senzore radnih parametara strojeva te (4) pozicijske i navigacijske senzore. Svaka od navedenih skupina ima specifičnu ulogu u integriranom geoinformatičkom sustavu.

#### 2.1.1 Senzori tla

Senzori tla(Slika 1) koriste se za mjerenje fizikalnih i kemijskih svojstava tla koja izravno utječu na rast i razvoj biljaka. Najčešće primjenjivani senzori u poljoprivrednoj mehanizaciji uključuju senzore volumetrijske vlažnosti tla, temperature tla te elektromagnetske senzore električne vodljivosti tla (EC). Elektromagnetski EC senzori osobito su značajni jer omogućuju kontinuirano mjerenje prostorne varijabilnosti tla tijekom kretanja stroja po parceli, bez potrebe za uzorkovanjem.

S inženjerskog stajališta, ovi senzori rade na principu induciranja elektromagnetskog polja u tlu i mjerenja odgovora koji ovisi o teksturi, sadržaju vode i salinitetu tla. Integracijom s GNSS sustavima, svako mjerenje precizno se georeferencira, čime se dobivaju prostorne baze podataka pogodne za GIS analize i izradu karata upravljačkih zona. Takvi senzori predstavljaju jedan od ključnih alata za prostorno diferencirano upravljanje poljoprivrednim površinama(Corwin & Scudiero, 2019).

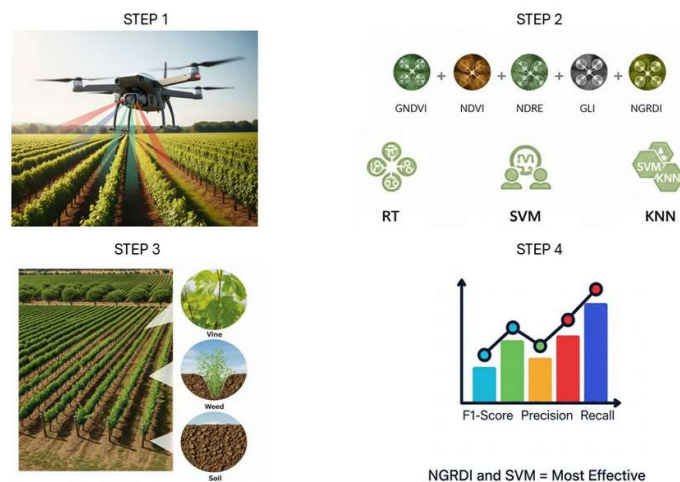


Slika 1-Senzor tla

### 2.1.2 Biljni senzori

Biljni senzori omogućuju procjenu fiziološkog stanja biljaka tijekom vegetacijskog ciklusa te su ključni za pravovremeno donošenje odluka o gnojidbi i zaštiti bilja. Ova skupina senzora dijeli se na aktivne optičke senzore i pasivne optičke senzore. Aktivni senzori emitiraju vlastito elektromagnetsko zračenje i mjere reflektirani signal, čime omogućuju stabilna mjerenja neovisno o vanjskim svjetlosnim uvjetima. Zbog toga su posebno pogodni za ugradnju na traktore i samohodne strojeve.

Pasivni biljni senzori(Slika 2), poput multispektralnih i hiperspektralnih kamera, oslanjaju se na Sunčevo zračenje te se najčešće koriste na UAV platformama i satelitima, ali se sve češće integriraju i u mehanizaciju. Analizom spektralnog odziva biljaka izračunavaju se vegetacijski indeksi, koji predstavljaju ulazne podatke za varijabilnu primjenu agrotehničkih mjera. Kombinacija biljnih senzora i prostorne analize značajno povećava učinkovitost precizne poljoprivrede(Maes & Steppe, 2019).

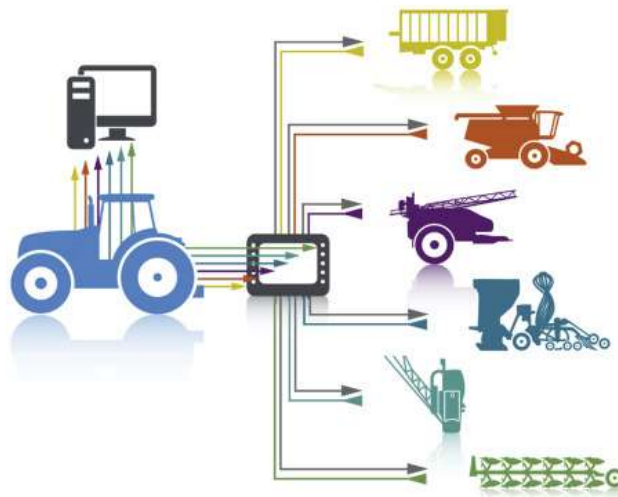


Slika 2-Pasivni biljni senzor

### 2.1.3 Senzori radnih parametara poljoprivredne mehanizacije

Senzori radnih parametara strojeva omogućuju praćenje i kontrolu učinkovitosti rada poljoprivredne mehanizacije. U ovu skupinu ubrajaju se senzori brzine, protoka, tlaka, zakretnog momenta, opterećenja i položaja radnih tijela. Njihova osnovna funkcija jest osiguravanje precizne i ponovljive primjene inputa, kao i automatska prilagodba radnih parametara u skladu s prostornim informacijama.

S inženjerskog aspekta, ovi senzori integrirani su u sustave upravljanja strojevima te su povezani s kontrolnim jedinicama koje u stvarnom vremenu donose odluke o regulaciji rada. Standardizirana komunikacija između traktora, priključnih strojeva i senzora ostvaruje se primjenom ISOBUS standarda (ISO 11783), čime se omogućuje interoperabilnost sustava (Slika 3) i integracija podataka u jedinstvenu platformu. Standardizacija ključni preduvjet za razvoj potpuno integriranih i automatiziranih poljoprivrednih sustava (ISO, 2019 Sørensen i dr., 2021).



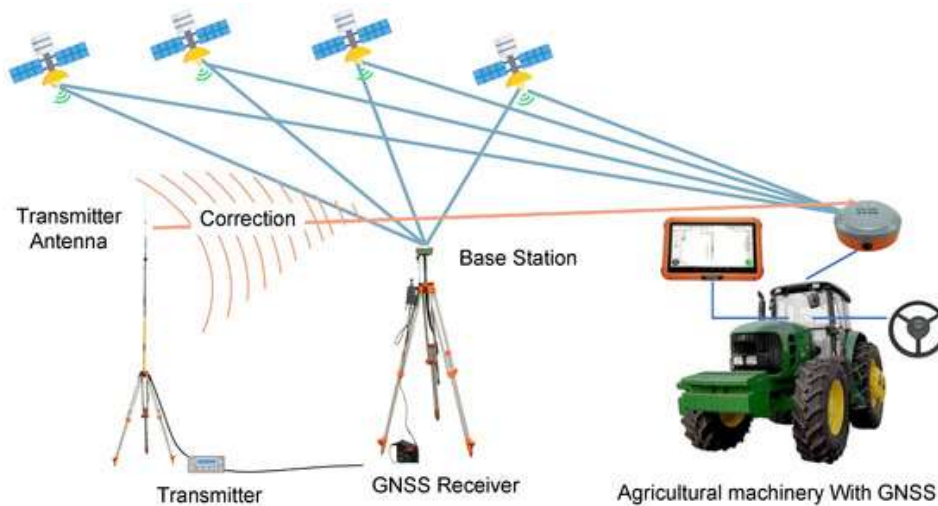
*Slika 3-ISOBUS interoperabilnost sustava*

