

Primjena multispektralnih i hiperspektralnih kamera u voćarstvu

Hlišć, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Agriculture / Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:204:324915>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-25**



Repository / Repozitorij:

[Repository Faculty of Agriculture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET

**Primjena multispektralnih i hiperspektralnih kamera u
voćarstvu**
ZAVRŠNI RAD

Luka Hlišć

Zagreb, travanj, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET

Preddiplomski studij:
Hortikultura

**Primjena multispektralnih i hiperspektralnih kamera u
voćarstvu**
ZAVRŠNI RAD

Luka Hlišć

Mentor: izv. prof. dr. sc. Goran Fruk

Zagreb, travanj, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET

IZJAVA STUDENTA
O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, **Luka Hlišć**, JMBAG 0178128634, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad pod naslovom:

Primjena multispektralnih i hiperspektralnih kamera u voćarstvu

Svojim potpisom jamčim:

- da sam jedini autor ovoga završnog rada;
- da su svi korišteni izvori literature, kako objavljeni tako i neobjavljeni, adekvatno citirani ili parafrazirani, te popisani u literaturi na kraju rada;
- da ovaj završni rad ne sadrži dijelove radova predanih na Agronomskom fakultetu ili drugim ustanovama visokog obrazovanja radi završetka sveučilišnog ili stručnog studija;
- da je elektronička verzija ovoga završnog rada identična tiskanoj koju je odobrio mentor;
- da sam upoznat s odredbama Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu (Čl. 19).

U Zagrebu, dana _____

Potpis studenta / studentice

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET

IZVJEŠĆE

O OCJENI I OBRANI ZAVRŠNOG RADA

Završni rad studenta **Luka Hlišć**, JMBAG 0178128634, naslova

Primjena multispektralnih i hiperspektralnih kamera u voćarstvu

mentor je ocijenio ocjenom _____.

Završni rad obranjen je dana _____ pred povjerenstvom koje je prezentaciju ocijenilo ocjenom _____, te je student postigao ukupnu ocjenu¹ _____.

Povjerenstvo:

potpisi:

- | | | | |
|----|-------------------------------|--------|-------|
| 1. | izv. prof. dr. sc. Goran Fruk | mentor | _____ |
| 2. | _____ | član | _____ |
| 3. | _____ | član | _____ |

¹ Ocjenu završnog rada čine ocjena rada koju daje mentor (2/3 ocjene) i prosječna ocjena prezentacije koju daju članovi povjerenstva (1/3 ocjene).

Sadržaj

1. Uvod.....	1
1.1. Cilj rada.....	2
2. Pregled literature.....	3
2.1. Nedestruktivne metode analize kvalitete voća pomoću sustava spektroskopije	3
2.2. Hiperspektralno linijsko skeniranje cijelih površina orkuglih poljoprivrednih proizvoda	7
2.2.1. Dijelovi i način rada hiperspektralnog slikovnog linijskog sustava.....	8
2.3. Trodimenzionalna vizualizacija i otkrivanje ranih ozljeda na jabukama hiperspektralnim sustavom	11
2.4. Upotreba hiperspektralnih sustava za procjenu unutarnje kvalitete nektarine	12
2.5. Analiza unutarnje kvalitete američke borovnice hiperspektralnim sustavima	15
2.6. Detekcija faze zrelosti ploda obične borovnice hiperspektralnim sustavima	17
2.7. Detekcija gljivičnih infekcija u plodu jagode hiperspektralnim sustavima.....	19
2.7.1. Otkrivanje bolesti lišća jagode korištenjem hiperspektralnih sustava.....	21
2.8. Otkrivanje ranih simptoma propadanja agruma hiperspektralnim sustavima.....	23
3. Zaključak.....	27
4. Popis literature	28
5. Popis ilustracija i tablica.....	35
6. Životopis.....	36

Sažetak

Završnog rada studenta **Luka Hlišć**, naslova

Primjena multispektralnih i hiperspektralnih kamera u voćarstvu

Suvremeni napredak tehnologije omogućuje razvoj precizne poljoprivrede korištenjem hiperspektralnih kamera. U ovom radu su prikazani različiti sustavi hiperspektralnih sustava u različitim uvjetima korištenja. Također, objašnjene su metode rada hiperspektralnih sustava na različitim voćarskim kulturama. Različite komponente hiperspektralnog sustava omogućuju uvid u površinsko i unutrašnje stanje ploda i biljnih organa. Uvid u kemijsko, biološko i fizičko stanje biljke omogućuje pravovremenu reakciju proizvođača na pojavu bolesti i drugih nedostataka. Mana modernih sustava hiperspektralnih kamera jest visoka cijena ulaganja, zbog čega navedeni sustavi kod nas gotovo i ne postoje. Napredak tehnologije dovodi do povećanja broja proizvođača hiperspektralnih sustava što doprinosi povećanju broja mogućih primjena. Implementacijom modernih sustava kamera u linije kontrole plodova nakon berbe, omogućuje se precizna poljoprivreda. Precizna poljoprivreda osigurava manje štete od bolesti i štetnika te bolje skladištenje i veću kvalitetu plodova na tržištu.

Ključne riječi: hiperspektralni sustavi, kamere, precizna poljoprivreda, voćarske kulture, kontrola kvalitete

Summary

Of the final work - student **Luka Hlišć**, entitled

Application of multispectral and hyperspectral cameras in fruit growing

Modern advances in technology enable the development of precision agriculture using hyperspectral cameras. This paper presents different systems of hyperspectral systems in different conditions of use. Also, the working methods of hyperspectral systems on different fruit crops are explained. Various components of the hyperspectral system enable insight into the surface and internal state of the fruit and plant organs. An insight into the chemical, biological and physical condition of the plant allows the producer to react in time to the appearance of diseases and other defects. The disadvantage of modern hyperspectral camera systems is the high investment cost, which is why these systems almost do not exist in our country. Advances in technology lead to an increase in the number of manufacturers of hyperspectral systems, which contributes to an increase in the number of possible applications. By implementing modern camera systems in the fruit control lines after harvest, precision agriculture is enabled. Precision agriculture ensures less damage from diseases and pests, as well as better storage and higher quality of fruits on the market.

