

Sustavi precizne gnojidbe usijeva primjenom prostorne interpolacije i vegetacijskih indeksa

Rac, Davor

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:

**Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek /
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:151:040894>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**



Sveučilište Josipa Jurja
Strossmayera u Osijeku

**Fakultet
agrobiotehničkih
znanosti Osijek**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Agrobiotechnical
Sciences Osijek - Repository of the Faculty of
Agrobiotechnical Sciences Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK

Davor Rac, redovni student

Diplomski studij Mehanizacije

**SUSTAVI PRECIZNE GNOJIDBE USJEVA PRIMJENOM PROSTORNE
INTERPOLACIJE I VEGETACIJSKIH INDEKSA**

Diplomski rad

Osijek, 2021

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK

Davor Rac, redovni student

Diplomski studij Mehanizacije

**SUSTAVI PRECIZNE GNOJIDBE USJEVA PRIMJENOM PROSTORNE
INTERPOLACIJE I VEGETACIJSKIH INDEKSA**

Diplomski rad

Osijek, 2021.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK

Davor Rac, redovni student

Diplomski studij Mehanizacije

**SUSTAVI PRECIZNE GNOJIDBE USJEVA PRIMJENOM PROSTORNE
INTERPOLACIJE I VEGETACIJSKIH INDEKSA**

Diplomski rad

Povjerenstvo za ocjenu i obranu diplomskog rada:

1. izv.prof.dr.sc. Ivan Plaščak, predsjednik
- 2.prof.dr.sc. Mladen Jurišić, mentor
- 3.Dorijan Radočaj mag. ing. geod. et geoinf, član
4. prof.dr.sc. Irena Rapčan, zamjenski član

Osijek, 2021.

ZAHVALA

Iskreno zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Mladenu Jurišiću i Dorijanu Radočajju, mag. ing. geod. et geoinf. na stručnim savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

Od srca hvala mojoj obitelji i Andrei na svemu što su mi omogućili i pružili. Bez Vas ovo ne bi bilo moguće.

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Gnojidba.....	2
2.1. Hraniva potrebna biljkama	3
2.2. Usporedba konvencionalnog pristupa gnojidbi i pristupa sustavima precizne poljoprivrede.....	6
3. Sustavi precizne poljoprivrede	9
3.1. Osnovni pristupi u sustavima precizne gnojidbe	9
3.2. Precizan pristup osnovnoj gnojidbi	11
3.2.1. Skeniranje elektrovodljivosti tla	12
3.2.2. Uzorkovanje tla	15
3.2.3. Izrada karata gnojidbe	17
4. Prostorna interpolacija.....	20
4.1. Metode prostorne interpolacije	22
4.1.1. Metoda inverzne udaljenosti (engl. <i>Inverse Distance Weighting, IDW</i>)	24
4.1.2. Metoda zavojnica (engl. <i>Splines</i>).....	26
4.1.3. Metoda funkcija radijalne osnove (engl. <i>Radial Basis Functions, RBF</i>)	27
4.2. Osnove geostatističkih metoda interpolacije	29
4.2.1. Variogram i semivarijanca.....	30
4.2.2. Općenito o krigingu.....	33
4.2.3. Kokriging	36
4.3. Utjecaj različitih faktora na svojstva prostornih interpolacijskih metoda	37
4.4. Metode usporedbe i procjene kvalitete prostorne interpolacijske metode	38
4.5. Softveri i programski sustavi za interpoliranje	39
4.6. Usporedbe i primjeri korištenja interpolacijskih metoda u kartiranju tala	41
4.6.1. Usporedba prostornih interpolacijskih metoda u kartiranju poljoprivrednog tla.....	41
4.6.2. Predviđanje točnosti prostornih interpolacijskih metoda u određivanju teksture poljoprivrednog zemljišta	46

5. Precizan pristup dopunskoj gnojidbi	48
5.1. Senzori za nadzor i upravljanje usjevima	49
5.2. Primjer optičkog senzorskog sustava za korištenje u poljoprivredne svrhe	52
6. Vegetacijski indeksi.....	55
6.1. Definiranje vegetacijskih indeksa	56
6.2. Vrste vegetacijskih indeksa	59
6.2.1. NDVI vegetacijski indeks	60
6.2.2. NDRE vegetacijski indeks	65
6.2.3. NGRDI vegetacijski indeks.....	67
6.2.4. SAVI vegetacijski indeks.....	69
6.3. Utjecaj određenih čimbenika na kvalitetu izračuna vegetacijskih indeksa	71
7. Primjena vegetacijskih indeksa u sustavima gnojidbe.....	75
7.1. Usporedba NDVI i NDRE vegetacijskih indeksa	76
7.2. Uporaba vegetacijskih indeksa u varijabilnoj dopunskoj gnojidbi	79
7.2.1. Primjer provođenja varijabilne gnojidbe dušikom u usjevu ozime pšenice.....	82
7.3. Održivost primjene upravljanja precizne gnojidbe dušikom.....	86
8. Zaključak.....	88
9. Popis literatutre.....	89
10. Sažetak	96
11. Summary	97
12. Popis slika	98

1. Uvod

Primjena gnojiva u poljoprivrednoj praksi predstavlja ulaganje u proizvodnju sa svrhom povećanja iskorištenja proizvodnog potencijala svake biljke u sjetvenom sklopu. Rastuća potreba za većom količinom hrane nameće potrebu intenziviranja proizvodnje, odnosno postizanje većeg uroda iste kvalitete na jednakoj površini. Ta činjenica ne opravdava korištenje veće količine gnojiva za postizanje visokog priroda, već racionalno, ekonomično i efektivno. Tako današnja, možemo ju nazvati suvremena gnojidba ima glavni zadatak, koji se svodi da aplicirana količina gnojiva iskoristi maksimalno od strane biljke, a da pri tome budu minimalni gubitci, dok se s druge strane pojavljuju sustavi precizne gnojidbe, čiji je cilj pravilne raspodjele hraniva prema potrebama i mogućnosti iskorištenja od strane biljaka. Tako u ovom radu nastojat ću predočiti i analizirati probleme u sustavima precizne gnojidbe tako da se u početnim poglavljima rada govori o značaju gnojidbe u suvremenoj intenzivnoj poljoprivrednoj proizvodnji te utjecaju pojedinih hraniva na razvoj biljke, kao i odgovora biljke na nedostatke pojedinih. Nadalje, prikazana je kategorizacija gnojidbe, gdje je u zasebnim poglavljima obrađen pristup sustavima precizne gnojidbe za osnovnu i dopunsku gnojidbu. U sustavima precizne osnovne gnojidbe obrađen je proces od prikupljanja potrebnih podataka do izrade aplikacijske karte, gdje je detaljnije obrađen način izrade kontinuirane karte pomoću metoda interpolacija. Interpolacijske metode koje se koriste u poljoprivredne svrhe su proanalizirane te je prikazna njihova uporaba u praksi. U krajnjim poglavljima rada proanaliziran je pristup dopunskoj preciznoj gnojdbi uz primjenu vegetacijskih indeksa, gdje je objašnjen koncept vegetacijskih indeksa, njihova podjela i primjena u praksi. Detaljnije su objašnjeni NDVI (engl. *Normalized Difference Vegetation Index*), NDRE (engl. *Normalized Difference Red Edge Index*), NGRDI (engl. *Normalized Red-Green Difference Index*), i SAVI (engl. *Soil Adjusted Vegetation Index*) vegetacijski indeksi iz razloga česte uporabe i korisnosti za poljoprivredu. Na kraju je izveden zaključak, koji ukazuje na važnost primjene ovakvog koncepta i sustava gnojidbe, uz ostvarivanje visokih i kvalitetnih prinosa bez nepotrebnog opterećenja ekosustava.

2. Gnojidba

Suvremena intenzivna poljoprivreda gnojidbu shvaća kao sredstvo inputa u poljoprivrednu proizvodnju, koji će pridonijeti kvalitetnijem razvoju biljke, a na kraju će dovesti do povećanja kvantitete željenog proizvoda, što će rezultirati pozitivnim ekonomskim učinkom. Vrlo važno je da se gnojidba od strane poljoprivrednika shvati kao mjera koja ne utječe samo na njihovu ekonomsku dobit, nego ima značajno važniji utjecaj na pristup gospodarenja. To predstavlja odgovorno korištenje svih vrsta gnojivih materijala koji se u današnjoj poljoprivrednoj praksi koriste. Loše shvaćanje i sama primijenjena praksa imaju osim lošeg ekonomskog utjecaja na gospodarenje, značajniji negativan utjecaj na okoliš, atmosferu te održivost prirodnih resursa.

Prema Vukadinović i Bertić (2013.) gnojidba je agrotehnička mjera koja povećava produktivnost tla i uloženog rada u poljoprivrednoj proizvodnji te budući da u sastav biljaka ulazi niz elemenata koja biljke usvajaju iz tla i atmosfere, gnojidba je zapravo neizostavna agrotehnička mjera od prvorazrednog značenja. Također isti autori navode kako gnojidbu treba smatrati investicijom u biljnu proizvodnju, a nipošto troškom te nalažu razmatranje filozofije ili strategije gnojidbe iz četiri aspekta: gnojidba tla, gnojidba biljaka, gnojidba tla i biljaka te strategija bez gnojidbe.

Vukadinović (2016.) smatra kako suvremeni koncept gnojidbe za optimalan rast usjeva te postizanje visokog, kvalitetnog i profitabilnog prinosa kao izvor hranjivih tvari uspješno mogu koristiti organska, mineralna ili obje vrste gnojiva. Također sustav gnojidbe koji prakticira oba izvora hraniva najčešće se označava kao integrirani *management* hraniva. Integriranu gnojidbu možemo učiniti da bude učinkovita, ali je potrebno dobro razumijevanje ciklusa i transformacije hraniva u tlu svih neophodnih ili esencijalnih elemenata, kako bi se uspješno mogla primijeniti potrebna norma za maksimalnu učinkovitost, također i minimalizirati gubitke te otkloniti ili umanjiti njen štetan utjecaj na okoliš. Vukadinović (2016.) dalje navodi kako negativan utjecaj na okoliš zbog dugotrajne, prekomjerne i nestručne upotrebe, podjednako imaju mineralna i organska gnojiva, dakle moderna gnojidba kao suvremeni način upravljanja (učinkovita, isplativa i ekološki prihvatljiva) ne može se provoditi bez stručnog znanja poljoprivrednog proizvođača uz podatke analiza tla, odnosno gnojidbenih preporuka, a vrhunski prinosi i dobra kvaliteta uroda postižu se samo korištenjem kombiniranog učinka, odnosno optimiziranjem cjelokupne agrotehlike i prakse upravljanja. Gnojidba kao važna agrotehnička mjera ne može nadoknaditi ostale mjere, koje treba također provoditi smišljeno i u skladu s razvojem bilja.

2.1. Hraniva potrebna biljkama

Biljke koje imaju klorofilne stanice mogu jedine stvarati organske tvari iz ugljičnog dioksida, vode i pomoću sunčeve energije u listu procesom fotosinteze. Dobava ugljičnog dioksida i kisika se kod biljaka obavlja iz zraka, a vodu i mineralne tvari biljka crpi iz tla. Neku količinu hraniva biljke mogu upijati i putem lisne mase, takav način gnojidbe je poznat pod nazivom folijarna gnojidba. Prema Gagro (1998.) biljke trebaju oko šezdeset različitih hraniva, iako bi se moglo pretpostaviti da u izgradnji biljke sudjeluje svih osamdeset i osam elementa, koliko ih je u sustavu Zemlje. Biljke kao hraniva mogu koristiti mineralne tvari, dok organske tvari kao biljne ostatke, masti, šećere, bjelančevine ne mogu koristiti za svoju ishranu. Kako bi organsku tvar biljke mogle koristiti potrebno ih je procesom mineralizacije pomoću mikroorganizama razgraditi do mineralnog oblika.

Biljna hraniva se dijele na makroelemente i mikroelemente ishrane. U makroelemente pripadaju hraniva koje biljke koriste u većim količinama, a to su dušik, fosfor, kalij, kalcij, sumpor, magnezij. Naročita potreba za dušikom, fosforom i kalijem iziskuje njihovo nadoknađivanje putem agrotehničke mjere gnojidbe. Mikroelemente biljka koristi u malim količinama, a najčešće se dovoljne količine nalaze u samom tlu, no u slučaju pomanjkanja nadoknađuju se gnojidbom. Svaka biljka pri pomanjkanju hraniva ispoljava različite simptome, koje je potrebno uočiti i dijagnosticirati kako bi se primjenio adekvatan tretman. Neovisno radi li se o mikro ili makro hranivima i koliko pojedinih biljka uzimala, sva su joj hraniva važna. Gagro (1998.) iznosi da prema LIEBIG-ovom zakonu, priroda će ovisiti o onom čimbeniku priroda koji se nalazi u minimumu, zato moramo nastojati biljku ishraniti što potpunije.

Makroelementi:

- a) Dušik (N) – glavni je nosioc prinosa i temelj intenzivne poljoprivredne proizvodnje. Ovaj element sastavni je dio proteina plazme, alkaloida, glikozina, nukleotida, klorofila, vitamina, enzima i drugih spojeva potrebnih za metabolizam u biljci. Stoga dušik izravno utječe na rast i razvoj, formiranje količine i kakvoće priroda. Pomanjkanje dušika uzrokuje smanjen porast biljaka, kratke i tanke izbojke, žućenje lišća, smanjena lisna površina te sušenje biljaka. Prilikom prevelike ishrane biljaka dušikom dolazi do izazivanja prebujnog rasta, dolazi do produženja vegetacije, polijeganje stabljike, smanjena otpornost na bolesti i štetnike te slabija kvaliteta. Također je važno naglasiti da je dušik pokretljiv u biljkama, tako da se simptomi njegova nedostatka očituju prvo na starijem odnosno donjem lišću.

- b) Fosfor (P) – služi za izgradnju organskih spojeva, nukleinskih kiselina, važan za metabolizam bjelančevina, sintezu enzima, diobu stanica, prenošenje nasljednih osobina te za promet energije i drugo. Dovoljna količina fosfora omogućuje normalan rast i razvoj biljaka te razvija otpornost biljaka i utječe na kakvoću dozrijevanja ploda. Prilikom nedostatka fosfornog hraniva biljke slabije rastu, a mlađi listovi poprimaju tamnije zelenu boju te su manji. Cvatnja cvijeta je smanjena dok stariji listovi poprimaju ljubičasto- bakrenu boju. Fosfor je vrlo važan u početnim fazama razvoja jer ako ga tada nema dovoljno, kasnije se ne može nadomjestiti.
- c) Kalij (K) – element koji ne ulazi u sastav organskih spojeva, ali ima važnu ulogu pri transportu ugljikohidrata, reguliranju vode te aktiviranju enzima u biljci. Ima izravan utjecaj na fotosintezu i prijeko je potreban za biosintezu bjelančevina i njihov metabolizam. Jedna od najvećih značajki kalija je što povećava sadržaj šećera i škroba u plodu pa ima izravnu vezu na kakvoću priroda te također povećava otpornost biljke na sušu, niske temperature i bolesti. Simptomi koji se javljaju pri nedostatku ovog hraniva ispoljavaju se na starijem lišću iz razloga lake pokretljivosti kalija u biljci. Lišće na rubovima odumire i dolazi do njihovog savijanja prema dolje te površina lista postaje valovita. Mlađi listovi i dijelovi stabljike se slabije razvijaju, a korijen bude kraći, slabo razgranat sa smanjenim brojem korijenovih dlačica.
- d) Sumpor (S) – važan element koji ulazi u sastav bjelančevina, enzima, aminokiselina te ima ulogu u diobi stanica. Znakovi koji se javljaju pri njegovoj manjkavosti slični su kao kod pomanjkanja dušika, samo što se manjkavost očituje na najmlađim listovima. Dolazi do pojave da lišće mijenja boju u žuto-zelenu gdje uske žute pruge se šire površinom lista, dok se kod nekih biljaka pojavljuje ljubičasta boja. Nedostatak sumpora može se primijetiti i prema smanjenom rastu biljke, zadebljanje listova smanjene površine te slabije razvijenom korijenovom sustavu.
- e) Kalcij (Ca) – ima utjecaj na održavanje strukture i funkciju staničnih membrana te na razvoj, diobu stanica i stabilnost kromosoma. Povoljan učinak kalcija se odražava na razvoj korijena i neutralizaciju organskih kiselina. Pri nedostatku ovog elementa u ishrani biljke dolazi do zaostajanja u razvoju, listovi se počinju uvijati te kompletna biljka poprima žbunasti oblik. Kalcij u kiselim tlima smanjuje kiselost te poboljšava strukturu tla i mikrobiološku aktivnost, a omogućuje korijenovom sustavu povećanje pristupačnosti hraniva. Kalcij se koristi u sklopu meliorativnih zahvata (kalcizacija) u kiselim tlima za poboljšanje tala, ali i u redovnim agrotehničkim postupcima u manjim količinama. Biljke ga također uzimaju, a gubi se isparavanjem.

- f) Magnezij (Mg) – potreban za stvaranje klorofila, ima utjecaj na fiziološke i biokemijske procese u biljci, utječe na aktivaciju enzima te premještanje produkata fotosinteze iz listova u cvjetne organe i plodove. Pomanjkanje magnezija dovodi do razgradnje klorofila, što se ispoljava žućenjem lišća i izražene nervature. Kako se magnezij ispire, tako najčešće dolazi do njegova pomanjkanja u kišovitim godinama te u pjeskovitim i lakšim tlima. (Gagro, 1998.)

Mikroelementi koji su ranije spomenuti u biljkama, nalaze se u malim količinama, ali neovisno o tome oni predstavljaju veliku važnost u rastu i razvoju biljke te ih je potrebno pratiti i pri nedostatku nadomjestiti. Imaju utjecaj na anatomske i morfološke promjene na biljci, a također sudjeluju u fiziološko-biokemijskim procesima. Kao i za makroelemente, na biljkama prilikom nedostatka mikroelementarnih hraniva javljaju se simptomi odnosno razne promjene koje se mogu uočiti.

Iz ranije navedenog možemo uočiti kako je svaki hranivni element bitan za rast i razvoj biljke, a u konačnici ključan za ostvarivanje prinosa visoke kvantitete i kvalitete. Upravo iz tih razloga sve se više pridaje pozornosti pravilnoj ishrani bilja, koja će osim visokih i kvalitetnih prinosa omogućiti i uštede u samoj proizvodnji te smanjiti negativan utjecaj na okoliš. Za donošenje odluke o količini i vrsti potrebnih hraniva neizbježno je obavljati stalni nadzor tla i usjeva, kako bi donesene odluke upravljanja dale željeni rezultat. Suvremena ishrana bilja u intenzivnoj proizvodnji je neizvediva bez kvalitetno obavljene kemijske analize tla i proračuna o iznošenju te unošenju hraniva tijekom radnih ciklusa. Osim toga, razvojem tehnologije, ali i razmišljanja dolazi do odmicanja pristupu gnojidbi na temelju prosječnih faktora za određeno poljoprivredno zemljište. Prestaje se tlo smatrati kao homogen sustav, koji je jednak na svim svojim dijelovima. Dolazi do pristupa tlu kao heterogenom sustavu koji je veoma različit u svojim lokalnim prostornim jedinicama. Cilj takvog pristupa je da se tlo idealizira, kako bi maglo na svakom svom dijelu omogućiti optimalan razvoj biljke. Takav pristup ishrani bilja se često naziva uzgojem bilja prema specifičnosti tla i položaju, što daje vrlo konkretan opis pristupu. Ovakav pristup je proizašao iz precizne poljoprivrede, koja ima za cilj iskoristiti veliku količinu preciznih podataka dobivenih raznim načinima mjerenje i zapažanja, kako bi došli do optimalnog stanja razvoj bilja uz minimalne troškove proizvodnje u skladu sa zaštitom okoliša. Također, mora se shvatiti važnost zaštite biosustava, poljoprivredna proizvodnja i okoliš su ovisni jedan o drugom te pogoduju jedan drugome ako se međusobno dovodu u usklađenu vezu.

2.2. Usporedba konvencionalnog pristupa gnojidbi i pristupa sustavima precizne poljoprivrede

Potrebe za većom proizvodnjom hrane, iz razloga rastuće svjetske populacije dovode do povećanja intenzivnosti i izmjene dosadašnjih tehnologija primjene i korištenja gnojiva. Uzmemo li u razmatranje potrebu za podizanjem prinosa uz zadržavanje iste proizvodne površine, uočavamo potrebu za korištenjem sve veće količine mineralnih i organskih gnojiva. Važno je znati da utjecaj obje vrste gnojiva može imati jednako dobar i loš utjecaj na usjev i okoliš. Prema Vukadinović (2016.) navodi se da prilikom aplikacije organskog gnojiva dolazi do povećanja omjera ugljika (C) i dušika (N) u tlu u odnosu na mineralnu gnojidbu, ali također fizikalna svojstva tla su pogodnija uz primjenu mineralnih gnojiva. Navodi se dalje, kako se ispiranje dušičnog elementa gnojiva dvostruko više događa primjenom organskih gnojiva. Iz tih razloga i još mnogih drugih možemo uočiti kako ekološka odnosno organska gnojidba ako se nestručno provodi ima jednak ili čak veći negativan utjecaj na okoliš.

Intenziviranje proizvodnje na današnjoj razini zahtjeva visoku učinkovitost primijenjenih gnojiva, što često dovodi do zlouporabe velikih količina hranivog materijala. Tako su istraživanja u SAD-u pokazala kako bi prinos kukuruza u prosjeku pao za oko 40 % bez primjene dušičnog gnojiva, dok bi pad bio još viši izostavljanjem tri primarna hranivna elementa. Tako se dalje navodi kako bi 40 % pad na prinosu pšenice bio bez redovite gnojidbe dušikom i fosforom, a čak i do 60 % bez primjene gnojiva (Vukadinović, 2016.). Iz toga vidimo neophodnost korištenja mineralnog i organskog gnojiva u suvremenoj poljoprivrednoj praksi. Primjena organskih gnojiva u intenzivnoj proizvodnji je jednako kvalitetna kao i primjena mineralnih gnojiva, ali se tu nailazi na jednu prepreku koju još uvijek nije moguće u potpunosti riješiti, a to je nemogućnost kontroliranja procesa mineralizacije organske tvari. Za taj proces potrebni su određeni uvjeti za rad i razvoj mikroorganizama, a i vrijeme kao jedna od ključnih komponenti u intenzivnoj proizvodnji. Tako se organska gnojiva smatraju gnojiva s produženim efektom trajanja.

Primjenom gnojiva na proizvodnoj površini dolazi do rastapanja mineralnih hraniva u vodi, gdje oni putem korjenova sustava dospijevaju u biljku. Prilikom tretiranja prevelike količine gnojiva na površinu biljka neće moći preuzeti svu količinu, nego će doći do gubitaka hranivih elemenata procesima ispiranja, erozijom, zakiseljavanjem tla, gubitaka strukture, isparavanjem i drugim. Tako se može zaključiti da unapređenje gnojidbe treba ići u smjeru povećavanja učinkovitosti primijenjenog gnojiva. Na učinkovitost gnojidbe se može utjecati povećanjem izobrazbe poljoprivrednika, korištenjem pravilnih kultivara, adekvatnom plodosmjenom,

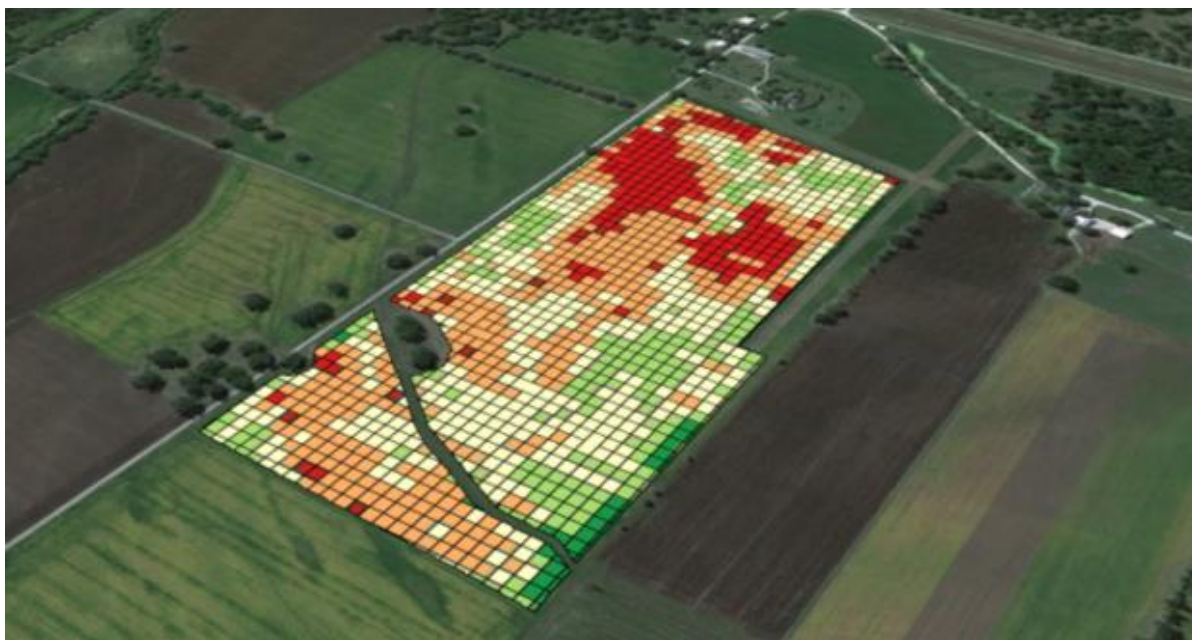
konzervacijskom i reduciranom obradom tla, korištenje pokrovnih usjeve, kontrola plodnosti tla i drugim metodama. Izrazito je važno razumjeti procese koji se događaju, možemo reći u pozadini, ali su oni vrlo bitni za pravilnu gnojidbu, tako na primjer korištenjem novih sustava obrade tla i pokrovnih usjeva doprinosimo smanjenju isparavanja hraniva i vlage iz tla, gubitka tla i hraniva uzrokovanih erozijom vode i vjetra, a ujedno povećavamo učinkovitost gnojidbe.

Nastojanje da se aplicira potrebna količina gnojiva biljkama, a da to ima prihvatljiv utjecaj na ekološko opterećenje okoliša dovela je do pristupa da se apliciraju manje količine gnojiva u više navrata, što se pokazalo vrlo povoljno na porast i razvoj biljaka te visok prinos uz prihvatljiv rizik od gubitaka hranivih elemenata. Kako bi se ta količina izgubljenih hraniva smanjila na najnižu moguću mjeru potrebno bi bilo biljci dati točno potrebnu dozu hraniva u određenom vremenu na određenoj površini. Iz toga razmišljanja i potrebe nastao je novi pristup u poljoprivrednoj praksi ustaljenog naziva u zadnjih deset godina precizna gnojidba.

Preciznu poljoprivredu možemo definirati kao pristup upravljanja poljoprivrednim gospodarstvom na načelima provjerenih, prikupljenih, stvarnih i vidljivih podataka, koji omogućuju donošenje pravilnih i pravovremenih odluka upravljanja, a sve zahvaljujući korištenju suvremene tehnologije za monitoring, prikupljanje, analiziranje, prikazavanje i upravljanje. Jurišić i Plaščak (2009.) navode kako je početak precizne poljoprivrede nastao uvođenjem globalne navigacijske satelitske usluge (engl. *Global Navigation Satellite System, GNSS*) i geografskog informacijskog sustava (engl. *Geographic Information System, GIS*) tehnologija u poljoprivredu te da je osnovna premisa precizne poljoprivrede da se što veći broj informacija, a isto tako i preciznih, bude na raspolaganju poljoprivredniku prilikom donošenja odluka upravljanja gospodarstvom. Ovakvim pristupom omogućuje se poboljšanja s ekonomskog i ekološkog aspekta, tako se: štedi na radnim sredstvima, radnom vremenu i strojevima, poboljšava se kvaliteta i kvantiteta dobivenih proizvoda pa tako i dobit, smanjuje se opterećenje na eko sustav i potiču su prirodno prostorni uvjeti te se omogućuje poboljšana dokumentacija procesa produkcije.

Cilj uvođenja precizne gnojidbe u poljoprivredu je racionalizacija uporabe gnojiva te smanjenje troškova i povećanje učinkovitosti gnojidbe. Ako pogledamo kao primjer iz prakse bilo koju proizvodnu poljoprivrednu površinu, ona će na oko izgledati homogena. Takav pristup samoj površini rezultira prosječnost na cijeloj površini, no uzmemo li uzorke tla i obavimo nad njima kemijsku analizu doći ćemo do spoznaje da se svaki dio polja razlikuje jedan od drugog, odnosno kažemo da ima svojstvo heterogenosti. Tako svaki dio polja, možemo ga nazvati površinskom jedinicom ima svoj kemijski sastav i svoje potrebe pa tako i biljke koje se na

njemu nalaze imaju različite uvjete za rast i razvoj. Ranije navedeno u radu kako je potrebno biljci omogućiti dostatnu količinu hraniva u određeno vrijeme sada ima još veće značenje ako primjenjujemo varijabilan sustav, gdje prema potrebama površinskih jedinica (lokalno) obavljamo gnojidbu. Za razliku od konvencionalne gnojidbe, gdje se aplikacija gnojiva obavljala po unaprijed predloženim planovima za pojedine kulture ili uzorkovanjem tla, gdje se izrađuje jedna prosječna vrijednost za sve uzete uzorke tla, precizna poljoprivreda pristupa s povećanom učinkovitošću, ekonomičnošću i ekološkom osvještenošću. Prema navodima Zimmer i sur. (2016.) u današnjim uvjetima globalizacije geoinformacijski sustav predstavlja sastavni dio suvremenog znanstvenog i gospodarskog razvoja, dalje navode kako je bez GIS-a nemoguće implementirati visokosofisticiranu agrotehniku za preciznu poljoprivredu te pomoću korištenja suvremenih sustava dobiva se uvid u informacije pomoću kojih se može obaviti precizna i kvalitetna gnojidba. Tlo se ne tretira kao homogena površina s prosječnim vrijednostima, nego se koriste trenutne informacije o značajkama zemljišta, navode isti autori. Prostorni informacijski sustav služi za prikupljanje prostornih podataka s opisnim podacima. Upotrebom GNSS-a i GIS-a omogućuje se precizno prikupljanje velikog broja podataka s varijabilnosti u vremenu i prostoru. Tako za pravilno upravljanje gnojidbom bitno je imati točan uvid u stanje hraniva u promatranom tlu te stalno praćenje, a prvenstveno kemijskih promjena, što je vrlo bitno da bi se postigla pravilna ocjena ishranjenosti i gnojidba (Bažon, 2009.).



Slika 1. Prikaz kemijske varijabilnosti prostornih jedinica poljoprivrednog zemljišta

Izvor: <https://www.farmmanagement.pro/mapping-as-a-path-to-success-in-precision-agriculture/>

3. Sustavi precizne poljoprivrede

Poznato je da se gnojidba u poljoprivredi obavlja u više navrata, odnosno u vremenu kada su određeni elementi hraniva potrebni biljci za rast i razvoj, a u cilju učinkovitijeg iskorištenja gnojiva i kvalitetnijeg razvoja biljaka. Pa tako gnojidbu možemo podijeliti na osnovnu, startnu i dopunsku gnojidbu. Osnovna gnojidba predstavlja aplikaciju mineralnog i/ili organskog gnojiva u vremenu prije obrade tla ili za njeno vrijeme, odnosno prije sjetve samih usjeva, kako bi biljka u tlu imala dovoljnu količinu lako pristupačnih hraniva kada razvije korijenov sustav. Osnovnu gnojidbu još nazivaju i gnojidba u brazdu, što znači da se gnojivo deponira u tlo pomoću oruđa za obradu tla. Startna gnojidba se provodi neposredno prije sjetve ili za vrijeme sjetve i služi biljci za početni rast i razvoj u plićem i pristupačnijem dijelu tla. Treća vrsta gnojidbe naziva se dopunska gnojidba ili se još naziva prihranom. Dopunskih gnojidbi može biti više tijekom vegetacijskog razdoblja, ovisno o kulturi i prethodnim gnojidbenim normama (Gagro, 1998.).

3.1. Osnovni pristupi u sustavima precizne gnojidbe

Sustavi precizne gnojidbe da bi mogli funkcionirati zahtijevaju slijed u odnosu na postupke. Što znači da je potrebno slijediti osnovne korake, koji će sustav dovesti u funkcionalno stanje odnosno stanje upravljanja prema unaprijed utvrđenom slijedu. Tako se započinje prvo sa prikupljanjem različitih sirovih informacija putem raznih tehnologija, zatim se ti podatci računalno obrađuju prema saznanjima o uzgoju bilja, te se kao takvi izvoze u oblicima pogodnim za procese upravljanja.

Postoje tri osnovna pristupa upravljanja u preciznoj poljoprivredi pa tako i u preciznoj gnojidbi koji se međusobno razlikuju po vremenskom razdoblju između prikupljanja informacija pa do procesa upravljanja putem istih, a to su:

1. Pristup izradi karata

-Ovakav pristup se koristi u osnovnoj gnojidbi i pri nadomještanju mikro hranivnih elemenata.

-Za izradu karte trenutačne raspodjele hraniva na određenoj poljoprivrednoj površini te u konačnici izradu aplikacijske karte potrebno je obaviti prvo prikupljanje prostornih informacija, zatim računalnom obradom u GIS programima i interpolacijskim metodama stvoriti mrežu rastera .

-Svaki element rasterske mreže ima pridruženu vrijednost u odnosu na dobivene rezultate te je georeferenciran.

-Daljnjom računalnom obradom se dobiva aplikacijska karta s potrebnim vrijednostima za određene površinske jedinice (rastere).

-Prebacuje se u format pogodan za upravljačko računalo u pogonskom stroju te se obavlja gnojidba putem izrađene karte u skladu s potreba dijelova polja i biljaka na njemu.

-Ovakav pristup koriste više setova različitih podataka, kao naprimjer: sadržaj hranivnih elemenata u tlu, pH vrijednost tla, podatci o prethodnom prinosu, klimatskim uvjetima i drugo.

2. Senzorski pristup upravljanja

-Ovakav pristup se primjenjuje pri dopunskoj gnojidbi, gdje je velika prostorna i vremenska dinamika.

-Posebno pogodno za korištenje kod visoko varijabilnih podataka o biljkama i tlu, kao naprimjer kod prihrane usjeva dušičnim hranivom

-Različite vrste senzora prikupljaju informacije koje se koriste za izravan postupak upravljanja.

-Kod ovoga pristupa koristi se manji broj prikupljenih informacija za razliku od pristupa kartama te georeferenciranje nije obavezno.

-Moguće direktno dokumentiranje obavljenog posla.