### 2.1.4 Pozicijski i navigacijski senzori

Pozicijski i navigacijski senzori predstavljaju temelj prostorne komponente integriranih sustava u preciznoj poljoprivredi. Globalni navigacijski satelitski sustavi (GNSS), često u kombinaciji s RTK korekcijama (Slika 4), omogućuju precizno određivanje položaja poljoprivredne mehanizacije s točnošću na centimetarskoj razini. Takva razina točnosti nužna

je za preciznu sjetvu, sadnju, automatizirano vođenje strojeva i prostorno točno povezivanje senzorskih mjerenja.

U složenijim sustavima, GNSS senzori kombiniraju se s inercijskim mjernim jedinicama (IMU) kako bi se osigurala pouzdanost pozicioniranja u uvjetima smanjenog satelitskog signala. U geodetskom i geoinformatičkom kontekstu, ovi senzori omogućuju povezivanje svih mjerenja s jedinstvenim referentnim koordinatnim sustavom, čime se osigurava konzistentnost prostornih analiza unutar GIS-a. Pozicijski senzori ključna su poveznica između senzorskih sustava i geoinformatičkih platformi (Villa-Henriksen i dr., 2020).

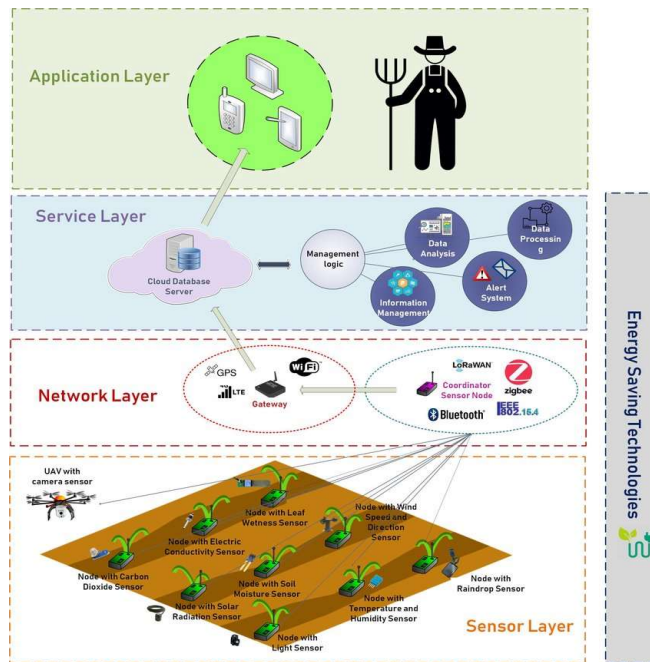


Slika 4-GNSS-RTK princip pozicioniranja

## 2.2. INTEGRACIJA SENZORA

Integracija senzora u preciznoj poljoprivredi temelji se na razvoju integriranih senzorskih sustava koji omogućuju objedinjavanje podataka iz različitih mjernih izvora u jedinstvenu, prostorno utemeljenu informacijsku cjelinu. Naglasak nije samo na mjerenju, već na uspostavi cjelovitog mjernog i informacijskog sustava koji povezuje senzore, pozicioniranje, komunikaciju, obradu podataka i GIS platforme (Slika 5).

Integrirani senzorski sustavi u poljoprivredi mogu se opisati kroz višeslojnu arhitekturu, koja se sastoji od međusobno povezanih funkcionalnih slojeva. Ovakav sustavni pristup omogućuje skalabilnost, interoperabilnost i pouzdanu implementaciju u operativnom okruženju.



Slika 5-Arhitektura pametnog sustava u poljoprivredi

Senzorski sloj obuhvaća sve mjerne uređaje raspoređene na terenu, poljoprivrednoj mehanizaciji, UAV platformama i meteorološkim postajama. U ovom sloju generiraju se izvorni podaci o stanju tla, biljaka, atmosferskih uvjeta i radnih parametara strojeva. S inženjerskog stajališta, ključni izazovi senzorskog sloja odnose se na pouzdanost mjerenja, otpornost na okolišne uvjete te prostornu i vremensku konzistentnost podataka. Kako bi senzorski podaci bili upotrebljivi, nužno je njihovo precizno pozicioniranje koje se u praksi ostvaruje integracijom senzora s GNSS prijemnicima. Time se svako mjerenje povezuje s jedinstvenim prostornim referentnim okvirom što predstavlja temelj za daljnju GIS obradu.

Komunikacijski sloj omogućuje prijenos podataka iz senzorskog sloja prema središnjem sustavu. Prema istom izvoru, u suvremenim implementacijama dominiraju IoT komunikacijske tehnologije, koje omogućuju prijenos podataka na velikim udaljenostima uz nisku potrošnju energije. Najčešće korišteni protokoli uključuju LoRaWAN i NB-IoT, dok se mobilne mreže koriste u sustavima s većim zahtjevima za propusnošću. Komunikacijski sloj ima ključnu ulogu u osiguravanju kontinuiranog i sinkroniziranog tijeka prostornih podataka, što je preduvjet za real-time analize i operativno upravljanje poljoprivrednim procesima.

Sloj za obradu i integraciju podataka provodi povezivanje senzorskih mjerenja s prostornim informacijama te pohranjivanje u strukturirane baze podataka. Ovaj sloj predstavlja središnju točku integriranog sustava, u kojoj se podaci različitih izvora i rezolucija objedinuju u jedinstvenu geoinformatičku strukturu. Geoinformacijski sustavi (GIS) su ključna komponenta koja u ovom sloju omogućuje prostornu analizu, interpolaciju i vizualizaciju senzorskih podataka, čime se sirova mjerenja pretvaraju u informacijski vrijedne prostorne proizvode.

Aplikacijski sloj predstavlja završnu fazu integriranog sustava, u kojoj se rezultati prostornih analiza koriste za operativno upravljanje poljoprivrednom proizvodnjom. U ovom sloju

implementiraju se sustavi za potporu odlučivanju, automatizirano upravljanje navodnjavanjem ili varijabilnu primjenu gnojiva. Primjer praktične implementacije jest sustav preciznog navodnjavanja u kojem se senzorski podaci o vlažnosti tla i meteorološkim uvjetima integriraju u GIS okruženju te se na temelju prostorne analize generiraju preporuke ili automatizirane odluke o navodnjavanju. Takav sustav ilustrira kako se integracija senzora ne završava na prikupljanju podataka, već rezultira izravnim upravljačkim djelovanjem na prostoru (Villa-Henriksen i dr., 2020).