Keywords: hyperspectral systems, cameras, precision agriculture, fruit crops, quality control

1. Uvod

Tehnologija strojnog uvida u procese poljoprivredne proizvodnje uvedena je u poljoprivredno-prehrambeni sektor 1960-ih kako bi se postigla veća kvaliteta kontrole i izbjegao mukotrpan rad radnika koji često rezultira nedostacima na plodovima uslijed ljudske pogreške (Brosnan i sur., 2004.). Zbog ograničenja tradicionalnih tehnologija strojnog vida baziranog na RGB tehnologiji, napredak je osigurao kvalitetniju primjenu koja pruža uvid u šire područje nedostataka. Tradicionalna tehnologija strojnog uvida ograničena je na mjerenje fizičkih i morfoloških svojstava objekta, otkrivanje dodatnih nedostataka poput fekalne kontaminacije i unutarnjeg oštećenja zahtjeva veći spektar informacija (Qin i sur., 2013.).

Kvaliteta i stavljanje na tržište voćarskih proizvoda, regulirano je propisima mnogih država u svijetu. Osim standarda za ozljede, posjekotine, posmeđenje ploda i ispucalu kožicu ploda, reguliraju i unutarnje stanje ploda u koje možemo zaviriti korištenjem hiperspektralnih kamera. U mnogim su studijama predložene spektroskopske tehnike za rješavanje pitanja interne procjene kvalitete ploda (Wang i sur., 2015).

Hiperspektralni sustavi (HSI), kombinacijom spektroskopije i oslikavanja, dijeleći svjetlosni spektar na mnoge uske pojaseve, uvedeni su u poljoprivredno-prehrambeni sektor zbog svoje sposobnosti dobivanja spektralnih i prostornih značajki uzorka (Kim i sur., 2001).

U poljoprivredi se tijekom zadnjeg desetljeća sve više uvode HSI sustavi kao učinkovit alat za kontrolu kvalitete širokog spektra poljoprivrednih proizvoda. Napretkom tehnologije, instrumentacije i tehnike analize plodova lakše se zadovoljavaju zahtjevi za industrijsku uporabu (Park i sur., 2011).

Bazirajući se na kvalitetu plodova, proveden je niz istraživanja poput testiranja učinkovitosti HSI tehnike za nedestruktivno određivanje topljive suhe tvari, ukupne kiselosti i sadržaja vlage u jagodama (ElMasry i sur., 2007). Po prvi puta uspješno je provedena klasifikacija agruma u dvije klase s obzirom na prisutnost defekta crne mrlje agruma korištenjem hiperspektralne analize s točnošću od preko 97% (Kim i sur., 2004). Usavršeno je i otkrivanje površinskih nedostataka jabuke (Lee i sur., 2005.).

Navedenim istraživanjima, HSI sustavi pokazali su se kao precizni i sa visokom sposobnošću mjerenja boje, teksture, ozljeda, kontaminacija raznim nepoželjnim česticama i spojevima i samim time kvalitete ploda. Studije su u procesu razvoja i napretka multispektralnih sustava kamera bile usmjerene na određivanje optimalnog raspona spektra za specifične primjene. Smanjenjem ukupnog volumena podataka omogućuje se implementacija učinkovitog multispektralnog sustava snimanja (Qin i sur., 2013.).

1.1. Cilj rada

Cilj ovog rada jest predstaviti osnovne karakteristike hiperspektralnih sustava za kontrolu kvalitete i zdravstvenog stanja voćarskih vrsta. Uz navedeno, objasniti osnovne funkcije i dijelove sustava za multispektralno i hiperspektralno snimanje na različitim voćarskim vrstama u različitim uvjetima snimanja. Također, navesti i pojasniti pojedine metode korištenja hiperspektralnih sustava s obzirom na organ biljke i oblik promatranog objekta. Ovim radom želi se prikazati točnost i potencijalna autonomnost multispektralnih i hiperspektralnih sustava u detekciji kvalitativnih atributa voćarskih proizvoda.