3. Kombinirani pristup putem karata i senzora

-Ovaj pristup objedinjuje prethodna dva pristupa.

-Dolazi do preklapanja informacija iz vremenski različitih razdoblja.

-Postupak upravljanja se temelji na trenutno uvaženom i ranije ispitanom modelu podataka.

-Obrada više setova podataka uz uvažavanje proteklog vremena između izrade karte i senzorom očitanih podataka (Jurišić i Plaščak, 2009.).

3.2. Precizan pristup osnovnoj gnojdbi

Osnovna gnojdba u intenzivnoj poljoprivrednoj proizvodnji predstavlja temeljni input kao preduvjet za ostvarivanje željenog priroda i njegove kvalitete. Stoga osnovnoj gnojdbi treba pristupiti razumno i smišljeno te samo na takav način omogućiti pravilno upravljanje poljoprivrednim zemljištem. Prema Vukadinović i Vukadinović (2014.) uzgoj usjeva uvijek je bio i ubuduće će biti rizičan, podjednako zbog vremenskih i tržišnih uvjeta pa si poljoprivredni proizvođači ne mogu priuštiti ne učinkovitu i pogrešnu primjenu gnojiva s obzirom na dozu, vrstu, način, vrijeme ili vrstu gnojiva. Za donošenje ispravne odluke, proizvođač mora obaviti kemijsku analizu tla i/ili biljaka, koja predstavlja zanemariv trošak u biljnoj proizvodnji, koji iznosi oko 2 % od ukupnog ulaganja. Istoimeni autori daju odgovor na pitanje: „Zašto se koriste gnojiva?“. uporaba gnojiva je neophodna radi postizanja visokih prinosa te isplativosti rada i ulaganja u biljnu proizvodnju, moderna gnojdba temelji se na kemijskom konceptu ishrane bilja i značajno utječe na povećanje poljoprivredne produkcije i bolju kvalitetu hrane, dodatak i nadoknada prirodnih zaliha hraniva, kompenzacija gubitka i odnošenja hraniva iz tla, poboljšanje nepovoljnih svojstava tla.

Zadovoljenje uvjeta suvremene osnovne gnojdbi s obzirom na učinkovitost i troškove postaje zasebno usmjereno učenje, gdje se pojavljuje suvremena tehnika i tehnologija za izvršavanje ove agrotehničke operacije. Pristup precizne poljoprivrede prema osnovnoj gnojdbi temelji se na sakupljanju što veće količine relevantnih podataka o pojedinačnim prostornim jedinicama te prostorni prikaz takvih obrađenih podataka u skladu s uzgojem bilja na poljoprivrednim kartama raspoloživih hraniva u tlu te u konačnici izrade varijabilne karte gnojdbi prema potrebama određenih prostornih jedinica, koja se koristi za proces upravljanja. Kako je rečeno, prvi korak za takav pristup predstavlja obavljanje uzorkovanja tla i kemijska analiza uzetih uzoraka uz poznavanje njihovih točnih georeferentnih podataka.

3.2.1. Skeniranje elektrovodljivosti tla

Za točnije određivanje mjesta uzimanja uzoraka tla za kemijsku analizu na proizvodnoj parceli obavlja se skeniranje tla na elektrovodljivost. Dobiveni podatci o elektrovodljivosti ispitane proizvodne parcele računalno se obrađuju, kako bi se dobile geokodirane karte elektrovodljivosti. Elektrovodljivost je svojstvo ispitivanog materijala, u našem slučaju tla da provodi električnu struju te se iskazuje u mjernoj jedinici milisimens po metru (mS/m). Izmjerene vrijednosti u tlu su povezane s kemijskim i fizikalnim svojstvima tla, tako da svaka čestica u tlu ima različitu elektrovodljivost. Jedan od primjera su čestice gline u tlu koje imaju visoku električnu vodljivost u odnosu na nisku vodljivost čestica pijeska. Stupanj elektrovodljivosti tla nam otkriva teksturu, veličinu čestica u tlu, također putem nje možemo prepoznati tla sklona isušivanju i tla koja prekomjerno zadržavaju vodu te sadržaj organske tvari i stupanj saliniteta ispitanog tla.

Za mjerenje elektrovodljivosti koriste se senzorski uređaji, koji prema načinu rada senzora mogu biti kontaktni ili beskontaktni. Na našem području najčešće se mogu sresti uređaji s kontaktnim sensorima, koji rade na principu dodira s tlom. Sastavljeni su od dva i više parova elektroda u obliku crtala, koje ostvaruju ulazak u tlo. Kontaktnim sensorima mjeri se najčešće elektrovodljivost do 30 cm dubine (plitko) i do 90 cm dubine (duboko). Princip mjerenja se ostvaruje tako da jedan par elektroda provodi električnu struju, a preostali mjere pad napona između njih te se na osnovi toga izračunava elektrovodljivosti. Kako bi se dobili kvalitetni i točni podatci o elektrovodljivosti tla, naročito se mora paziti na trenutnu vlažnost ispitivanog tla, koja bi trebala iznositi minimalno 10 % iznad točke venuća (Stracenski, 2015.). Prilikom pojave veće vlažnosti tla i očitavanje elektrovodljivosti će biti veće, dok relativne vrijednosti između različitih čestica ostaju konzistentne. Traktor koji je agregatiran sa skenerom za elektrovodljivost mora biti opremljen računalom i pripadajućim softverom, kako bi mogao primiti podatke u realnom vremenu tijekom rada skenera. Prebacivanjem izmjerenih podataka na stolno računalo i daljnjom obradom sirovih podataka, obavlja se interpolacija podataka. Pomoću interpolacije možemo odrediti vrijednosti za ne mjerene mjesta. Karta elektrovodljivosti programski se prikazuje kao poligon bez prekida, podijeljen u razrede te prikazan različitim bojama (Stracenski, 2015).



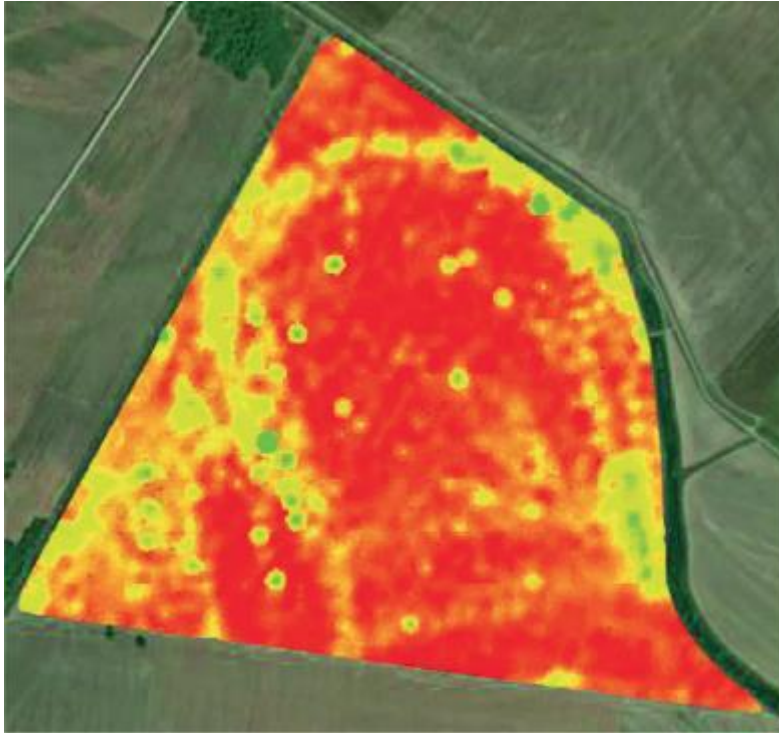
Slika 2. Vučeni uređaj za mjerenje elektrovodljivosti tla

Izvor: <http://veristech.com/the-sensors/v3100>

Prema Lončar (2019.) georeferencirane karte elektrovodljivosti tla pokazuju teksturu i salinitet tla te služe za bolje određivanje mjesta uzorkovanja tla te se ovakvo kartiranje obavlja samo jednom za promatranu parcelu, osim u slučajevima značajnijeg pomicanja tla prilikom nekih od sistematizacijskih zahvata.

Barač i sur. (2016.) navode kako se pomoću električne vodljivosti mogu prostorno okarakterizirati promjene fizikalno-kemijskih svojstava tla te da terenska mjerenja elektrovodljivosti služe za kartiranje prostornih varijacija nekoliko edafskih čimbenika: sadržaj gline, slanost tla, sadržaj vode u tlu, količine organske tvari i detekcija poplavom deponiranih slojeva pijeska.

Izradom karte elektrovodljivosti za određenu proizvodnu površinu dobivamo uvid u međusobnu povezanost pojedinih prostornih jedinica te na taj način možemo organizirati uzimanje uzoraka za kemijsku analizu tla na osnovi poznavanja povezanosti pojedinih parametara tla dobivenih mjerenjem električne vodljivosti. Corwin i Lesch (2005.) navode kako je mjerenje elektrovodljivosti tla postalo jedno od najpouzdanijih mjerenja i najčešće korištenih za karakterizaciju varijabilnosti polja za primjenu u preciznoj poljoprivredi zbog svoje jednostavnosti i pouzdanosti. Također, isti autori dalje navode kako se pomoću elektrovodljivosti omogućuje razgraničavanje georeferenciranih područja unutar proizvodne površine koja pokazuje slično ponašanje s obzirom na urod usjeva, koji se naziva jedinicama upravljanja specifičnim za određenu lokaciju te se navodi kako se koriste geostatističke tehnike interpolacije za procjenu prostorne raspodjele svojstava tla iz izmjerenih podataka, koje će biti detaljno opisane dalje u radu.



Slika 3. Prikaz karte elektrovodljivosti

Izvor: Barač i sur. (2016.)

Slika 3 prikazuje kartu elektrovodljivosti tla na kojoj se može razlikovati teksturu i salinitet tla na pojedinim lokalnim prostornim jedinicama te omogućuje bolje određivanje mjesta uzorkovanja. Karta se prikazuje kao poligon bez prekida s razredima prikazanim u različitim bojama. Svrstavanje vrijednosti elektrovodljivosti u razrede po načelu jednakih vrijednosti određuje se proizvoljno, u ovom slučaju pomoću tri boje (tri razreda). Uzorak teksture tla vidljiv je već s tri razreda, gdje zelena boja predstavlja prvi razred (EC od 500 do 38), žuta boja predstavlja drugi razred (EC od 37 do 16) i crvena boja treći razred (EC do 15 do -100) (Barač i sur.,2016.).

3.2.2. Uzorkovanje tla

Uzorkovanje tla poljoprivrednih proizvodnih jedinica predstavlja važno oruđe za prikupljanje informacija o trenutnom stanju hranivih tvari u tlu te u skladu s tim omogućuje ispravan postupak upravljanja hranivim materijalom. Ovisno o pravnim regulacijama, u pojedinim državama se nalaže obavljanje uzorkovanja tla minimalno svake pete godine na svakom prostoru od deset hektara prema Huuskonen i Oksanen (2018.). Za preciznu poljoprivredu ovakvi minimalni zahtjevi prema uzorkovanju nisu dovoljni. Potrebno je prikupljati često informacije o stanju hranivih tvari u tlu, na način da se smanji broj uzoraka na površini, a da se iz malog broja uzoraka dobije precizan uvid u stanje tla. U tu svrhu se koriste metode kao ispitivanje tla na elektrovodljivost te se razvijaju nove metode kojima je cilj da se odredi prostorna povezanost interno konzistentnih prostornih jedinica na promatranj proizvodnoj površini. Na takav način se omogućuje jednostavniji i brži pristup preciznim informacijama sa smanjenim brojem nepotrebnih podataka koji usporavaju samo uzorkovanja, ali i kasnije računalnu obradu. Razvijeni računalni programi za prostornu statističku interpolaciju sva mjesta koja nisu izravno uzorkovana izračunavaju na osnovi uzorkovanih.

Uzorkovanje tla ima svrhu dobivanja reprezentativnih uzoraka koji će kemijskom laboratorijskom analizom utvrditi stanje hraniva (mikroelemenata i makroelemenata) te nekih drugih svojstava tla, kao što su pH vrijednost tla, sadržaj organske tvari, sadržaj humusa i drugo. Prema Walworh (2006.) uzimanje uzoraka se odvija u četiri koraka, prvo se uzimaju reprezentativni uzorci tla, zatim se obavlja laboratorijska analiza uzoraka, interpretacija analitičkih rezultata te upravljanje tim podacima u potrebite svrhe.

Grubeša (2014.) navodi kako prostorni raspored uzorkovanja ovisi o veličini i obliku čestice, ali i o cilju uzorkovanja te navodi sljedeće moguće tipove prostornog rasporeda uzorkovanja:

- a. Slučajno ili randomizirano uzorkovanje
- b. Nesustavno statističko uzorkovanje
- c. Sustavno statističko uzorkovanje
- d. Kontrolno kružno uzorkovanje

Mjesta koja su određena za uzorkovanje ne smiju biti u uvalama, na mjestima istovara gnojivnog materijala, sijena ili opožarenim mjestima. Treba se izbjegavati uzimanje uzoraka u blizini puteva, zgrada i gospodarskih dvorišta, naročito treba pripaziti na vlažnost tla, koja bi trebala biti takva da se tlo može obrađivati odnosno kada se ono ne lijepi za oruđa, ne rasipa se

i ne praši. Grubeša (2014.) iznosi kako je najbolje obavljati uzorkovanje na ratarskim površinama poslije žetve prije pripreme tla za sljedeći usjev, u trajnim nasadima poslije berbe, a na pašnjacima i livadama poslije otkosa ili prije kretanja vegetacije u proljeće. Prostorni raspored uzoraka iznosi informacije o varijabilnosti tla, a vremenski rasporedom uzorkovanja dolazimo do podataka o dinamici raspoloživih hraniva i svojstava promatranog tla. Prilikom uzorkovanja također nam je bitan odabir dubine uzimanja uzoraka, što ovisi o vrsti biljke koju uzgajamo odnosno o njenom korijenu. Tako se uzorkovanje kod ratarskih kultura obavlja na dubinama od 0 do 30 cm, trajni nasadi se uzorkuju na dvije dubine: 0 – 30 i 30 – 60 cm, a također treba uzeti u obzir dubinu uzorkovanja pri određivanju količine dušika iz razloga mogućnosti velike varijabilnosti s obzirom na dubinu i tip tla. Tako se koriste tri dubine uzorkovanja za određivanje dušičnog stanja tla: 0 – 30 cm, 30 – 60 cm i 60 – 90 cm.



Slika 4. Vozilo opremljeno uređajem za uzimanje uzoraka

Izvor: <https://www.wintexagrousa.com/automatic-soil-samplers/wintex-1000>

Na slici 4. prikazano je vozilo koje omogućuje jednostavnije prikupljanje uzoraka na velikim površinama. Osim kvalitetno uzetog uzorka vrlo je bitno za daljnju obradu i interpretaciju podataka za svaki uzeti uzorak obaviti gerefenciranje pomoću GNSS prijemnika. Povezivanjem GNSS podataka i podataka dobivenih analizom tla dobivamo uvid u stupanj raspoloživih hraniva u tlu i njihov prostorni raspored, što nam omogućuje temelj za provedbu precizne osnovne gnojidbe. Korištenjem GIS programa izrađujemo karte raspodjele hraniva na promatranim proizvodnim površinama, koje koristimo u daljnjoj obradi za izradu aplikacijskih karata, koje nam omogućuju procese upravljanja.

Kvalitetno obavljenu analizu tla čine ove tri komponente:

- Reprezentativan uzorak
- Primjena odgovarajuće metode laboratorijske analize koja će najtočnije utvrditi sadržaj raspoloživog hraniva
- Eksperimentalni rad na utvrđivanju korelacije između rezultata analize tla i stvarnih potreba za količinom nekog hraniva.

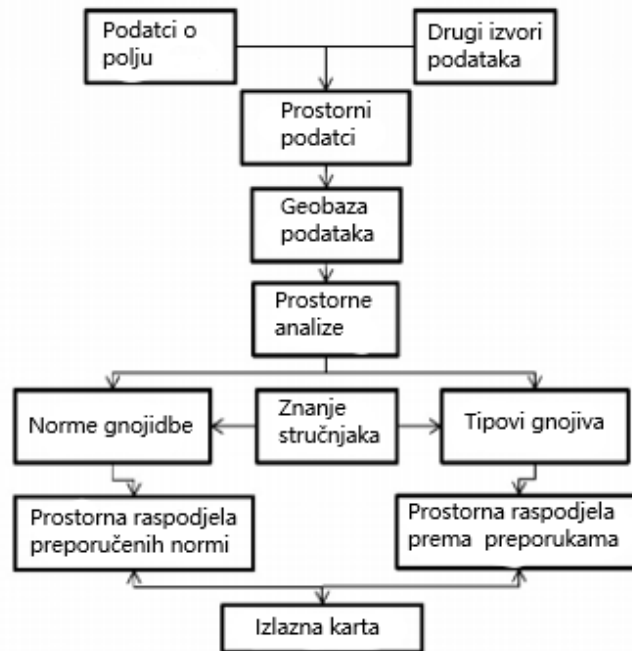
3.2.3. Izrada karata gnojidbe

Nakon kvalitetno obavljenog uzorkovanja tla i laboratorijske analize dobivamo određeni set podataka koji će se dalje koristiti u interpretaciji, obradi i izradi karata gnojidbe. Lončar (2019.) navodi kako dobro izvješće agrokemijskog laboratorija o obavljenoj analizi tla mora sadržavati sljedeće podatke:

- Podatke o proizvodnoj površini koja je uzorkovana, kao što su: ime, lokacija, veličina, datum, pretkultura, prethodno korištena mineralna i organska gnojiva
- Rezultati fizikalno-kemijskih analiza tla: pH vrijednost, sadržaj fosfora, kalija, kalcija organske tvari, adsorpcijski kompleks, sadržaj mikro hranivih elemenata, mehanički sastav, salinitete i drugo
- Procjenu opskrbljenosti tla (manjak, višak ili drugi limitirajući čimbenici)
- Preporuke gnojidbe – potrebna količina pojedinih hranivih elemenata i doze gnojiva u odnosu na pojedine usjeve i njihove planirane visine prinosa utemeljene na agroekološkim uvjetima proizvodnje i ekonomskim promišljanjima.
- Preporuke o kondicionerima tla (kalcizacija, humizacija)
- Dodatke i opaske na analizu

Korištenjem GIS računalnih programa dobiveni podatci kemijskom analizom tla, GNSS prijemnikom i ostali relevantni podatci o promatranoj proizvodnoj površini se povezuju u jednu modularnu cjelinu, gdje se dobiva prostorni raspored trenutnog stanja raspoloživih hraniva promatrane površine. Takav prikaz omogućuje uočavanje varijabilnosti pojedinih prostornih jedinica te izradu aplikacijske ili možemo reći upravljačke karte u skladu s načelima uzgoja pojedinih kultura. Svi podatci koji se koriste u računalnoj obradi se povezuju s mjestom na terenu i čine razne baze podataka. Naravno, za izradu takvih tematskih karata mora se koristiti

veća lepeza različitih računalnih alata i programa, ali se sve više zahtjeva izobrazba i shvaćanje korisnika.



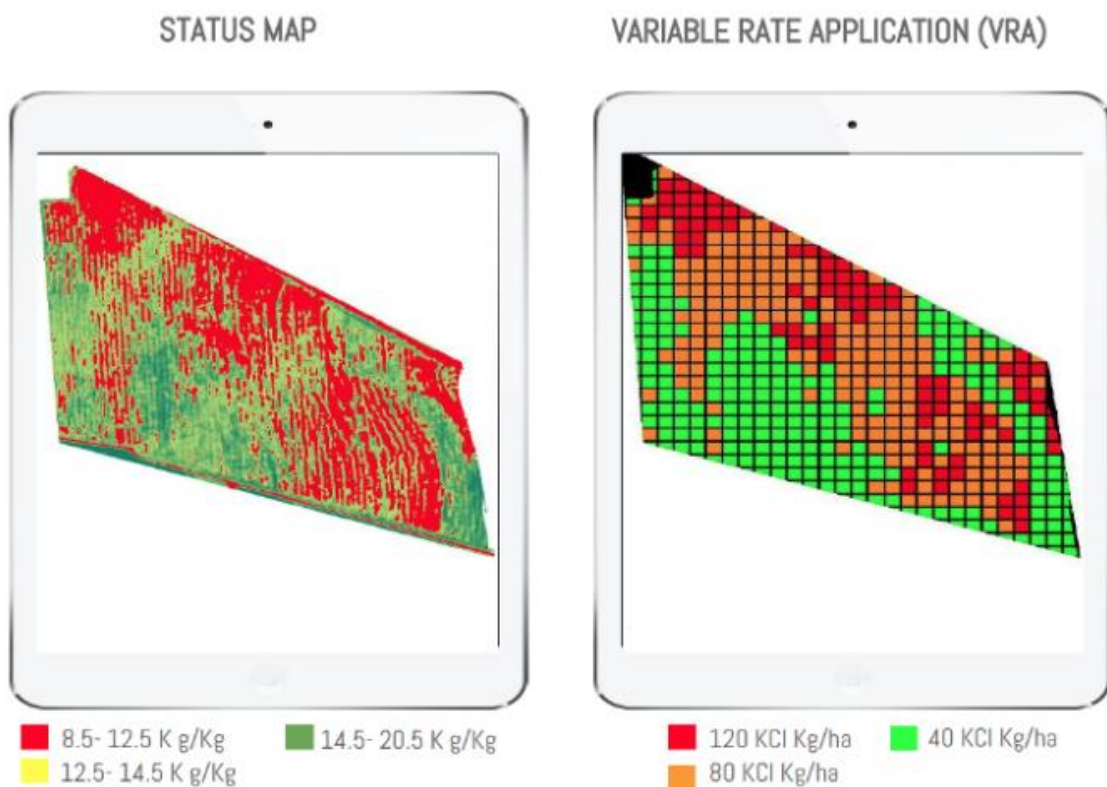
Slika 5. Prikaz koncepta izrade aplikacijske karte

Izvor: prema Papadopulus i sur. (2015.)

Papadopulus i sur. (2015.) navode kako je ključna komponenta u uzgoju bilja prema specifičnosti tla i položaju korištenje geografskih informacijskih sustava (GIS) te da je upravljanje poljoprivrednom proizvodnjom u interakciji s ekološkim i prirodnim resursima koji imaju očigledni prostorni karakter, ključan. Nadalje, GIS postaje ključan faktor u poljoprivredi, pogotovo u gnojidbi, gdje se on koristi za obradu modela inputa i njihovu vizualizaciju, gdje se rješavaju posebni i sofisticiraniji problemi kao što je upravljanje gnojidbom, prostorno modeliranje i povezivanje GIS-a s različitim metodologijama odlučivanja.

Nakon ranije navedene računalne izrade karte trenutne raspodjele hraniva promatrane proizvodne površine slijedi izrada aplikacijske karte. Aplikacijske karte se koriste u procesu upravljanja putem računala pogonskog stroja, a zapravo možemo reći da su te karte završni proizvod cijelog procesa, koji se direktno koristi. Kako bi se aplikacijska karta izradila, osim ranije sakupljenih, obrađenih i pohranjenih podataka, mora se znanjem stručnjaka u suglasnosti s uzgajanom kulturom i okolišem odrediti potreba određene količine hranivog materijala. Nadalje, tako će se dobiti varijabilna prostorna predodžba potrebnih količina hraniva na

pojedini prostornim jedinicama s težnjom da se omoguće jednaki uvjeti za rast i razvoj svake biljke na promatranoj površini. Tako se prilikom izrade aplikacijske karte, ali i izrade karte trenutne raspodjele hraniva koriste posebne matematičko-statističke metode interpolacije, koje omogućuju da se iz uzetog broja stvarnih mjerenja izračunaju ostale vrijednosti s određenom pogreškom te kao takve prikažu u ovom slučaju na tematskoj karti. Osim grafičkog prikaza stanja hraniva, da li na aplikacijskoj ili trenutnoj karti hraniva koristi se numerički podatci koji prikazuju sadržaje hraniva klasificirane po pojedinim bojama te minimalne, maksimalne i prosječne količine hraniva u tlu ili minimalne, maksimalne i prosječne količine gnojiva po hektaru, kao i ukupnu količinu gnojiva potrebnu za promatranu proizvodnu površinu, što se može vidjeti na slici 6.



Slika 6. Prikaz karte trenutnog stanja hraniva (lijevo) i aplikacijske karte (desno)

Izvor: <https://medium.com/remote-sensing-in-agriculture/variable-rate-application-in-precision-agriculture-70a8b2be871d>

4. Prostorna interpolacija

Prostorni kontinuirani podatci imaju značajnu ulogu u različitim oblastima kao što su: procjena rizika, planiranje, donošenje odluka upravljanja okolišem i drugo. Iako je tehnologija danas napredovala i dalje se većina prikupljenih podataka nalazi u vektorskom formatu, dakle točkasti uzorci predstavljeni koordinatama X i Y. Također, kako bi se došlo do kontinuiranih površina koje su neophodne za razne vrste proučavanja prostora koji nas okružuje potrebno je procijeniti vrijednosti na neuzorkovanim područjima koristeći pri tome različite interpolacijske metode.

Šiljeg i sur. (2013.) navode kako je interpolacija jedna od ključnih sastavnica obrade i analize podataka u GIS okruženju te je predmet proučavanja statistike i geostatistike, a također interpolaciju definiraju kao proces determinističke ili geostatističke procjene vrijednosti neuzorkovanih područja, na temelju skupa izmjerenih vrijednosti na poznatim koordinatama, a sve u svrhu dobivanja kontinuirane površine s nizom vrijednosti.

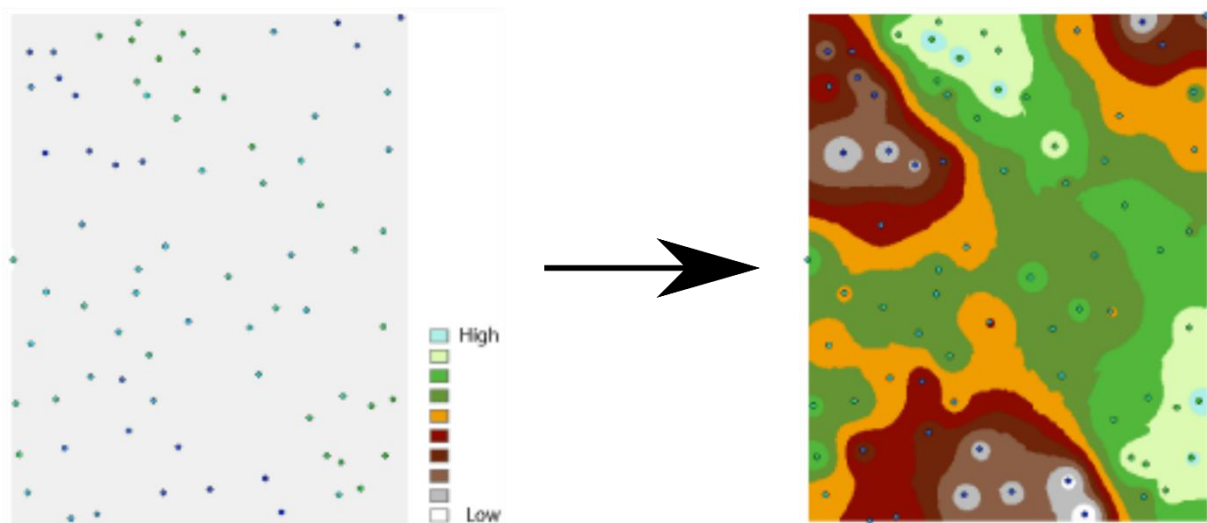
Li i Heap (2008.) navode da geografski informacijski sustav (GIS) i tehnike modeliranja postaju moćni alati za upravljanje prirodnim resursima i biološko očuvanje, prostorno kontinuirani podatci o varijablama okoliša sve su više potrebni. Također, Elumalai i sur. (2017.) proveli su istraživanje o zagađenosti podzemne vode na području južne Afrike, gdje su koristili dvije metode prostorne interpolacije pomoću računalnog programa ArcMap za ne uzorkovana mjesta. Radilo se o metodama OK (engl. *Ordinary Kriging*) i IDW (engl. *Inverse distance weighted*), o čemu će biti riječi u daljnjim poglavljima.

Pojam interpolacija je nastao od latinske riječi *inter* što znači između i grčke riječi *polos* što znači os. Drugim riječima, interpolacija je definirana kao postupak određivanja nove nepoznate vrijednosti između dvije ili više poznatih vrijednosti neke funkcije, gdje funkcija u tom slučaju može biti poznata, ali u presloženoj formi za računanje ili može biti nepoznata, ali su poznate neke informacije o njoj, kao na primjer vrijednosti funkcije na nekom skupu točaka navode Medved i sur. (2010.). Spomenuti drugi slučaj se češće pojavljuje u praksi pri rješavanju raznih inženjerskih i znanstvenih zadataka, u slučaju kada je mjerenjima dobiven samo određeni broj vrijednosti funkcije, odnosno diskretni skup točaka te je potrebno odrediti i približne vrijednosti te funkcije u drugim točkama (Medved i sur., 2010.).

Prostornu interpolaciju moguće je obaviti u jednoj, dvije ili tri dimenzije te na temelju poznatih vrijednosti promatrane primarne varijable ili uz pomoć jedne ili više sekundarnih varijabli na istom prostoru s time da mora biti zadovoljen uvjet da su sekundarne varijable u jakoj korelaciji

s primarnom varijablom. Dalje navode Medved i sur. (2010.) kako za razliku od klasičnog statističkog pristupa, geostatistika uzima u obzir prostornu zavisnost varijabli te tako geostatističke metode interpolacije polaze od pretpostavke da je poznavanjem vrijednosti nekog svojstva u poznatim točkama, moguće ustanoviti njegovu vrijednost i u nepoznatim točkama.

Xiao i sur. (2016.) u svom istraživanju koriste geostatističke metode interpolacije za analizu razine podzemne vode, gdje dolaze do zaključka kako svaka metoda ima svoje prednosti u odnosu na svrhu korištenja te dalje navode da je geostatistička interpolacija ili lokalna prostorna interpolacija poznata kao nepristrana optimalna metoda za procjenu regionaliziranih varijabli.



Slika 7. Prikaz funkcije prostorne interpolacije

Izvor: <https://geobgu.xyz/r/spatial-interpolation-of-point-data.html>

4.1. Metode prostorne interpolacije

Do danas je razvijen veliki broj metoda za prostornu interpolaciju, koje se koriste u različitim disciplinama. U ovom radu će biti obrađene metode koje se najčešće koriste pri izradi poljoprivrednih karata i drugih analiza okoliša. Kako postoji velik broj disciplina u kojima se metode koriste, tako postoje i različiti izrazi za njihovo razlikovanje, tako se koriste termini kao što su: metode interpolacije i ne interpolacije ili interpolatori ili ne interpolatori. Zbog velikog broja metoda, možemo ih podijeliti u tri osnovne kategorije: determinističke metode, geostatističke metode i kombinirane metode. Šiljeg i sur. (2013.) navode kako se interpolacijske metode mogu još klasificirati kao: lokalne i globalne, determinističke i stohastičke (geostatističke) te točne i približne. Nadalje, u geostatistici se metode koje su sposobne koristiti sekundarne informacije nazivaju multivarijatne metode, a dok se metode koje ne koriste sekundarne informacije nazivaju univarijatne metode.

Osim interpolacije, često se može čuti i za pojam ekstrapolacije koji je s njom povezan, a radi se o pojmu koji predstavlja predviđanje vrijednosti varijable na mjestima izvan područja obuhvaćenih mjerenjem. Takvi rezultati smatraju se nesigurnim i svrstavaju se u područje pretpostavljenog.

Negeostatističke		Geostatističke		Kombinirane metode	
		Univarijante	Multivarijantne		
Najbliži susjed	Jednostavni kriging		Univerzalni kriging	Klasifikacija kombiniranih interpolacijskih metoda	
Interpolacije pvezane s trokutastom nepravilnom mrežom	Obični kriging		SK s različitim lokalnim potrebama	Analiza trenda površine kombinirana s krigingom	
Prirodni susjed	Blok kriging		Kriging s vanjskim utjecajem	Mješani linearni model	
Metoda inverzne udaljenosti	Faktorski kriging		Jednostavni kokriging	Metoda regresijskog stabla kombinirana s krigingom	
Regresijski model	Dvostruki kriging		Obični kokriging	Vjerojatnost rezidualnog maksimuma-empirijski najbolji linearni prediktor	
Analiza površine trenda	Indikatorski kriging		Standardizirani OCK	Regresijski kriging	
Zavoji i površine lokalnog trenda	Disjunktivni kriging		Kriging s glavnim komponentama	Gradijent i metoda inverzne udaljenosti na kvadrat	
Metoda tanke pločaste zavojnice	Kriging prema modelu		Kriging unutar slojeva		
Klasifikacija	Simulacija		Kolocirani kokriging		
Regresijsko stablo			Multivarijantni faktorski kriging		
Fourierova serija			Indikatorski kokriging		
Vredovanje krugova			Kriging s vjerojatnošću		

Slika 8. Prikaz klasifikacije metoda prostorne interpolacije

Izvor: prema Li i Heap (2008.)

Sve metode prostorne interpolacije se mogu predstaviti pomoću ponderiranih prosjeka uzorkovanih podataka, gdje ponderiranje predstavlja postupak kojim se određuje odgovarajuća vrijednost pojedinih veličina prilikom izračunavanja srednje vrijednosti (<https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=49396>). Većina interpolacijskih metoda se temelji na prvom zakonu geografije koji kaže: sve je povezano sa svime, međutim točke koje su bliže jedna drugoj su povezanije (Šiljeg i sur., 2013.) Nadalje, većina metoda prostorne interpolacije dijele istu opću formulu, koja izgleda ovako:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z_{x_i}$$

Gdje oznaka $Z(x_0)$ predstavlja procijenjenu vrijednost u točki x_0 , N predstavlja ukupan broj promatranih točaka, Z_{x_i} je izmjerena vrijednost u točki „ i “, a oznaka λ_i je ponder.

Radi velikog broja razvijenih metoda prostorne interpolacije u daljnjem tekstu bit će detaljno objašnjene najznačajnije metode za poljoprivrednu praksu s pridodanim primjerima njihovih usporedbi u određenim analizama.