Integracija senzora predstavlja i osnovu za razvoj naprednih koncepata poput digitalnih blizanaca poljoprivrednih sustava. Digitalni blizanac objedinjuje senzorske podatke, prostorne modele i povijesne zapise u jedinstveni virtualni prikaz stvarnog sustava, omogućujući simulaciju i predikciju budućih stanja. Takvi sustavi zahtijevaju visoku razinu prostorne točnosti i pouzdanosti podataka, što dodatno naglašava ulogu geomatike u projektiranju i održavanju integriranih senzorskih sustava (Purcell, 2023).

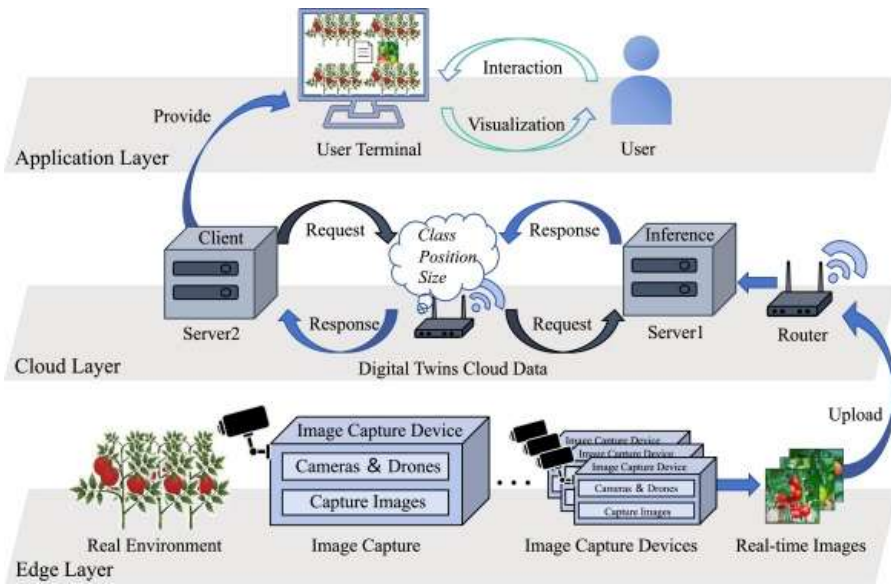
### 2.3. DIGITALNI BLIZANAC

Digitalni blizanac predstavlja dinamički digitalni prikaz fizičkog sustava koji se kontinuirano ažurira stvarnim podacima prikupljenima iz senzorskih mreža, daljinskih istraživanja i operativnih sustava upravljanja. U kontekstu precizne poljoprivrede, digitalni blizanci omogućuju prostorno i vremenski usklađenu integraciju podataka, pri čemu geoinformacijski sustavi (GIS) imaju ključnu ulogu u organizaciji, analizi i vizualizaciji tih podataka.

Digitalni blizanac poljoprivredne površine (Slika 6) temelji se na točno definiranoj prostornoj referenci, pri čemu se senzorski podaci tla, vegetacije, atmosfere i poljoprivredne mehanizacije vežu uz jedinstveni koordinatni sustav. Time se omogućuje modeliranje procesa u stvarnom prostoru, uključujući varijabilnost tla, mikroklimatske uvjete i prostornu heterogenost usjeva, što je preduvjet za pouzdanu analizu i simulaciju.

Ključna vrijednost digitalnih blizanaca očituje se u prediktivnim sposobnostima sustava, gdje se integrirani prostorni podaci koriste za simulaciju budućih scenarija upravljanja resursima, poput optimizacije navodnjavanja, gnojidbe ili planiranja poljoprivrednih operacija. Takav pristup omogućuje donošenje odluka temeljenih na podacima (data-driven decision making), uz smanjenje operativnih troškova i negativnog utjecaja na okoliš.

U integriranim geoinformatičkim sustavima digitalni blizanac djeluje kao poveznica između senzorskog sloja i aplikacijskog sloja, gdje se sirovi podaci transformiraju u informacijski i upravljački alat. Upravo ta sposobnost kontinuirane povratne veze između stvarnog sustava i njegovog digitalnog modela predstavlja temelj budućeg razvoja pametne i održive poljoprivrede (Purcell, 2023).



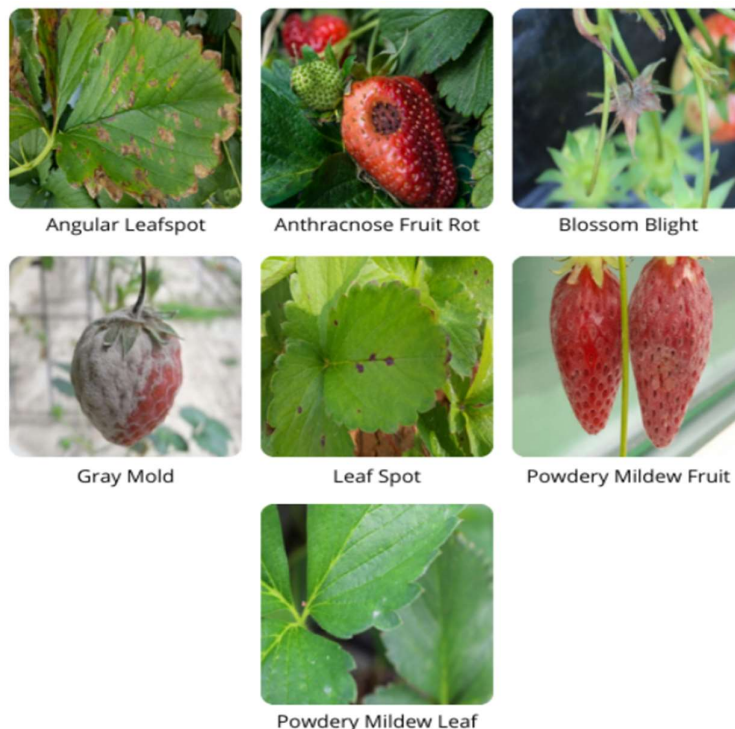
Slika 6-Model digitalnog blizanca

### 3. PRIMJENA INTEGRIRANIH SENZORSKIH SUSTAVA U PRECIZNOJ POLJOPRIVREDI

#### 3.1. PAMETNI INTEGRIRANI SUSTAV U PRECIZNOM UZGOJU JAGODA

Uzgoj jagoda zahtijeva kontinuiranu kontrolu okolišnih uvjeta i zdravstvenog stanja biljaka zbog njihove izrazite osjetljivosti na temperaturne promjene, vlažnost zraka i tla te pojavu različitih biljnih bolesti (Slika 7). Nepravodobno prepoznavanje nepovoljnih uvjeta može dovesti do smanjenja prinosa, lošije kvalitete plodova i povećane uporabe kemijskih sredstava za zaštitu bilja. Tradicionalni pristupi nadzoru temelje se uglavnom na periodičnim mjerenjima i vizualnom pregledu nasada, što često nije dovoljno precizno niti pravovremeno.