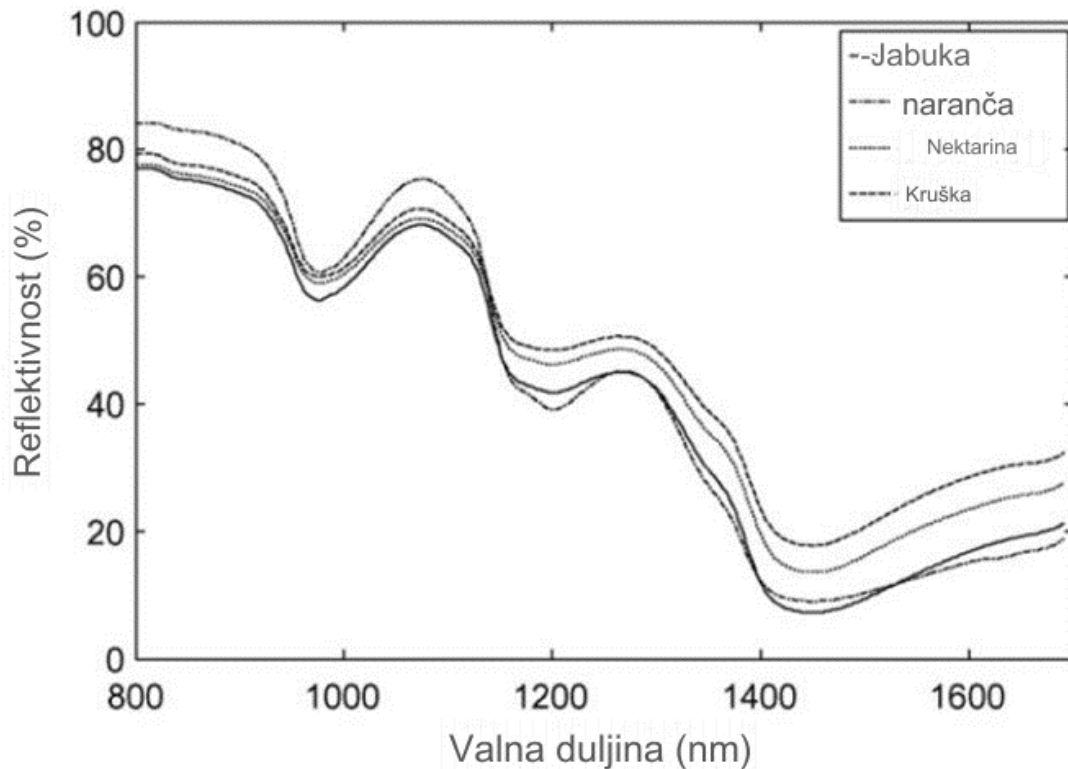
2. Pregled literature

2.1. Nedestruktivne metode analize kvalitete voća pomoću sustava spektroskopije

Metode nedestruktivne analize kvalitete voća pomoću NIR spektroskopije blisko infracrveno (NIR) zračenje pokriva raspon elektromagnetskog spektra između 780 i 2500nm (Nicolai i sur., 2007.). NIR zračenje otkrio je Friedrich Wilhelm Herschel 1800. godine (Davies, 2000.). Kada radijacija dođe u kontakt s uzorkom, upadno zračenje može se reflektirati, apsorbirati ili prenositi kroz analizirani objekt, a relativni doprinos svake zabilježene pojave ovisi o kemijskom sastavu i fizikalnim parametrima uzorka (Nicolai i sur., 2007.).

Korištenjem NIR metode promatrani objekt biva ozračen blisko infracrvenim zračenjem te ovisno o refleksiji ili transmisiji emitiranih zraka bilježimo promjene spektralnih karakteristika hiperspektralnim sustavom. Prvo bilježenje uspješnog korištenja NIR spektrometrije seže iz šezdesetih godina prošlog stoljeća (Norris i sur., 1964.). Metoda blisko infracrvene spektroskopije uvedena je u voćarstvo 1992. godine za analizu sadržaja topljivih suhih tvari jabuka (Bellon-Maurel, 1992.). Razvojem spektroskopije u blisko infracrvenom području povećao se broj primjena i utvrđeno je da se može koristiti za analizu mikrostrukture voća poput tvrdoće (Lammertyn i sur. 1998.), unutarnjih oštećenja (Clark i sur., 2003.) i osjetilnih atributa (Mehinagić i sur., 2004.). Donedavni razvoj spektroskopije proširio je potencijal NIR spektroskopije koji uključuje korištenje multispektralnih i hiperspektralnih kamera (Martinsen i Schaare, 1998.).

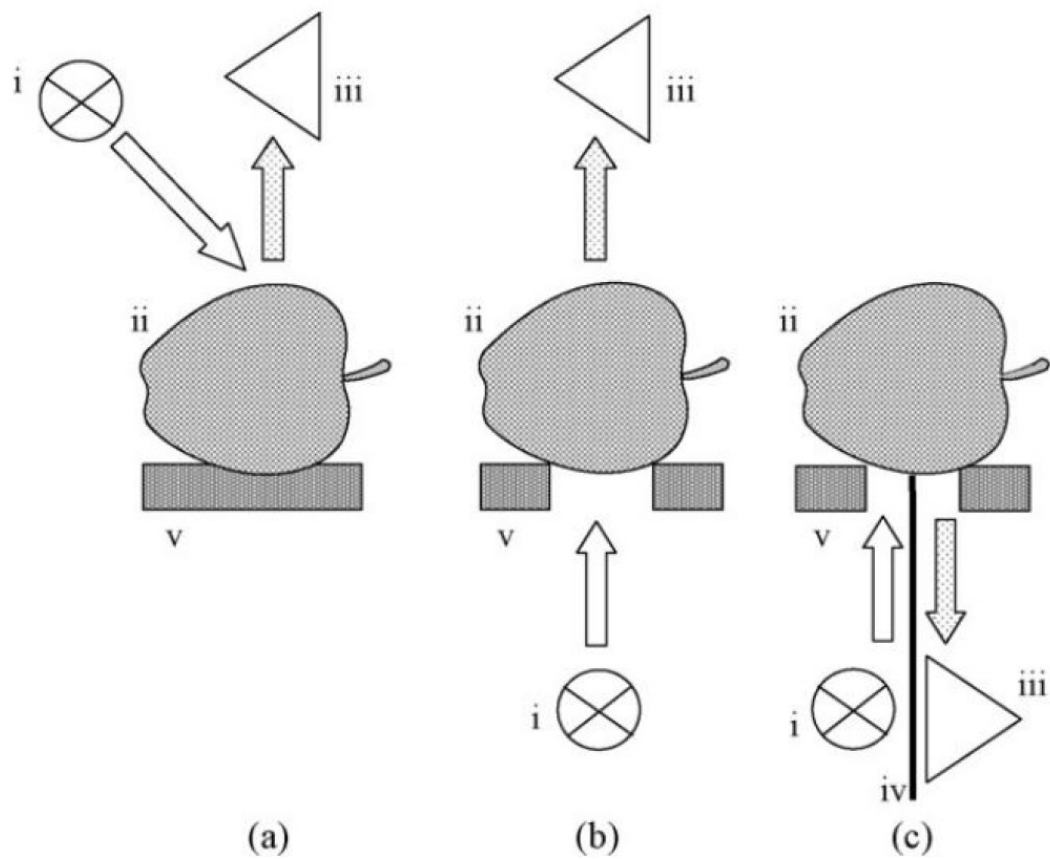
Najveći značaj u voćarstvu predstavlja analiza plodova nakon berbe. Hiperspektralni sustavi prepoznaju karakteristike površine objekta praćenjem refleksije koja nastaje kao posljedicu triju različitih pojava. Zrcalna refleksija uzrokuje sjaj dok paralelno nastaje difuzna refleksija koji uzrokuje hrapava površina objekta (Nicolai i sur., 2007.). Nagle promjene indeksa loma svjetlosti uzrokuju elementi stanične stijenke (McGlone i sur., 1997.). Također, promjene indeksa loma svjetlosti uzrokuju i čestice škroba, plastidi i mitohondriji (Il'yasov i Krasnikov, 1991.). Uz navedeno, na difuziju svjetla utječu i pore i kapilare koje se protežu kroz uzorak (Nicolai i sur., 2007.). Često voćni plodovi prilikom spektrofotometrijskog snimanja reflektiraju slične spektre zbog dominacije spektra vode (Slika 1.).