4.1.1. Metoda inverzne udaljenosti (engl. *Inverse Distance Weighting, IDW*)

Metoda inverzne udaljenosti pripada skupini ne geostatističkih metoda. Procjenjuje vrijednost atributa na neuzorkovanim točkama, koristeći pri tome linearnu kombinaciju vrijednosti na uzorkovanim točkama ponderiranih inverznom funkcijom udaljenosti od točke interesa do uzorkovane točke. Pri tome se uzima pretpostavka da što su uzorkovane točke bliže neuzorkovanim točkama to su i one njima sličnije po vrijednostima, a vrijedi i obratno, tako da se ponder može izraziti kao:

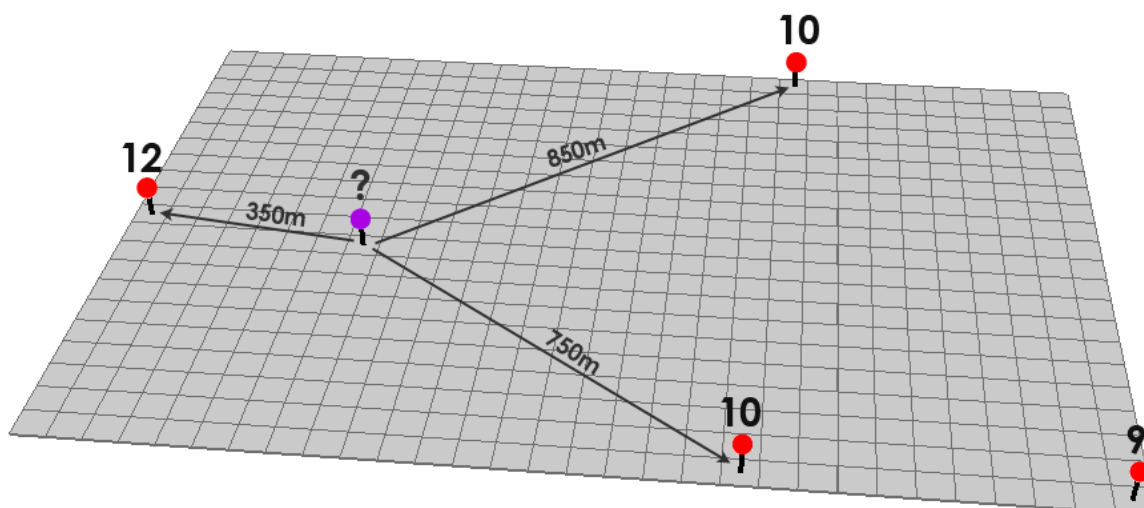
$$\lambda_i = \frac{1/d_i^p}{\sum_{i=1}^n 1/d_i^p}$$

Gdje je d_i udaljenost između x_0 i x_i , a „ p “ predstavlja parametar snage kao težinski parametar, dok je „ n “ broj uzorkovanih točaka uzetih za procjenu. Glavni parametar, koji utječe na točnost

ove metode je parametar snage „p“. Ponder se nalazi u takvom odnosu da se on smanjuje kako se udaljenost povećava, a naročito kada se vrijednost parametra snage povećá. Tada uzorci u blizini imaju veći ponder, a tako i veći utjecaj na procjenu, gdje se dobiva lokalna rezultirajuća prostorna interpolacija. Parametar snage i veličina susjedstva (engl. *neighbourhood size*) se bira proizvoljno, gdje se kao najčešći izbor odabire parametar snage „p“ kao 2, a rezultirajuća metode se najčešće tada naziva inverzna udaljenost u kvadratu (engl. *Inverse Distance Squared, IDS*). Osim ovog načina odabira parametra „p“ moguće ga je odabrati na temelju mjerenja pogreške. Glatkoća procjenjivane površine se povećava kako se povećava parametar snage „p“ te je utvrđeno da se dobivaju manje zadovoljavajući rezultati kada je „p“ vrijednost 1 ili 2 za razliku kada je odabrana vrijednost od 4. Kada se parametar „p“ 0, tada se IDW referira kao pomoćni prosjek, za razliku kada je „p“ jednak vrijednosti 1 tada se naziva linearna interpolacija ili u trećem slučaju kada parametar „p“ nije jednak 1, onda kažemo da se radi o ponderiranom pomičnom prosjeku.

Medved i sur. (2010.) navode kako je metoda inverzne udaljenosti slična kriging metodi koja dodjeljuje odgovarajuće težinske koeficijente kontrolnim točkama ovisno o njihovoj udaljenosti od točaka pravilne prostorne mreže, ali se razlikuju proračun koeficijenata i njihova dodjela. EkspONENT udaljenosti odnosno parametar snage „p“ predstavlja težinski parametar koji se kontrolira ovisnosti težine o udaljenosti, zapravo možemo reći da on određuje koliko će brzo težina opadati ovisno o udaljenosti od čvorova prostorne mreže. Sam naziv metode govori da one vrijednosti koje su bliže točkama u kojima se procjenjuje vrijednost imat će veći utjecaj na proces interpolacije. Nadalje, što je parametar „p“ bliže nuli dobivamo prikaz sličniji horizontalnoj plohi koja prolazi sredinom svih zadanih podataka, a ako povećamo spomenuti parametar, topografija je izraženija i značajnija (Medved i sur., 2010.).

Ova metoda radi jednostavnosti algoritma omogućuje korištenje svih podataka za manje skupove podataka prilikom interpolacije, a poželjno je da podatci budu razmješteni u kontrolnim točkama, što omogućuje bolje rezultate. Ova metode ne omogućuje procjenu podataka izvan područja poznatih podataka, tako zvanu ekstrapolaciju.



Slika 9. Prikaz principa metode inverzne udaljenosti

Izvor: <https://gisgeography.com/inverse-distance-weighting-idw-interpolation/>

4.1.2. Metoda zavojnica (engl. *Splines*)

Metoda zavojnica pripada ne geostatističkim metodama prostorne interpolacije, koja se temelji na zavojima koji se sastoje od polinoma, gdje svaki polinom stupnja „p“ postaje lokalni. Polinomi služe za opisivanje dijelova crte ili plohe, odnosno točno su postavljeni na mali broj podatkovnih točaka te su spojeni tako da čine površinu zaglađenom. Tamo gdje se dijelovi spajaju nastaje mjesto koje se naziva čvor. Odabir samih čvorova je proizvoljan i polučuje izravan i snažan utjecaj na kompletnu procjenu. Pri odabiru parametra „p“ zavoje postaje linearan, kvadratan ili kubičan, ovisno da li je vrijednost „p“ 1, 2 ili 3, a najčešće se koriste kubični zavoji odnosno stupnja 3.

Linearna interpolacijska metoda zavoja koristi se za popunjavanje podatkovnih praznina u tablicama i sl. te je mnogo jednostavnija od kubične metode. Kao rezultat interpolacijske metode dobije se skupina ravnih linija koje povezuju podatkovne točke. Također, ako se radi o dvije prostorne dimenzije, to se smatra bilinearnom metodom, a u slučaju treće dimenzije trilinearnom. Ova metode se često koristi u kemijskom inženjerstvu, gdje rezultirajući zavoje nikad ne pretjeruje rezultat. Kada je potreban ugađen interpolat koristi se zavoje višeg reda. Nadalje, ova metode je našla široku primjenu u računalnoj grafici, gdje je temeljna operacija linearne

interpolacije između dvije vrijednosti, a poznata pod nazivom *lerp*. Tako se *lerp* operacije nalaze na današnjim hardverima svih suvremenih računalnih grafičkih procesora (engl. *Graphic Processor Unit*, GPU) te se koriste za konstrukciju blokova složenih operacija (Kaya, 2014.)

Interpolacijska metoda kvadratnih zavoja, za razliku od linearne, omogućuje dobivanje boljih kontinuiranih funkcija, gdje je kvadratni zavoj kontinuirano diferencijabilan u dijelovima kvadratne funkcije, gdje kvadrat uključuje sve linearne kombinacije baznih monoma.

Metoda interpolacije kubičnog zavoja ima vrlo važnu ulogu tamo gdje je potrebna uglađena interpolacija, kao što je modeliranje, animacije i skaliranje slike. Tako se u računalnoj grafici kubno interpoliranje zavojima često koristi za definiranje kretanja predmeta i kamera koje prolaze u korisnički zadanom položajem u ključnom okviru animacijskog sustava. Također, prilikom obrade slike, metoda se pokazala korisna za implementiranje visoko kvalitetnih funkcija povećanja slike (Kaya, 2014.).

Robinson i Metternicht (2005.) navode da se spomenuta metoda sastoji od polinoma koji opisuju dijelove crte ili površine te su uklopljeni zajedno i povezani uglađeno. Dalje navode kako zavoji daju dobre rezultate na površinama koje imaju slabije izražene promjene, tako da nisu prikladne za korištenje u slučajevima kada su velike promjene u površinskim vrijednostima, a naročito na kratkim razmacima u horizontalnoj ravnini.

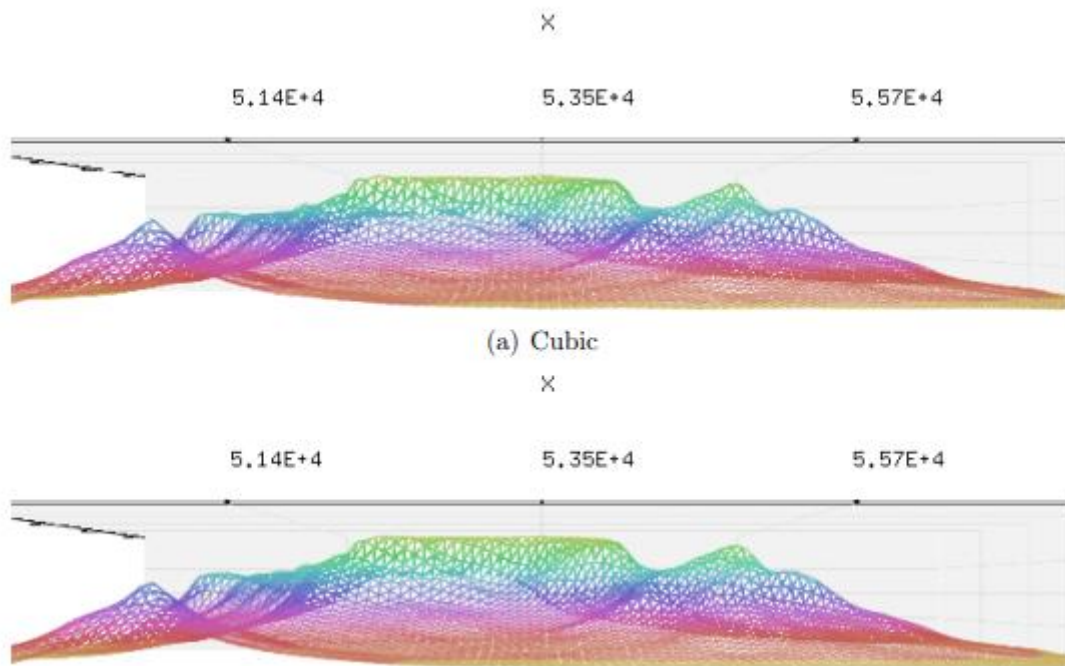
4.1.3. Metoda funkcija radijalne osnove (engl. *Radial Basis Functions*, RBF)

Ova metoda se koristi u mnogim područjima, kao što su inženjerstvo, računalne znanosti, matematika, razne poslovne studije i biološke znanosti, gdje omogućava razne mogućnosti. Tako se koristi pri rekonstrukciji površina, modeliranju terena, formiranju digitalnih slika. Prednost ove metode, kako se vidi iz svestranosti primjene leži u korištenju podataka koji se najčešće višedimenzionalni što čini velike skupove podataka u kalkulaciji. Također, kao prednost ove metode interpolacije navodi se ne potrebnost organiziranja podataka po nekakvom redu. Spomenuta metoda je nastala 1970-ih godina, kada je korištena u kartografiji te kasnije u raznim primjenama, kao što je pri mjerenju zemljine temperature na raštrkanim mjernim mjestima.

Toit (2008.) navodi kako se metoda funkcija radijalne osnove koristi u mnogim praktičnim primjenama, tamo gdje trebamo približne funkcije mnogih varijabli, a imamo raštrkane

odnosno ne poredane podatke. Nadalje, navode isti autori kako je metoda prikladna za multidimenzioniranje raštrkanih podataka na način da se izračunava funkcija udaljenosti između svake točke i njezinih susjeda te nema postavljenih ograničenja za podatkovne točke osim što moraju sve biti različite. Postoje razne metode funkcije s radijalnom osnovom, koje se koriste u raznim slučajevima, kao što su funkcija bazirana na Gaussu, multikvadratna, inverzna multikvadratna te inverzna kvadratna funkcija i druge.

Korištenje ove metode u obradi GIS podataka može se vidjeti iz primjera gdje je pomoću softverskog paketa *Global Mapper* korišteno 3388 raštrkanih točkastih podataka sa svojim koordinatnim vrijednostima za dobivanje modela planinskog terena u južnoj Africi . Nadalje, putem izračuna interpolanata za sve istražene radijalne bazne funkcije dobiveni su rezultati koji se podudaraju s uzetim orijentirima, a dobiveni model je prikaza na slici 10 (Toit, 2008.).



Slika 10. Prikaz planinskog modela reljefa

Izvor: Toit, 2008.

Prema Zandi i sur. (2011.) RBF metoda je točna interpolacijska metoda, gdje određeni interpolatori predviđaju vrijednosti identične onima mjenim u istim točkama te generirana površina zahtjeva prolaz kroz svaku izmjerenu točku. Također, predviđene vrijednosti mogu biti jako iznad maksimalne ili ispod minimalne izmjerene vrijednosti. Postoje razne osnovne funkcije ove metode koje čine malu razliku između osnovnih funkcija, a dobivene površine imaju male razlike. Procijenjene vrijednosti metoda temelje se na matematičkoj funkciji koja

minimizira ukupnu zakrivljenost površine, a pri tome stvarajući prilično glatku površinu, gdje se ta uglađenost regulira parametrom zaglađivanja (Zandi i sur., 2011.).

Karydas i sur. (2009.) navode kako je funkcija radijalne osnove obitelj od pet determinističkih egzaktnih tehnika interpolacije: tankoslojni zavoj (engl. *thin-plate spline*), zavoj s naponom (engl. *spline with tension*), potpuno reguliran zavoj (engl. *completely regularised spline*), multi-kvadratna funkcija (engl. *multi-quadratic function*) i inverzna multi-kvadratna funkcija (engl. *inverse multi-quadratic function*). Točan interpolator se smatra onaj koji predviđa vrijednosti identične onima mjerenim u istim točkama.

4.2. Osnove geostatističkih metoda interpolacije

Geostatistika je grana primijenjene statistike koja primjenjuje teorije determinističke procjene. Može se reći da je to metodologija u analizi prostorno koreliranih podataka, čije je glavno obilježje uporaba varijograma kao i tehnika za kvantificiranje i modeliranje prostornih podataka. Najčešće se koristi u geologiji i rudarstvu za prostorne prikaze rudnih tijela i ležišta mineralnih sirovina, također se koristi u botanici i ekologiji te astronomiji i agronomiji. Geostatistika se smatra dijelom geomatike, a gdje je geomatika znanost o prikupljanju, obrađivanju i razmjenjivanju geografskih ili prostornih referenciranih informacija, gdje uključuje različite tehnike, kao što je krigiranje koje omogućuje vizualizaciju prostornog korelacijskog modela. Nalaže se da je u geostatistici najbitnije sljedeće: 1) poznavati metodologiju i njene mogućnosti, 2) pravila korištenja metodologije, 3) raspolaganje s ulaznim skupom podataka (numeričkim) čija će analiza dovesti do zaključka.

Prema Mikulčić (2016.) nepoštivanje metodologije i njezinih pravila korištenja dovodi do pogrešnih rezultata, ali u slučaju korištenja točne metodologije također može doći do pogrešnih rezultata, gdje tada postaje riječ o prirodi ulaznih podataka. Ulazni podatci mogu biti točni ili sadržavati grešku nastalu pri mjerenju u očekivanim granicama, a promatraju se zasebno, gdje pogrešno promatrani ulazni podatci u sebi mogu sadržavati ključnu informaciju. Također, može se dogoditi da ulazni podatci budu točni za jednu metodu, dok su za drugu pogrešni. Nadalje, ulazni podatci puno više utječu na samu točnost krajnjih rezultata, nego ostali čimbenici određene metodologije gdje pripada i sam istraživač.

Skup uzorkovanih podataka treba sadržavati pouzdane reprezentativne podatke, što predstavlja da svojim karakteristikama bude nalik osnovnom skupu. Kako bi se postigla reprezentativnost uzetih uzoraka potrebno je odabrati ispravan izbor elemenata osnovnog skupa, odnosno svaki element skupa mora biti u mogućnosti postati uzorak. Odabir jedinica osnovnog skupa može se razlikovati kao: namjerni uzorak ili slučajni uzorak. Kod namjernog uzorka radi se o elementima koje je odabrao istraživač prema svojoj odluci te je tako teško odabrati reprezentativan uzorak iz razloga što je potrebno dobro poznavanje osnovnog skupa podataka kako bi bili u mogućnosti odabrati elemente pomoću kojih će se doći do pouzdanih rezultata. Za razliku od toga, slučajan uzorak predstavlja uzorak u kojem svaki element osnovnog skupa ima jednaku vrijednost biti odabran kao uzorak (Miklučić, 2016.).

Prema Li i Heap (2008.) geostatistika je proizašla ranih 1910-tih u agronomiji i 1930-tih u meteorologiji, gdje je Mathreon 1963. godine iznio teoriju o regionalizaciji varijabli, gdje se navodi kako mineralizirani fenomen može biti okarakteriziran putem prostorne raspodjele određenog broja prostornih interpolacijskih metoda, gdje se mjerljive veličine nazivaju regionalizirane varijable. Također, Li i Heap (2008.) navode kako geostatistika uključuje nekoliko metoda koje koriste kriging algoritme za procjenu kontinuiranih atributa, a kriging se smatra zajedničkim nazivom za skup generaliziranih algoritama najmanjih kvadrata korištenih za prepoznavanje.

4.2.1. Variogram i semivarijanca

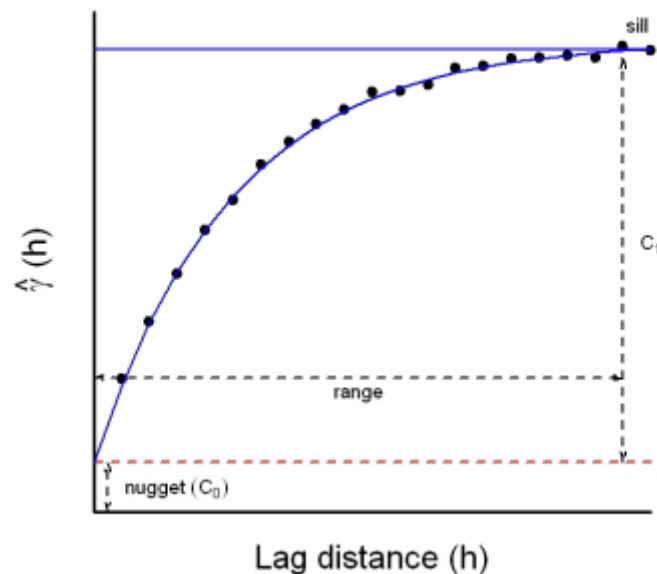
Variogram analize služe za ispitivanje prostorne povezanosti između mjesta uzimanja uzoraka, odnosno s njima možemo ispitati do koje se udaljenosti mjesta uzorkovanja povezana. Pojam semivariogram predstavlja srednje širenje razlika kod vrijednosti jednog obilježja koje se nalaze u određenom prostornom razmaku. Udaljenost između mjernih mjesta označava se slovom „h“, a vrijednost semivariograma u odnosu na razmak „h“ naziva se semivarijanca. Nadalje, znači ako vrijednost u određenom razmaku „h“ odstupaju značajno jedna od druge, odnosno ako iz odnosa prostora rezultirajuća povezanost mala, tada je semivarijanca velika. U slučaju da je vrijednost u razmaku „h“ slične, tada je povezanost velika, a semivarijanca mala. Tako za semivariogram možemo reći da je mjera za prostornu povezanost vrijednosti obilježja (Jurišić i Plaščak, 2009.).

Semivarijanca (γ) od Z između dvije podatkovne točke (točke uzorkovanja) predstavlja jedan važan koncept u geostatistici, koji se definira sljedećim izrazom:

$$\gamma(x_i, x_0) = \gamma(h) = \frac{1}{2} \text{var} [Z(x_i) - Z(x_0)]$$

h – predstavlja udaljenost između točaka x_i i x_0

$\gamma(h)$ - predstavlja semivariogram (obično referiran kao variogram)



Slika 11. Prikaz primjera semivariograma eksponencialnim modelom

Izvor: Li i Heap (2008.)

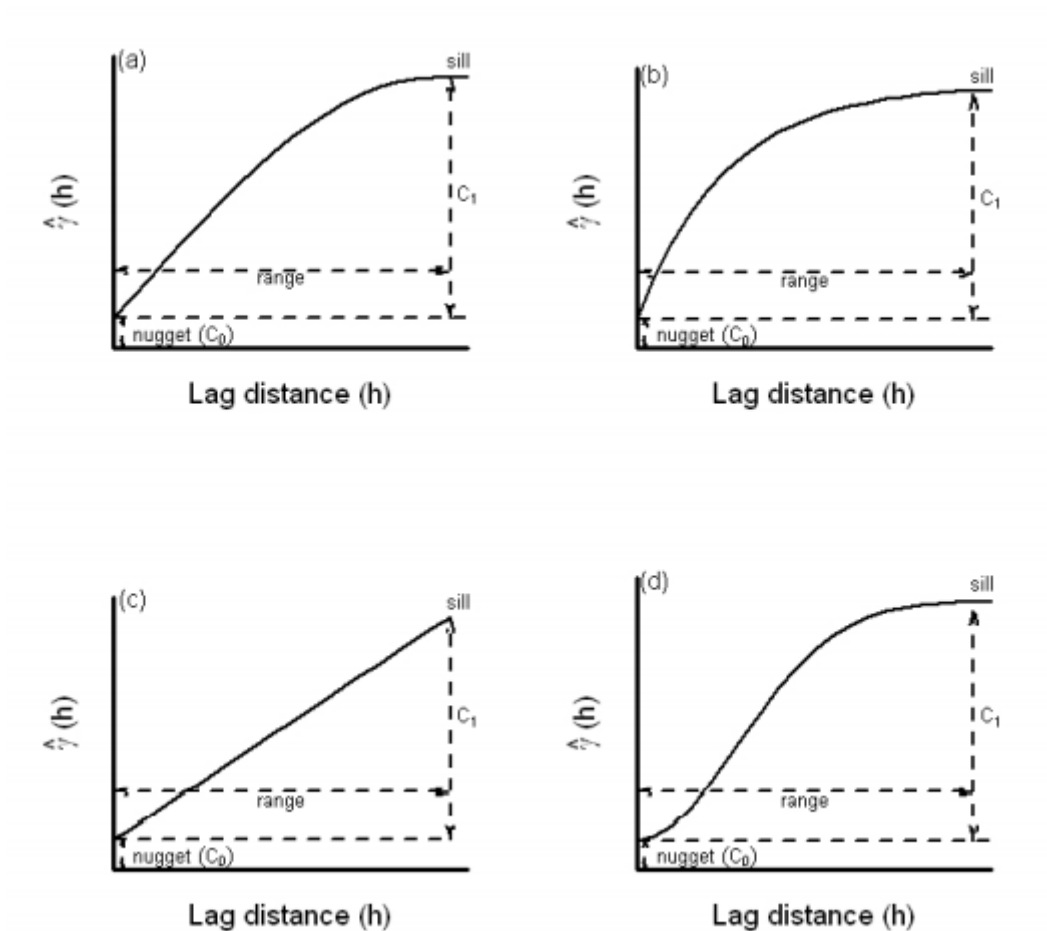
Na slici 11 možemo vidjeti eksperimentalni variogram prikazan u obliku grafikona s nekoliko važnih značajki. Prva značajka je „*nugget*“ (grumen) označen oznakom „ C_0 “, pozitivna vrijednost $\gamma(h)$ na „ h “ u blizini 0, što rezultira odraz varijance na pogrešku uzorkovanja i prostornoj varijanci na kraćoj udaljenosti nego minimalni uzorkovni razmak. Doseg odnosno „*range*“ predstavlja vrijednost udaljenosti do praga dosega „*sill*“ ($C_0 + C_1$). Uzorci uzeti na udaljenostima većim od dosega (*engl. range*) su prostorno neovisni jer prostorna semivarijanca razlike obrnuto proporcionalna s udaljenošću. Nadalje, ako je omjer između praga (*engl. sill*) i grumena (*engl. nugget*) blizu vrijednosti 1, tada je većina varijabilnosti ne prostorna. Također, doseg (*engl. range*) pruža informacije o veličini prozora za pretrživanje (*engl. search window*), koji se koristi u interpolacijskim metoda. Modeliranje i variogram izuzetno su bitni za strukturnu analizu i prostornu interpolaciju. Tako se modeli variograma mogu sastojati od

jednostavnih modela, koji uključuju modela: grumen, eksponencijalni model, sferni model, Gausov, linearni i *Power* model ili sumu više jednostavnih modela (Li i Heap (2008)).

Tako iz slike 11. semivarijanca može biti procijenjena sljedećim izrazom:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (z(x_i) - z(x_i + h))^2$$

Gdje je: „n“ broj parova uzorkovanih točaka razdvojenih na udaljenosti „h“.



Slika 12. Prikaz četiri najčešće korištena modela za izračunavanje variograma: a) sferni, b) eksponencijalni, c) linearni i d) Gausov model

Izvor: Li i Heap, 2008.

4.2.2. Općenito o krigingu

Prilikom procjene nekog od svojstava u geostatistici potrebno je obaviti inicijalizaciju cijele mreže panela i blokova, a zatim se određenim postupcima obavlja njihovo pretvaranje u prostor. Takve procjene omogućuju dodjeljivanje vrijednosti panelima i blokovima, dobivenih iz skupova obavljenih istraživanja. Tako Mikulčić (2016.) navodi da geostatistička procjena npr. volumena jednog bloka, kao elementa prostora, zahtijeva podatke kao što su: točan položaj elementa volumena (lokalni i globalni koordinatni sustav), skup poznatih vrijednosti nastao kao posljedica istraživanja, variogram s definiranom anizotropijom (nejednakosti) te program za obavljanje procjene, a nadalje se kriging i sve njegove izvedenice, kokriging i stohastičke simulacije ubrajaju u metode takve procjene.

Kriging pripada skupini geostatističkih metoda prostorne interpolacije, koja je našla primjenu u različitim granama znanstvenih istraživanja i primjene, a sve zahvaljujući pouzdanoj procjeni prostorno distribuiranih varijabli. Procjena ovim metodama temelji se na korištenju poznatih vrijednosti neke varijable tzv. kontrolnih točaka, čiji je utjecaj na samu procjenu izražen odgovarajućim težinskim koeficijentima. Upravo najzahtjevniji postupak kod kriginga je određivanje tih koeficijenata za svaku kontrolnu točku zasebno. Tako Medved i sur. (2010.) navode da je prilikom procjene metodama potrebno zadovoljiti sljedeće kriterije: da ona bude nepristrana te načinjena tako da varijanca razlike između stvarnih i procijenjenih vrijednosti u odabranim točkama bude najmanja moguća.

Metoda kriginga je matematički napredna interpolacijska metoda, kojom se procjenjuju vrijednosti određene varijable u točkama mreže, a kao cilj metode navodi se određivanje prostorne veze između stvarnih, odnosno mjerenih podataka i točke za koje se računa procijenjena vrijednost. Mikulčić (2016.) navodi da je prilikom procjene metodom kriginga nužno koristiti variogramsku analizu, gdje se zaključuje da se ne uzima u obzir samo udaljenost točaka od mjesta procjene, nego i lokalna varijanca, odnosno varijanca kriginga, što predstavlja da je razlika između očekivanih i procijenjenih vrijednosti minimalna. Nadalje, kada se obavlja procjena ovom metodom interpolacije svakom se podatku dodaje težinski koeficijent (λ), gdje njegova vrijednost ukazuje koliko su promatrane točke međusobno zavisne, odnosno što je njegova vrijednost veća točka je prostorno bliža točki procjene i jače utječe na nju. Dalje slijedi, zbroj svih težinskih koeficijenata (λ) jednak je jedinici, osim kod korištenja tehnike jednostavnog kriginga. Metoda kriginga tako obuhvaća višebrojne tehnike, koje se razlikuju po obliku matricnih jednadžbi, prema području i vrsti podataka na koje se primjenjuju, a neke od

njih su: jednostavni kriging, obični kriging, indikatorski kriging, univerzalni kriging, disjunktivni kriging.

Shvaćanje principa rada kriging metode najjednostavnije je prikazati sljedećim nizom jednažbi: neka je za primjer slovo „Z“ dno dubine jezera, kontinuirano prostorno distribuirano i izmjereno na mjestima x_1, x_2, \dots, x_n s vrijednostima $Z_{(x_1)}, Z_{(x_2)}, \dots, Z_{(x_n)}$. Svojstvo „Z“ naziva se regionaliziranom varijablom jer je njezina vrijednost distribuirana u prostoru. Vrijednosti x_1, x_2, \dots, x_n predstavljaju točke u kojima su očitane vrijednosti svojstava pa možemo zapisati $x_i = (x, y)$ za $i = 1, \dots, n$ (Medved i sur., 2010.). Tako se vrijednosti varijable procijenjena krigingom na temelju „n“ kontrolnih točaka računa prema formuli:

$$Z_k = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times Z_i$$

Gdje su:

λ_i – težinski koeficijent za svaku lokaciju

$Z_i = Z_{(x_i)}$ – poznate vrijednosti varijable u okolnom području tzv. kontrolne točke

Z_k – vrijednosti varijable dobivene procjenom

Predviđenu i stvarnu pogrešku moguće je izračunata nakon procjene u točkama odabrane pravilne mreže na način da se te vrijednosti usporede s mjerenim vrijednostima na kontrolnim točkama, koje se upotrebljavaju kao ulazni podatci procjene. Tako se odredi pouzdanost procjene i kvaliteta odabranog prostornog modela. Najznačajnije svojstvo kriging metode interpolacije je zadržavanje mjerenih veličina fiksnima, što predstavlja da se izravno uključuje originalni skup podataka koji se u daljnjem procesu interpolacije neće mijenjati. Nadalje, zadržava se trend mjerenih podataka prateći njihove sličnosti u određenim smjerovima.

Prema Medved i sur. (2010.) odnosi između postojećih i procijenjenih vrijednosti izražavaju se vrijednostima kovarijance ili variograma, gdje promjena varijance mjerenja vrijednosti može se predočiti grafički kao prikaz standardnih pogrešaka procjene te je tako određen utjecaj poznate vrijednosti na procijenjenu vrijednost s obzirom na njihovu udaljenost.

Prilikom procjene vrijednosti metodom kriginga svakome podatku uključenom u postupak dodjeljuje se određeni težinski koeficijent (λ) kojim procjenjuje njegov utjecaj na ukupan račun.

Također, odnosi između postojećih vrijednosti i točke u kojoj se ona procjenjuje izražava u vrijednostima kovarijance ili variograma te se na taj način određuju zavisnosti i utjecaji pojedine lokacije obzirom na njezinu udaljenost od točke čija se vrijednost procjenjuje.

Prema Malvić (2005.) osnovna pravila kojima su definirane jednadžbe kriginga su sljedeća:

- „Veličina i oblik područja (broj točaka mreže odnosno engl. *grida*) za koje se radi procjena vrijednosti određeni su izrazom $C(Z_k, Z_k)$, odnosno kovarijancom između vrijednosti izračunate krigingom sa samom sobom.
- Udaljenost između točke koja se procjenjuje („k“) te kontrolne točke „i“ određena je kovarijancom $C(Z_k, Z_i)$
- Raspored i međusobna udaljenost dviju kontrolnih točaka „i“ i „j“ predstavljena je vrijednošću kovarijance $C(Z_i, Z_j)$
- Kvaliteta procjene težinskih koeficijenata ovisi o načinjenom modelu variograma. Također, variogramski model s većim brojem kontrolnih točaka, većim dosegom, manjim odstupanjem i bez anizotropije imat će puno veću pouzdanost kod procjene težinskih koeficijenata „

4.2.2.1. Jednostavni kriging (engl. *Simple Kriging, SK*)

Jednostavni kriging se smatra jednom od tehnika kriginga koja podrazumijeva da su lokalne srednje vrijednosti relativno konstantne i jednake srednjoj vrijednosti cijele populacije, koja se smatra poznatom. U svakoj lokalnoj procjeni upotrebljena je populacijska srednja vrijednost, s uzorcima koji pripadaju takvoj lokalnoj procjeni. Ova tehnika se smatra osnovom za ostale vrste kriginga, ali ne zadovoljava uvjete nepristrane procjene. Tako sve ostale tehnike kriginga sadrže dodatni faktor ograničenja unutar jednadžbi, čime se zapravo zadovoljava u potpunosti uvjet jednadžbi kriginga pod nazivom najbolji linearni nepristrani procjenitelj (engl. *Best Linear Unbiased Estimator, BLUE*).

Procjena jednostavnog kriginga (SK) je bazirana na sljedećoj jednadžbi:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) + [1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i] \mu$$

Gdje je „ μ “ poznat kao stacionarna srednja vrijednost te se predstavlja kao parametar koji je konstantan na cijelu domenu, a izračunava se kao prosjek podataka. Jednostavni kriging se koristi za procjenu ostatka iz referentne vrijednosti „ μ “ dane odobravanjem i stoga se metoda ponekad naziva kriging s poznatim sredstvom. Broj korištenih uzoraka za procjenu je obrađen opsegom utjecaja semivariograma, budući da je jednostavni kriging nema uvjet nepristranosti, $[1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i]$ nije uvijek 0, što je veća vrijednost $[1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i]$, to će procjena biti bliže srednjoj vrijednosti, odnosno vrijednost $[1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i]$ raste u relativno siromašno uzorkovanim prostorima (Li i Heap, 2008.).

4.2.2.2. Obični kriging (engl. *Ordinary Kriging, OK*)

Obični kriging kao tehnika prostorne interpolacije dodaje vanjski parametar, *Lagrangeov* faktor kojim se minimizira iznos varijance kriginga. Nadalje, u ovoj tehnici kriginga se pretpostavlja da lokalna srednja vrijednost nije približna ili jednaka srednjoj vrijednosti ukupnog broja podataka.

Obični kriging veoma je sličan tehnici jednostavnog kriginga, ali se razlikuje po tome što se kod običnog kriginga procjenjuje vrijednost atributa korištenjem iste matematičke formule sa zamijenjenim članom „ μ “ za član lokalne srednje vrijednosti $\mu(x_0)$, koja je srednja vrijednost uzorka prostora koji se istražuje.