Razvojem precizne poljoprivrede i pametnih tehnologija omogućena je automatizacija procesa praćenja i upravljanja uzgojem. Integrirani senzorski sustavi, Internet stvari (IoT) i metode umjetne inteligencije omogućuju prikupljanje velike količine podataka u stvarnom vremenu te njihovu analizu i korištenje za donošenje odluka. Ovo poglavlje temelji se na radu Cruz i dr. (2022.) u kojem se prikazuje primjer takvog sustava primijenjenog u uzgoju jagoda, s naglaskom na integraciju senzora, edge computinga i računalnog vida.

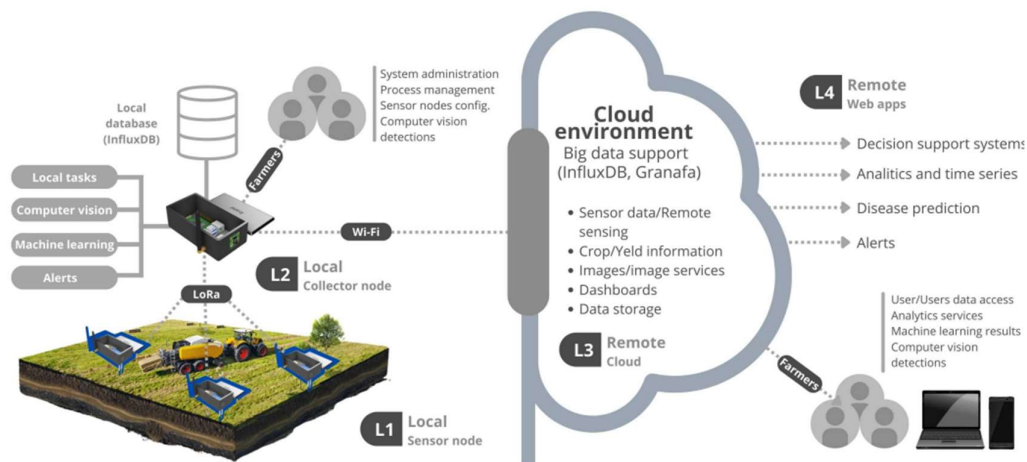


*Slika 7-Primjeri zaraza kod jagoda*

### 3.1.1. Arhitektura pametnog sustava

Predloženi sustav temelji se na višeslojnoj IoT arhitekturi (Slika 8) koja omogućuje jasnu podjelu funkcionalnosti i pouzdanu integraciju različitih komponenti. Arhitektura je osmišljena tako da podržava proširenje sustava dodavanjem novih senzora ili aplikacija bez značajnih izmjena postojeće infrastrukture.

Senzorski sloj zadužen je za prikupljanje podataka iz okoline, dok sloj obrade omogućuje lokalnu analizu podataka i filtriranje nepravilnosti. Komunikacijski i servisni sloj omogućuje prijenos i pohranu podataka, dok aplikacijski sloj korisnicima pruža pregled informacija i alate za donošenje odluka. Ovakav pristup omogućuje objedinjavanje podataka iz različitih izvora u jedinstvenu informacijsku cjelinu, što je temelj precizne poljoprivrede.

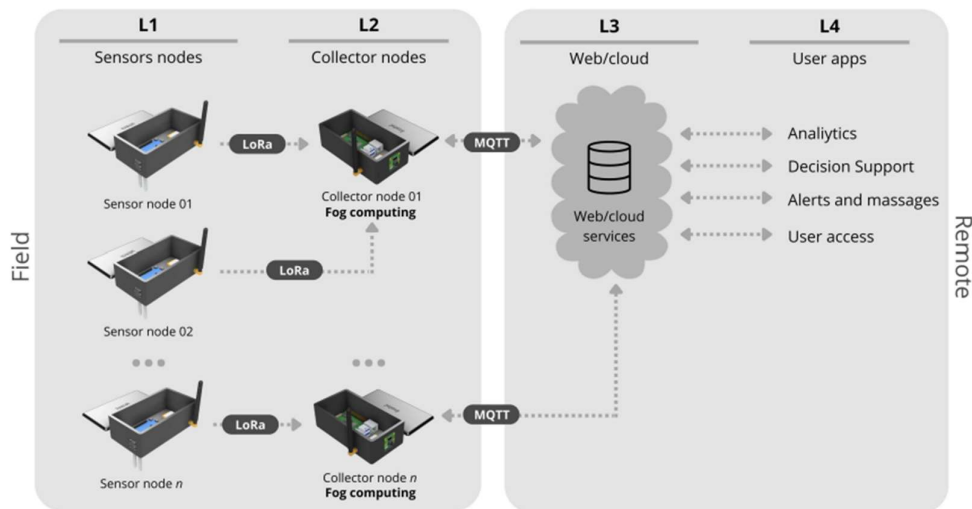


Slika 8-Arhitektura realiziranog sustava

### 3.1.2. Senzorski i komunikacijski dio sustava

Senzorski dio sustava sastoji se od više senzorskih čvorova raspoređenih unutar nasada jagoda. Čvorovi su opremljeni sensorima za mjerenje temperature zraka, relativne vlažnosti i vlažnosti tla, jer su upravo ti parametri ključni za pravilan rast biljaka i prevenciju bolesti. Podaci se prikupljaju kontinuirano, čime se dobiva detaljan uvid u mikroklimatske uvjete nasada.

Za komunikaciju između senzorskih čvorova i centralne jedinice koristi se LoRa tehnologija, koja omogućuje prijenos podataka na velikim udaljenostima uz nisku potrošnju energije (Slika 9). Ovakvo rješenje pokazuje se izuzetno pogodnim za poljoprivredna područja gdje ne postoji stabilna internetska infrastruktura. Niska potrošnja energije i jednostavna instalacija dodatno doprinose isplativosti sustava.