Slika 1. – Tipični NIR refleksijski spektar plodova nekoliko voćnih vrsta u usporedbi (Nicolai i sur., 2007.)

Spektrofotometri bliskog infracrvenog zračenja sastoje se od izvora svjetlosti, postolja za prihvat uzorka, monokromatora, detektora i optičkih komponenti poput leća, razdjelnika svjetlosti, sfera i optičkih vlakana (Nicolai i sur., 2007.). Spektrofotometri se klasificiraju prema vrsti monokromatora odnosno kotača koji drži apsorpcijske ili interferencijske filtere. Monokromatorima je ograničena spektralna rezolucija. U monokromatorima se nalazi prizma koja odvaja pojedinačne frekvencije zračenja koje ulazi ili izlazi iz uzorka. Uz pomoć separatora valnih duljina, do detektora svjetlosti dolazi frakcija emitiranih zraka. Detektori zaprimaju različite zrake ovisno o jačini i spektru emitiranog svjetla i metodi analiziranja ploda (Nicolai i sur., 2007.).

Postoje tri najčešće metode dobivanja slika blisko infracrvenog zračenja (Slika 2.). Metoda refleksije, metoda prijenosa zraka kroz objekt i metoda interakcije (Tablica 1.). U metodi interakcije, detektor i izvor svjetlosti postavljeni su paralelno (Nicolai i sur., 2007.).



Slika 2. – Shematski prikaz metode (a) refleksije, (b) prijenosa i (c) interakcije blisko infracrvenih zraka (Nicolaï i sur., 2007.)

Tablica 1. - Pregled primjene NIR spektroskopije za mjerenje TST plodova voća

<i>Vrsta</i>	<i>Kultivar</i>	<i>Spektrofotometar</i>	<i>Metoda</i>	<i>Spektralni raspon nm</i>	<i>Ref.</i>
Jabuka (<i>Malus domestica</i> Borkh.)	Jonagold	Skeniranje	Refleksija	380-1650	Lammertyn i sur. 1998.
	Zlatni delišes	PDA	Interakcija	350-999	Ventura i sur. 1998.
	Kraljevska gala	PDA	Interakcija	500-1100	McGlone i sur. 2002.
	Fuji	FT-NIR	Interakcija	812-2357	Liu i Ying 2005.
Marelica (<i>Prunus armeniaca</i> L.)	Boccuccia Sinosa , Errani	Skeniranje	Interakcija	600-2500	Carlini i sur. 2000.
Trešnja (<i>Prunus serotina</i> L.)	Ravenna	Skeniranje	Interakcija	600-2500	Carlini i sur. 2000.
	Hedelfinger, Sam	Skeniranje	Refleksija	800-1700	Lu 2001.
Grožđe (<i>Vitis vinifera</i> L.)	Cabernet sauvignon , Chardonnay	PDA	Prijenos / Interakcija	650-1100	Herrera i sur. 2003.
Kivi (<i>Actinidia deliciosa</i>)	Hayward	PDA	Interakcija	300-1140	Schaare i Fraser 2000.
Mandarina (<i>Citrus reticulata</i>)	Satsuma	Skeniranje	Prijenos	680-1235	Kawano i sur. 1993.
	Imperial	PDA	Interakcija	730-930	Greensill i Walsh 2002.
Mango (<i>Mangifera indica</i> L.)	Tommy Atkins	Skeniranje	Refleksija	1200-2400	Schmilovitch i sur. 2000.
	Caraboa	Skeniranje	Refleksija	1100-2500	Saranwong i sur. 2001.
Nektarina (<i>Prunus persica</i> L.)	Summerbrite	PDA	Interakcija	735-932	Golić i Walsh 2006.

Izvor: (Nicolai i sur., 2007.)

2.2. Hiperspektralno linijsko skeniranje cijelih površina okruglih poljoprivrednih proizvoda

Tehnologije strojnog uvida uvedene su u poljoprivredno-prehrambeni sektor još 1960-tih godina kako bi se ubrzao proces sortiranja i kalibracije te povećala kvaliteta kontrole zdravstvenog stanja ploda (Brosnan & Sun, 2004). U počecima primjene strojnog uvida koristila se tehnika snimanja RGB (Red–Green–Blue) kamerom za analizu pomoću projekcije crvene, zelene i plave boje te filtrima koji su na te boje usredotočeni. Tadašnje slike mogle su prikazati karakteristike ploda poput veličine, boje, teksture i oblika (Zhang i sur., 2014). Korištenje RGB snimanja nije zadovoljilo potrebe kontrole zbog nemogućnosti uvida u unutrašnje stanje i kontaminaciju ploda (Qin i sur., 2013.).

Današnje naprednije spektralne tehnike imaju mogućnost uvida u stanje unutrašnjosti ploda te procjenu bioloških i kemijskih karakteristika odjeljivanjem vidljivog dijela spektra od infracrvenog. Od početka razvoja hiperspektralnih sustava provedeno je mnogo znanstvenih istraživanja s ciljem analize točnosti procjene određenog nedostatka ploda. Testiranje učinkovitost HSI tehnike za nedestruktivno određivanje sadržaja vlage, topljive suhe tvari i ukupne kiselosti u jagodama pokazalo je visoku točnost sustava (ElMasry i sur., 2007.). Korištenjem HSI sustava uspješno su detektirani uobičajeni nedostaci na narančama u spektralnom području između 400 i 1000 nm (Li i sur., 2002.). HSI se pokazao kao dobar alat i u otkrivanju defekta crne mrlje citrusa sa točnošću od preko 97% (Kim i sur., 2014.). Analize sustava često su sporedno usmjerene u proučavanje nedostatka nekog ploda, a više u razvoj sustava i prilagodbu pojedinim plodovima kako bi se postigao maksimum u detekciji nedostataka na plodu.