4.2.3. Kokriging

Kokriging je interpolacijska metoda koja se temelji na ponovljenom izračunu težinskih koeficijenta i srednje vrijednosti podataka. Težinski koeficijenti dodijeljeni kontrolnim točkama (podatcima) minimiziraju varijancu procjene. U usporedbi s krigingom, takvi se izračuni obavljaju za primarnu i sekundarnu varijablu, a sekundarna varijabla je veličina koja na neki način dodatno (poboljšano) opisuje ponašanje primarne (Mikulčić, 2016.). Također, kao što kriging metoda interpolacije ima mnogo tehnika, tako je s kokriging metodom, gdje će biti nabrojane neke od tehnika, ali neće biti dalje obrađivane u radu zbog opsežnosti i kompliciranosti rada, pa tako postoje sljedeće tehnike: jednostavni kokriging, obični kokriging, sastavljeni kokriging, indikatorski kokriging i ostali.

4.3. Utjecaj različitih faktora na svojstva prostornih interpolacijskih metoda

Prilikom korištenja bilo koje od metoda interpolacije, osim poznavanja pravila i načina korištenja pojedine metode potrebno je poznavati utjecaj pojedinih parametra i ulaznih podataka na konačan ishod korištene proračunske metode prostorne interpolacije. Tako na točnost prostorne interpolacijske metode utječu sljedeći faktori:

- a. **Gustoća prikupljenih uzoraka i njihova prostorna raspodjela** – gustoća podataka ima vrlo snažan utjecaj na svojstva interpolacijskih metoda. Kod velike gustoće uzetih podataka većina metoda će pokazati slične rezultate. Prilikom korištenja uzorkovanih podataka normalno raspoređenih i uzoraka velike gustoće utvrđeno je da korištenje šireg uzorkovanja utječe na reduciranje informacija u krajnjim kartama, iako gustoća uzoraka ostaje relativno velika (Li i Heap, 2008.). Pri slučaju niske gustoće uzorkovanih podataka temeljne pretpostavke o varijacijama među uzorcima mogu se razlikovati, a dolazi do problema s odabirom interpolacijske metode, što znači da je bolja izvedba prostorne interpolacije kada su podaci gušće uzorkovani. Također, potrebno je omogućiti prikupljanje kvalitetnih podataka i razumne količine, koji imaju veći utjecaj na sam ishod proračuna za razliku od gustoće uzorkovanja.
- b. **Prostorna raspodjela uzoraka** – određene interpolacijske metode pokazuju kvalitetnije rezultate pri uzorcima pravilnog i gustog razmaka, nego u obrnutom slučaju. Prilikom korištenja podataka s nepravilnim razmakom uzorkovanja dolazi do varijacije interpolirane karte. Grupiranje uzoraka također ima utjecaj na točnost procjena, a učinci također ovise o odabranim metodama. Nadalje, visinske i sezonske promjene podataka imaju značajnu ulogu u predviđanju.
- c. **Tip površine** – može imati značajan utjecaj na svojstva i ishod prostorne interpolacijske metode. Što je veća varijabilnost površine, to je veća i pogreška procjene odnosno pogreška procjene konstantno raste s porastom stope, kako se veličina uzoraka smanjuje. Nagle i izražene prostorne promjene, poput promjene u tipu tla mogu uzrokovati probleme s interpolacijskim procjenama, također svojstva interpolacijskih metoda smanjuju se kako se povećava varijabilnost površine.
- d. **Količina uzoraka, struktura uzorkovanja i variogram** – količina uzorkovanih podataka odnosno uzoraka i struktura uzorkovanja direktno utječu na pouzdanost variogram analize. Količina uzoraka manja od 50, često rezultira nestabilnim variogramom ili nimalo evidentnom prostornom strukturom (Li i Heap, 2008.). Veća

količina uzoraka iz kojih se izračunava variogram rezultirat će većom preciznošću. Prostorna struktura podataka utječe na količinu uzoraka i variogram.

- e. **Kvaliteta podataka** – na kvalitetu podataka utječe nekoliko glavnih čimbenika, a to su: raspodjela, izotropizam, anizotropizam, varijanca i opseg, točnost, prostorna povezanost i drugi čimbenici.
- f. **Raspodjela podataka** – normalnost podataka utječe na procjenu nekih metoda prostorne interpolacije, odnosno normalna distribucija ulaznih podataka oko njihove srednje vrijednosti.
- g. **Varijanca i opseg** – varijanca podataka utječe na svojstva prostornih metoda interpolacije i njihove rezultate. Kada koeficijent varijacije podataka raste, smanjuje se učinak odabrane metode. Varijanca i opseg podataka mogu utjecati na svojstva i odabir tehnike prostorne interpolacije.
- h. **Točnost podataka** – čimbenik koji izravno utječe na rezultate procjene prostornim interpolacijama. Tamo gdje podaci nisu reprezentativni za površinsko modeliranje može se pojaviti rezultati s interpolacijskom pristranošću. Ne reprezentativne podatke potrebno je uspoređivati u odnosu na promatrane i predviđane. Osim toga, loši podatci utječu negativno na samu izvedbu pojedinih metoda interpolacije. Uklanjanjem ne reprezentativnih podataka iz procjene dovodi do značajnih poboljšanja u konačnom rezultatu procjene.

4.4. Metode usporedbe i procjene kvalitete prostorne interpolacijske metode

Svaka metoda prostorne interpolacije daje različite prikaze, potrebno je generirati najtočniju moguću površinu na osnovi uzetih uzoraka i utvrditi karakter pogrešaka i varijabilnosti procijenjenih vrijednosti pomoću različitih metoda testiranja te uspoređivanjem različitih metoda interpolacije. Tako postoji nekoliko metoda za usporedbu interpolacijskih metoda, a to su:

- 1) Unakrsno vrednovanje (engl. *cross-validation*)
- 2) Podijeljeni uzorak (engl. *split sampling*)
- 3) *Jackknifing*
- 4) Reziduala (ostatak)

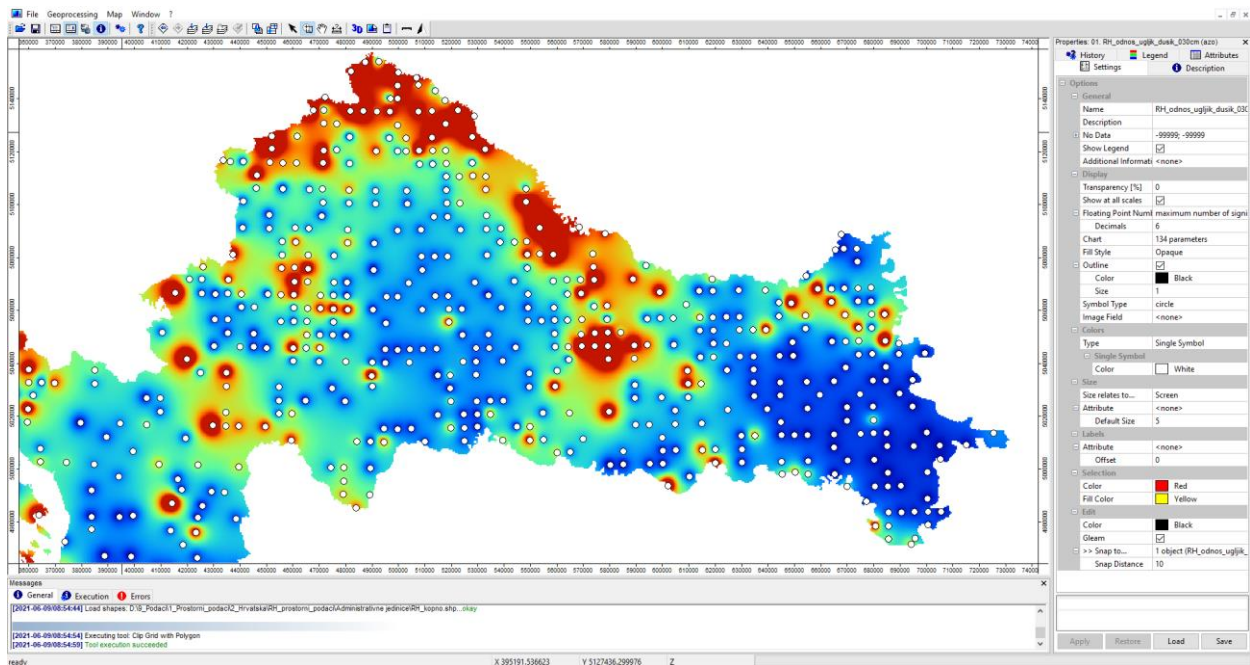
Većina istraživača i korisnika prostornih interpolacijskih metoda preporučuje korištenje metode unakrsnog vrednovanja za provjeru točnosti korištene metode. Metoda unakrsnog vrednovanja koristi sve točke za razvoj i usporedbu modela. Najčešći oblik unakrsnog vrednovanja se naziva tehnika ostavljanja jedne točke (engl. *leave one*), tom tehnikom izostavlja se jedna točka prije procesa interpolacije, kako bi se približila njegova vrijednost. Nakon toga izračunavaju se razlike između mjerenih i predviđanih točaka te se postupak ponavlja za svaki uzorak (mjerena točka). Ova metoda se pokazala pouzdanom kod površina s visokim brojem reprezentativnih uzoraka, a može se smatrati korisnim pokazateljem općih karakteristika odabrane metode interpolacije, ali se ne može koristiti kao mjera pouzdanosti algoritama. Metoda podijeljenog uzorka se koristi za procjenu točnosti i stabilnosti algoritma interpolacije. Karakteristika metode je razdvajanje podataka na dva dijela, trening i test podataka, uz zadržavanje podataka o omjeru između njih. Ispitni podatci (slučajni uzorci) se koriste kao kontrolne točke, dok se podatci o treningu koriste za razvoj modela. Metoda jackknifing je slična kao i prošla metoda, ali izlazni rezultati ovise tehnicom odabiranja testnih podataka (slučajni uzorci). Ideja same metode je testiranje interpolacijskih algoritama, odnosno njihove dosljednosti. Rezidualna metoda, za razliku od unakrsne metode ona se oslanja na razliku između zadanih vrijednosti „Z“ i interpolirane vrijednosti, izračunava se izrazom $Z_{res} = Z_{dat} - Z_{grd}$, gdje Z_{dat} predstavlja vrijednosti reziduala, Z_{dat} je vrijednost ulaznih podataka i Z_{grd} je vrijednost interpolirane točke. Glavna karakteristika ove metode je da je vrijednost standardne devijacije jednaka kao kod metode unakrsne provjere, dok ostali parametri dobivaju različite vrijednosti (Šiljeg i sur. 2013.)

4.5. Softveri i programski sustavi za interpoliranje

Napretkom tehnologije i tehnike razvili su se različiti programi i moduli koji se koriste za interpolaciju izmjerenih podataka, na način da se podatci unose u programe koji izrađuju pravilne kvadratne mreže, koje se dalje koriste u analizi i vizualizaciji prostora. Većina programskih paketa za prostornu interpolaciju danas se naplaćuje putem kupovine licenci koje mogu biti godišnje ili za cijelo vrijeme korištenja, ovisno o proizvođaču, ali također postoje programski paketi koje je moguće preuzeti potpuno besplatno. Zavisno o potrebama i mogućnostima programa postoje različite verzije istih proizvođača programa, kako bi se omogućio odabir prema potrebi korisnika. Prilikom korištenja bilo kojeg programskog paketa

za prostornu interpolaciju potrebno je poznavati rad u sučelju programa i posjedovati znanje o metodama te osnovama geo-znanosti, kao predvodnika razvoja ovih programa. Najčešći korišteni programski paketi su:

- a. SAGA (engl. *System For Automated Geoscientic Analyses*)
- b. Surfer
- c. ILWIS (engl. *Integrated Land and Water Information System*)
- d. MATLAB R
- e. Arc GIS
- f. QGIS (engl. *Quantum GIS*)
- g. GRASS (engl. *Geographic Resources Analysis Support System*)



Slika 13. Prikaz grafičkog sučelja softvera SAGA

Izvor: <http://www.saga-gis.org/en/about/software.html>

4.6. Usporedbe i primjeri korištenja interpolacijskih metoda u kartiranju tala

U ovom poglavlju rada bit će prikazane različite metode prostorne interpolacije korištene za istu svrhu, odnosno kartiranje svojstava tla te će međusobno biti uspoređene, kako bi bili u mogućnosti dobiti kompletan uvid u prednosti ili nedostatke pojedinih metoda. Jedino na ovakav način možemo pravilno odabrati metodu koju ćemo koristiti u poljoprivrednoj praksi za kartiranje trenutnog stanja tla i aplikacijskih karata. Važnost odabira pravilne metode za poljoprivrednu svrhu ima puno šire značenje, jer će se upravo odabirom pravilne metode izbjeći loša poljoprivredna praksa i smanjiti potrošnja mineralnih i/ili organskih gnojiva, što će imati izravan utjecaj na uštedu u proizvodnji i povećanje profita uzgojem biljaka prema lokalnim potrebama. Iz tih razloga potrebno je veliku pažnju usmjeriti u kompletan proces kartiranja, gdje se zahtjeva visoko znanje poljoprivredne prakse, geologije i geostatistike te drugih znanstvenih grana (multidisciplinarni pristup) za dobivanje krajnjeg željenog rezultata.

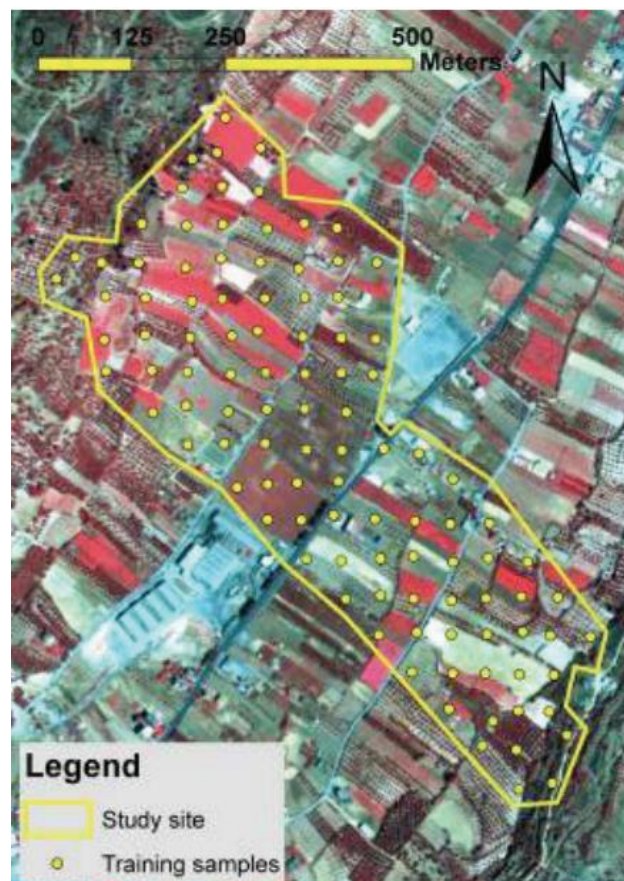
4.6.1. Usporedba prostornih interpolacijskih metoda u kartiranju poljoprivrednog tla

Karydas i sur. (2009.) su istraživali pogodnosti tri prostorne interpolacijske metode u kartiranju svojstava poljoprivrednog zemljišta na Kreti. Tako je istraživačka skupina obavljala ocjenjivanje interpolacijskih metoda na osnovi sljedećih pet svojstava tla: organska tvar, ukupni CaCO_3 (kalcijev karbonat), električna vodljivost, sadržaj željeza (Fe) i sadržaj gline. Naveli su, kako je znanje o promijenjivim svojstvima tla neophodno za korištenje dobre poljoprivredne prakse. Ispitivano područje se nalazi u 25 ha-skombloku, gdje se nalazi vinograd i maslinici na mediteranskom otoku Kreti u državi Grčkoj. Korištene se tri poznate metode prostorne interpolacije, a to su: OK (*engl. Ordinary Kriging, OK*), metode inverzne udaljenosti (*engl. Inverse Distance Weighting, IDW*) i metoda funkcije radijalne osnove (*engl. Radial Basis Functions, RBF*). Metode su služile za generiranje karata predviđanja, koje su nakon toga korištene za usporedbu s neovisnim setom podataka kako bi se ispitala točnost i efektivnost svake metode.

Poljoprivredne površine u mediteranskom području su generalno okarakterizirane s velikim prostornim varijacijama svojstava tla na poljima malih veličina. Iz takvih razloga, gospodarstvima se ne isplati ulagati u skupa rješenja, što predstavlja da izbor optimalne

interpolacijske metode za izradu karte predviđanja trenutnog stanja tla s ograničenim brojem uzoraka tla ima vrlo važnu ulogu.

Područje Archanes u kojem je bilo obavljano istraživanje nalazi se na strmovitom terenu, gdje se uzgaja vinova loza i masline. Karakterizira ga visoka heterogenost zbog malih polja, dugačkih i nepravilnih oblika te valovitog reljefa s niskom dubinom obradivog sloja. Tlo u ispitivanju je vrsta lapora odnosno muljevito i plitko tlo s velikim postotkom šljunka. Interpolacija uzoraka tla preko mreže točaka implementirana s korištenjem tri različita interpolatora za ranije spomenuta svojstva tla. Skup korištenih podataka se sastojao od dva skupa podataka, prvi skup sa 106 uzoraka korišten je za interpolacijske proračune, a drugi skup od 70 uzoraka služio je za testiranje interpolacijskih metoda. Digitalna slika satelita IKONOS s nominalnom veličinom piksela od 1m korištena je za identificiranje poljoprivrednog sustava, karakteriziranje krajolika i lociranje uzoraka tla na terenu tijekom prikupljanja uzoraka. Također, i pri prezentaciji dobivene karte, kao podloga.



Slika 14. Prikaz uzorkovanog područja

Izvor: Karydas i sur. (2009.)

Uzorkovanje je obavljeno jednakomjerno na ispitnom području, tako da se mreža jednakih točaka rasprostrani područjem, kako je po prikazano na slici 14. Ova metoda uzimanja uzoraka često se koristi za procjenjivanje varijabilnosti svojstava tla. Odabrana mreža dimenzije 50*50 m² pruža jednako razmaknuto promatranje i otkriva sustavne varijacije, kao glavnu metu istraživačke skupine Setovi podataka su prikupljeni u dva različita vremenska perioda, s razmakom od nekoliko mjeseci. Uzorkovne točke, odnosno sjecišta čvorova mreže su preklopljena preko orto-foto karte IKONOS satelita. Za lociranje koordinatnih točaka uzorkovanja korišten je diferencijalni GNSS prijemnik, dok se uzorkovanje obavljalo na dubini od 30 cm. Uzeti uzorci tla su različitim laboratorijskim metodama obrađeni te je dobivena kemijska analiza. Za računalnu obradu i proračun prostornih interpolacijskih metoda istraživači su koristili programski paket ArcGIS 8.1 verziju, gdje su obavljali proračun globalnog trenda kao glavni postupak koji utječe na sve mjerenja na deterministički način. To se postiže tako da se projiciraju sva mjesta uzoraka na „x“ i „y“ ravninu, a vrijednost atributa svakog uzorka navedena je u „z“ dimenziji odnosno vrijednost atributa projicira se u sve tri dimenzije kao raspršene točke, a utvrđuje se da globalni trend postoji, ako krivulja koja nije ravna prolazi podacima, kao što je prikazano na slici 15 (Karydas i sur., 2009.)

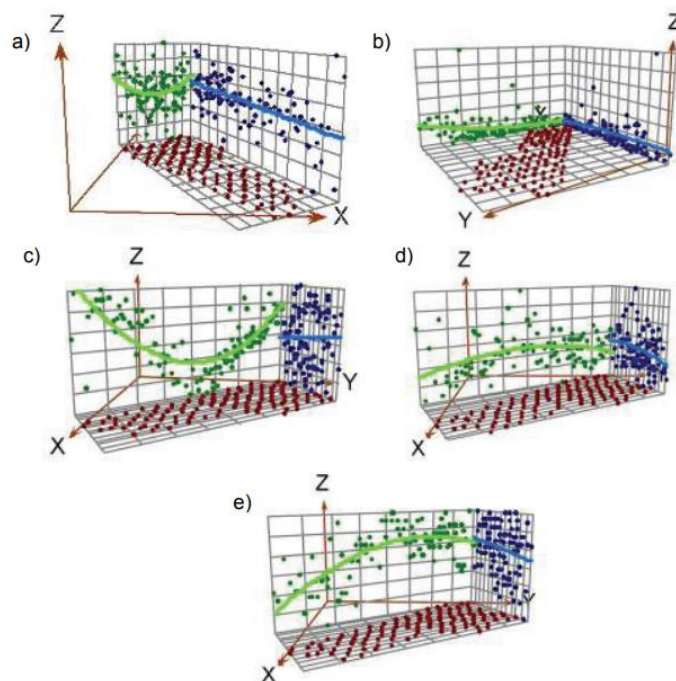
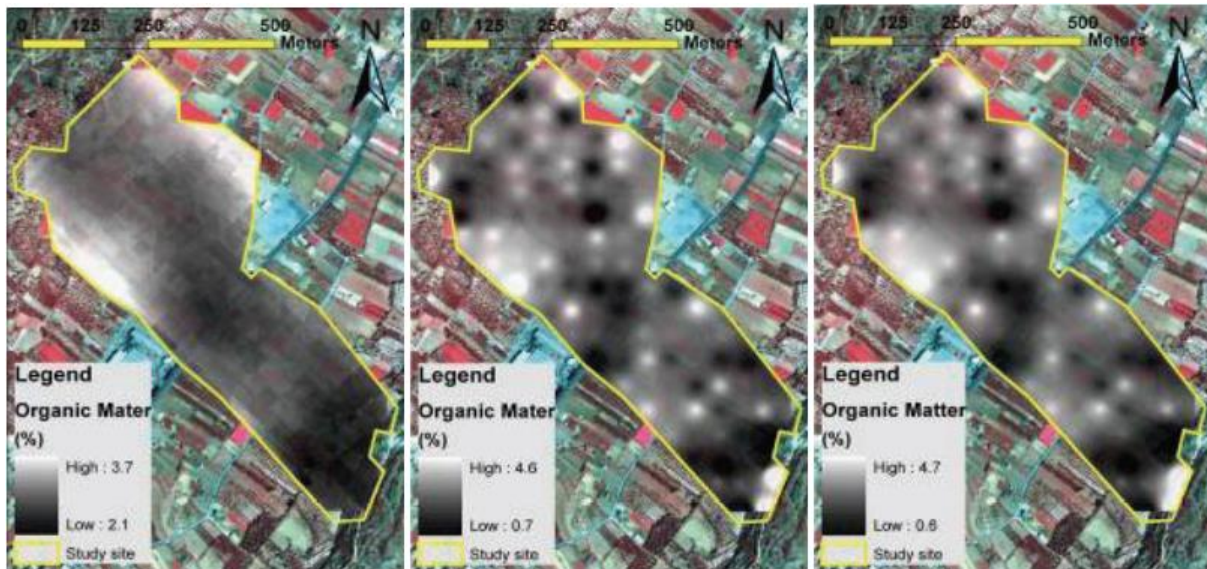


Figure 3: Trends of soil properties a) OM, b) EC, c) CaCO₃, d) Fe and e) Clay.

Slika 15. Trendovi svojstava tla

Izvor: Karydas i sur. (2009.)

Petnaest karata predviđanja svojstava tla dobivene su interpoliranjem ranije spomenutih metodama prostorne interpolacije. Svako svojstvo tla je zasebno obrađeno i prikazano tematskom kartom, kao primjer na slici 16. se može vidjeti razlike u interpoliranju svojstava organske tvari.



Slika 16. Karta predviđanja organske tvari pomoću OK (lijevo), IDW (u sredini) i RBF metoda (desno)

Izvor: Karydas i sur. (2009.)

Kako bi se ocijenila točnost i efektivnost određene karte predviđanja istraživačka skupina koristila je zasebni set podataka od 70 uzoraka, koji je uzet s drugim setom podataka za predviđanje. Uzorkovanje je za ovaj set podataka obavljeno nasumično i bez reda, a analiza je obavljena istom metodologijom kao i za testne uzorke, gdje su pretpostavljene vrijednosti na uzorkovanim mjestima za testiranje snimljene u laboratoriju i identificirane na karti. Kao mjere točnosti i učinkovitosti izračunate su pogreške srednjeg kvadrata (MSE) i točnost predviđanja (G%). Tako nam usporedba MSE vrijednosti između metoda pokazuje za određeno svojstvo da se najmanje pogreške postižu korištenjem različitih metoda, odnosno ne postoji metoda koja se može smatrati boljom od ostalih. Vrijednost „G“ pokazuje pozitivne vrijednosti samo za sadržaj željeza i ukupni sadržaj kalcijeva-karbonata za sve metode interpolacije i blago pozitivnu vrijednost za organsku tvar primjenom IDW metode.

Svojstva tla		Interpolacijske metode					
		IDW		RBF		OK	
		MSE	G (%)	MSE	G (%)	MSE	G (%)
Sadržaj organske tvari	2.87%	0.2	1.54	0.24	-17.8	0.23	-13.4
Sadržaj gline	39.46%	25.49	-38.1	23.29	-26.2	25.29	-37.1
Električna provodljivost	0.79 mS/cm	0.19	-73.9	0.21	-91.2	0.19	-73.8
Fe sadržaj	4.67 ppm	1.88	4.97	1.96	1.00	1.91	3.64
Ukupni sadržaj CaCO ₃	35.33 %	88.6	22.67	86.4	24.58	84.77	26.01

Slika 17. Usporedba metoda preko MSE i G vrijednosti

Izvor: Prema Karydas i sur. (2009.)

Istraživačka skupina je zaključila ovim istraživanjem da su primijenjene metode interpolacije rezultirale sličnost u pogledu točnosti, bez isticanja niti jedne od korištenih. To je u jednu ruku očekivano, zbog bogatog skupa podataka, dok bi u rijetkom skupu pretpostavka bila u neskladnoj varijaciji i odabiru metode možda kritična. Kao činjenicu uzimaju da je shema uzorkovanja bila jednolična prekrivena standardnom gustoćom uzoraka, što isključuje mogućnost pogreške zbog sheme uzorkovanja. U smislu učinkovitosti, samo se sadržaj CaCO₃ može kartirati bilo kojom od navedenih metoda interpolacije, a ostala karte se mogu koristiti samo kao upotrebljive srednje vrijednosti. Nedostatak homogenosti tla na malim udaljenostima proizlazi iz činjenica da su poljoprivrednici navikli na različite načine gospodarenja, poput gnojidbe, navodnjavanja i obrade tla. Poljoprivredna polja su površine s atributima koji se kontinuirano razlikuju u prostoru, iako unutar diskretnih granica, ali njihovu varijancu unutar polja ne kontrolira samo omjer prostornih varijacija svojstava površine nego i varijanca izmjene usjeva (Karydas i sur., 2009.).

4.6.2. Predviđanje točnosti prostornih interpolacijskih metoda u određivanju teksture poljoprivrednog zemljišta

Gozdowski i sur. (2015.) istraživali su mogućnost i opravdanost uporabe prostornih interpolacijskih metoda u kartiranju teksture tla korištenog u poljoprivredne svrhe. Tako su na poljima veličina od 10 do 45 ha na području sjeverne i središnje Poljske obavili istraživanje. Na svakom polju uzeto je od 21 do 60 uzoraka tla, koji su laboratorijskom analizom ispitani na sadržaj čestica tla i prikazani postotkom. Za dalje istraživanje korišteni su podatci o česticama gline, pijeska i mulja. Za interpolaciju teksture tla korišteni su podatci o ispitanoj elektrovodljivosti tla, kao pomoćni. Tako su dobiveni podatci korišteni za usporedbu odabranih metoda prostornih interpolacija. Nadalje, za procjenu točnosti metoda korištene su rezidualna i unakrsna metoda vrednovanja točnosti.

Na četiri poljoprivredne čestice obavljeno je prikupljanje uzoraka tla, koji su podvrgnuti kemijskoj analizi. Za istraživanje korištena je zemljovidna karta u mjerilu 1:5000 kao podloga, dobivena fotografiranjem iz zraka. Prostorna ovisnost atributa (svojstava) procijenjena je pomoću parametara variogramске sferne funkcije i Morano-vim koeficijentom autokorelacije. Točnost interpolacijske metode je na osnovu pogreške srednjeg kvadrata (RMSE) procijenjena ranije navedenim dvaju metodama. U istraživanju korištene su četiri metode prostorne interpolacije, a to su: IDW, RBF, OK i OCK. Neprostorene statističke analize provedenu su pomoću programa Statistica 10, a prostorne statističke radnje i obrada je obavljena programskim paketom ArcGIS 9.3, gdje je za sve analize u istraživanju uzeta razina značajnosti (engl. *significance level*) 0,05(Gozdowski i sur., 2015.).

Metode IDW, RBF i OK imale su vrlo male razlike u pogledu pogreške srednjeg kvadrata (RMSE) iz razloga sličnosti rezultata. RBF metoda imala je jedina malo veću točnost za predviđanje sadržaja pijeska u usporedbi s IDW i OK metodama, a u slučaju predviđanja sadržaja gline IDW metoda je pokazala veću točnost od ostalih. Tako je utvrđeno da relativne razlike RMSE između ove tri metode nisu bila veća od 6%, odnosno prosječno između 3-4%.

	Polje				Srednja vrijednost
	D2	D5	O3a	O5c	
			Pijesak		
IDW	4.32	5.12	4.29	3.55	4.32
RBF	4.04	5.41	3.85	3.30	4.15
Ordinary kriging	4.06	5.45	4.22	3.23	4.24
Cokriging	4.07	5.46	4.27	1.68	3.87
			Mulj		
IDW	3.74	3.90	3.59	3.15	3.59
RBF	3.61	4.00	3.15	2.86	3.40
Ordinary kriging	3.53	4.02	3.00	2.93	3.37
Cokriging	3.55	4.00	3.05	2.20	3.20
			Glina		
IDW	1.26	2.23	1.82	1.99	1.83
RBF	1.25	2.30	2.10	2.09	1.94
Ordinary kriging	1.43	2.24	1.79	2.14	1.90
Cokriging	1.42	2.19	1.74	1.71	1.76

Slika 18. Prikaz srednjeg kvadrata pogreške za unakrsnu metodu ocjenivanja

Izvor: Prema Gozdowski i sur., 2015.

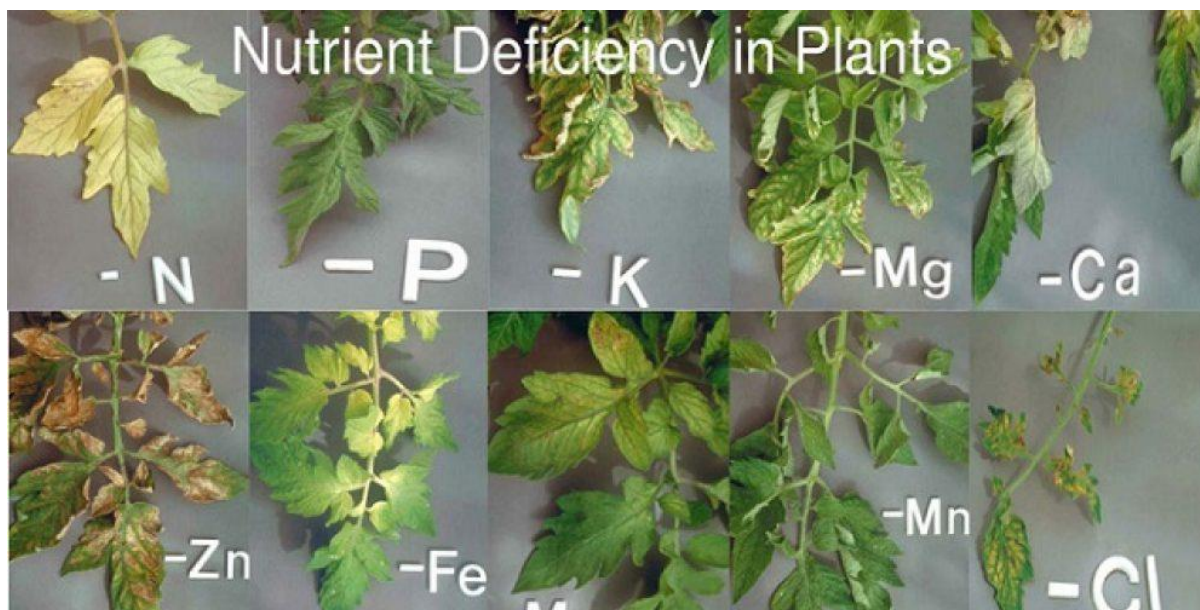
Istraživačka skupina došla je do saznanja kako su razlike u točnosti predviđanja vrijednosti tekstura tla korištenim metodama prostornih interpolacija vrlo male, tako da odabir najbolje metode od korištenih nije moguć. Sve frakcije tekstura tla predviđene su sa sličnom točnošću, dok se uočava kako je OCK metoda imala malo veću točnost od ostalih metoda. Korišteni pomoćni podatci (elektrovodljivost tla) smanjili su vrijednosti standardnih pogrešaka srednjeg kvadrata za sve sadržaje čestica koje su korištene u kartiranju. Također, ako su takvi podatci dostupni poželjno ih je koristiti, to predstavlja da izrazito povezane varijable koje mogu biti mjerene u visokoj prostornoj rezoluciji, veoma unaprjeđuju prostorno predviđanje teksture tla kada se koristi kao kovarijanta u kokriging metodi prostorne interpolacije. To predstavlja veliku važnost jer je moguće ograničiti (smanjiti) broj uzoraka za laboratorijsku analizu, a sadržati visoku točnost uz smanjenje podataka za obradu (Gozdowski i sur., 2015.).

5. Precizan pristup dopunskoj gnojidbi

Prema Lončarić i Karalić (2015.) gnojidba je agrotehnička mjera aplikacije gnojiva radi postizanja stabilnog visokog prinosa odgovarajuće kvalitete optimizacijom opskrbe usjeva hranivima održavanjem ili popravljanjem plodnosti tla bez štetnog utjecaja na okoliš. Nadalje, dopunska gnojidba predstavlja veliku važnost u ostvarivanju visokih i kvalitetnih prinosa, uz mogućnost popravljivanja prethodne loše gnojidbene odluke. Tako dopunska gnojidba može uvažiti trenutne potrebe biljaka za hranivom na određenim lokaliziranim dijelovima promatrane površine, pomoću „signala“ odnosno vizualnih promjena (simptoma) koji ukazuju na određeni hranidbeni ili drugi problem, kao što je definirano u početnim poglavljima rada. Dopunsku gnojidbu možemo definirati na način da kažemo kako ona ima izrazitu zadaću hranidbe usjeva prema stadijima razvoja i prema specifičnim potrebama u određenoj fazi rasta, također u fazi aktivne vegetacije, prihrana kao oblik (naziv) dopunske gnojidbe obavlja se u obrocima odnosno višekratno u skladu s trenutnim stadijem razvoja.