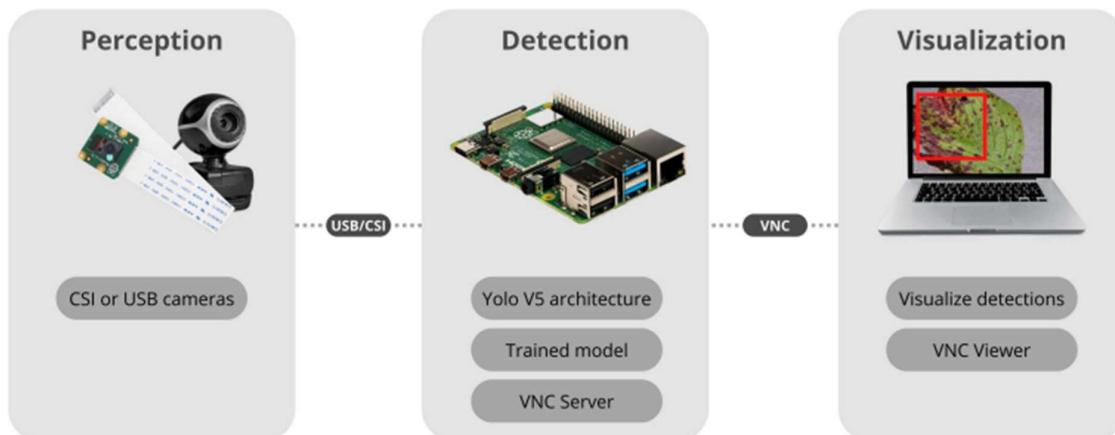


Slika 9-Slojevi IoT arhitekture

### 3.1.3. Edge obrada podataka i računalni vid

Centralni čvor sustava temelji se na Raspberry Pi platformi, koja djeluje kao edge uređaj za lokalnu obradu podataka prikupljenih iz senzorskih i slikovnih izvora. Na ovoj razini sustava provodi se analiza senzorskih mjerenja, privremena pohrana podataka te obrada slikovnih zapisa dobivenih pomoću CSI ili USB kamere postavljene u nasadu. Takav pristup omogućuje obradu podataka neposredno na mjestu njihova nastanka, čime se smanjuje kašnjenje u prijenosu informacija i povećava pouzdanost sustava u uvjetima ograničene ili nestabilne internetske veze.

Uz obradu i detekciju, sustav uključuje i vizualizacijski sloj, koji korisnicima omogućuje jednostavan pregled rezultata analize. Rezultati detekcije prikazuju se u obliku označenih područja na slici biljke, pri čemu su detektirani simptomi jasno istaknuti i popraćeni pripadajućim oznakama. Vizualizacija se ostvaruje putem VNC poslužitelja na edge uređaju i VNC klijenta na korisničkom računalu, što omogućuje udaljeni nadzor sustava bez potrebe za fizičkom prisutnošću na terenu. Integracijom edge obrade, računalnog vida i vizualizacije u jedinstvenu cjelinu (Slika 10), sustav pruža učinkovitu podršku odlučivanju u preciznoj poljoprivredi te omogućuje transparentan i intuitivan uvid u stanje nasada u stvarnom vremenu.



Slika 10-Komponente sustava za računalni vid

### 3.1.4. YOLO model

Slika 9 prikazuje primjere rada sustava za detekciju bolesti jagoda temeljenog na YOLOv5 modelu računalnog vida. Sustav je treniran za prepoznavanje nekoliko najčešćih bolesti i problema u uzgoju jagoda, koji se manifestiraju promjenama na listovima i plodovima. YOLO model omogućuje istovremenu detekciju i klasifikaciju objekata, što znači da sustav u jednom prolazu analizira sliku i identificira potencijalne probleme.

Prepoznate bolesti uključuju različite oblike pjegavosti, gljivične infekcije, nekrozu listova te deformacije plodova, ali i znakove stresa uzrokovane nepovoljnim okolišnim uvjetima poput prekomjerne vlage ili toplinskog stresa. Vizualni prikaz rezultata detekcije omogućuje poljoprivredniku brzu interpretaciju stanja nasada i donošenje ciljanih mjera zaštite.



Slika 11-Uzorci mogućih zaraza kod jagoda

### 3.1.5. Rezultati i isplativost

Sustav je implementiran na stvarnom nasadu jagoda površine približno 18.900 m<sup>2</sup> s ukupno 104.000 biljaka (Slika 12). Postavljena su dva senzorska čvora i jedan centralni čvor, što se pokazalo dovoljnim za pokrivanje najkritičnijih dijelova nasada. Sustav je testiran u stvarnim uvjetima uzgoja, uključujući prikupljanje senzorskih podataka, njihovu obradu i vizualizaciju te testiranje računalnog vida. Implementacija je pokazala da je sustav relativno jednostavan za instalaciju i održavanje, što dodatno doprinosi njegovoj praktičnoj primjeni u stvarnoj proizvodnji.



*Slika 12-Područje nasada*

Rezultati testiranja pokazali su da sustav pouzdano prikuplja i obrađuje podatke te omogućuje pravovremenu detekciju nepovoljnih uvjeta i bolesti. YOLOv5 model postiže visoku točnost detekcije, dok edge obrada smanjuje vrijeme reakcije sustava i količinu podataka koje je potrebno slati u oblak.

S ekonomskog aspekta, sustav pokazuje dobru isplativost ulaganja. Korištenjem relativno jeftinih hardverskih komponenti, poput Arduino i Raspberry Pi platformi, te besplatnog softvera otvorenog koda, početni troškovi implementacije ostaju umjereni. Pravovremena detekcija bolesti omogućuje smanjenje gubitaka prinosa i racionalniju primjenu pesticida, što dugoročno smanjuje troškove proizvodnje i povećava profitabilnost uzgoja.

## 3.2. PAMETNI INTEGRIRANI SUSTAV U PRECIZNOM STOČARSTVU

### 3.2.1. Opći opis istraživanja

Kao što je u prethodnom poglavlju prikazana primjena integriranih senzorskih sustava u preciznom uzgoju jagoda, isti tehnološki i istraživački koncept primjenjuje se i u području stočarstva kroz razvoj preciznog stočarstva (Precision Livestock Farming – PLF). Prema Berckmansu (2017), precizno stočarstvo predstavlja interdisciplinarni pristup koji kombinira senzorske tehnologije, automatiziranu obradu podataka i sustave za potporu odlučivanju s ciljem kontinuiranog praćenja pojedinih životinja unutar proizvodnog sustava (Slika 13).

Temeljna razlika između tradicionalnog i preciznog stočarstva leži u načinu prikupljanja informacija. Dok se klasični pristupi oslanjaju na povremene preglede i subjektivnu procjenu uzgajivača, precizno stočarstvo omogućuje objektivno, neprekidno i kvantitativno praćenje ponašanja i fiziološkog stanja životinja. Berckmans naglašava da je takav pristup nužan u suvremenim proizvodnim sustavima u kojima se povećava broj životinja po farmi, a mogućnost individualnog nadzora postaje sve ograničenija.

Istraživanja u području preciznog stočarstva temelje se na istoj logici kao i istraživanja u preciznoj biljnoj proizvodnji: biološki sustavi promatraju se kao dinamični procesi koji se mogu mjeriti, modelirati i optimizirati pomoću senzora i podataka. Umjesto praćenja rasta biljaka i mikroklimatskih uvjeta, u stočarstvu je fokus na ponašanju, zdravlju i produktivnosti životinja, ali je osnovni cilj također pravovremeno donošenje odluka temeljenih na podacima.