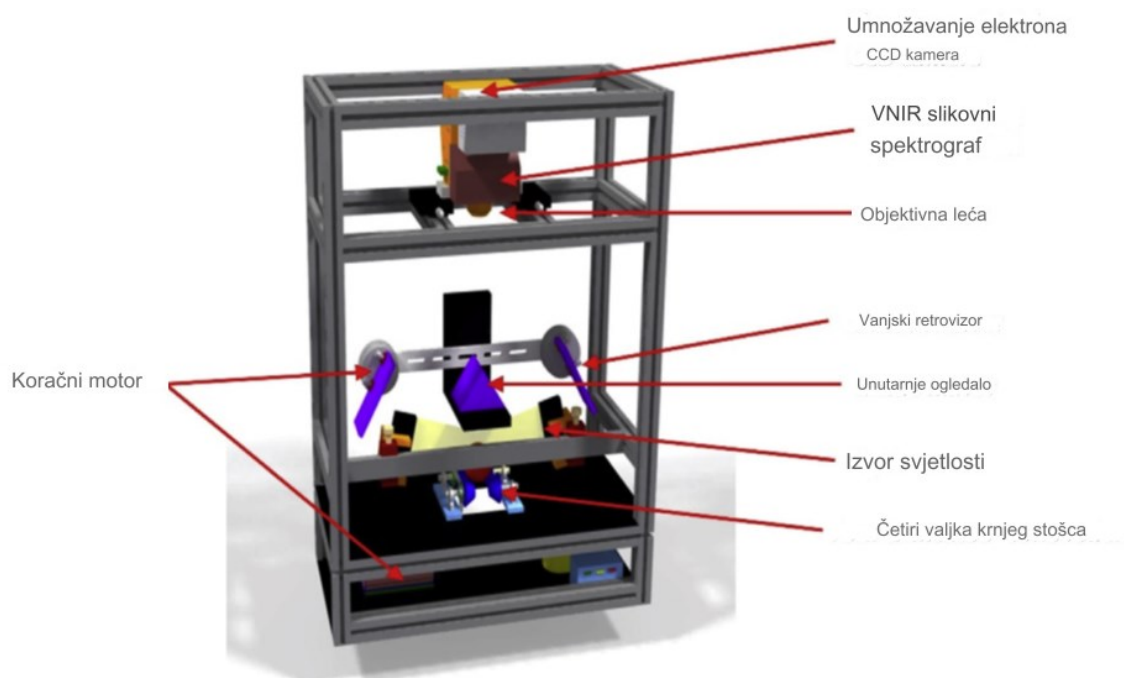
Hiperspektralne analize jabuka korištene su za prepoznavanje spektralnih karakteristika pogodnih za jabuke kako bi se sustav prilagodio optimalnim valnim duljinama za što brže otkrivanje kontaminacije jabuka nepoželjnim tvarima (Mehl i sur., 2002.). Velik broj studija potvrđuje da su HSI sustavi pogodni za analize poljoprivrednih proizvoda zbog visoke točnosti i brzine rada. Predstavljaju savršenu implementaciju za mjerenje kvalitete u stvarnom vremenu na inspeksijskim linijama ploda prije skladištenja ili plasiranja na tržište. Zbog mnogih prepreka u snimanju okruglog predmeta, sve do pojave razvijenih HSI sustava maksimalno je bilo moguće skenirati dvije trećina objekta te ga potom ponovno postavljati u točku promatranja kako bi se analizirao i drugi dio površine.

Prvo konstruktivno rješenje tom problemu predstavili su roboti zbog ravnomjernog i ujednačenog rotiranja svakog ploda (Molto i sur., 1999.) Mana korištenja robotskih ruku bila je u dugom periodu vremena potrebnom za snimanje samo jednog ploda. Napredak u proučavanju hiperspektralnih sustava osigurao je metodu sa vrlo malim anomalijama i velikom točnošću. Hiperspektralne linijske kamere u kombinaciji sa zrcalima za skeniranje cijele površine razvijaju jednostavne i učinkovite algoritme za obradu zbog nasumično postavljenih i rotirajućih objekata (Baek i sur., 2019.) Idealni plodovi za navedenu metodu su jabuke, breskve i naranče. Jednostavni i učinkoviti algoritmi mogu se nositi sa dinamičkim

oblicima i veličinom promatranog objekta i koristiti za implementaciju u sustav inspekcije (Baek i sur., 2019.)