Uvođenjem precizne gnojidbe kao temelja pravilnog gospodarenja, dopunska precizna gnojidba dobila na važnosti. Razlog tomu je mogućnost opažanja promjena nastalih na biljci prema njenim potrebama za određenim hranivom. Nadalje, uz napredak tehnike i tehnologije ta zapažanja promjena postaju centar oko kojeg se „gradi“ daljnji pristup. Do sada poznate promjene kao što su: veličina lista, boja lista, promjene u rastu i slično mogle su djelomično ukazivati na potrebe određenih hraniva, ali ako zamislimo da postoji mogućnost da zapazimo i najmanje „odstupanje“ u ponašanju biljke od idelnog dolazimo do superiornog sustava nadzora i kontrole biljaka. Takav sustav moguće je primijeniti samo uz korištenje suvremenog AIT-a (Agrarne informacijske tehnologije) te visoko educiranog i specijaliziranog kadra, gdje pristup tada postaje složen i multidisciplinaran.

Praćenje promjena i simptoma na uzgajanim biljkama koji ukazuju na ranije navedeno u današnje vrijeme obavlja se uporabom različitih osjetnika (senzora), koji se zajednički nazivaju senzori usjeva. Takvi senzori omogućuju nam praćenje zdravstvenog i vegetacijskog stanja usjeva uz pomoć nama okom nevidljivog dijela elektromagnetskog spektra te tako možemo vidjeti i prepoznati nekakvu promjenu, koja je ranije bila nevidljiva. U daljnjim poglavljima vidjet će se funkcioniranje spomenutog načina zapažanja i značaj vegetacijskih indeksa u preciznoj gnojidbi.



Slika 19. Promjene na biljci uzrokovane nedosatkom određenog hraniva

Izvor: <https://www.botanika.hr/botanopedija/uloga-magnezija-mg-i-kalcija-ca-u-biljkama>

5.1. Senzori za nadzor i upravljanje usjevima

Senzori su uređaji koji omogućuju pretvaranje neke fizikalne veličine u analognu električnu veličinu (napon, otpor, struja) ili digitalnu veličinu. Može se reći kako senzori sudjeluju u procesu, odnosno u interakciji su s procesom i zapažaju različita stanja procesa, tako da se njihova reakcija transformira u jedan od oblika izlaznog signala. Patel i sur. (2020.) navode kako su senzori mogu primati različite vrste signala, kao što su fizikalni, kemijski i biološki te ga pretvoriti u električni. Senzori se danas koriste gotovo u svim tehničkim sustavima te je njihov rad neophodan za pojedine. Upravo iz toga razloga postoji velik broj različitih vrsta senzora, koje se dijele prema; konstrukciji, načinu zapažanja, mjerenja i registracije fizikalnih veličina, prikazu i drugo. Prema Kovačić (2019.) senzori se dijele prema tipu detektirane energije, a mogu biti pasivni ili aktivni, gdje aktivni senzori posjeduju vlastitu energiju pomoću koje obavljaju mjerenje, dok pasivni senzori koriste isključivo nekakav drugi izvor energije za obavljanje mjerenje. Najčešća podjela senzora je sljedeća: prema mjernoj veličini, specifikacijama, tipu pretvaranja, materijalu izrade, području primjene i načinu detekcije. Zbog opširnosti rada i discipline koja proučava senzore (senzorika) u daljnjem tekstu će biti obrađeni optički senzori koji se koriste u poljoprivredne svrhe za nadzor usjeva.

Za praćenje stanja usjeva u poljoprivredi te procese izravnog upravljanja, najznačajniji su optički spektralni senzori. Takvi senzori omogućuju zapažanje promjena na biljkama i njihovom okruženju u vidljivom i ne vidljivom dijelu elektromagnetskog spektra, a kombinacije i međusobna preklapanja takvih podataka dovode do različitih mogućnosti. Takvi podatci koji nastaju preklapanjem po određenom pravilu odnosno formuli nazivaju se vegetacijski indeksi.

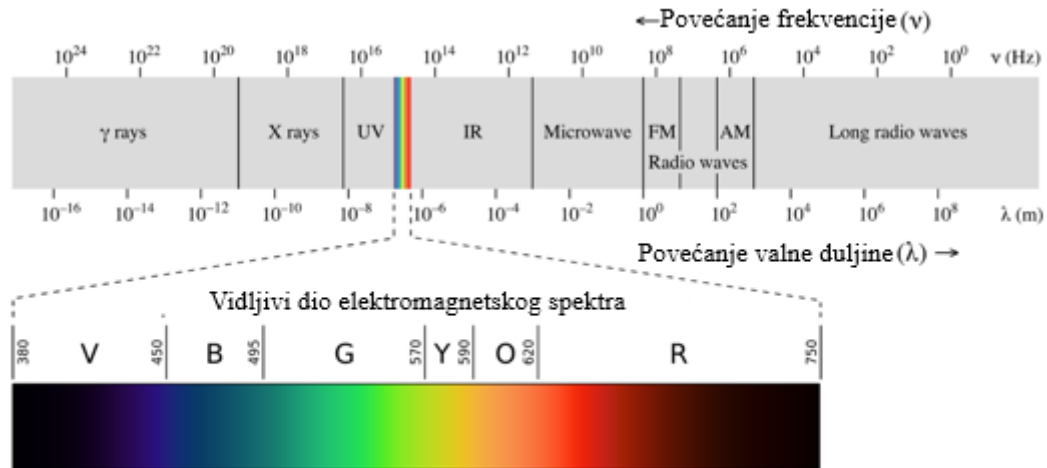


Slika 20. Prikaz multispektralnog senzora

Izvor: <https://surveyequipment.com/parrot-sequoia-multispectral-sensor/>

Kako bi se lakše shvatio princip rada optičkih senzora koji se koriste u poljoprivrednoj praksi potrebno je poznavati funkcioniranje ljudskog oka, koji predstavlja naš optički senzor. Tako kada čovjek gleda ili promatra okolinu, možemo reći da koristi ljudski pasivni optički senzor. Princip viđenja okoline pomoću ljudskog oka temelji se na svjetlosnim zrakama (zračenju) koje padaju na promatrane objekte. To zračenje može od strane objekta biti apsorbirano (upijeno), odbijeno (reflektirano) ili propušteno (transmitirano), a također objekti može isijavati svoje zračenje, ovisno o spektralnoj karakteristici promatranog objekta. Promatranjem takvih promjena nastaje stvaranje okoline koju mi percipiramo. Ljudske oči mogu percipirati zračenje odnosno svjetlosne zrake samo iz vidljivog dijela elektromagnetskog spektra, gdje svjetlosna zraka sastavljena od svih boja pada na promatrani objekt, a njen jedan dio se reflektira, upija ili propušta. Nadalje, ako mi percipiramo da je nekakav objekt plave boje, tada zapravo taj objekt reflektira plave svjetlosne zrake dok sve ostale zrake upija. Tako kada zapazimo da je nekakav

objekt bijel predstavlja da su sve zrake svijetla koje su pristigle odbijene od strane objekta, a u suprotnom slučaju kada su sve zrake upijene od strane objekta, objekt će biti crne boje.



Slika 21. Prikaz elektromagnetskog spektra

Izvor: prema

https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetsko_zra%C4%8Denje#/media/Datoteka:EM_spectrumrevised.png

Na slici 21. možemo vidjeti cijeli elektromagnetski spektar, gdje uočavamo istaknuti dio vidljivog (engl. *Red Green Blue*, RGB) dijela elektromagnetskog spektra koji ljudsko oko može percipirati. Vidljivi dio je vrlo mali dio kompletnog spektra, što predstavlja ograničenje ljudskog oka. Upravo to ograničenje zapažanja dovelo je do razvoja uređaja koji mogu zapažati i druge dijelove elektromagnetskog spektra, a to su optički spektralni senzori. Senzori koji mogu percipirati dva spektralna pojasa nazivaju se multispektralni, dok postoje senzori koji mogu percipirati stotine spektralnih područja, a nazivaju se hiperspektralnim sensorima. Upravo takvi podatci, dobiveni multispektralnim i hiperspektralnim sensorima omogućuju zapažanje i najmanjih promjena na biljkama i u njezinoj okolini. Takvi senzori predstavljaju mogućnost interpretiranja refleksije izvan vidljivog dijela elektromagnetskog spektra, gdje upravo ta „nevidljiva“ informacija predstavlja moć zapažanja koja je potrebna u poljoprivrednoj praksi.

5.2. Primjer optičkog senzorskog sustava za korištenje u poljoprivredne svrhe

Sustav Isaria *PRO ACTIVE* prikuplja podatke o biljkama, koji se automatski pohranjuju u memoriju operacijskog računala pomoću dva podesiva senzora. Prikupljeni podatci čine osnovu za izračunavanje hranjivog stanja promatranih biljaka, omogućivši na takav način korisniku odrediti točnu količinu potrebnog gnojiva. Aplikacijska vrijednost tada točno odgovara potrebama, a pri tome uzimajući u obzir potencijal usjeva na određenim mjestima na polju. Prilikom korištenja senzora bilježe se GNSS podatci, odnosno očitavanja senzora se georeferenciraju na mjestima na kojima su izmjerena uz pomoć GNSS prijemnika i takve vrijednosti se spremaju u različitim formatima za pohranu (shape, txt, csv). Dobiveni podatci o prinosu se također putem karata koriste za određivanje aplikacijske vrijednosti gnojiva. GNSS prijemnik, senzori i upravljački motor komuniciraju putem terminala pomoću *Bluetooth* sučelja. Senzorski sustav povezan je s upravljačkim sustavom na vozilu te njima upravlja pomoću terminala. (<https://isaria-digitalfarming.com/en/>)



Slika 22. Senzor usjeva agregatiran s traktorom u prihrani

Izvor: https://www.isaria-digitalfarming.com/wp-content/uploads/2019/11/ISARIA-PRO-Active_ENG.pdf

Senzor usjeva baziran je na aktivnom mjernom sustavu s visokim svjetlosnim postavkama. Korišteni LED izvor svjetlosti omogućuje rad senzora bez obzira o danjem svijetlu te se može koristiti noću. Iz toga razloga nije potrebna kalibracija sustava pri promjeni dana ili noći. Prilikom rada senzor postiže frekvenciju snimanja od 10 do 800 (čak do 2000) mjerenja u sekundi, što omogućuje veliki mjerni raspon bez zasićenja sustava, ovisno o okolišnim uvjetima. Takva visoka frekvencija mjerenja omogućuje prikupljanje čak nekoliko podataka po individualnoj biljci u usjevu. Korisniku to omogućuje dobivanje vrlo precizne slike o kondicijskom statusu biljaka promatranog usjeva. (https://www.claas.co.uk/products/easy-2018/precision-farming/crop-sensor-isaria?subject=CUK_en_UK)



Slika 23. Senzorska glava

Izvor: <https://www.cffertilisers.co.uk/media/1270/isaria-brochure.pdf>

Ovim senzorima se mjere dva parametra, a to su indeks biomase (IBI) i N indeks (IRMI). Indeks biomase je povezan sa stanjem usjeva, koji omogućuje praćenje stresa usjeva ili oštećenja nastalih od suše ili mraza. Indeks IRMI je vegetacijski indeks temeljen na zelenoj boji biljke, pomoću kojega se izračunava opskrba dušičnim hranivima. N indeks se uglavnom koristi u kasnijim fazama rasta biljaka, dok se indeks biomase (IBI) može koristiti u ranijim fazama rasta usjeva za prilagođavanje aplikacijske vrijednosti te omogućavajući primjenu regulatora rasta, a u nekim slučajevima i primjenu fungicida na određenom mjestu u polju. U kasnijim fazama rasta biljaka koristi se kombinacija indeksa biomase i IRMI indeksa kako bi se pravovremeno moglo reagirati na specifične uvjete usjeva, kao što su suša.

Kako bi se izmjerila ova dva parametra senzori koriste iz vidljivog djela spektralnog pojasa crveni kanal i iz nevidljivog dijela infracrveni spektralni kanal. Prikaz usporedbe vremena korištenja pojedinog indeksa prikazan je na slici 24.

(<https://www.claas.co.uk/blueprint/servlet/blob/1655284/bff071e5cbfe11eb09d672adb3d933ab/320030-23-dataRaw.pdf>)



Slika 24. Korištenje indeksa u ovisnosti o fazi rasta usjeva

Izvor: <https://www.claas.co.uk/blueprint/servlet/blob/1655284/bff071e5cbfe11eb09d672adb3d933ab/320030-23-dataRaw.pdf>

6. Vegetacijski indeksi

Informacije dobivene daljinskim istraživanjima o rastu i vigoru te dinamici kopnene vegetacije mogu pružiti izuzetno korisne informacije za primjenu u nadzoru okoliša, očuvanju biološke raznolikosti, poljoprivredi, šumarstvu, urbanoj zelenoj infrastrukturi i drugim srodnim područjima, a njihovo korištenje u poljoprivredne svrhe pružaju ne samo objektivnu osnovu za makro i mikro upravljanje poljoprivrednom proizvodnjom, već se koriste u raznim situacijama razvoja usjeva navode Xue i Su (2017.). Upravo ovakva način korištenja informacija pripada kategoriji precizne poljoprivrede, kao discipline koja primjenjuje daljinska istraživanja i različite vegetacijske indekse ovisno o željenom rješenju trenutnog problema. Gabela i sur. (2016.) također navode kako podaci dobiveni obradom satelitskih snimaka omogućuju vremenski intenzivno praćenje vegetacijskih promjena na većim površinama kroz duže vremensko razdoblje te kao prednost korištenja tehnika analize vegetacijske aktivnosti navode brzo i ekonomično dobivanje setova podataka s relativno velikih područja Zemljine površine.

U području daljinskih istraživanja, znanstvenici su razvili vegetacijske indekse (VI) za kvantitativnije i kvalitetnije praćenje vegetacijskog pokrova, korištenjem spektralnih mjerenja. Spektralni odgovor promatranog vegetacijskog područja predstavlja kompleksnu mješavinu vegetacije, zemljine svjetline, okolišnog utjecaja, sjena, boje zemlje i vlage. Također, na vegetacijske indekse utječe prostorno-vremenske varijacije atmosfere. Tako je unazad dva desetljeća razvijeno preko 40 vrsta vegetacijskih indeksa, kako bi se povećao odgovor vegetacije te smanjili negativni učinci (Bannari i sur., 1995.).

Sabo i sur. (2014.) nalažu kako se mnogobrojne fotografije satelitskih senzora koriste za analizu fizikalnih procesa na površini Zemlje ne uzimajući u obzir da li je promatrana površina vegetacija ili urbano područje, a kao jedan od primarnih interesa navode proučavanje vegetacije u globalnim procesima velikih razmjera s ciljem razumijevanja funkcioniranja Zemlje kao kompleksnog sustava. Nadalje, iz toga proizlazi razumijevanje globalne raspodjele vegetacijskih tipova i njihovih bio-fizikalnih te strukturnih osobina kao i prostorno-vremenskih izmjena.

Podatci dobiveni mjerenjem spektralne refleksije i analizom vegetacijskih indeksa su postali široko primjenjivi za nadzor ishranjenosti usjeva. Tehnike daljinskih istraživanja u današnje vrijeme postaju sve brže, točnije i uvjerljivije. Veliki rast u razvojnom sektoru nosača senzora, kao što su sateliti, bespilotne letjelice te internet dovode daljinsko istraživanje pristupačnije za korištenje u svrhe nadzora hranidbenog stanja usjeva, što rezultira niže cijene agrotehničkih zahvata gnojidbe te minimizira gubitke niske produktivnosti proizvodnje.

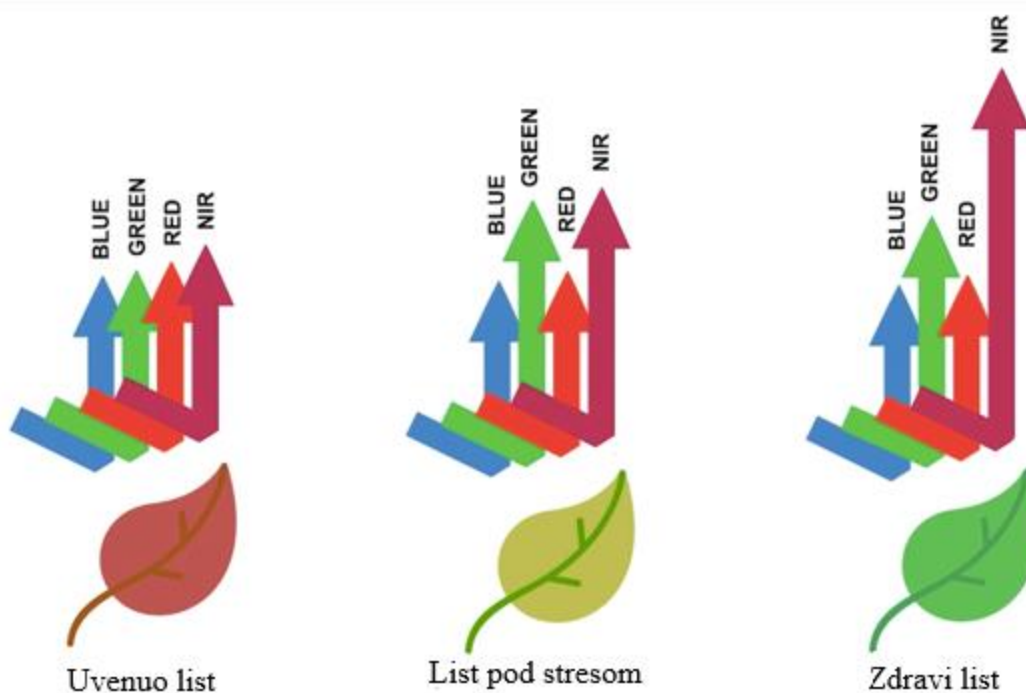
6.1. Definiranje vegetacijskih indeksa

Vegetacijski indeks je spektralna transformacija dva ili više elektromagnetska spektralna kanala osmišljenih da pojačaju doprinos vegetacijskog svojstva i omogućće pouzdane prostorne i vremenske međusobno usporedne terenske fotosintetske aktivnosti i strukturne varijacije istih. Lukadinović (2020.) navodi kako su vegetacijski indeksi podatci koji se računaju iz različitih kanala multispektralnih snimki na temelju apsorpcije, transmisije i refleksije energije vegetacije u različitim spektralnim kanalima te ponajprije služe kao indikatori procjene aktivnosti vegetacije na promatranom području.

Godine 1972. lansiran je prvi satelit koji je služio za istraživanje Zemljinih reusrsa, gdje je bilo potrebno uložiti veliki trud i napor kako bi se ustanovila veza između radiometrijskog odaziva i vegetacijskog pokrova. Program pod imenom *Monitoring the Vernal Advancemnet and Retrogradation Natural Vegetation* je jedan od prvih programa u polju korištenja satelitskih snimki u svrhu mjerenja tla te u eksploataciji satelitskih multispektralnih snimki prve generacije Landsat-MSS (engl. *MultiSpectral Scanner*) satelita. Nakon nekog vremena, drugi program pod nazivom LACIE (engl. *Large Area Crop Inventory Experiment*) od strane Amerike je otišao dalje u korištenju ovakvih informacija. Pokazao je kako uporaba crvenog (R) i bliskog infracrvenog (NIR) kanala elektromagnetskog spektra na satelitskim sensorima imaju posebnu pogodnost za korištenje pri proučavanju vegetacije, odnosno ti spektralni pojasevi nalaze se na multispektralnim kamerama meteoroloških satelita i satelita za nadzor Zemlje, a najčešće sadrže i više od 90% podataka koji se odnose na vegetaciju. Tako se različite kombinacije između spektralnih kanala nazivaju vegetacijski indeksi (Bannari i sur., 1995.).

Indeks je broj koji kvalificira intenzitet pojave, a ta pojava je kompleksna za razgradnju na poznate parametre, odnosno možemo reći, gledano sa statističke strane da je indeks relativan broj koji izražava odnose stanja jedne pojave ili nekakve skupine pojava u različitim

razdobljima prema nekoj odabranoj veličini, a veličina prema kojoj se uspoređuje odnos stanja naziva se referentnom veličinom. Kako su indeksi relativni brojevi, tako se pomoću njih olakšava praćenje osobitosti jedne pojave u vremenu te se omogućuje usporedba raznorodnih pojava (<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=27285>). Moguće je odrediti udio pojedinih čimbenika na neku pojava, ako se odradi kvalitetno dokumentiranje poznatih parametara. Pojam vegetacijskog indeksa navode Bannari i sur. (1995.) je dobro prilagođen za kvalificiranje vegetacije na velikim površinama, odnosno preko područja koje prekriva puno piksela jedne slike te služe kao kvantitativni podatci koji ukazuju na vigor promatrane vegetacije. Korisnost odnosno njihova iskoristivost leži u tome da predstavljaju snažan interpretatorski faktor digitalnih slika dobivenih daljinskim istraživanjem, ali i zasebnu metodu za otkrivanje promjena u korištenju tla, praćenje gustoće vegetacijskog pokrova, diskriminaciju usjeva te predviđanje stanja usjeva. Prilikom tematskih kartiranja zemljišta, interes za vegetacijske indekse značajno raste prilikom klasificiranja.



Slika 25. Prikaz odnosa pojedinog spektralnog kanala i zdravstvenog stanja biljke

Izvor: Prema <https://flurosat.com/blog/how-to-track-crop-growth-using-msavi-ndvi-and-ndre>

Prilikom promatranja nekog područja, njegov vegetacijski pokrov može se razlikovati u ovisnosti o jedinstvenom spektralnom ponašanju u odnosu na ukupne elemente tla. Nadalje, vidljivo zračenje u crvenom spektralnom pojasu apsorbira klorofil, a zračenje u području bliskog infracrvenog pojasa predstavlja promjenjivicu osjetljivu na prisutnost zelene vegetacije. Tako nam ova kombinacija dvije spektralne domene omogućava razlikovanje vegetacije od tla te pomoću nje možemo odrediti fotosintetsku aktivnost biomase kroz vegetativnu gustoću pokrova.

Elektromagnetski sustav zračenja koji zrači sa Zemljine površine omogućuje informacije o fizičkim svojstvima tla, vodi i vegetaciji. Takve informacije mogu biti korisne u slučaju kada tehnike i modeli daljinskih istraživanja omogućuju pretvaranje spektralnih informacija u čitljiv oblik. Nadalje, kako bi se uopće mogla upotrebiti daljinska istraživanja kao izvor podataka potrebno je razumjeti interakciju energije zračenja i Zemljine površine. Opseg, primjenjivost i ograničenja u korištenja vegetacijskih indeksa moraju se ostvariti u rješavanju ekoloških problema, odnosno svih problema povezanih s okolišem, kao jednim velikim sustavom. Tijekom godina razvio se veliki broj različitih vegetacijskih indeksa, koji imaju različitu namjenu, gdje se može uočiti kako su mnogi znanstvenici razvili indekse koji se odnose na njihovo specifično područje rada. Iz toga razloga ne možemo govoriti o lošem ili dobrom vegetacijskom indeksu, već o prikladnošću njihove uporabe u pojedinom slučaju (Bannari i sur., 1995.).

Navodi o prvim vegetacijskim indeksima nalažu kako su Pearson i Miler začetnici u povijesti vegetacijskih indeksa, gdje su 1972. godine razvili prve vegetacijske indekse. Radilo se o dva vegetacijska indeksa u obliku omjera RV (engl. *Ratio Vegetation Index*) i VIN (engl. *Vegetation Index Number*) (Majić, 2016.). Nadalje, kao prednost vegetacijskih indeksa McDonald i sur. (1998.) navode lakoću korištenja te indeksi mogu biti razvijeni tako da dokažu empirijske odnose sa željenim parametrima uz minimiziranje osjetljivosti na periferne varijacije.

Vegetacijski indeksi se koriste za različite svrhe, pa tako najčešća uporaba je u sljedećim slučajevima: ispitivanje klimatskih trendova, procjena sadržaja vode u tlu, nadzor navodnjavanja, upravljanje poljoprivrednim usjevima, nadzor evaporacije i transpiracije biljaka, klasifikacija vegetacije, procjena u promjeni biološke raznolikosti i drugo.

6.2. Vrste vegetacijskih indeksa

Ranije je navedeno da trenutno postoji vrlo velik broj različitih vegetacijskih indeksa koji koriste različite kombinacije spektralnih kanala kako bi determinirali određenu pojavu na promatranom području. Možemo ih podijeliti prema broju korišten multispektralnih kanala na multispektralne i hiperspektralne vegetacijske indekse, a neki od multispektralnih su:

- 1) *Ashburn Vegetation Index (AVI)*
- 2) *Greenness Above Bare Soil (GRABS)*
- 3) *Multi-Temporal Vegetation Index (MTVI)*
- 4) *Greenness Vegetation and Soil Brightness (GVSB)*
- 5) *Adjusted Soil Brightness Index (ASBI)*
- 6) *Adjusted Green Vegetation Index (AGVI)*
- 7) *Transformed Vegetation Index (TVI)*
- 8) *Diferend Vegetation Index (DVI)*
- 9) *Normalized Difference Greenness Index (NDGI)*
- 10) *Redness Index (RI)*
- 11) *Normalized Difference Index (NDI)*
- 12) *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*
- 13) *Perpendicular Vegetation Index (PVI)*
- 14) *Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)*
- 15) *Transformed SAVI (TSAVI)*
- 16) *Modified SAVI (MSAVI)*
- 17) *Weighted Difference Vegetation Index (WDVI)*

Razlikujemo sljedeće hiperspektralne vegetacijske indekse :

- 1) *Discrete-Band Normalised Difference Vegetation Index (DBNDVI)*
- 2) *Yellowness Index (YI)*
- 3) *Photochemical Reflectance Index (PRI)*
- 4) *Discrete-Band Normalised Difference Water Index (DBNDWI)*
- 5) *Red Edge Position Determination (REPD)*
- 6) *Crop Chlorophyll Content Prediction (CCCP)*
- 7) *Moment Distance Index (MDI)*

Iz razloga opširnosti pojašnjavanja svakog vegetacijskog indeksa zasebno, izdvojiti ćemo nama interesantnije, koji se koriste u poljoprivredi za praćenje i nadzor usjeva te ih prikazati na primjerima uporabe u poljoprivrednoj praksi. Kako navode Bannari i sur. (1995.) vegetacijski indeksi prošli su dvije razvojne faze:

- 1) Temelji se na jedinicama linearnih kombinacija, gdje su korišteni razlika, zbroj ili omjeri sirovih spektralnih pojaseva, a da pri tome nisu uzimani u obzir drugi vanjski čimbenici te interakcija između vegetacije i tla nije uzeta.
- 2) Konceptualna druga faza razvoja temelji se na poznavanju fizikalnih pojava koje objašnjavaju međusobni odnos između elektromagnetskog zračenja, atmosfere, vegetacijskog pokrova i tla kao podloge. Ova faza još predstavlja polaznu točku za stjecanje znanja i korištenje metoda daljinskih istraživanja i drugih srodnih disciplina.

Za pronalaženje idealnog indeksa u praksi potrebno je odrediti čimbenike i njihovu razinu utjecaja na pojedine vegetacijske indekse, tako se navodi sljedeće pravilo za odabir idealnog vegetacijskog indeksa koje glasi: indeks treba biti djelomično osjetljiv na vegetacijski pokrov, neosjetljiv na svjetlinu tla i boju tla, na njega što manji utjecaj treba imati atmosfera, okolišni utjecaj i solarna svjetlosna geometrija te uvjeti vidljivosti korištenog senzora (Jackson i sur. prema Bannari i sur., 1995).

6.2.1. NDVI vegetacijski indeks

Normalizirani indeks razlike u vegetaciji (engl. *Normalized Difference Vegetation Index, NDVI*) je jedan od najkorištenijih vegetacijskih indeksa za praćenje i procjenu stanja vegetacije odnosno pokazatelj fotosintetske aktivnosti. Ovaj indeks se definira sljedećim izrazom:

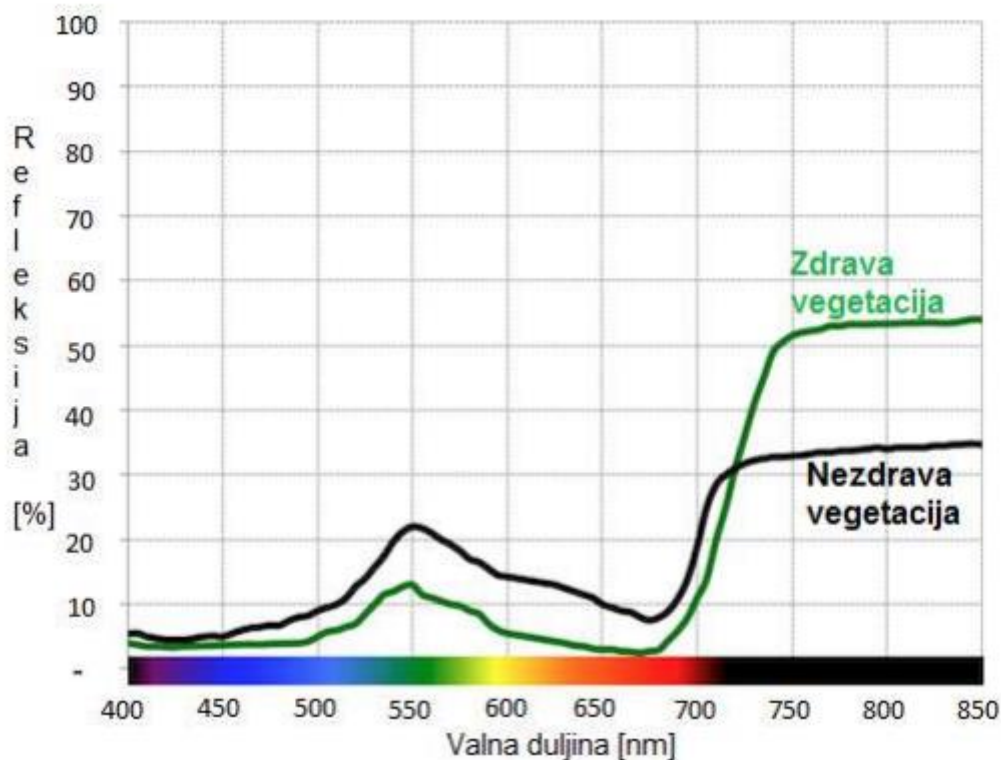
$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

gdje simboli R i NIR predstavljaju prosječnu refleksiju od površine u vidljivom crvenom (R) i bliskom infracrvenom (NIR) području elektromagnetskog spektra. Područje vidljivog dijela spektra ima približno valnu duljinu od 0,6 μm , dok bliski infracrveni pojas ima približno 0,8 μm . NDVI je u korelaciji s određenim bio-fizičkim svojstvima vegetacije, kao što su površina lisne mase, frakcijskog pokrova vegetacije, stanja vegetacije i biomase. Na površinama s

gustom vegetacijom NDVI indeks reagira prvenstveno na crvenu refleksiju, a relativno je neosjetljiv na varijacije bliskih infracrvenih reflektiranih zraka (Jiang i sur., 2006.).

Paton (2020.) navodi kako NDVI predstavlja razliku između bliske infracrvene (NIR) i crvene (R) boje zračenja koju emitira vegetacija podijeljene s njihovom sumom. Također, navodi se dalje kako je Rouse 1973. godine izradio ovaj indeks na bazi spektralnih svojstava klorofila. Molekule klorofila predstavljaju apsorpcijski maksimum u plavom (B) pojasu (431 nm i 453 nm) i crvenom (R) pojasu (667 nm i 642 nm), a minimumi apsorpcije u zelenom (G) i bliskom infracrvenom (NIR) pojasu. Nadalje, prednost ovog indeksa očituje se u neovisnosti o topografiji odnosno kutevima pojave reflektiranog zračenja, iako su se drugi indeksi pokazali učinkovitijim, NDVI je i dalje najkorišteniji indeks fotosintetske aktivnosti u ekologiji. Iz razloga kao što su: laka uporaba, rano povijesno podrijetlo, dobra diskriminacija između vegetacije (0-1) i zemljanih površina (-1-0) ovaj vegetacijski indeks zadržao je vrlo veliku popularnost, tako je njegova primjena široka u različitim istraživačkim područjima od područja vezanih uz biljke kao proizvodna biomase, sadržaj dušika, fiksacija dušika, stope evapotranspiracije, kvantifikacija fenološkog stanja biljke, starenje vegetacije i vodni stres biljaka do praćenja degradacije zemljišta, analiziranje požara i slično. Osim navedenih mogućnosti korištenja NDVI vegetacijskih indeksa on se također koristi u ekologiji za karakterizaciju vrsta ili analizu intenziteta ispaše morskih i kopnenih organizama. Vrlo je važno prilikom uporabe NDVI indeksa da se u obradi koriste fotografije promatranog područja visoke rezolucije iz razloga detekcije vegetacije u odnosu na okolinu (Paton, 2020.).

Svi vegetacijski indeksi pa tako i NDVI temelje se na činjenici da različite površine reflektiraju različite tipove svjetla na drugačiji način, iz toga razloga potrebno je poznavati neke od osnovnih pojmova tih pojava. Refleksija koja se često spominje zapravo predstavlja omjer energije reflektirane od nekog objekta prema apsorbiranoj energiji. Nadalje, biljke slabije reflektiraju plavi i crveni spektar elektromagnetskog zračenja, zato što ga apsorbira klorofil biljaka, dok refleksija zelenog dijela spektra je nešto veća te su biljke nama vidljive kao zelene. Bliska infracrvena svjetlost se jako reflektira od površine biljaka te kao takva ovisi o svojstvima listova (Gabela i sur. 2016.).