Slika 13-Konceptualni okvir preciznog stočarstva temeljen na kontinuiranom praćenju i obradi podataka

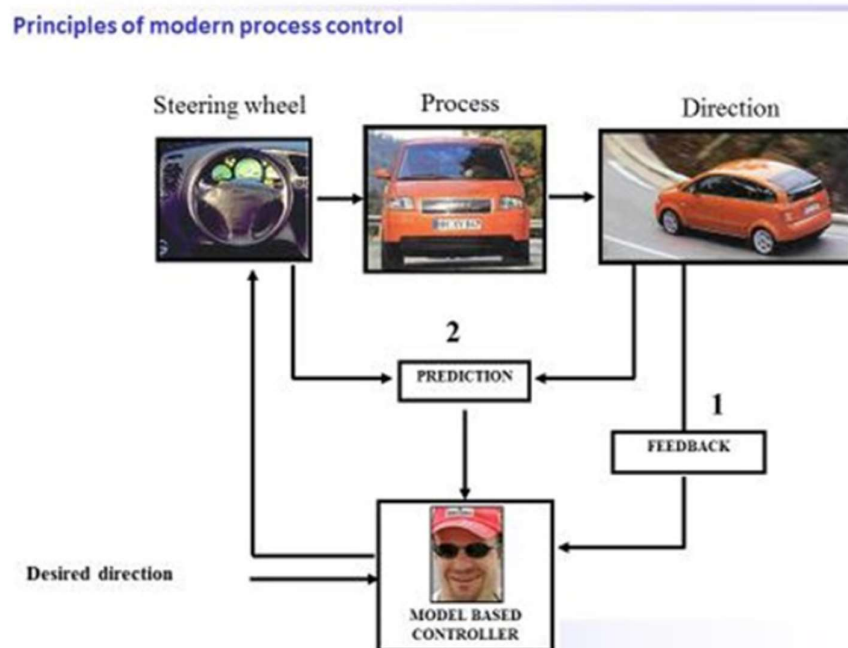
### 3.2.2. Senzorski sustav i vrste senzora

Prema Berckmansu (2017), senzori su ključna komponenta preciznog stočarstva jer omogućuju pretvaranje složenih bioloških procesa u mjerljive signale. Najvažniju skupinu čine senzori koji prate ponašanje životinja, budući da su promjene u ponašanju često prvi pokazatelj zdravstvenih ili proizvodnih problema. U tu skupinu ubrajaju se senzori aktivnosti, najčešće temeljeni na akcelerometrima, koji bilježe kretanje, ležanje, ustajanje i hodanje životinja.

Upravo analiza obrazaca ponašanja pokazuje se izuzetno vrijednom u ranom otkrivanju bolesti šepavosti ili stresa, jer takve promjene često nastupaju prije pojave vidljivih simptoma. Uz senzore aktivnosti, koriste se i senzori tjelesne temperature, disanja i unosa hrane, koji omogućuju dodatni uvid u fiziološko stanje životinja. Kombinacija više senzora povećava pouzdanost sustava jer se odluke ne donose na temelju jednog mjerenja, već na temelju povezanih senzorskih informacija (Slika 14).

U mliječnom govedarstvu važnu ulogu imaju senzori integrirani u sustave za mužnju. Ovi senzori prate količinu i brzinu protoka mlijeka te električnu vodljivost mlijeka, koja je izravno povezana s pojavom upale vimena. Takvi senzori omogućuju praćenje proizvodnje na razini pojedine životinje, što predstavlja značajan iskorak u odnosu na tradicionalne metode koje se temelje na prosječnim vrijednostima za cijelo stado.

Analogno biljnim i okolišnim sensorima korištenima u uzgoju jagoda, u stočarstvu se primjenjuju i senzori okoliša koji prate uvjete u kojima se životinje nalaze. Iako Berckmans primarno naglašava senzore vezane uz životinje, jasno ističe da okolišni uvjeti imaju izravan utjecaj na ponašanje i produktivnost, zbog čega se podaci o okolišu često interpretiraju zajedno sa senzorskim podacima o životinjama.



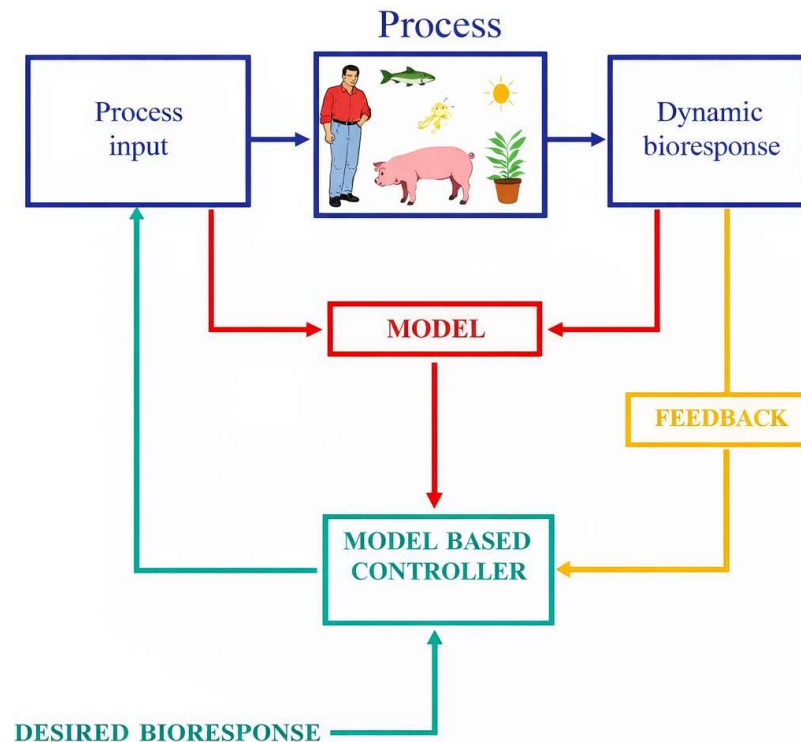
Slika 14-Opći model modernog upravljanja procesima

### 3.2.3. Integracija podataka i obrada

Jedan od ključnih naglasaka Berckmansova rada odnosi se na činjenicu da precizno stočarstvo ne podrazumijeva samo ugradnju senzora, već razvoj integriranog sustava za obradu i interpretaciju podataka. Senzorski podaci prikupljaju se kontinuirano i u velikim količinama, što zahtijeva automatizirane metode obrade i analize. Ovi sustavi opisani su kao inteligentni nadzorni sustavi koji djeluju kao stalni promatrači proizvodnog procesa.

Osnovna zadaća sustava za obradu podataka jest prepoznavanje odstupanja od uobičajenih obrazaca ponašanja i proizvodnje. Umjesto apsolutnih vrijednosti, naglasak je na detekciji promjena kroz vrijeme, što omogućuje ranu identifikaciju problema. Takav pristup usporediv je s analizom vremenskih serija senzorskih podataka u preciznoj biljnoj proizvodnji, gdje se promjene u mikroklimatskim uvjetima ili stanju biljaka koriste kao indikatori rizika. Načelo takvog upravljanja biološkim procesima, temeljeno na integraciji senzorskih podataka, modeliranju odgovora i povratnoj informaciji, prikazano je na slici 15.

Iako se u istraživanju primarno raspravlja o konceptualnoj razini obrade podataka, suvremeni sustavi sve češće integriraju senzorske podatke s prostornim informacijama i digitalnim modelima farme. Time se omogućuje cjelovit prikaz proizvodnog sustava, pri čemu senzorski podaci postaju dio šireg informacijskog okvira, sličnog konceptu digitalnog blizanca opisanom u prethodnim poglavljima rada.