2.2.1. Dijelovi i način rada hiperspektralnog slikovnog linijskog sustava

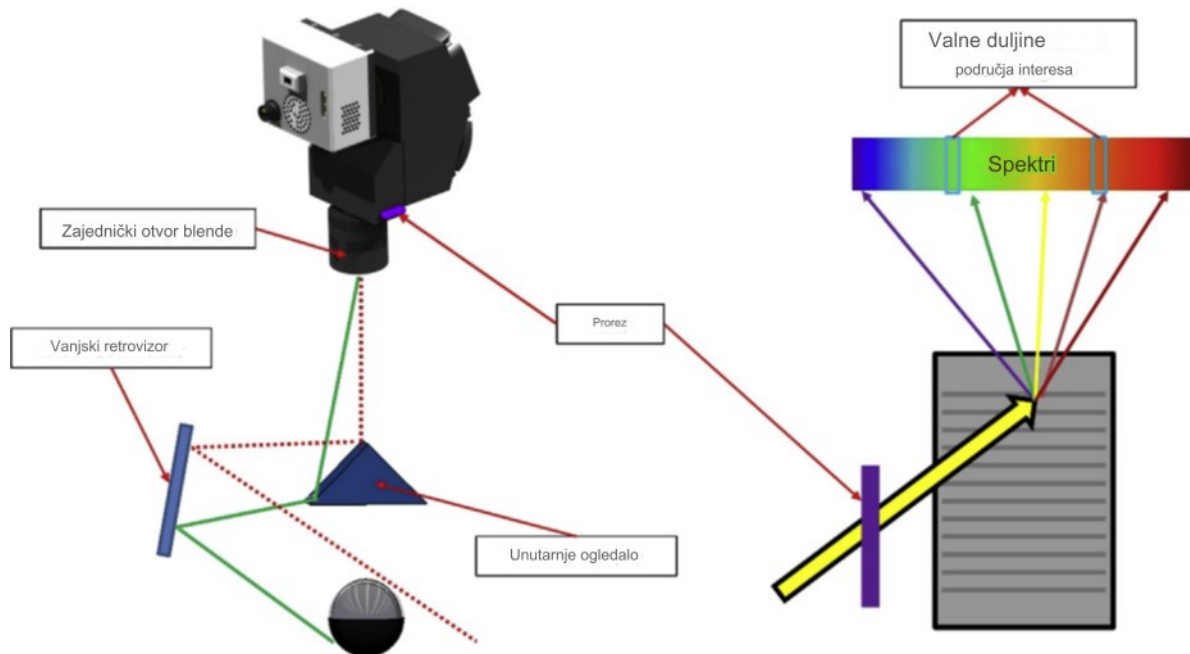
Osnovne komponente hiperspektralnog linijskog sustava su slikovni spektrograf „VNIR Concentric Imaging Spectrograph“ i kamera uređaja sa spregnutim nabojem za množenje elektrona „EMCCD“ (Baek i sur., 2019.). Slikovni spektrograf ima široki otvor blende s kojim kroz leću objektiva pretvara trenutno vidno polje u tanku liniju. Okrugli predmet promatranja postavljen je na četiri valjka stošca koji se okreću ravnomjernom brzinom od 150 mm/s, time se postiže rotacija objekta u mjestu (Baek i sur., 2019.) Za osvjetljenje se koristi svjetlo kvarcne halogene lampe od 150W podijeljeno putem optičkog kabela na dva izvora svjetla koja padaju na objekt pod kutom od 45° (Baek i sur., 2019). Upravljanje svim dijelovima sustava (Slika3.) vrši se pomoću računalnog programa. Upravljanje sustavom uključuje postavke kamere, dobivanje slike, brzinu elektromotora za rotaciju objekta i kutove vanjskih ogledala. Elektromotori rotiraju valjke ispod objekta automatski prema potrebama sustava čak i za svega nekoliko mikrona kako bi se promijenio njihov kut izvora svjetlosti (Baek i sur., 2019.) Kamere ovog sustava snimaju slike unutar spektralnog područja od 447nm do 951nm uz mogućnost regulacije i postavljanja točno željenih valnih duljina (Baek i sur., 2019).



Slika 3. – Shematski prikaz hiperspektralnog linijskog sustava (Baek i sur., 2019)

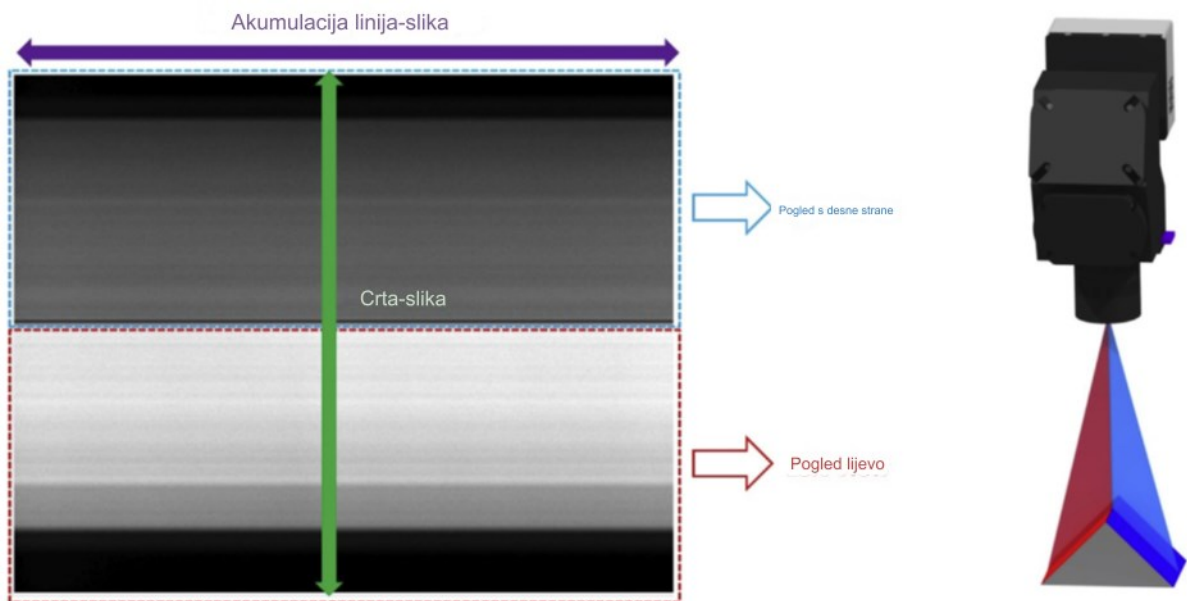
Kvalitetna analiza čitave površine ploda se dobiva uz pomoć više istovremenih pogleda na objekt i više istovremeno osvijetljenih polja promatranja. Sustav koristi jedno unutarnje zrcalo i dva vanjska zrcala uz koje se dobivaju dva bočna pogleda na objekt. Unutarnje zrcalo

se sastoji od dva površinska zrcala s jednom dodirnom točkom pod kutom od 90°. Sliku promatranog tijela prikupljaju vanjska zrcala te ju reflektiraju prema unutarnjim zrcalima. Unutarnja zrcala reflektiraju sliku prema otvoru hiperspektralne kamere. Spektrograf u hiperspektralnom sustavu tada raspršuje linijsku sliku unutarnjeg zrcala i procijira ju prema uređaju sa spregnutim nabojem za množenje elektrona „EMCCD“(Slika 4.) (Beak i sur., 2019).