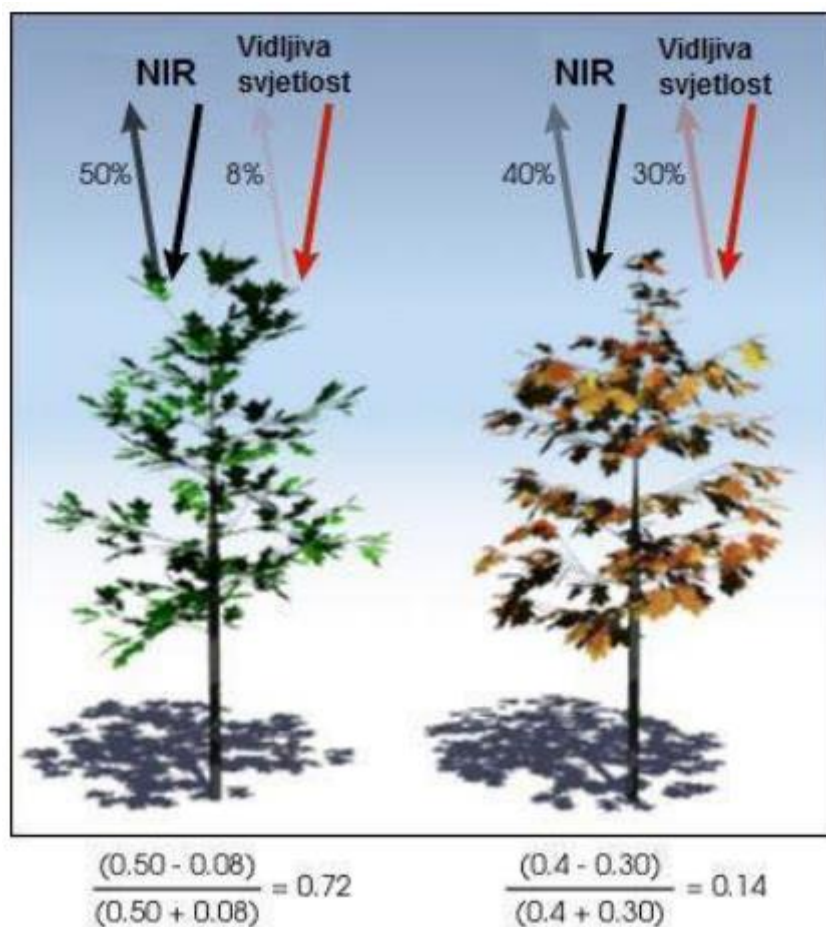


Slika 26. Reflektivnost elektromagnetskog zračenja biljaka

Izvor: Gabela i sur., 2016.

Na slici 26. možemo vidjeti reflektivnost vidljive svjetlosti i bliskog infracrvenog zračenja (NIR), a uočavamo da plavo i crveno zračenje slabije se reflektira od zelenog i bliskog infracrvenog zračenja. Također valne duljine plavog spektra imaju raspon od 410 nm do 490 nm, a raspon valnih duljina zelenog spektra kreće se od 510 nm do 590 nm, dok se crveni spektar nalazi u rasponu od 610 nm do 690 nm te bliski infracrveni s najdužim valnim duljinama od 800 nm do 900 nm. Nadalje, fotosintetski aktivna vegetacije apsorbira većinu crvene svjetlosti koja dospije do nje, dok većinu bliske infracrvene svjetlosti (NIR) reflektira. Nezdrava vegetacija ili osušena reflektira više crvene svjetlosti i manje bliske infracrvene svjetlosti, dok površine bez vegetacije imaju još veću refleksiju kroz cijeli elektromagnetski spektar (Gabela i sur., 2016).

Kao što je ranije prikazano pomoću izraza, tradicionalni NDVI se izračunava kao omjer refleksivnosti crvenog i bliskog infracrvenog spektralnog kanala fotografije promatranog područja, te je u takvom obliku ujedno i najčešći. Izračun NDVI vegetacijskog indeksa obavlja se za svaki piksel (najmanji element digitalne fotografije) fotografije pojedinačno. Tako u izrazu se uzima vrijednost bliskog infracrvenog kanala za jedan piksel slike te za taj isti piksel vrijednost crvenog spektralnog kanala iste fotografije. Naravno, da bi se mogao provesti ovaj izračun potrebno je fotografiju izraditi pomoću senzora koji uz fokusirani crveni kanal ima mogućnost zapažanja i infracrvenog spektralnog kanala. Također, moguće je koristiti zeleni ili plavi spektralni kanal umjesto crvenog kanala uz bliski infracrveni kanal, ali u tom slučaju se ne radi o tradicionalnom NDVI-a, nego o BNDVI (engl. *Blue Normalized Difference Vegetation Index*) ili GNDVI (engl. *Green Normalized Difference Vegetation Index*) koji se računaju jednakim matematičkim izrazom (Gabela i sur., 2016).



Slika 27. Primjer izračuna NDVI indeksa

Izvor Gabela i sur., 2016.

Nakon obavljenog izračuna, prema ranije navedenom izrazu dobiva se rezultat koji je zapravo nova digitalna fotografija čiji su vrijednosti piksela zapravo vrijednosti NDVI vegetacijskog indeksa. NDVI vrijednosti se mogu kretati od -1 do +1 te je on bezdimenzionalna veličina, gdje njegova vrijednost manja od 0,1 ukazuje na sjenovito, pješčano, snježno područje ili vodenu površinu. Za promatranje vegetacije razmatra se područje od 0 do 1, gdje oskudna vegetacija kao što je grmlje, pašnjaci, stariji usjevi i slično imaju vrijednosti NDVI od 0,2 do 0,5, a visoke vrijednosti NDVI indeksa od 0,6 do 0,9 predstavljaju gustu vegetaciju npr. tropske šume, usjevi na vrhuncu razvoja i slično. Odnosno, veće vrijednosti NDVI-a predstavljaju veću razliku između crvenog i infracrvenog spektralnog kanala fotografije, što je povezano s jakom fotosintetskom aktivnošću vegetacije. Suprotno tome, ako je NDVI vrijednost mala, znači da je mala i razlika između crvenog i infracrvenog kanala fotografije. Što zapravo ukazuje na smanjenu fotosintetsku aktivnost vegetacije ili se radi o vodenim površinama i sličnim takvim površinama koje imaju malu refleksivnost bliske infracrvene svjetlosti. Tako Gabela i sur. (2016.) navode kako je jedan od glavnih razloga popularnosti NDVI vegetacijskog indeksa upravo mogućnost mnogih uređaja, senzora i instrumenata filtriranje bliskog infracrvenog te vidljivog spektra elektromagnetskog zračenja.

Govaerts i Verhulst (2010.) navode sljedeće faktore koji utječu na izmjerene vrijednosti NDVI indeksa:

- Rezolucija digitalne fotografije promatranog područja
- Atmosferski uvjeti
- Vlažnost tla
- Salinitet tla
- Pokrov tla
- Razlike u tipu tla
- Vlažnost vegetacije

te da NDVI nije direktna mjera pokrova tla, biomase, vlage u zemlji i sličnih stvari, već je mjera zelenila izračunata u omjeru infracrvene i crvene svjetlosti koja se reflektira od površine.

6.2.2. NDRE vegetacijski indeks

Normalizirani indeks razlike crvenog ruba (engl. *Normalized Difference Red Edge, NDRE*) je spektralni indeks koji je dobiven kombinacijom nekoliko spektralnih pojaseva. Bliski infracrveni spektralni pojas (NIR) i pojas koji koristi uski spektralni raspon između vidljivog crvenog (R) i NIR spektralnog područja. Nadalje, ovaj indeks je jako sličan ranije navedenom NDVI vegetacijskom indeksu, ali je razlika u tome da je NDRE vegetacijski indeks osjetljiviji od NDVI vegetacijskog indeksa u određenom razvojnom periodu usjeva. Tako je NDRE indeks pogodniji za usjeve srednjeg i kasnijeg razvojnog stadija, odnosno onda kada je u usjevu akumulirana veća količina klorofila iz razloga intenzivnijeg prikazivanja stanja vegetacije od NDVI indeksa. Točnije, NDRE koristi svjetlo crvenog ruba (engl. *red edge*) koje ima mogućnost prolaska kroz lisnu masu daleko dublje nego svjetlost crvenog vidljivog pojasa koje se koristi za izračunavanje NDVI vegetacijskog indeksa. Također, relevantniji je za korištenje tijekom cijele sezone, odnosno kompletnog razvojnog stadija usjeva jer ne podlježe zasićenju prilikom maksimalne akumulacije sadržaja klorofila od strane biljaka. (<https://eos.com/industries/agriculture/ndre/>)

Grujić i sur. (2017.) navode kako je NDRE vegetacijski indeks zapravo modifikacija NDVI vegetacijskog indeksa, gdje je crveni spektralni pojas (R) zamijenjen spektralnim pojasom ruba crvene svjetlosti (RE), koji je osjetljiviji na varijacije klorofila te se izračunava sljedećim izrazom:

$$NDRE = \frac{NIR - RE}{NIR + RE}$$

Također, Boiarskii i Hasegawa (2019.) navode kako osjetljivost senzora na pojas u području crvenog ruba (RE) valne duljine od 717 nm predstavlja faktor osjetljivosti na sadržaj klorofila u listovima promatranih biljaka, gustoći usjeva te pozadinskog utjecaja tla. Nadalje, isti autori navode da NDRE vegetacijski indeks ima mogućnost determinirati niske varijacije dušika u promatranom području usjeva te da je NDRE vegetacijski indeks vrlo pogodan za korištenje u završnim i srednjim razvojnim stadijima usjeva, kada je koncentracija klorofila u lišću usjeva visoka iz razloga bolje probojnosti svjetlosti crvenog ruba (RE) u gustom usjevu.

NDRE vegetacijski indeks je moguće koristiti zasebno za praćenje stanja usjeva u svim razvojnim stadijima, a također i u kombinaciji s NDVI vegetacijskim indeksom od sjetve do žetve usjeva. On nam daje potpunu sliku sadržaja klorofila u promatranim biljkama, koji je

zapravo glavni pokazatelj sadržaja dušika u usjevu te se tako koristi prilikom izrade aplikacijskih karata gnojidbe ili izravnom primjenom dobivenih podataka. Za primjer, NDRE fotografija se najčešće interpretira pomoću palete boja od crvene do zelene, gdje crvena područja predstavljaju golo tlo, žuta do svijetlo zelena predstavljaju ne zdrave biljke u usjevu, dok zelena predstavlja zdravu vegetaciju, kako se može zamijetiti na slici 27. (<https://eos.com/industries/agriculture/ndre/>)



Slika 28. Vizualna interpretacija NDRE vegetacijskog indeksa

Izvor: <https://eos.com/industries/agriculture/ndre/>

Već spomenuto da su NDVI i NDRE vrlo slični indeksi koji se mogu koristiti u istu svrhu tijekom različitih razvojnih stadija vegetacije nalaže sljedeće objašnjenje. Vidljivi spektar u crvenom području koji se koristi za izračun NDVI vegetacijskih indeksa se jako apsorbira od strane gornjih dijelova biljaka (listova), a to istovremeno znači da niži dijelovi biljke ne utječu značajno na dobiveni rezultat NDVI vegetacijskog indeksa, što dalje povlači za sobom činjenicu da se u tom slučaju javlja moguća netočnost mjerenje odnosno da se prikazuje zdravo stanje usjeva koje možda i nije tako. Ovaj problem je izraženiji kod biljaka čija je morfološka građa lisne mase izvedena po lisnim etažama, kao što su suncokret i kukuruz u kasnijim fazama razvoje te krošnje trajnih nasada. Tako uskoredni usjevi, trave i slične kulturne biljke u kasnijim fazama rasta, kada je sadržaj klorofila visok dovode do maksimalne vrijednosti NDVI indeksa 1.0 odnosno zasićenja, gdje postaje teško otkriti varijabilnost usjeva sve dok vrijednost ne

dostigne pad u područje ispod zasićenja NDVI indeksa, a to upravo može biti u točki kada se već pojavila šteta na promatranom usjevu. Jedno od rješenja ovakvih situacija upravo „leži“ u zamjeni crvenog spektralnog pojasa NDVI vegetacijskog indeksa sa spektralnim pojasom bliskog crvenog ruba, koji se koristi za izračun NDRE vegetacijskog indeksa. Nadalje, takvom zamjenom se dobivaju mjerena koje nisu ogleđ samo gornjih etaža lisne površine, već kompletne lisne površine promatranih biljaka. Nadalje, iz tog uočavamo da je NDRE indeks manje sklon zasićenju u gustom vegetaciji, što predstavlja mogućnost primjene u procjeni biomase pašnjaka. Tako NDRE indeks ponekad može pružiti bolje mjerenje varijabilnosti u području koje bi NDVI indeksom bilo izmjereno kao jednoliča +1.0 (<https://sentera.com/ndvi-vs-ndre-whats-difference/>).

6.2.3. NGRDI vegetacijski indeks

Normalizirani indeks razlike zelenog i crvenog (engl. *Normalized Green-Red Difference Index, NGRDI*) je vegetacijski indeks koji koristi pojase vidljivog dijela elektromagnetskog spektra za determinaciju vegetacije i njeno stanje (Beniach i sur. 2019.). Predstavlja vrlo koristan vegetacijski indeks iz razloga korištenja samo vidljivog dijela spektra, za razliku od prijašnje obrađenih vegetacijskih indeksa u radu. Upravo ta činjenica omogućuje daleko veću mogućnost primjene vegetacijskih indeksa u poljoprivredi za nadzor i upravljanje usjevima iz razloga manjeg ekonomskog ulaganja. Nadalje, takvi vegetacijski indeksi odnosno indeksi za čije se snimanje koriste RGB (engl. Red Green Blue) senzorne kamere omogućuju manjim poljoprivrednim gospodarstvima kvalitetniji način nadzora njihovih usjeva. RGB kamere su klasične komercijalno dostupne kamere s različitim prostornim rezolucijama, koje se danas nalaze na većini bespilotnih letjelica (dronova) te zajedno predstavljaju idealno rješenje za nadzor usjeva. NGRDI vegetacijski indeks izračunava se sljedećim izrazom:

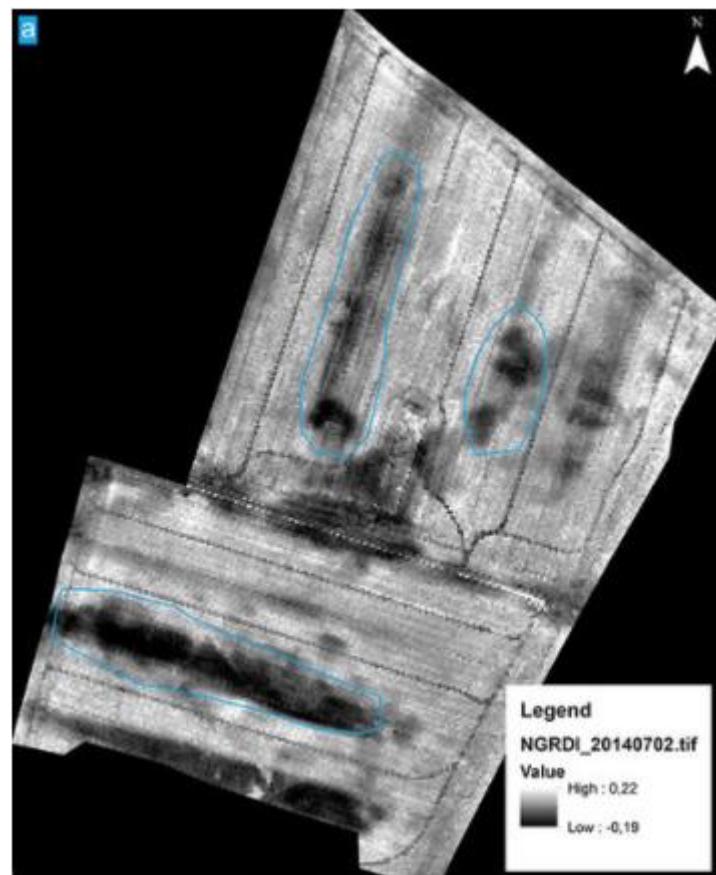
$$NGRDI = \frac{G - R}{G + R}$$

Gdje simbol „G“ predstavlja prosječnu refleksiju zelenog svijetla vidljivog dijela elektromagnetskog spektra, a R prosječnu refleksiju crvenog svijetla istog dijela spektra.

Lussem i sur. (2018.) navode kako se dronovi opremljeni s RGB kamerama mogu koristiti u poljoprivredne svrhe računalno dobivenih RGB vegetacijskih indeksa, a naročitu primjenu ovakvih indeksa vide u silažnim usjevima za procjenu suhe tvari iz razloga velike osjetljivosti

na vodu. Nadalje, Song i Park (2020.) navode kako NGRDI vegetacijski indeks upravo zbog visokih vrijednosti na vodenim površinama nije pogodan za korištenje u detekciji vodenog bilja.

NGRDI vegetacijski indeks dobiva se ranije spomenutim izrazom, a kao rezultat dobiva se fotografija u pravim bojama (engl. *True colour composite*). Tako se ovaj indeks koristi za fenološko praćenje usjeva s mogućnošću određivanja biomase, detekcije korova i praćenje statusa hranjivih sastojaka. Međutim, ovakvi vizualni indeksi ne primjenjuju se tako često kao indeksi koji koriste infracrveni spektralni pojas zbog razlike između korištenih pojasa, koja omogućuje veću preciznost procjene (Montoya, 2018.).



Slika 29. Prikaz vrijednosti NGRDI vegetacijskog indeksa u usjevu

Izvor: https://www.researchgate.net/figure/Imagery-and-indices-from-2-July-a-NGRDI-b-T-S-T-A-c-orthophoto-RGB-data-and_fig7_311652545

6.2.4. SAVI vegetacijski indeks

Indeks vegetacije prilagođen tlu (engl. *Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI*) je vegetacijski indeks koji je nastao kao pokušaj poboljšanja NDVI vegetacijskog indeksa iz razloga njegove nestabilnosti u ovisnosti o boji tla, vlagom u tlu te zasićenja kod guste vegetacije. Tako je SAVI vegetacijski indeks koji koristi iste spektralne pojase kao i NDVI, znači bliski infracrveni i crveni pojas, ali se u kalkulaciju uzima i faktor prilagodbe pozadine. Izraz kojim se izračunava SAVI indeks je sljedeći:

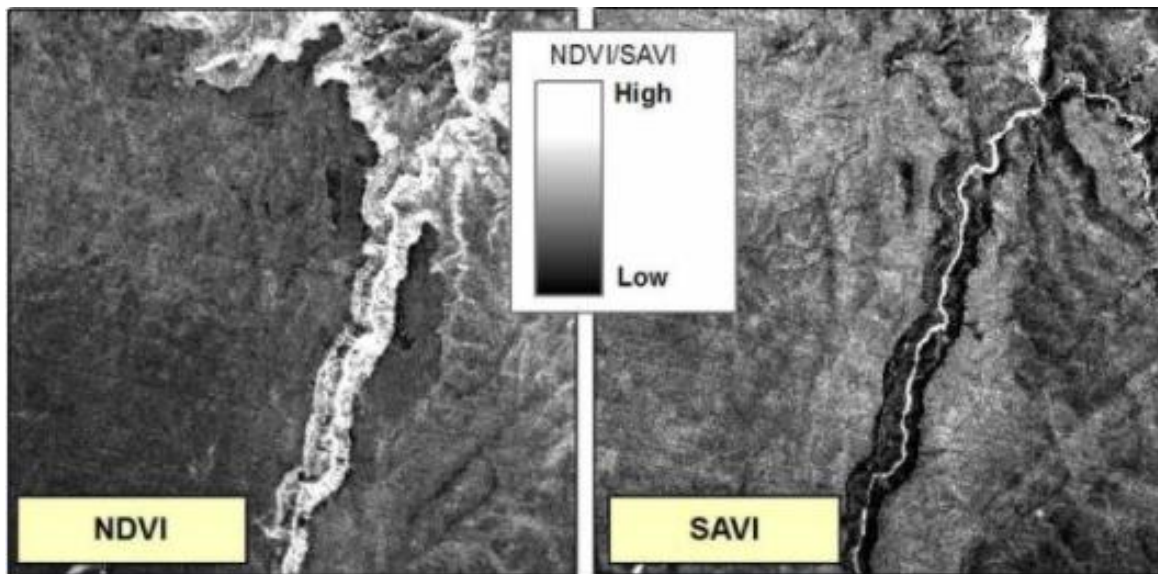
$$SAVI = \frac{(1 + L)(NIR - RED)}{(NIR + RED + L)}$$

Gdje je „L“ faktor prilagodbe pozadine, „NIR“ predstavlja prosječnu refleksiju bliskog infracrvenog spektra, a „RED“ prosječnu refleksiju crvenog dijela spektra. Također, utvrđeno je da vrijednost „L“ od 0,5 u prostoru refleksije smanjuje varijacije svjetline tla i uklanja potrebu za dodatnom kalibracijom prilikom promatranja u različitim tlima te je moguće skoro u potpunosti eliminirati varijaciju uzrokovanu utjecajem različitosti tla (Huete, 1988.).

Bannari i sur. (2009.) navode kako postoji kontradiktornost između NDVI i PVI indeksa (engl. *Perpendicular Vegetation Index*) koji uzima u obzir golo tlo, pa je tako SAVI indeks osmišljen kako bi napravio kompromis između indeksa omjera (NDVI) i ortogonalnih indeksa (PVI).

U slučajevima kada je vegetacijski pokrov rijedak, odnosno manji od 40% te je površina tla izložena, refleksija svjetlosti bliskog infracrvenog i crvenog spektra može utjecati na vrijednosti izmjerenih vegetacijskih indeksa. Nadalje, ova pojava postaje posebno problematična kada se uspoređuju različiti tipovi tla, koji mogu odražavati različite količine spomenutih svjetlosti, odnosno različiti tipovi tla imaju i različite spektralne karakteristike zbog svoje svjetline. SAVI indeks razvijen je kako bi se modificirao NDVI indeks na utjecaj svjetline tla kada je vegetativni pokrov nizak. Ranije navedena formula koristi faktor prilagodbe „L“, koji varira ovisno o količini ili gustoći vegetacije, tako na područjima s velikom količinom vegetacije vrijednost mu je 0, u području bez zelene vegetacije „L“=1. Nadalje, vrijednost faktora „L“ od 0,5 dobro funkcionira u većini situacija te je najčešće zadana vrijednost, a u slučaju kada je vrijednost faktor „L“ 0, tada se dobiva jednakost SAVI i NDVI vegetacijskog indeksa. Nadalje,

prilagođavanje utjecaja tla na izračun vegetacijskog indeksa ima negativan utjecaj na osjetljivost vegetacijskog indeksa, tako da je SAVI indeks općenito manje osjetljiv na promjene nastale u vegetaciji te je osjetljiviji na atmosferske utjecaje za razliku od NDVI vegetacijskog indeksa (https://wiki.landscapetoolbox.org/doku.php/remote_sensing_methods:soil-adjusted_vegetation_index).



Slika 30. Usporedba NDVI i SAVI indeksa u sivoj skali tonova

Izvor:

https://wiki.landscapetoolbox.org/lib/exe/detail.php/remote_sensing_methods:savi_ex.jpg?id=remote_sensing_methods%3Asoil-adjusted_vegetation_index

6.3. Utjecaj određenih čimbenika na kvalitetu izračuna vegetacijskih indeksa

Na sve vrijednosti koje se mjere u promjenjivim i nestabilnim okolinama djeluju nekakvi čimbenici koji imaju loš ili dobar utjecaj na rezultate, odnosno postoje približno idealni uvjeti koji omogućuju dobivanje stvarnog i reprezentativnog rezultata pa je takva situacija i prilikom snimanja vegetacijskih indeksa. Prilikom snimanja raznim multispektralnim i hiperspektralnim sensorima može doći do pogreške u rezultatu, koja će imati daljnji utjecaj u računalnoj obradi, gdje će se njen utjecaj povećavati i dovesti na kraju do loše procjene i upravljanja. Tako Bannari i sur. (2017.) navode kako na vegetacijske indekse direktan utjecaj imaju faktori kao što su: kalibracija korištenog senzora, utjecaj atmosfere, svjetlina tla, boja tla, razlike u spektralnim odazivima senzora, vidljivost, solarna geometrija, raspored lisne mase u usjevu i drugo.

Nadalje, čimbenike koje utječu na vegetacijske indekse moguće je podijeliti u dvije domene, na biološku i fizičku. Promatranjem vegetacije optička svojstva se razvijaju kroz vrijeme u odnosu na različite čimbenike koji karakteriziraju stanje promatrane vegetacije, kao što su starost, sadržaj vode, nedostatak minerala, bolesti, nametnici, geometrija pokrova, orijentacija redova i razmak, raspodjela lisnih etaža biljaka i slično. Takvi čimbenici utječu na refleksijska svojstva vegetacije, a na taj način na vegetacijske indekse. Osim ovih bioloških čimbenika, također se s fizikalnog aspekta treba uzeti u obzir utjecaj atmosfere, valne duljine svjetlosti, svojstva i vrste tla, svjetlina i boja tla, solarna geometrija, uvjeti vidljivosti senzora. Takvi čimbenici imaju direktan utjecaj koji se rješava razvojem vegetacijskih indeksa te drugim metodama (Bannari i sur., 2017.). Nadalje, u sljedećem dijelu poglavlja bit će ukratko opisani utjecaju pojedinih čimbenika na promatranje vegetacijskih indeksa.

1) Svjetlina tla

Različite svjetline tla imaju velik utjecaj na izračun vegetacijskih indeksa. Do različitosti u svjetlini tla osim zbog različite vrste tla dolazi zbog različite strukture, sadržaja vlage, boje tla, materijalnog sastava i drugo. Stoga se prilikom analize vegetacijskih indeksa pojavljuje smanjenje detaljnosti rezultata, a naročito kod vegetacijskih indeksa baziranih na omjerima bez kalibracije svjetline tla, kako je slučaj PVI indeksa. Jackson i Huete (1991.) navode kako će svjetlina tla imati utjecaj na vegetacijski indeks sve dok tlo nije u potpunosti prekriveno vegetacijom te da djelomično prikriveno tlo koje iz suhog prijeđe u vlažno i obrnuto, također utječe na procjenu vegetacijskog indeksa. Tlo vlaženjem postaje tamnije odnosno manje svjetline, što dovodi do izmjene promatranog piksela odnosno dijela

prostora, tako područja djelomično prekrivena vegetacijom pri vlažnom tlu imaju nižu korekcijsku vrijednost od suhog tla, dok pri promatranju s NDVI i RVI vegetacijskih omjera vlažnijih područja imaju povećane vrijednosti u odnosu na suhe. Tako ranije navedeni SAVI indeks posjeduje korekcijski faktor, čija vrijednost ovisi o gustoći vegetacije na promatranom području.

2) Boja tla

Promatranjem vegetacije koja se nalazi na nekom prostoru odnosno tlu pretpostavlja da se varijacije dobivene vegetacijskim indeksima isključivo odnose na vegetaciju, što nije točno. Tlo kao pozadina ima utjecaj na spektralnu refleksiju ovisno o svojoj spektralnoj karakteristici, kao objekta usputnog promatranja s utjecajem na sam rezultat. Prema Bannari i sur.(2017.) boja tla predstavlja smetnju, koja ometa otkrivanje vegetativnih pokrivača male gustoće i to zbog varijacije spektralnih svojstava tla, a ne zbog porasta gustoće vegetativnog pokrivača. Također, u područjima manje gustoće vegetacije te naročito u sušnim predjelima mora se uzeti u obzir boja tla kao utjecajan čimbenik. Kao jedno od rješenja ovoga problema navodi se korištenje vegetacijskih indeksa koji uključuju korekcijske faktore u izračun te pri tome koriste maksimalno zeleni elektromagnetski spektralni kanal. Ublažavanjem utjecaja ovog čimbenika omogućuje se povećanje osjetljivosti vegetacijskih indeksa, a naročito je to korisno kod otkrivanja stanja vegetacije pri njenoj smanjenoj gustoći.

3) Atmosfera

Prilikom prikupljanja podataka nekom od metoda daljinskih istraživanja svjetlost mora prevaliti određeni put kroz atmosferu. Na sama svojstva reflektivnosti direktan utjecaj ima atmosfera, jer prolaskom emitirane svjetlosti kroz atmosferu ona nailazi na razne čestice suspenzije koje mogu biti u krutom, tekućem ili plinovitom stanju te svojim svojstvima utječu na modifikaciju zračenja. Nadalje, različiti vremenski uvjeti prilikom satelitskog snimanja dovode do promjena u refleksijskim svojstvima promatranih objekata, što dovodi do različitih podataka za ista mjesta snimanja u istim vremenima, tako prilikom snimanja pri oblačnom danu dolaziti će do pojave zasjenjivanja, gdje će ta područja imati mračniju površinu koja će refleksijskim svojstvima biti vrlo blizu vodenim površinama i vegetaciji. Nadalje, na vrijednosti vegetacijskih indeksa utjecaj ima isparavanje vodene pare, što rezultira mutnoćom atmosfere koja ima utjecaj na apsorpciju različitih svjetlosnih zraka i njihovo daljnje ponašanje, a naročito crvenog spektralnog kanala. Smanjivanje utjecaja

atmosfera na točnost predviđanja vegetacijskog indeksa moguća je uz korekciju postojećih vegetacijskih indeksa i razvojem novih. Jedan takav indeks je ARVI (engl. *Atmosphere Resistance Vegetation Index*) koji koristi samokorekciju u crvenom spektralnom kanalu, koja se realizira putem razlike između plavog i crvenog kanala te se tvori novi spektralni kanal RB (engl. *Red-Blue*) te tako minimizira atmosferski utjecaj uzrokovan raspršenim aerosolima u crvenom kanalu. Osim ovog indeksa postoje mnogi drugi koji omogućuju smanjenje pojedinih utjecaja atmosfere na vegetacijske indekse (Bannari i sur., 2017.).

4) Kalibracija senzora

Jedan od važnih čimbenika na izračun vegetacijskih indeksa je pravilno odabran i postavljen optički senzor za prikupljanje prostornih informacija. Poznavanjem nastanka fotografije za korištenje u ove svrhe, znamo da se svaka takva fotografija može okarakterizirati pomoću spektralne, prostorne i radiometrijske razlučivosti. Tako spektralna razlučivost predstavlja mogućnost diskriminacije snimljenih objekata i njihovo prepoznavanje. Prostorna razlučivost nam omogućuje nastanak materijala za praćenje željenog područja, dok radiometrijska razlučivost definira utjecaj senzora na blještavilo. Svi senzori daljinskih istraživanja kalibriraju se prije njihovog korištenja te se prati njihov rad i obavlja ponovna kalibracija prema potrebi. Prilikom kalibracije svemirskih optičkih senzora moraju se uzeti u obzir čimbenici kao što su atmosfersko trenje i sunčeva zračenja, koja utječu na točnost snimanja. Također, kako bi se omogućio odnos između pravilnog odaziva senzora i informacije koju on promatra potrebno je obaviti radiometrijsku kalibraciju. Veliki izbor snimaka za izračun vegetacijskih indeksa od različitih satelita predstavlja prednost, ali i mogući nedostatak u nejednakim kalibracijskim parametrima, što treba imati na umu prilikom njihova korištenja (Bannari i sur., 2017.).

5) Solarna geometrija

Zrake solarne svjetlosti koje padaju na površinu djelomično prekrivenu vegetacijom odbijaju se od takve površine u ovisnosti o kutu upada i smjeru gledanja optičkog senzora. Tako se prilikom promatranja širokorednog usjeva u početnim fazama rasta, gdje su redovi usmjerenja sjever-jug može primijetiti da će tlo između redova biti zasjenjeno rano i kasno udanu, a osvijetljeno u podnevnim satima. Pa tako ako senzor promatra usjev okomito na površinu, refleksija crvene svjetlosti bi ujutro bila mala, a povećavala se prema popodnevju te ponovo smanjivala, dok se bliski infracrveni spektralni kanal ne bi mijenjao u tolikoj mjeri iz razloga refleksije svjetlosti od lisnu površinu i zasjenjeno tlo. Ovisno o korištenim

vegetacijskim indeksima utjecaj ovog čimbenika je veći ili manji, ali se treba voditi o njemu računa (Jackson i Huete, 1991.).

6) Spektralni odaziv senzora

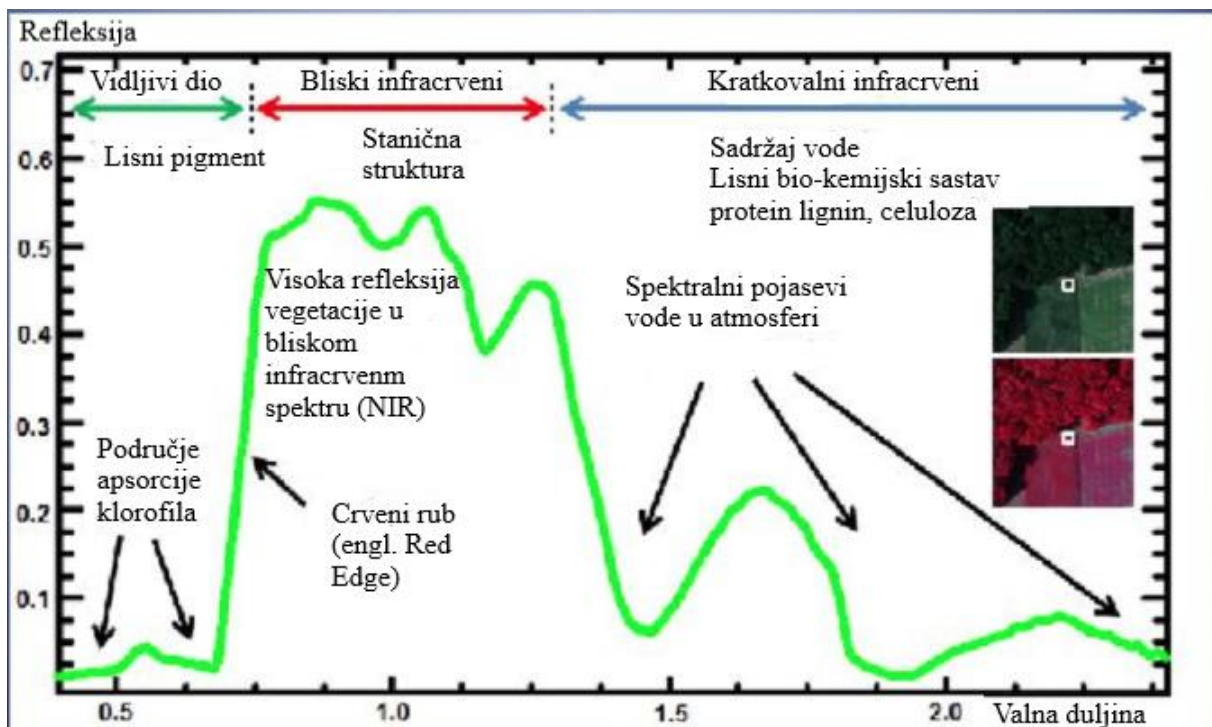
Svaki spektralni senzor ima svoju spektralnu karakteristiku, pa tako prilikom snimanja istog područja s različitim senzorima u istim spektralnim kanalima doći će do različitog rezultata, a razlog tomu je što svaki optički senzor ima drugačiju prostornu rezoluciju, položaj snimanja i primanja svjetlosti. Također, svaki senzor ima različite detektore i filtre za mjerenje reflektiranih svjetlosnih zraka u određenim intervalima valnih duljina, pa se tako spektralni odaziv za određeni spektralni kanal definira kao kombinacija detektoru ovisnom o valnoj duljini i odzivnom filtru navode Bannari i sur, (2017.).