Slika 15-Sustav upravljanja u preciznom stočarstvu na temelju senzorskih mjerenja i modeliranja biološkog odgovora

### 3.2.4. Rezultati istraživanja i isplativost

Najveća vrijednost preciznog stočarstva leži u mogućnosti ranog otkrivanja problema, često i prije nego što su oni vidljivi uzgajivaču. Pravovremene intervencije omogućuju smanjenje gubitaka u proizvodnji, poboljšanje zdravstvenog stanja životinja i povećanje ukupne učinkovitosti proizvodnog sustava. Ovakav pristup ima izravan utjecaj na ekonomsku isplativost stočarske proizvodnje.

Berckmans naglašava da se ekonomske koristi senzorskih sustava ostvaruju kroz smanjenje veterinarskih troškova, bolje upravljanje hranidbom i reprodukcijom te smanjenje potrebe za intenzivnim ručnim nadzorom. Posebno se ističe važnost ovih sustava u velikim farmama, gdje tradicionalni načini nadzora postaju sve manje učinkoviti i gdje automatizacija donosi najveće uštede.

Usporedbom s primjerom preciznog uzgoja jagoda, može se uočiti jasna analogija u načinu vrednovanja isplativosti. U oba slučaja, početna ulaganja u senzorsku opremu i informacijske sustave nadoknađuju se kroz smanjenje gubitaka, racionalnije korištenje resursa i stabilniju proizvodnju. Na taj način, precizno stočarstvo predstavlja logičan nastavak razvoja integriranih senzorskih sustava u poljoprivredi, pri čemu se isti konceptualni okvir primjenjuje na različite biološke proizvodne sustave.

## 4. FINANCIJSKA ISPLATIVOST INTEGRACIJE SENZORA

Iako su tehnološki aspekti integriranih senzorskih i geoinformatičkih sustava u preciznoj poljoprivredi i stočarstvu danas relativno dobro razvijeni, njihova šira primjena u praksi u velikoj mjeri ovisi o ekonomskoj opravdanosti ulaganja. Nakon razmatranja tehničke arhitekture sustava, integracije senzora, komunikacijskih slojeva i primjene digitalnih blizanaca, nužno je sagledati i financijsku dimenziju takvih rješenja u kontekstu upravljanja poljoprivrednim gospodarstvima.

Istraživanje Munza i Schülea (2022) pruža detaljan uvid u ekonomske čimbenike koji utječu na uspjeh implementacije tehnologija precizne poljoprivrede, temeljeno na model-baziranoj analizi različitih tipova gospodarstava. Autori analiziraju scenarije gospodarstava različitih veličina te pokazuju da je ekonomska isplativost tehnologija snažno povezana s razinom integracije sustava i obujmom proizvodnje. Veća gospodarstva ostvaruju brži povrat investicije, dok se kod manjih gospodarstava isplativost značajno poboljšava uz potporne mjere i smanjenje troškova implementacije.

Zaključci navedenog istraživanja mogu se jasno povezati s primjerom pametnog integriranog sustava u uzgoju jagoda prikazanog u poglavlju 3.1. U tom slučaju, relativno niska početna ulaganja u senzorsku opremu, edge uređaje i softver otvorenog koda omogućuju postizanje povoljnog omjera uloženi sredstava i ostvarenih koristi. Pravovremena detekcija bolesti i nepovoljnih mikroklimatskih uvjeta dovodi do smanjenja gubitaka prinosa, racionalnije primjene pesticida i stabilnije proizvodnje, što predstavlja ključni izvor ekonomske koristi, a ne samo povećanje ukupnog prinosa.

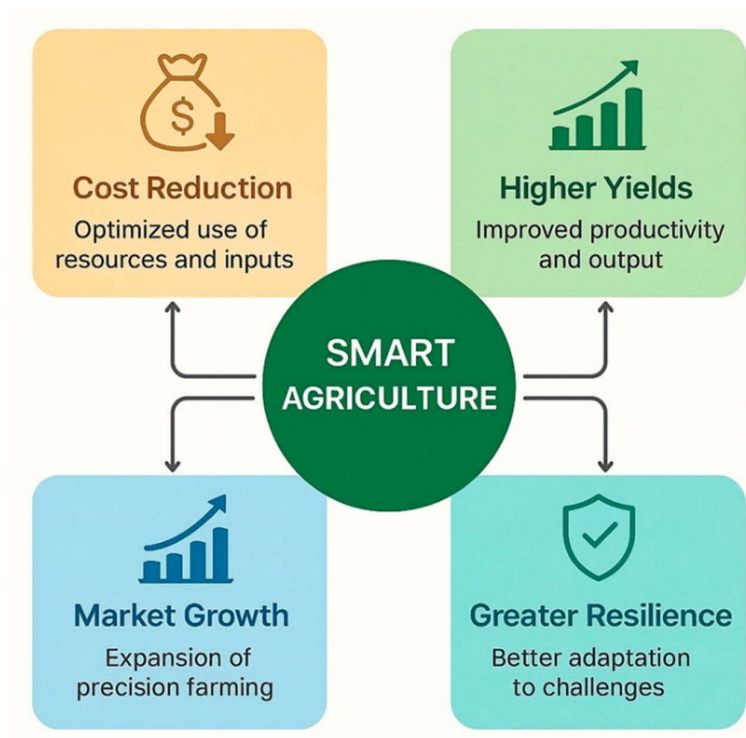
Slična logika isplativosti prisutna je i u primjeru preciznog stočarstva prikazanog u poglavlju 3.2. Iako se u stočarstvu tehnologije često percipiraju kao financijski zahtjevnije, ekonomski učinci ostvaruju se kroz smanjenje veterinarskih troškova, ranije otkrivanje zdravstvenih problema, optimizaciju hranidbe i smanjenje potrebe za intenzivnim ručnim nadzorom. Kao i kod biljne proizvodnje, najveća vrijednost ne proizlazi iz povećanja proizvodnje po sebi, već iz smanjenja gubitaka i učinkovitijeg upravljanja resursima na razini pojedine životinje.

Iz perspektive integriranih geoinformatičkih sustava, važno je naglasiti da se navedeni ekonomski učinci ostvaruju ponajprije u slučajevima gdje su tehnologije implementirane kao dio cjelovitog sustava. Integracija senzora tla, biljnih senzora, senzora za praćenje životinja, GNSS pozicioniranja i GIS analize omogućuje prostorno i vremenski diferencirano upravljanje proizvodnim procesima. Fragmentirana ili djelomična primjena tehnologija, bez odgovarajuće integracije i obrade podataka, često ne dovodi do očekivanih ekonomskih rezultata, što potvrđuje važnost sustavnog pristupa upravljanju farmom.