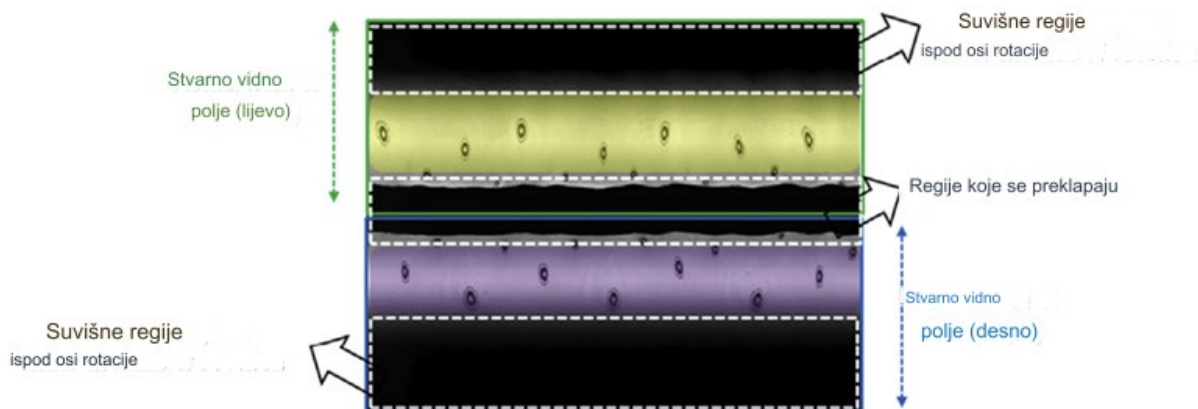
Slika 4.- Shema optičkog puta svjetla hiperspektralnog sustava (Baek i sur., 2019.)

Za ispravno korištenje hiperspektralnog linijskog sustava potrebno je izvršiti poravnavanje zrcala i kalibraciju. Unutarnje zrcalo mora biti poravnato sa središtem kamere kako bi se dobila ravnomjerna refleksija slike od vanjskih zrcala. Vanjska zrcala moraju zatvarati kut pod kojim se slika od promatranog objekta reflektira ravno prema unutarnjem zrcalu. Na taj način dobiva se dvije paralelne slike objekta koje kamera vidi kao jednu. Može se i povećati broj slika ukoliko u sustav dodamo više zrcala pod uvjetom da se unutarnje zrcalo može postaviti pod kutom da dobiva više željenih slika odjednom. Prije početka analize plodova potrebno je izvršiti prostornu kalibraciju sustava. Slike se snimaju na način da se na obje strane unutarnjeg zrcala ili na putu refleksije od vanjskih prema unutarnjem postave plavi i crveni transparentni papir (Slika 5.). Primjer prostorne kalibracije crvenim i plavim papirom (Beak i sur., 2019.). Tako se kasnije može odijeliti jedna slika na jednu i drugu stranu, a da se pritom ne mijenja sadržaj slike. S pravilno kalibriranim sustavom dobiva se prikaz stvarnog vidnog polja i nesegmentiranu sliku iz dva kuta (Beak i sur., 2019)



Slika 5.- Primjer prostorne kalibracije crvenim i plavim filmom (Baek i sur., 2019.)

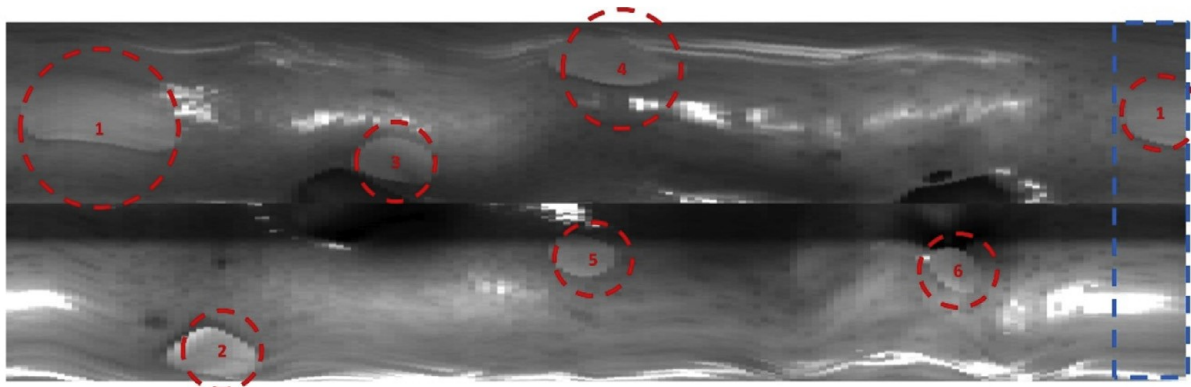
Za pregled cijele površine, ovom metodom, potrebna su samo područja površine snimljena iznad osi rotacije (Slika 6.). Područja ispod osi rotacije predstavljaju duplicirane fotografije koje se odbacuju. Kako ne bi došlo do anomalija u sustavu prouzrokovanih dupliciranim podacima, suvišna područja moraju se ukloniti. Za kalibraciju najčešće se koristi pravilno geometrijsko tijelo poput kugle s naznačenim malim mrljama na površini (Baek i sur., 2019).



Slika 6.- Shema neobrađene slike hiperspektralnog linijskog sustava (Baek i sur., 2019)

Obrada slike vrši se uklanjanjem graničnih pozadinskih područja ispod osi rotacije i centriranjem. Centriranjem se pomiče desna strana objekta na dno slike i lijeva strana objekta na vrh. Kako bi se sigurno analizirala cijela površina objekta potrebno je napraviti više uzastopnih fotografija tijekom rotacije. Obično to bude puno više fotografija koje se naknadno uklanjaju zbog velikog broja preklapanja. Nakon obavljene analize, prikupljeni podatci ostaju trajno zapisani uz mogućnost 3D rekonstrukcije objekta i prikaz svih zapaženih nedostataka

na objektu. Sustav može, ukoliko mu je zadano, automatski označiti sumnjiva područja (Slika 7.) i kao takve trajno ih zapisati (Beak i sur., 2019).