5) Građa lisne površine biljaka

Promatranjem građe lisne površine na promatranom području može se doći do zaključka da različito usmjereni listovi biljaka različito reflektiraju pridošle elektromagnetske zrake. Nadalje, listovi koji su postavljeni kod biljaka horizontalno reflektirat će svjetlosno zračenje više za razliku od biljaka koje listove imaju postavljeno vertikalno, pa slijedi da se dobar dio zračenja „zarobljava“ unutar lisne mase. Jackson i Huete (1991.) u svom radu navode kako optički senzor okomito postavljen na usjev može primiti 20-30% više reflektiranog zračenja od biljke s formiranom horizontalno usmjerenom lisnom masom, za razliku od vertikalno usmjerenih biljaka.

7. Primjena vegetacijskih indeksa u sustavima gnojidbe

Vegetacijski indeksi predstavljaju vrijedan izvor informacija u poljoprivrednoj praksi. Razvojem podataka dobivenih daljinskim istraživanjima došlo je do sve veće mogućnosti primjene takve tehnologije u poljoprivredne svrhe, koja omogućuje nadzor i praćenje tla i vegetacije na velikim površinama. Nadalje, takav nadzor omogućuje praćenje prostorno varijabilnih zemljišnih jedinica na kojemu se temelji precizna poljoprivreda kao takva. Basso i sur. (2004.) navode kako je prednost vegetacijskih indeksa u povećanoj osjetljivosti u odnosu na zasebno korištene spektralne kanale pri promatranju te da vegetacijski indeksi snažno povezuju solarnu radijaciju s fotosintetskom aktivnošću promatranih biljaka, a također indiciraju bio-fizikalna svojstva povezana s produktivnošću i površinskim balansom energije.



Slika 31. Prikaz primarnih apsorpcijskih kanala i spektralne krivulje

Izvor: prema https://www.researchgate.net/figure/Spectral-reflectance-response-curve-of-a-healthy-green-leaf-The-Y-axis-is-the-value_fig1_304467575

Razlog visokog potencijala primjene podataka daljinskih istraživanja u poljoprivredne svrhe nalazi se u multispektralnim refleksijama i temperaturama vegetacije, koje povezuju dva vrlo važna procesa kod biljaka, a to su fotosinteza i evapotranspiracija. Pigment klorofila u biljkama apsorbira crveni i zeleni dio elektromagnetskog spektra, reflektira zeleni. Nadalje, bliski infracrveni dio elektromagnetskog spektra se reflektira na spužvastu i perforiranu strukturu mezofilnog tkiva unutar lista biljke pa je stoga postotak zračenja odbijenog od lista veći u NIR nego u zelenom elektromagnetskom pojasu. Korištenjem takvog spektralnog ponašanja možemo procijeniti vigor usjeva i razdvojiti tlo od vegetacije, a također možemo korištenjem NIR spektralnog kanala odrediti razvojno stanje i vrstu usjeva, zbog različitih spektralnih ponašanja tijekom promjene lista. Tako nam je omogućeno ocijeniti stres kod biljaka uzrokovan bolestima, štetnicima, nedostatkom dušičnog hraniva i slično (Basso i sur.,2004.). Nadalje, stručnjaci u području elektromagnetske refleksije mogu ocijeniti razna ponašanja vegetacije u odnosu na njihovo stanje te uz pomoć raznih drugih struka donijeti zaključak za pojedinu primjenu.

Iz prethodno iznesenog, možemo zaključiti da su vegetacijski indeksi podatci koji se mogu koristiti u razne svrhe u poljoprivrednoj praksi, tako pomoću njih možemo obavljati procjene potencijala usjeva, identifikaciju bolesti, štetnika i korova u usjevu, nadzor prostorno varijabilnih čimbenika, upravljanja navodnjavanjima i drugo, dok najzanimljivije za ovaj rad je primjena vegetacijskih indeksa u gnojdbene svrhe. Tako vegetacijske indekse u gnojdbi osim što koristimo za nadzor i donošenje odluka koristimo za izravne i neizravne procese upravljanja. Izravno upravljanje bi se odnosilo na primjenu podataka u realnom vremenu za varijabilnu raspodjelu hraniva, dok neizravna primjena podrazumijeva računalnu obradu podataka odnosno kartiranje te njihovo korištenje. U daljnjim poglavljima rada bit će prikazana uporaba vegetacijskih indeksa u gnojdbi te njihova usporedba.

7.1. Usporedba NDVI i NDRE vegetacijskih indeksa

Boiarskii i Hasegawa (2019.) su obavili istraživanje, gdje su uspoređivali NDVI i NDRE vegetacijske indekse u usjevima povrća i soje. Pri tome su koristili bespilotnu letjelicu odnosno dron kao nosač multispektralnog senzora. Dron koji je korišten posjedovao je navigacijski sustav kako bi se unaprijed mogla pripremiti trasa njegova kretanja odnosno stručno nazvana misija. Područje promatranja nalazi se u japanskom gradu Niigata te je veličine 15 ha. Za

daljinsko snimanje usjeva korištena je multispektralna kamera proizvođača *MicaSense*, koja ima mogućnost snimanja sljedećih pet -spektralnih pojasa: crveni (668 nm), zeleni (560 nm), plavi (475 nm), bliski infracrveni (840 nm) i crveni rub (717 nm). Prva tri nabrojana pojasa su standardni vidljivi dio elektromagnetskog spektra, a kao dodatni su ostala dva. Bliski infracrveni (NIR) spektralni kanal nalazi se u području iza crvenog kanala te je vrlo koristan za otkrivanje zdravstvenog stanja biljke, dok se spektralni kanal crvenog ruba (REDGE) nalazi između crvenog (RED) i bliskog infracrvenog (NIR) spektralnog kanala.

Dva spomenuta vegetacijska indeksa korištena su za praćenje aktivnosti vegetacije i sadržaja klorofila. Korištena bespilotna letjelica obavljala je snimanje na visini od 100 m pri brzini od 11 m/s, gdje joj je izrađena misija pomoću softvera. Dobiveni su pikseli veličine 6,28 cm pri uzdužnom preklapanju od 75% i poprečnom od 80%, gdje je na kraju dobiveno 1805 sirovih fotografija, odnosno 360 kompletnih fotografija. Visok postotak preklapanja koji je korišten u istraživanju rezultirao je preciznost i kvalitetu ulaznih podataka. Dobivene sirove fotografije obrađivane su računalnim softverom *Pix4Dmapper* kako bi se dobili stereo parovi uz pomoću fotogrametrijskih algoritama. Stereo parovi predstavljaju fotografiju s različitim geokoordinatama, koji se generiraju pomoću oblaka točaka u ortofoto plan. Istraživači su koristili *QGIS* softver za izračunavanje vegetacijskih indeksa, gdje su u sirove podatke unijeli formule za njihovo izračunavanje (Boiarskii i Hasegawa, 2019.).

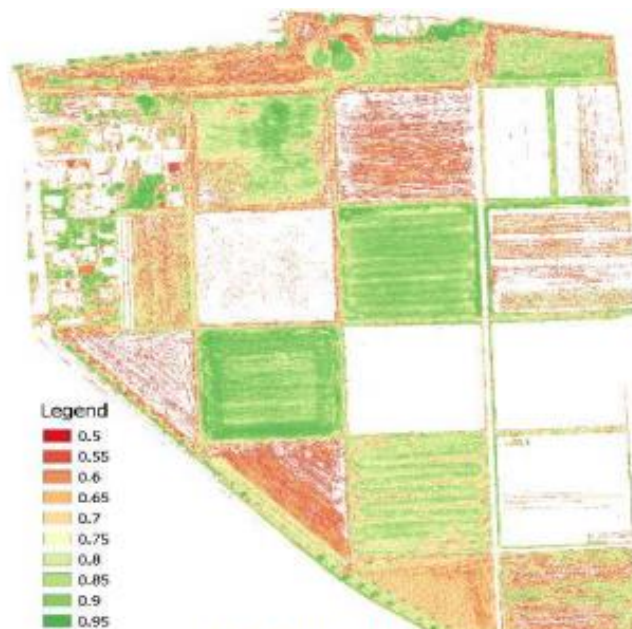
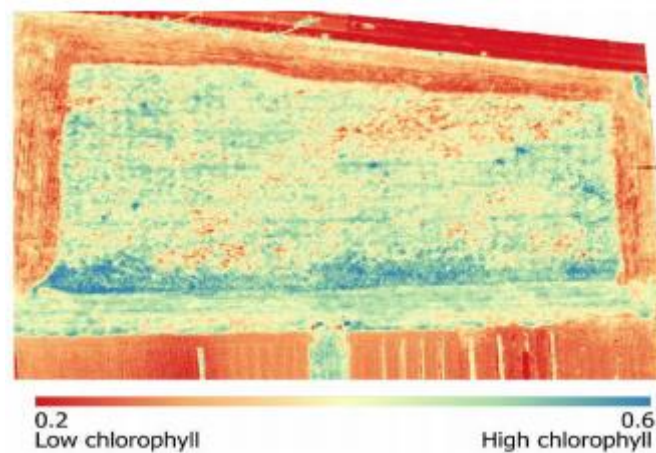


Fig. 6. NDVI layer

Slika 32. Prikaz NDVI rezultatnog sloja

Izvor: Boiarskii i Hasegawa (2019.)

Prilikom promatranja rezultata NDVI vegetacijskog indeksa istraživači su uočili jednolik raspored na mjestima u prisutnosti vegetacije te bez vidljivih depresija u usjevu. Zaključeno je da ovaj indeks najpogodniji za početni i srednji razvojni stadij usjeva iz razloga mjerenja refleksije NIR i crvenog spektralnog kanala koji se najčešće koriste za detekciju zelenila u aktivnom razvoju usjeva. Također, uočena je razlika između zelenosti usjeva i sadržaja klorofila, gdje je NDVI prikazivao zelenu boju gdje god se pojavila vegetacija s malom varijacijom. Iz toga razloga korišten je NDRE vegetacijski indeks koji sadrži spektralni kanal crvenog ruba (REDGE) umjesto NIR spektralnog kanala, koji je osjetljiviji pokazatelj sadržaja klorofila u lišću pri većoj gustoći lisne mase i utjecaja tla na refleksiju. Nadalje, pomoću NDRE-a moguće je vidjeti na kojem mjestu u usjevu je aplicirana manja količina dušičnog gnojiva. Tako je NDRE vegetacijski indeks prikladniji za korištenje u srednjem i završnom stadiju razvoja usjeva, gdje tada usjev ima akumuliranu veću količinu klorofila u svojoj lisnoj masi te gdje zrake crvenog dijela elektromagnetskog spektra imaju slabo prodiranje. Tako autori Boiarskii i Hasegawa (2019.) navode kako klorofil ima maksimalnu apsorpciju u crvenom spektralnog kanalu te upravo taj spektralni dio ne može proći kroz nekoliko slojeva lisne mase u kasnijim fazama razvoja biljaka, dok je spektralni kanal crvenog ruba (REDGE) prodorniji kroz slojeve lisne mase od crvenog i plavog spektralnog pojasa te predstavlja glavnu prednost u kasnijim fazama rasta.



Slika 33. Prikaz NDRE sloja promatranog usjeva

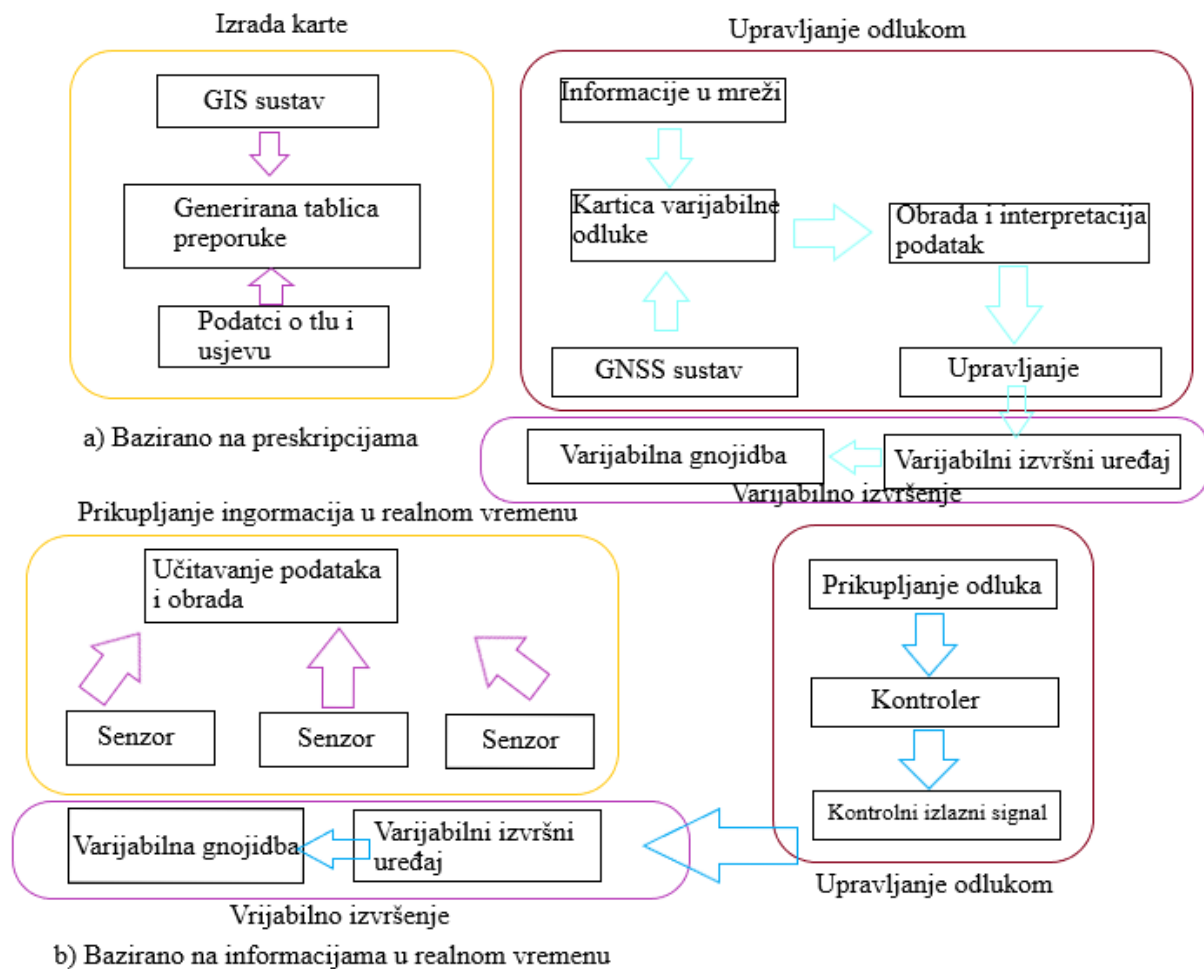
Izvor: Boiarskii i Hasegawa (2019.)

Na kraju je istraživanja zaključeno, da je NDVI vegetacijski indeks koristan u analizi gustoće usjeva na većim površinama te se pomoću njega može ocjenjivati zdravstveno stanje usjeva, efektivnost kultivacije i pravilnost sjetvenog sklopa. NDRE vegetacijski indeks je koristan za vizualizaciju sadržaja klorofila u lisnoj masi promatranog usjeva te omogućuje identifikaciju dijelova polja koji su imali nepravilnu primjenu gnojiva, a posebno dušika. Također, pomoću njega se može proračunavati preporuka za dodatnom dušičnom prihranom ili provjeriti korisnost kemijske analize tla. Na kraju bi se trebalo pridržavati pravila da se različiti vegetacijski indeksi trebaju koristiti ovisno o vrsti usjeva, njegovoj gustoći, sjetvenom sklopu i razvojnom stadiju (Boiarskii i Hasegawa, 2019.).

7.2. Uporaba vegetacijskih indeksa u varijabilnoj dopunskoj gnojidbi

Podatci o usjevima dobiveni daljinski prikupljenim informacijama, a zatim računalno obrađeni predstavljaju preduvjet za varijabilnu gnojidbu. Veoma je važno shvatiti povezanost između usjeva i njihovih potreba za gnojivom te se upravo iz toga razloga razvila tehnologija nazvana varijabilna gnojidba, koja omogućuje maksimiziranje prinosa s minimalnim gnojidbenim inputima odnosno omogućuje ostvarivanje optimalnog odnosa *input-output*. Shi i sur. (2020.) navode kako je varijabilna gnojidba ključna tehnologija i temelj precizne poljoprivrede, koja predstavlja novi i efektivniji način za „upoznavanje“ biljaka i njihovih potreba odnosno dolazi do promjena velikog i opsežnog pristupa upravljanja tradicionalnom gnojidbom. Također, istoimeni autori definiraju varijabilnu gnojidbu (engl. *VRT Variabl-Rate Technology*) kao tehnologiju koja je sastavljena od sljedeće tri tehnologije: daljinska istraživanja (engl. *remote sensing*), geografski informacijski sustav (GIS) i globalna navigacijska satelitska usluga (GNSS).

Tehnologija varijabilne gnojidbe može se raščlaniti u dvije osnovne forme (pristupa) koje su prikazane na slici 34., to su: forma bazirana na preskripcijama i forma prikupljanja parametara u realnom vremenu. Razlika između ove dvije forme varijabilne gnojidbe nalazi se u vremenskom razmaku između radnji upravljanja i prikupljanja korištenih informacija, odnosno varijabilna gnojidba u realnom vremenu omogućuje praćenje trenutnog stanja i potreba usjeva za hranivom u različitim fazama razvoja, što predstavlja smanjenje složenosti sustava.



Slika 34. Prikaz dvije osnovne forme varijabilne gnojidbe

Izvor: prema Shi i sur. (2020.)

Prilikom korištenja modela varijabilne gnojidbe pojavljuje se jedan važan čimbenik koji utječe na točnost izvođenja te vrste gnojidbe, a to je stabilan, reprezentativan i točan terenski podatak o stanju promatranog usjeva. Ovisnost te informacije u realnom vremenu bazirana je na odnosu bioloških karakteristika lisne mase biljaka, koje su direktno povezane s njihovom spektralnom refleksijom. Nadalje, različite spektralne karakteristike i parametri predstavljaju različitu povezanost s nutritivnim stanjem promatrane lisne mase pa tako ranije navedeni vegetacijski indeksi, koji pripadaju vegetacijskih indeksima omjera (engl. *Ratio Vegetation Index*, RVI) te LAI (engl. *Leaf Area Index*), SPAD i ostali indeksi omogućuju predviđanje potreba usjeva veoma dobro te se mogu koristiti u varijabilnoj gnojidbi baziranoj na parametrima prikupljenim u realnom vremenu. Jedna od glavnih uspješnica u razvoju varijabilne gnojidbe s parametrima prikupljenim u realnom vremenu svakako je razvoj daljinskih istraživanja i to točnije senzora

usjeva koji omogućuju prikupljanje informacija o nutritivnom stanju biljke u fazi rasta bez njezina oštećenja, velikom brzinom i pouzdanošću (Shi i sur., 2020.).

Sve veći razvoj računalne tehnologije i tehnologije daljinskih istraživanja doveo je do otvaranja novih mogućnosti u poljoprivrednoj praksi, a naročito u primjeni varijabilne gnojidbe. Tako se informacije o usjevu u realnom vremenu koriste u nadzornom sustavu koji je povezan sa sustavom za donošenje odluka, koji odlučuje količinu primjene gnojiva na određenoj lokaciji promatranja. Tako određenu informaciju koristi glavni kontroler koji putem aktuatora upravlja izvršnim uređajem i aplicira točno potrebnu količinu gnojiva na promatranom dijelu. Shi i sur. (2020.) navode kako postoje dva osnovna tipa nadzornih platformi za usjeve: zrakoplovni i prizemni tip, gdje se zrakoplovni tip dijeli na satelitski i zračne letjelice, a prizemni tip se dijeli na ručne nadzornike i nadzornike postavljene na vozila.

Postoji nekoliko glavnih faktora prema Shi i sur. (2020.) koje treba imati na umu pri nadzoru i korištenju varijabilne tehnologije gnojidbe, a to su:

1. Tehnologija nadzora je relativno limitirana iz razloga specijalnog promatranja određenih vrsta bilja i tipova tla, odnosno malo je istraživanja provedeno na neke od važnih usjeva kao što su grah, krumpir i drugi komercijalno važni usjevi.
2. Izmjereni biološki parametri jedinstveni su za određeni fenotip usjeva. Svaka tehnika promatranja ima svoje granice na koje utječu temperature, svjetlost i drugo, a neke tehnike daljinskih istraživanja mogu imati velike mjerene pogreške, što treba imati u vidu pri odlučivanju na osnovu tih mjerenja.
3. Prilikom korištenja trenutno dobivenih daljinskih informacija pojavljuje se izazov za brzu obradu takvih podataka, kako bi se mogli koristiti za proces upravljanja u realnom vremenu. Nadalje, naročito velike količine podataka dobivaju se hiperspektralnim i lidar sensorima, gdje obrada takvih setova podataka predstavlja limitirajući faktor za hardversku konfiguraciju.
4. Modeliranje dobivenih podataka o usjevima mora se obavljati zasebno, odnosno različiti usjevi i različite faze rasta izvode se zasebno, kao i kod utjecaja različitih utjecaja okoline uz to, što dovodi do usporavanja analize odlučivanja.
5. Skupoća komponenata sustava i mali stupanj specijalizacije za određenu primjenu. Sensori, kao što su radarski, hiperspektralni i drugi ostaju skupi, a ograničavajući faktor predstavlja komplicirana prilagodba, optimizacija i nadogradnja iz razloga malog stupnja specijalizacije.

7.2.1. Primjer provođenja varijabilne gnojidbe dušikom u usjevu ozime pšenice

Efektivna, profitabilna i ekološka metoda varijabilne gnojidbe na osnovi varijacije sadržaja dušičnog hraniva u tlu i odgovora usjeva predstavlja moćan alat za upravljanje usjevima na osnovu potreba prostornih jedinica. Korištenjem moderne tehnike, varijabilna gnojidba prema navodima Stamatiadis i sur. (2017.) u njihovom istraživanju dovela je do ekonomske uštede primjenom optimalne količine dušičnog gnojiva, gdje je u sezoni korišteno 72% manje gnojiva odnosno ukupno 38% (131 kg/ha) nego što je to bio slučaj u ranijoj aplikacija poljoprivrednika konvencionalnim načinom(212 kg/ha).

Istraživanje su proveli Stamatiadis i sur. (2017.) na poljoprivrednoj površini veličine 2.4 ha na području centralne Grčke. Obavljena je obrada tla na dubini od 15cm te su poljoprivrednici obavili osnovnu gnojidbu s normom 500 kg/ha gnojiva NPK formacije 20-10-10. Posijana je durum ozima pšenica s 270kg sjemena po hektaru u studenom. Promatrano polje bilo je podijeljeno u četiri bloka, nad kojima su provedena tri tretmana gnojidbe bez nekakvog reda. Provedena tri tretmana su se sastojala od aplikacije dušičnog gnojiva prije sjetve u normi od 100 kg/ha, tako da su poljoprivrednici aplicirali svoju normu od 112 kg/ha plus 100 kg/ha prije sjetve, a usporedna metoda varijabilne gnojidbe je bila izražena kao norma prije sjetve od 100 kg/ha plus varijabilni dio, a također je ostavljen i dio polja bez predsjetvene gnojidbe dušikom.



Slika 35. Prikaza komponenata varijabilnog sustava gnojidbe

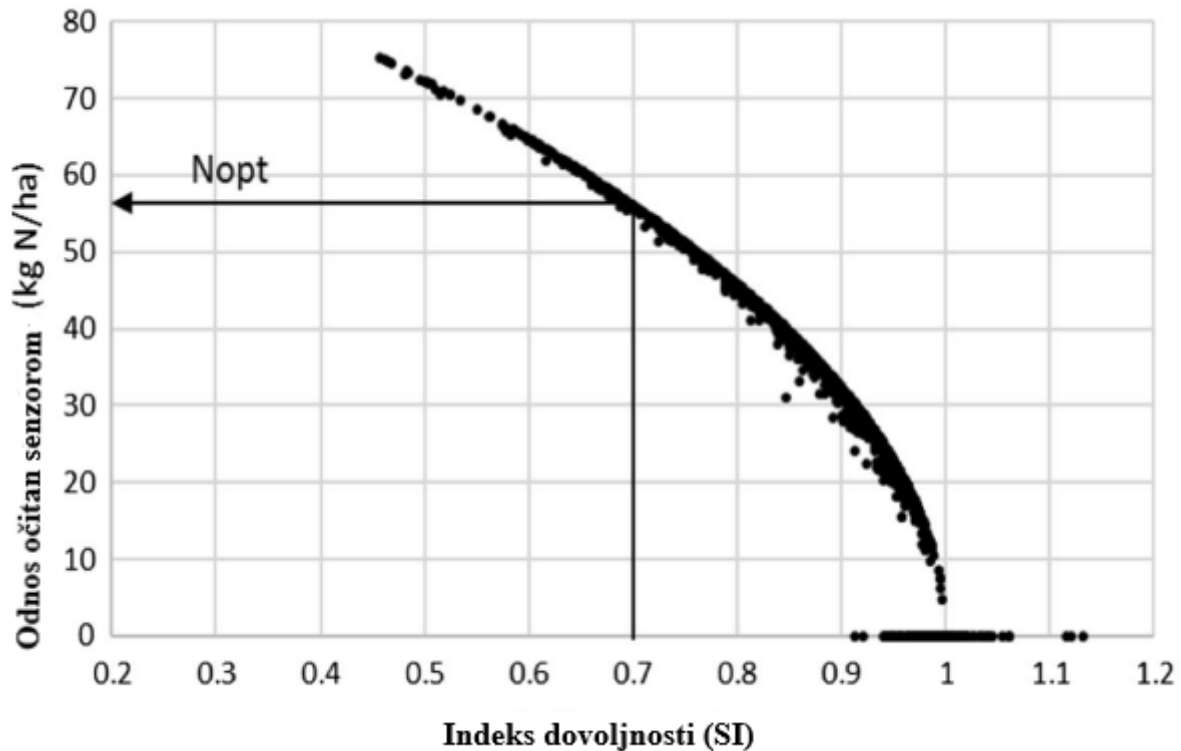
Izvor: Stamatiadis i sur. (2017.)

Iz priloženog na slici 34. može se vidjeti da se prototip sustava sastoji od dva aktivna senzora usjeva Crop Circle ACS-430 , GeoScoutX uređaja za zapisivanje podataka, kontrolera Raven SCS 660 i hidrauličnog motora Gandy Orbit Air 66FSC koji omogućuje promjenu količine izuzimanja gnojiva iz raspodjeljivača. Princip rada se temelji na tome da uređaj za zapisivanje podataka obrađuje prostorne podatka u realnom vremenu da bi mogao prenijeti signal o normi dušičnog gnojiva do kontrolera te dalje prema izvršnom hidrauličnom motoru na raspodjeljivaču. Glavni kontroler norme (Raven) u odnosu na brzinu kretanja traktorskog agregata zadržava varijabilnu normu putem magnetskog senzora na kotaču. Preporuke za raspodjelu količine dušičnog gnojiva napravljene su pri učestalosti snimanja od 1 Hz odnosno oko svakih 1,3 m pri kretanju agregata brzinom 4,3 km/h. Korišteni senzori bili su postavljeni ispred aplikacijskih uređaja na visini od 60 cm iznad lisne mase usjeva te su zapažali tri spektralna kanala: crveni (670 nm), crveni rub (730 nm), NIR (780 nm). Praćenje usjeva sensorima obavljano je pri frekvenciji od 40000 Hz, a pohranjivanje podataka na 10 Hz. Da bi se dobiveni podatci mogli pohraniti potrebno ih je georeferencirati pa je tako uređaj za zapisivanje podataka bio opremljen s unutarnjim GNSS prijemnikom te je tako obavljano pohranjivanje prostornih podataka dobivenih od senzora usjeva te je obavljeno preračunavanje njih u NDRE vegetacijski indeks. Pri uspostavi načina radu u sustavu varijabilne gnojidbe, zapisivač podataka konstantno preračunava normu aplikacije dušičnog gnojiva koja se bazira na razvijenom algoritmu proizvođača.

$$N_{APP} = (N_{opt}) \times \sqrt{\frac{(1 - SI)}{\Delta SI}}$$

Gdje je N_{APP} izračunata aplikacijska norma, N_{opt} predstavlja optimalnu normu u sezoni za postizanje skoro maksimalnog uroda, a u ovom slučaju 56 kg/ha. Simbol SI predstavlja indeks dostatnosti (*eng. sufficiency index*) odnosno $SI = NDRE$ vrijednost dobivena senzorom / NDRE referentnom vrijednosti. Simbol ΔSI predstavlja SI parametra razlike, koji je ovdje uzet 0,3. Prilikom proračuna N_{opt} se modificira u ovisnosti o vrsti tla zbog složenih procesa kao što su mineralizacija, imobilizacija, ispiranje i slično. Tako je N_{opt} zajedno s apliciranom količinom prije sjetve iznosili 156 kg/ha, što je ujedno i preporuka za tu regiju od strane Ministarstva poljoprivrede. Poljoprivrednici često premašuju dostatne količine gnojiva iz razloga smanjivanja mogućnosti stresa za biljke. Nadalje, kako bi se mogao izračunati koeficijent dostatnosti potrebno je odrediti vrijednost referentnog NDRE-a, a ona se određuje pomoću pristupa nazvanog „virtualna traka“. Takav pristup baziran je na tome da se senzorom usjeva

nadgleda dio odnosno jedna traka postojećeg usjeva koja predstavlja raspon vigora usjeva unutar polja te se statistički identificiraju biljke koje se smatraju ne ograničavajuće prema odabiru količine dušika odabirom kumulativne 95%-te vrijednosti histograma (Stamatiadis i sur., 2017.).

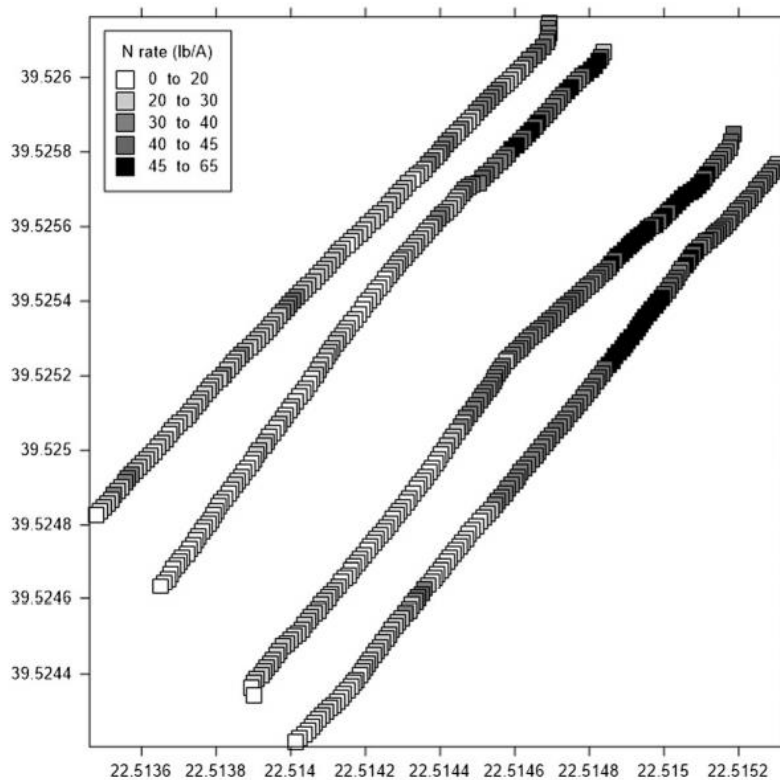


Slika 36. Histogram usporednog prikaza vrijednosti izmjernog NDRE indeksa i aplicirane vrijednosti dušičnog gnojiva na osnovi SI indeksa

Izvor: Stamatiadis i sur. (2017.)

Slika 36. prikazuje raspodjelu vrijednosti NDRE vegetacijskog indeksa izmjerene u usjevu koje se odnose na 95% referentne vrijednosti izračunate putem probnog mjerenja. Indeks dostatnosti (SI) predstavlja aplikacijsku normu, gdje je vrijednost SI indeksa od 0,7 jednaka vrijednosti N_{opt} u ovom slučaju 56 kg/ha.

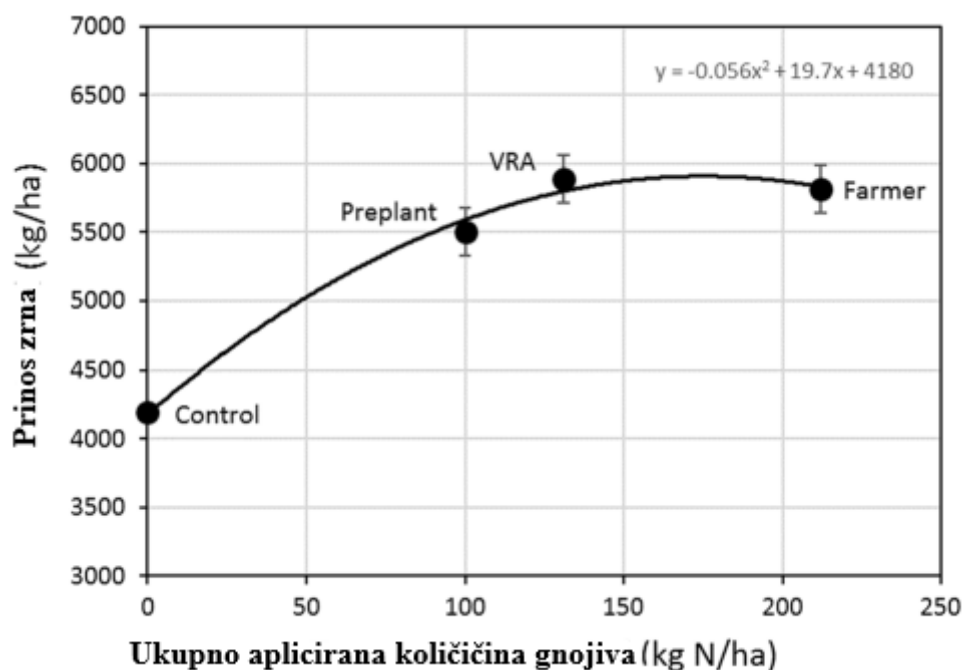
Istraživačka skupina prilikom žetve nije imala na raspolaganju sustav za nadzor ubranog usjeva s georeferenciranim točkama, pa su prinos prikazali po svakoj traci usjeva za razliku od dobivene karte prostorne varijabilne raspodjele dušičnog gnojiva po promatranim trakama.



Slika 37. Prikaz varijabilne prostorne raspodjele dušičnog gnojiva

Izvor: Stamatiadis i sur. (2017.)