Digitalni alati, uključujući koncepte digitalnih blizanaca i simulacijskih modela, dodatno povećavaju ekonomsku vrijednost integriranih sustava jer omogućuju smanjenje rizika pri donošenju odluka. Simulacijom različitih upravljačkih scenarija moguće je procijeniti

ekonomske posljedice prije njihove stvarne primjene, kako u biljnoj proizvodnji, tako i u stočarstvu. Time se integrirani senzorski sustavi ne promatraju samo kao tehnička podrška proizvodnji, već kao ključan alat suvremenog farm managementa u poljoprivredi.

Zaključno, primjeri preciznog uzgoja jagoda i preciznog stočarstva jasno pokazuju da integrirani senzorski i geoinformatički sustavi mogu ostvariti mjerljive ekonomske koristi u različitim proizvodnim sustavima (Slika 16). Iako su inicijalna ulaganja i dalje važan čimbenik odluke, pravilno projektirani i integrirani sustavi, potpomognuti odgovarajućim poticajima i znanjem korisnika, predstavljaju održiv smjer razvoja učinkovitog i ekonomski opravdanog upravljanja poljoprivrednim gospodarstvima.



Slika 16- Ekonomski utjecaji pametne poljoprivrede

## 5. ZAKLJUČAK

Integrirani senzorski sustavi predstavljaju temelj suvremenog razvoja precizne poljoprivrede i stočarstva, pri čemu se njihova stvarna vrijednost očituje u sposobnosti objedinjavanja heterogenih podataka u jedinstven, prostorno utemeljen informacijski sustav. Kroz ovaj seminarski rad prikazan je konceptualni i tehnički okvir integracije senzora, komunikacijskih tehnologija, geoinformatičkih sustava i digitalnih blizanaca, s ciljem unaprjeđenja upravljanja poljoprivrednim proizvodnim procesima.

U teorijskom dijelu rada analizirane su osnovne vrste senzora koje se koriste u preciznoj poljoprivredi, uključujući senzore tla, biljne senzore, senzore radnih parametara poljoprivredne mehanizacije te pozicijske i navigacijske senzore. Poseban naglasak stavljen je na njihovu ulogu u prikupljanju prostorno i vremenski referenciranih podataka, kao i na važnost njihove integracije unutar GIS okruženja. Time je istaknuta ključna uloga geomatike u osiguravanju prostorne konzistentnosti, interoperabilnosti i pouzdanosti integriranih sustava.

Primjena integriranih senzorskih sustava detaljno je razmotrena kroz dva konkretna primjera: precizni uzgoj jagoda i precizno stočarstvo. U primjeru pametnog sustava za uzgoj jagoda pokazano je kako integracija senzora okoliša, IoT komunikacije, edge obrade podataka i računalnog vida omogućuje pravovremenu detekciju nepovoljnih uvjeta i biljnih bolesti. Time se smanjuju gubici prinosa, racionalizira primjena zaštitnih sredstava i povećava ukupna učinkovitost proizvodnje. S druge strane, primjer preciznog stočarstva pokazuje da se isti konceptualni okvir može uspješno primijeniti i na praćenje zdravlja, ponašanja i produktivnosti životinja, pri čemu se ekonomske koristi ostvaruju kroz smanjenje veterinarskih troškova, optimizaciju hranidbe i učinkovitije upravljanje velikim proizvodnim sustavima.

U radu je također naglašena važnost obrade i interpretacije senzorskih podataka, pri čemu se integrirani sustavi ne promatraju samo kao alati za prikupljanje podataka, već kao inteligentni nadzorni sustavi sposobni za prepoznavanje promjena i odstupanja u biološkim procesima. Koncept digitalnog blizanca dodatno proširuje mogućnosti takvih sustava omogućujući simulaciju, predikciju i donošenje odluka temeljenih na prostorno i vremenski usklađenim podacima.

Analiza financijske isplativosti pokazala je da ekonomska opravdanost integriranih senzorskih sustava uvelike ovisi o razini njihove integracije i načinu primjene. U oba analizirana primjera, najveće ekonomske koristi proizlaze iz smanjenja gubitaka i racionalnijeg korištenja resursa, a ne isključivo iz povećanja proizvodnje. Time se potvrđuje da integrirani senzorski i geoinformatički sustavi predstavljaju ključan alat suvremenog farm managementa, s potencijalom za dugoročno održiv i učinkovit razvoj poljoprivredne proizvodnje.

Zaključno, integrirani senzorski sustavi u kombinaciji s GIS-om i konceptom digitalnog blizanca predstavljaju snažan temelj buduće pametne poljoprivrede. Njihova primjena omogućuje prijelaz s reaktivnog na proaktivno upravljanje proizvodnim procesima, pri čemu geomatika ima središnju ulogu u povezivanju stvarnog prostora s digitalnim modelima i sustavima odlučivanja.

## 6. LITERATURA

- Berckmans, D. (2017). *General introduction to precision livestock farming*. *Animal Frontiers*, 7(1), 6–11.
- Corwin, D. L., & Scudiero, E. (2019). *Review of soil salinity assessment for agriculture across multiple scales using proximal and remote sensing*. *Computers and Electronics in Agriculture*.
- Cruz, M., Mafra, S., Teixeira, E., & Figueiredo, F. (2022). *Smart strawberry farming using edge computing and IoT*. *Sensors*, 22(15), 5866.
- ISO (2019). *ISO 11783 — Tractors and machinery for agriculture and forestry — Serial control and communications data network*.
- Maes, W. H., & Steppe, K. (2019). *Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture*. *Trends in Plant Science*.
- Munz, J., & Schüle, R. (2022). *Influencing the Success of Precision Farming Technology Adoption—A Model-Based Investigation of Economic Success Factors in Small-Scale Agriculture*. *Agriculture*, 12(11), 1773.
- Purcell, W. (2023). *Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-art review*
- Sørensen, C. G., et al. (2021). *Conceptual framework for automation and digitization in agriculture*. *Journal of Field Robotics*.
- Villa-Henriksen, A., et al. (2020). *Internet of Things in arable farming: Implementation, applications, challenges and potential*. *Biosystems Engineering*.

## 7. POPIS SLIKA

Slika 1-Senzor tla.....	3
Slika 2-Pasivni biljni senzor .....	3
Slika 3-ISOBUS interoperabilnost sustava.....	4
Slika 4-GNSS-RTK princip pozicioniranja .....	5
Slika 5-Arhitektura pametnog sustava u poljoprivredi .....	6
Slika 6-Model digitalnog blizanca .....	8
Slika 7-Primjeri zaraza kod jagoda .....	9
Slika 8-Arhitektura realiziranog sustava.....	10
Slika 9-Slojevi IoT arhitekture.....	11
Slika 10-Komponente sustava za računalni vid .....	12
Slika 11-Uzorci mogućih zaraza kod jagoda .....	12
Slika 12-Područje nasada .....	13
Slika 13-Konceptualni okvir preciznog stočarstva temeljen na kontinuiranom praćenju i obradi podataka .....	14
Slika 14-Opći model modernog upravljanja procesima.....	15
Slika 15-Sustav upravljanja u preciznom stočarstvu na temelju senzorskih mjerenja i modeliranja biološkog odgovora.....	16
Slika 16- Ekonomski utjecaji pametne poljoprivrede.....	19