Predstavljeno istraživanje na kraju je dovelo do zaključka kako se pri varijabilnoj gnojidbi koristi u 72% manje dušičnog gnojiva, odnosno ukupno 38% nego konvencionalnim aplikacijskim tretmanom i to bez gubitka prinosa. U područjima slabije ishranjenosti i produktivnosti biljaka varijabilnom gnojidbom aplicirala se veća količina gnojiva iz razloga velike povezanosti senzorom očitanih podataka i stvarnog stanja biljaka. Također, uočeno je kako je predstajvena gnojidba od strane poljoprivrednika bila pretjerana na nagnutim djelovima poljoprivredne površine. Pri uzetom u obzir čimbenicima o brzini mineralizacije i zaostajanju određene količine dušika dobivena je ekonomična vrijednost varijabilne gnojidbe, koja je povećala učinkovitost uporabe dušičnog gnojiva za 58% te poboljšanje za 6 odnosno 14% u odnosu na predstajvenu gnojidbu i konvencionalnu poljoprivrednikovu aplikaciju. Gledano s ekonomskog stajališta varijabilna gnojidba u ovom slučaju je donijela uštedu od 2,60 euro/ha te minimalne gubitke nastale ispiranjem dušika iz tla (Stamatiadis i sur., 2017.).



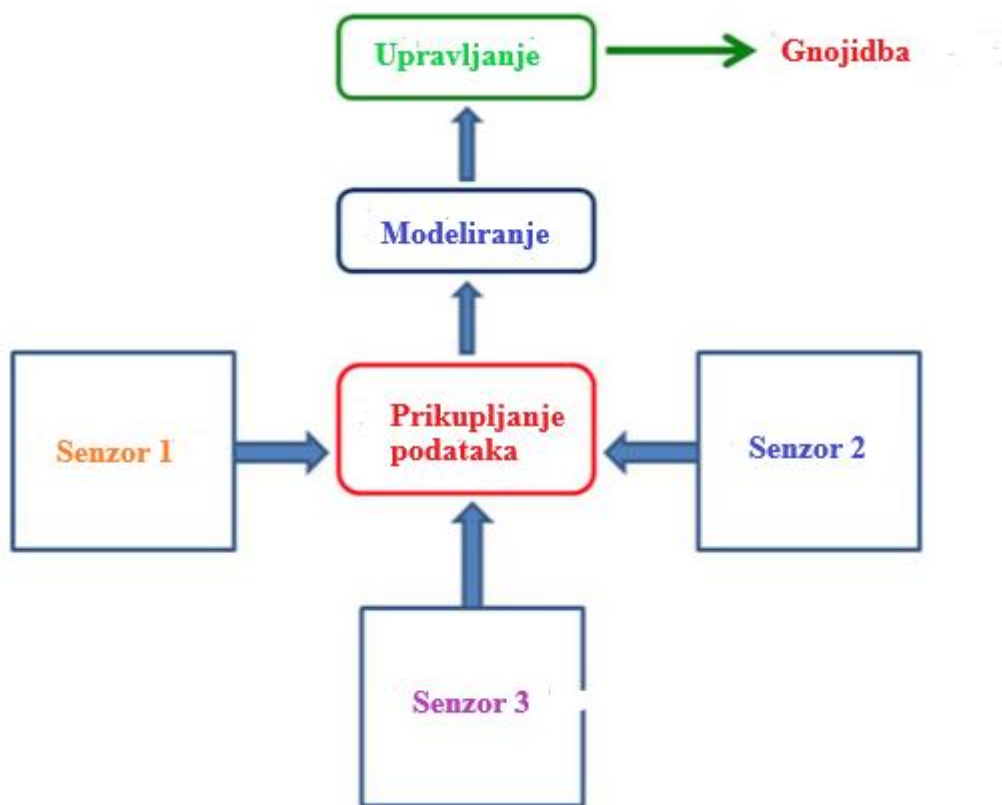
Slika 38. Prikaz krivulje odnosa ukupno aplicirane količine gnojiva i ostvarenog prinosa

Izvor: prema Stamatiadis i sur. (2017.)

7.3. Održivost primjene upravljanja precizne gnojidbe dušikom

Precizna varijabilna gnojidba predstavlja temelj precizne poljoprivrede, kao mogućnost smanjena primjene nepotrebnih količina gnojiva te njihovu maksimalnu iskoristivost od strane biljaka. Diacono i sur., (2015.) navode kako se korištenjem fiksne stope dušičnog gnojiva na cijeloj poljoprivrednoj čestici ne može postići niti ekonomska niti ekološka održivost te kako je zadaća precizne poljoprivrede upravo rješavanja problema pretjerane i pogrešne primjene gnojiva. Također, u citiranoj rečenici razumijevanje riječi pretjerane i pogrešne primjene predstavlja temelj za bilo kakvo upravljanje, gdje pretjerana gnojidba predstavlja ne samo preveliku količinu ukupnog apliciranog gnojiva, već prekomjerne količine gnojiva po biljkama, koje se ne mogu kvalitetno ili nikako iskoristiti. Pogrešna primjena gnojiva ne predstavlja samo krivo odabranu formulaciju ili normu apliciranja i slično, već nalaže potrebnost razumijevanja kemijsko-fizikalnih procesa, koji odlučuju o pristupačnosti i mogućnosti iskorištenja odabrane vrste gnojiva. Vrlo je važan čimbenik kod varijabilne, ali i drugih vrsta gnojidbi, učinkovitost upotrebe dušičnog gnojiva, što predstavlja potrebu za dobrom regulacijom procesa kao što su mineralizacija i imobilizacija mikroorganizama te isparavanje i hlapljenje. Glavna zadaća

precizne gnojidbe nalazi se u velikom broju korištenih informacija različitog učinka na istu stvar. Pa tako precizan pristup dušičnoj gnojidbi smanjuje gubitke dušičnog hraniva iz sustava zemlja-biljka, poboljšavajući efikasnost korištenja gnojiva uz povećanje prinosa i smanjenje štetnog utjecaja na okolinu navode Diacono i sur., (2015.).



Slika 39. Prikaz dobivanja i kretanja informacija u sustavu precizne gnojidbe

Izvor: prema Diacono i sur., (2015.)

8. Zaključak

Gnojidba predstavlja odgovornu i važnu agrotehničku mjeru, koja mora biti izvedena smišljeno, efikasno i u skladu s potrebama biljaka, a u istom slučaju uvažavajući ekološke i etičke norme promatranog područja. Nadalje, primjeni gnojiva treba pristupiti „ozbiljno“ uz uvažavanje i korištenje veće količine različitih informacija u istu svrhu pa se tako moglo uočiti u radu kolika je važnost dobivanja pouzdanih sirovih podataka, kao i njihova daljnja računalna obrada da bi se dobila krajnja, možemo ju nazvati uporabna informacija. Takve, upravljačke informacije postaju ključne u sustavima precizne gnojidbe te iz takvih razloga njihova važnost neupitno postaje dominantna. Tehnološki razvoj dovodi do razvoja sve sofisticiranijih i korisniku pristupačnijih programskih paketa upravo tog segmenta, obrade i primjene takvih preciznih informacija. Suvremena gnojidba oslanja se na uporabu agrarne informacijske tehnologije na sve višem stupnju, što predstavlja nagli razvojni korak u poljoprivrednoj praksi, koja sada nalaže potrebu stalnog učenja i usavršavanja korisničkih kadrova te ulaganje u nove tehnološke sustave. Nadalje, možemo uočiti kako daljnji razvoj gnojidbenih sustava u intenzivnoj proizvodnji ne ide u pravcu razmatranja novih gnojiva ili njihovom ukidanju, već se razmatra način apliciranja prema potrebama pojedine biljke u sklopu i maksimalna iskoristivost aplicirane količine u svrhu ostvarivanja optimalnog uroda i njegove kvalitete. Interpolacijske metode korištene u svrhu precizne gnojidbe imaju vrlo važnu ulogu u odlučivanju i uporabi uzorkovanih podataka, koji mogu biti uzorkovani laboratorijski kao tlo i biljka ili senzorski. Svaka od metode sadrži određenu razinu pogreške, ali poznavanjem njihovih mogućnosti i uporabne korisnosti potrebno je odabrati onu koja će omogućiti najpovoljniji krajnji rezultat, što iziskuje specijaliziran, stručan te iskusan kadar. Također, rečeno je u radu kako se sada svaka biljka u sjetvenom sklopu promatra zasebno, to omogućuje da svaka ta biljka ima idealne uvjete za rast iako oni nisu isti za svaku biljku. Promatranje biljaka različitim sensorima može se poistovjetiti s čovjekovim promatranjima biljaka, ali se pojavljuje velika razlika u konačnim rezultatima zapažanja i mogućnostima procesiranja velike količine reprezentativnih podataka. Dobiveni senzorski podatci korišteni u različitim omjerima odnosno vegetacijski indeksi predstavljaju temelj za promatranje nutritivnog i zdravstvenog stanja biljke, ali i stanja zakorovljenosti i štetnika usjeva. Može se reći kako visoka tehnika i tehnologija sustava suvremene gnojidbe predstavlja mogućnost napretka u ekološkom i ekonomskom smislu te zadržavanja održivosti.

9. Popis literatutre

1. Bannari, A. i sur. (1995.): A Review of Vegetation Indices. Remote Sensing Reviews, vol. 13, 95-120. Preuzeto: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02757259509532298>. 12.4.2021.
2. Barač, Ž. i sur. (2016.): Gnojidba poljoprivrednih površina primjenom GIS-a i načela elektrovodljivosti tla, Agronomski glasnik, 2-3/2016. Pristupljeno: <https://hrcak.srce.hr/175722> 6.2.2021.
3. Basso, B., Cammarano, D., De Vita, P. (2004.): Remotely sensed vegetation indices: Theory and Applications for Crop Management. Rivista Italiana di Agrometeorologia 1:36-53. Preuzeto: http://www.agrometeorologia.it/wp-content/uploads/2010/11/Basso2004_1.pdf. 13.4.2021.
4. Bažon, I. (2009): Važnost kemijskih ispitivanja tla i biljnog tkiva u uzgoju vinove loze, Agronomski fakultet, Zagreb
5. Beniaich, A., Silva, M.L.N, Avalos, F.A.P., de Menezes, M.D., Cândido, B.M. (2019.): Determination of vegetation cover index under different soil management systems of cover plants by using an unmanned aerial vehicle with an onboard digital photographic camera. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, vol 40(1), 49-66. Preuzeto: https://www.researchgate.net/publication/331134311_Determination_of_vegetation_cover_index_under_different_soil_management_systems_of_cover_plants_by_using_an_unmanned_aerial_vehicle_with_an_onboard_digital_photographic_camera. 13.4.2021.
6. Boiarskii, B., Hasegawa, H. (2019.): Comparison of NDVI and NDRE Indices to Detect Differences in Vegetation and Chlorophyll Content. International Conference on Applies Science, Technology and Engineering, Special Issue, 4:20-29. Preuzeto: https://www.researchgate.net/publication/337193427_Comparison_of_NDVI_and_NDRE_Indices_to_Detect_Differences_in_Vegetation_and_Chlorophyll_Content. 13.4.2021.
7. Claas- Precision farming, EASY- Efficient Agriculture Systems. <https://www.claas.co.uk/blueprint/servlet/blob/1655284/bff071e5cbfe11eb09d672adb3d933ab/320030-23-dataRaw.pdf>. 6.4.2021.
8. Corwin, L. D., i Lesch, S.M. (2005.): Characterizing soil spatial variability with apperent soil electrical conductivity: Survey protocols. Computers and Electronics in

- Agriculture, 46(1):103-133. Preuzeto: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169904001279> 15.2.2021.
9. Diacono, M., Rubino, P., Montemurro, F. (2015.): Precision nitrogen management of wheat. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33:219-241. Preuzeto: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-012-0111-z>. 3.5.2021.
 10. Elumalai, V., Brindha, K., Sithole, B., Lakshmanan, E. (2017.): Spatila interpolation methods and geostatistics for mapping groundwater contamination in a costal area. *Environ Sci Pollut Res*, 24:11601-11617. Preuzeto: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-017-8681-6> 2.3.2021.
 11. Gabela, J., Ivić, M., Jovanović, N. (2016.): Analiza vegetacijske aktivnosti pomoću NDVI metode upotrebom geostatističkih alata. Preuzeto: <https://apps.unizg.hr/rektorova-nagrada/javno/akademske-godine/2015/nagradeni-radovi>. 12.4.2021.
 12. Gagro, M., (1998.): *Industrijsko i krmno bilje*, Hrvatsko agronomsko društvo, Zagreb
 13. Gazdowski, D., Stepien, M., Samborski, S., Dobers, E.S., Szatyłowich, J., Chormanski, J. (2015.): Prediction accuracy of selected spatial interpolation methods for soil texture at farm field scale. *Journal of soil science and plant nutrition*, 15:239-650. Preuzeto: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-95162015000300008&lng=en&nrm=iso 2.4.2021.
 14. Govaerts, B., Verhulst, N. (2010.): The normalized difference vegetation index (NDVI) Greenseeker(TM) handheld sensor: toward the integrated evaluation of crop management part A: concepts and case studies. Preuzeto: <https://repository.cimmyt.org/handle/10883/550>. 13.4.2021.
 15. Grubeša, D. (2014.): *Metode uzorkovanja tla i biljaka*. Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR. Preuzeto: <https://repozitorij.fazos.hr/islandora/object/pfos%3A229/datastream/PDF/view> 23.2.2021.
 16. Grujić, N., Golubović, M., Jovanović, D. (2017.): The use of satellite images in the field of agriculture. *Researches Review DGTH*, 47(1), 11-22. Preuzeto: https://www.researchgate.net/publication/345470805_The_use_of_satellite_images_in_the_field_of_agriculture. 13.4.2021.
 17. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksigrafski zavod Miroslav Krleža. Pristupljeno: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=49396> 10.3.2021.

18. Huuskonen, J. i Oksanen, T. (2018.): Soil sampling with drones and augmented reality in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 154, 25-35. Preuzeto: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169918301650> 15.2.2021.
19. Isaria pro active. Preuzeto: <https://isaria-digitalfarming.com/en/>. 6.4.2021.
20. Jackson, R.D., Huete, A.R. (1991.): Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, 11: 185-200. Preuzeto: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167587705800042>. 13.4.2021.
21. Jiang, Z., Huete, A.R., Chen, J., Chen, Y., Li, J., Yan, Guangjian, Zhang, X. (2006.): Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote sensing of Environment*, 101:366-378. Preuzeto: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425706000290>. 13.4.2021.
22. Jurišić M., Plaščak I. (2009.): Geoinformacijski sustavi-GIS u poljoprivredi i zaštiti okoliša, Poljoprivredni fakultet Osijek, Osijek
23. Karydas, C.G., Gitas, I.Z., Koutsogiannaki, E., Lydakis-Simantiris, N., Silleos, G.N. (2009.): Evaluation of spatial interpolation techniques for mapping agricultural topsoil properties in Creta. *EARSeL e Proceedings*, 8:26-39. Preuzeto: https://www.researchgate.net/publication/234060912_Evaluation_of_spatial_interpolation_techniques_for_mapping_agricultural_topsoil_properties_in_Crete 20.3.2021.
24. Kaya, E. (2014.): Spline interpolation techniques. *Jurnal of technical science and technologies*, Vol 2, Issue 1. Pristupljeno: <https://jtst.ibsu.edu.ge/jms/index.php/jtst/article/view/56> 10.3.2021.
25. Kovačić, D. (2019.): Senzori i njihova primjena u preciznoj poljoprivredi. Repozitorij Fakulteta agrobiotehničkih znanosti Osijek. Preuzeto: https://www.researchgate.net/publication/347050409_Introduction_to_sensors. 5.4.2021.
26. Li, J. i Heap, A.D. (2008.): A review of spatial interpolation methods for enviromental scientists. *Geoscience Australia*, Canaberra
27. Lončar A., (2019.): Primjena GIS-a i metode izrade karte hraniva i N-senzori pri gnojdbi. Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR. Preuzeto: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/pfos:2037> 22.2.2021.

28. Lončarić, Z., Karalić, K. (2015.): Mineralna gnojiva i gnojidba ratarskih usjeva. Poljoprivredni fakultet u Osijeku, Osijek
29. Lukadinović, M. (2020.): Analiza vegetacijskih indeksa za kartiranje u preciznoj gnojidbi, Preuzeto: <https://repositorij.fazos.hr/islandora/object/pfos:2427>. 12.4.2021.
30. Lussem, U., Bolten, A., Gnyp, M.L., Jasper, J., Bareth, G. (2018.): Evaluation of RGB-based vegetation indices from UAV imagery to estimate forage yield in grassland. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 62(3), 1215-1219. Preuzeto: https://www.researchgate.net/publication/324864762_EVALUATION_OF_RGB-BASED_VEGETATION_INDICES_FROM_UAV_IMAGERY_TO_ESTIMATE_FORAGE_YIELD_IN_GRASSLAND. 13.4.2021.
31. Majić, I. (2016.): Detekcija urbane vegetacije snimanjem georeferenciranog videozapisa modificiranom GoPro kamerom. Preuzeto: <https://apps.unizg.hr/ректорова-nagrada/javno/stari-radovi/3925/preuzmi>. 12.4.2021.
32. Malvić, T. (2005.): Kriging. Geostatistička interpolacijska metoda, 2. Izdanje. Autorska naklada, Hrvatsko geološko društvo. Preuzeto: <http://geologija.hr/pdf/geomat/Kriging.pdf> 27.3.2021.
33. McDonald, A.J., Gemell, F.M., Lewis, P.E. (1998.): Investigation of the Utility of Spectral Vegetation Indices for Determining Information on Coniferous Forests. Remote sensing of Environment, 66:250-272. Preuzeto: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425798000571>, 12.4.2021.
34. Medved, I., Pribičević B., Medak, D., Kuzmanić, I. (2010.): Usporedba metoda interpolacije betimetrijskih mjerenja za prećenje promjena volumena jezera. Geodetski list, 2:71-86. Preuzeto: <https://hrcak.srce.hr/57672> 2.3.2021.
35. Mikulčić, I. (2016.): Osnove geostatistike i njena primjena. Sveučilište Sjever, Digitalni repozitorij Sveučilišta Sjever, Varždin. Preuzeto: https://www.researchgate.net/publication/234060912_Evaluation_of_spatial_interpolation_techniques_for_mapping_agricultural_topsoil_properties_in_Crete. 23.3.2021.
36. Montoya, S.: Vegetation and Biomass Indices Estimation with QGIS 3 - Tutorial (2.8.2018.) <https://www.hatarilabs.com/ih-en/vegetation-and-biomass-indices-estimation-with-qgis-3-tutorial>. Pristupljeno: 13.4.2021.
37. Normalized difference rededge. Earth observing system. Preuzeto: <https://eos.com/industries/agriculture/ndre/>. 13.4.2021.

38. Papadopulus, A., Kalivas, D., Hatzichristos, T. (2015.): GIS modelling for site-specific nitrogen fertilization towards soil sustainability. *Sustainability*, 7/6684-6705. Preuzeto: <https://www.mdpi.com/2071-1050/7/6/6684> 26.2.2021., 10.4.2021.
39. Patel, B.C., Sinha, G.R., Goe, N. (2020.): Introduction to sensors, *Advanced in modern sensors* IOP Science. Preuzeto: <https://www.researchgate.net/publication/347050409> Introduction to sensors 5.4.2021.
40. Paton, D. (2020.): Normalized Difference Vegetation Index Determination in Urban Areas by Full-Spectrum Photography. *Ecologies*, 1:22-35. Preuzeto: <https://www.mdpi.com/2673-4133/1/1/4>. 13.4.2021.
41. Robinson, T.P., Metternicht, G. (2005.): Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Computers and electronics in agriculture*, 50:97-108. Preuzeto: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169905001523> 12.3.2021.
42. Sabo, F., Pavlović, S., Popović, D. (2014): Veza između vegetacijskih indeksa i detekcije šuma na osnovi landsat 5 snimki. *Ekscentar*, br.17, 58-61. Preuzeto: <https://hrcak.srce.hr/file/185340>. 12.4.2021.
43. Shi, Y., Zhu, Y., Wang, X., Sun, X., Ding Y., Cao, W. Hu, Z. (2020.): Progress and development on biological information of crop phenotype research applied to real-time variable-rate fertilization. Shi et al. *Plant Methods*, vol.16(11), 1-15. Preuzeto: <https://plantmethods.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13007-020-0559-9>. 13.4.2021.
44. Song, B., Park, K. (2020.): Detection of Aquatic Plants Using Multispectral UAV Imagery and Vegetation Index. *Remote Sensing*, vol.12(387), 1-16. Preuzeto: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/3/387>. 13.4.2021.
45. Stamatiadis, S., Schepers, J.S., Evangelus, E., Tsadilas, C., Glampedakis, A., Glampedakis, M., Derecas, N., Spyropoulos, N., Dalezios, N.R., Eskridge, K. (2017.): Variable-rate nitrogen fertilization of winter wheat under high spatial resolution. *Precision Agric* 19:570-587. Preuzeto: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-017-9540-7>. 13.4.2021.
46. Stracenski S., (2015): Automatsko vođenje poljoprivrednih strojeva te gnojidba šećerne repe u sustavu precizne poljoprivrede. Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR. Preuzeto: <https://www.bib.irb.hr/797110> 22.2.2021.

47. Šiljeg, A., Lozić, S., Roland, V. (2013.): Usporedba metoda interpolacije u izradi digitalnog modela reljefa – primjer PP Vransko jezero. Preuzeto: <https://pdfslide.tips/documents/usporedba-metoda-interpolacije-u-izradi-digitalnog-modela-reljefa-primjer.html> 23.3.2021.
48. Šiljeg, A., Lozić, S., Šiljeg S. (2013.): The accuracy of deterministic models of interpolation in the process of generating a digital terrain model- the example of the vrana lake nature park. Tehnički vjesnik 22, 4:853-863. Preuzeto: https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=211034 6.3.2021.
49. The Landscape Toolbox. Soil-adjusted Vegetation Index. https://wiki.landscapetoolbox.org/doku.php/remote_sensing_methods:soil-adjusted_vegetation_index. Preuzeto: 13.4.2021.
50. Toit, W. (2008.): Radial basis function interpolation. Department of mathematical sciences, University of Stellenbosch, South Africa. Preuzeto: <https://core.ac.uk/download/pdf/37320748.pdf> 12.3.2021.
51. Vukadinović, V., (2016.): Učinkovitost i ekonomičnost gnojidbe. Preuzeto: <http://www.fazos.unios.hr/upload/documents/Pravilnik%20o%20završnim%20i%20diplomskim%20radovima.pdf>, 15.1.2021.
52. Vukadinović, V., Bertić B. (2013.): Filozofija gnojidbe-Sve što treba znati o gnojidbi, Autorska naklada, Osijek
53. Vukadinović, V., Vukadinović V. (2014.): Osnovno o gnojivima i gnojidbi. Preuzeto: http://ishranabilja.com.hr/literatura/ishrana_bilja/Osnovno_o_gnojivima_i_gnojidbi.pdf, 20.1.2021.
54. Walworth, J. (2006.): Soil sampling and analysis. College of agriculture and life sciences, University of Arizona, Tucson. Preuzeto: <https://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1412.pdf> 20.2.2021.
55. Xiao, Y., Gu, X., Shiyang, Y., Shao, J., Cui, Y., Zhang, Q., Niu, Y. (2016.): Geostatistical interpolation model selection based on Arc GIS and spatio-temporal variability analysis of groundwater level in piedmont plains, northwest China. SpringerPlus, 5:425. Preuzeto: <https://springerplus.springeropen.com/articles/10.1186/s40064-016-2073-0> 2.3.2021.
56. Xue, J., Su, B. (2017.): Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. Preuzeto: <https://www.hindawi.com/journals/js/2017/1353691/>. 10.4.2021.

57. Zandi, S., Ghobakhlou, A., Sallis, P. (2011.): Evaluation of spatial interpolation techniques for mapping soil pH. 19th International congress on modelling and simulation, Perth, Australia, 1153-1159. Preuzeto:: <https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluation-of-spatial-interpolation-techniques-for-Zandi-Ghobakhlou/ebd72056c25b3383d08eae75ca3d8d1e0d454563> 15.3.2021.
58. Zimmer D., Jurišić, M., Plaščak I., Barač Ž. (2016.): Tehnički i tehnološki čimbenici gnojidbe primjenom GIS tehnologije u poljoprivredi. Agronomski glasnik, 1/2016., 27-40. Preuzeto: <https://hrcak.srce.hr/169578> 5.2.2021.

10. Sažetak

Sustavi precizne gnojidbe predstavljaju temelj za daljnji razvoj intenzivne poljoprivredne proizvodnje, koja treba omogućiti ostvarivanje visokih i kvalitetnih prinosa bez negativnog utjecaja na okoliš odnosno usmjeriti trenutni način proizvodnje u onaj održivi. Korištenjem velikog broja informacija o trenutnom stanju promatranih biljaka u usjevu, omogućuje se donošenje racionalnijih zaključaka upravljanja. Poznavanjem potreba biljaka, ukazanim njihovim simptomima koji su objašnjeni u radu, a pri tom korištenjem suvremene optičke tehnologije predstavlja superiorni način zapažanja i odlučivanja pri najmanjim promjenama. Korištenjem podataka elektromagnetskog spektra iz različitih pojaseva, omogućuje se praćenje zdravstvenog stanja biljaka u njihovim različitim vegetacijskim stadijima. Postojanje velikog broja vegetacijskih indeksa ukazuje na raznovrsnu i razno vremenu uporabu u praksi. Potreba za izradom preciznih aplikacijskih karata te karata trenutnog hranivnog stanja tla predstavlja izazov dobivanja točnih informacija iz što manjeg broja uzoraka. Suvremena računalna tehnika svojim razvojem omogućuje dobivanje pouzdanih podataka o kontinuiranim prostornim podacima, ali je potrebno poznavanje problema i korištenja određenih interpolacijskih metoda prema potrebama dobivanja reprezentativnih rezultata za daljnje procese upravljanja.

11. Summary

Precision fertilization systems are the basis for the further development of intensive agricultural production, which should enable the achievement of high and quality yields without negative impact on the environment, direct the current method of production to a sustainable one. By using a large amount of information on the current state of the observed plants in the crop, it is possible to draw more rational management conclusions. Knowing the needs of plants, indicating their symptoms, which are explained in the paper, and using modern optical technology is a superior way of observing and deciding on the slightest changes. By using electromagnetic spectrum data from different bands, it is possible to monitor the health status of plants in their different vegetation stages. The existence of a large number of vegetation indices indicates diverse and diverse use in practice. The need to produce precise application maps and maps of the current nutrient status of the soil is a challenge to obtain accurate information from as few samples as possible. Modern computer technology, with its development, enables obtaining reliable data on continuous spatial data, but it is necessary to know the problems and use certain interpolation methods according to the needs of obtaining representative results for further management processes.

12. Popis slika

Slika 1. Prikaz kemijske varijabilnosti prostornih jedinica poljoprivrednog zemljišta.....	8
Slika 2. Vučeni uređaj za mjerenje elektrovodljivosti tla.....	13
Slika 3. Prikaz karte elektrovodljivosti.....	14
Slika 4. Vozilo opremljeno uređajem za uzimanje uzoraka	16
Slika 5. Prikaz koncepta izrade aplikacijske karte	18
Slika 6. Prikaz karte trenutnog stanja hraniva (lijevo) i aplikacijske karte (desno).....	19
Slika 7. Prikaz funkcije prostorne interpolacije	21
Slika 8. Prikaz klasifikacije metoda prostorne interpolacije.....	23
Slika 9. Prikaz principa metode inverzne udaljenosti	26
Slika 10. Prikaz planinskog modela reljefa	28
Slika 11. Prikaz primjera semivariograma eksponencijalnim modelom	31
Slika 12. Prikaz četiri najčešće korištena modela za izračunavanje variograma: a) sferni, b) eksponencijalni, c) linearni i d) Gausov model.....	32
Slika 13. Prikaz grafičkog sučelja softvera SAGA	Error! Bookmark not defined.
Slika 14. Prikaz uzorkovanog područja	42
Slika 15. Trendovi svojstava tla	43
Slika 16. Karta predviđanja organske tvari pomoću OK (lijevo), IDW (u sredini) i RBF metoda (desno)	44
Slika 17. Usporedba metoda preko MSE i G vrijednosti.....	45
Slika 18. Prikaz srednjeg kvadrata pogreške za unakrsnu metodu ocjenivanja	47
Slika 19. Promjene na biljci uzrokovane nedosatkom određenog hraniva.....	49
Slika 20. Prikaz multispektralnog senzora.....	50
Slika 21. Prikaz elektromagnetskog spektra	51
Slika 22. Senzor usjeva agregatiran s traktorom u prihrani	52
Slika 23. Senzorska glava	53
Slika 24. Korištenje indeksa u ovisnosti o fazi rasta usjeva	54
Slika 25. Prikaz odnosa pojedinog spektralnog kanala i zdravstvenog stanja biljke	57
Slika 26. Reflektivnost elektromagnetskog zračenja biljaka	62
Slika 27. Primjer izračuna NDVI indeksa	63
Slika 28. Vizualna interpretacija NDRE vegetacijskog indeksa.....	66
Slika 29. Prikaz vrijednosti NGRDI vegetacijskog indeksa u usjevu	68

Slika 30. Usporedba NDVI i SAVI indeksa u sivoj skali tonova	70
Slika 31. Prikaz primarnih apsorpcijskih kanali i spektralne krivulje.....	75
Slika 32. Prikaz NDVI rezultatnog sloja	77
Slika 33. Prikaz NDRE sloja promatranog usjeva	78
Slika 34. Prikaz dvije osnovne forme varijabilne gnojidbe	80
Slika 35. Prikaza komponenata varijabilnog sustava gnojidbe.....	82
Slika 36. Histogram usporednog prikaza vrijednosti izmjernog NDRE indeksa i aplicirane vrijednosti dušičnog gnojiva na osnovi SI indeksa	84
Slika 37. Prikaz varijabilne prostorne raspodjele dušičnog gnojiva	85
Slika 38. Prikaz krivulje odnosa ukupno aplicirane količine gnojiva i ostvarenog prinosa	86
Slika 39. Prikaz dobivanja i kretanja informacija u sustavu precizne gnojidbe	87

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Fakultet agrobiotehničkih znanosti u Osijeku
Sveučilišni diplomski studij, smjer Mehanizacija

Diplomski rad

SUSTAVI PRECIZNE GNOJIDBE USJEVA PRIMJENOM PROSTORNE INTERPOLACIJE I VEGETACIJSKIH INDEKSA

Davor Rac

Sažetak: Sustavi precizne gnojidbe predstavljaju temelj za daljnji razvoj intenzivne poljoprivredne proizvodnje, koja treba omogućiti ostvarivanje visokih i kvalitetnih prinosa bez negativnog utjecaja na okoliš odnosno usmjeriti trenutni način proizvodnje u onaj održivi. Korištenjem velikog broja informacija o trenutnom stanju promatranih biljaka u usjevu, omogućuje se donošenje racionalnijih zaključaka upravljanja. Poznavanjem potreba biljaka, ukazanim njihovim simptomima koji su objašnjeni u radu, a pri tom korištenjem suvremene optičke tehnologije predstavlja superiorni način zapažanja i odlučivanja pri najmanjim promjenama. Korištenjem podataka elektromagnetskog spektra iz različitih pojaseva, omogućuje se praćenje zdravstvenog stanja biljaka u njihovim različitim vegetacijskim stadijima. Postojanje velikog broja vegetacijskih indeksa ukazuje na raznovrsnu i razno vremenu uporabu u praksi. Potreba za izradom preciznih aplikacijskih karata te karata trenutnog hranivnog stanja tla predstavlja izazov dobivanja točnih informacija iz što manjeg broja uzoraka. Suvremena računalna tehnika svojim razvojem omogućuje dobivanje pouzdanih podataka o kontinuiranim prostornim podatcima, ali je potrebno poznavanje problema i korištenja određenih interpolacijskih metoda prema potrebama dobivanja reprezentativnih rezultata za daljnje procese upravljanja.

Rad je izrađen pri: Fakultetu agrobiotehničkih znanosti u Osijeku

Mentor: prof.dr.sc. Mladen Jurišić

Broj stranica: 87

Broj grafikona i slika: 39

Broj tablica: 0

Broj literaturnih navoda: 58

Broj priloga: 0

Jezik izvornika: hrvatski

Ključne riječi: gnojidba, suvremena gnojidba, precizna gnojidba, vegetacijski indeksi, interpolacijske metode

Datum obrane:

Stručno povjerenstvo za obranu:

1. izv.prof.dr.sc. Ivan Plaščak, predsjednik
2. prof.dr.sc. Mladen Jurišić, mentor
3. Dorijan Radočaj, mag. ing. geod. et geoinf., član

Rad je pohranjen u: Knjižnica Poljoprivrednog fakulteta u Osijeku, Sveučilištu u Osijeku, Kralja Petra Svačića
1d.

BASIC DOCUMENTATION CARD

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek
Faculty of Agriculture biotechnical science
University Graduate Studies, Agriculture machinery, course

Graduate thesis

CROP PRECISE FERTILIZATION SYSTEM USING SPATIAL INTERPOLATION AND VEGETATION INDICES

Davor Rac

Abstract: Precision fertilization systems are the basis for the further development of intensive agricultural production, which should enable the achievement of high and quality yields without negative impact on the environment, direct the current method of production to a sustainable one. By using a large amount of information on the current state of the observed plants in the crop, it is possible to draw more rational management conclusions. Knowing the needs of plants, indicating their symptoms, which are explained in the paper, and using modern optical technology is a superior way of observing and deciding on the slightest changes. By using electromagnetic spectrum data from different bands, it is possible to monitor the health status of plants in their different vegetation stages. The existence of a large number of vegetation indices indicates diverse and diverse use in practice. The need to produce precise application maps and maps of the current nutrient status of the soil is a challenge to obtain accurate information from as few samples as possible. Modern computer technology, with its development, enables obtaining reliable data on continuous spatial data, but it is necessary to know the problems and use certain interpolation methods according to the needs of obtaining representative results for further management processes.

Thesis performed at: Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek

Mentor: prof.dr.sc. Mladen Jurišić

Number of pages: 87

Number of figures: 39

Number of tables: 0

Number of references: 58

Number of appendices: 0

Original in: Croatian

Key words: fertilization, modern fertilization, precise fertilization, vegetation indices, interpolation methods

Thesis defended on date:

Reviewers:

1. izv.prof.dr.sc. Ivan Plaščak, president
- 2.prof.dr.sc. Mladen Jurišić, mentor
- 3.Dorijan Radočaj, mag.ing.geod. et geoinf., member

Thesis deposited at: Library, Faculty of Agriculture in Osijek, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek,
Kralja Petra Svačića 1d