Slika 7.- Završna hiperspektralna linijska snimka ploda jabuke sa označenim nedostatcima na površini (Baek i sur., 2019.)

2.3. Trodimenzionalna vizualizacija i otkrivanje ranih ozljeda na jabukama hiperspektralnim sustavom

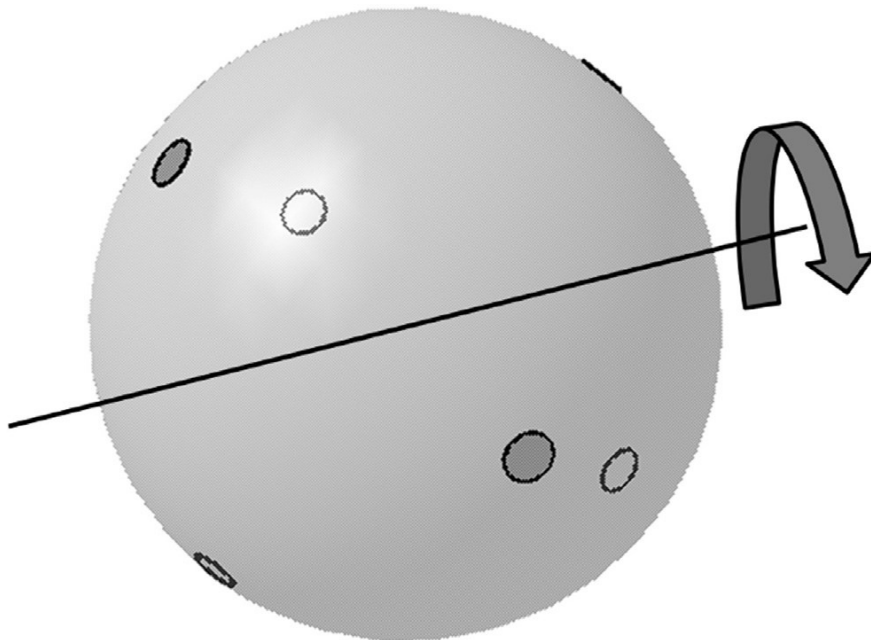
Jabuka je jedno od najpopularnijih voćnih proizvoda u svijetu s ukupnom proizvodnjom od preko 95 milijuna tona godišnje. Većina jabuka u svijetu prije plasiranja na tržište prolazi procese skladištenja kako bi stigle na tržište kada ih ono traži.

Plod jabuke vrlo je sklon mehaničkim ozljedama koje se obično događaju tijekom procesa berbe, pakiranja, sortiranja i kalibracije, skladištenja i transporta (Hussein i sur., 2020.). Najčešće se ozljede na plodu manifestiraju u obliku deformacije potkožnog tkiva i pucanja stanica što dogodi do enzimske oksidacije (Franck i sur., 2007.). Enzimska oksidacija dovodi do stvaranja kinona i daljnjeg nakupljanja smeđih polimera (Hussein i sur., 2019.). Ovisno o jačini sile udarca ili nagnječenja ploda, mogu proći i dani do pojave okom vidljivih nedostataka na površini ploda što dovodi do skladištenja ili prodaje plodova s nevidljivim nedostatcima (Du i sur., 2020.).

Zbog toga rana detekcija nedostataka može bitno utjecati na kvalitetu plodova prevenirajući skladištenje ili prodaju onih s nedostatcima. Danas postoje razne metode otkrivanja nedostataka ploda jabuke poput rendgenskog snimanja (Diels i sur. 2017.), termalnog snimanja (Lin i sur., 2023.), fluorescentnog snimanja (Fu i sur., 2022.), oslikavanja prostorno frekvencijske domene „SDFI“ (He i sur., 2021.) i strukturnog iluminacijskog reflektivnog snimanja „SIRI“ (Li i sur., 2023.). Najpoželjnija tehnika zbog minimalnog kontakta s plodom i nedestruktivne prirode je tehnika snimanja ploda hiperspektralnim sustavima.

Hiperspektralni sustavi koriste razne valne duljine s obzirom na karakteristike promatranog objekta. Često se primjenjuje analiza objekata osvijetljenih valnim duljinama u blizini valnih duljina infra-crvenog zračenja. Istraživanja pokazuju da hiperspektralni sustavi snimanja, u bliskom infra-crvenom području valnih duljina, mogu biti i najpovoljniji alat za otkrivanje ozljeda u ranoj fazi zbog visoke osjetljivosti na kemijske komponente koje se

oslobađaju iz ozljeda (Keresztes i sur., 2016.). Zbog oblika jabuke, najveći intenzitet uočavanja nedostataka je ekvatorijalno područje jabuke jer je najbliže izvoru svjetlosti (Mahanti i sur., 2022.). Smanjeno slabljenje intenziteta refleksije od ekvatorijalne površine jabuke uzrokuje tzv. Lambertova refleksija. Područja iznad i ispod ekvatora ostaju znatno tamnija. Neravnomjerno osvjetljenje ometa otkrivanje ozljeda u središnjem području (Bin i sur., 2024.). Kako bi se ravnomjerno analizirao plod ovom tehnikom potrebno je poboljšati neravnomjernu raspodjelu svjetla i primijeniti Lambertovu korekciju (Zhang i sur., 2017.). Razvojem metoda tradicionalnog 3D snimanja, istražene su korekcije temeljene na podacima o stvarnom obliku i modelima refleksije (Baek i sur., 2019.) Usvojena je primjena metode mjerne profilometrije „PMP“ za dobivanje profila uzorka koja je usavršena na oštećenim kruškama (Rajapaksha i sur., 2019.) Integrirana je 3D profilometrija u sustave hiperspektralnih kamera što omogućuje analizu dinamičnog oblika (Slika 8.) promatranog ploda (Rajapaksha i sur., 2019.)



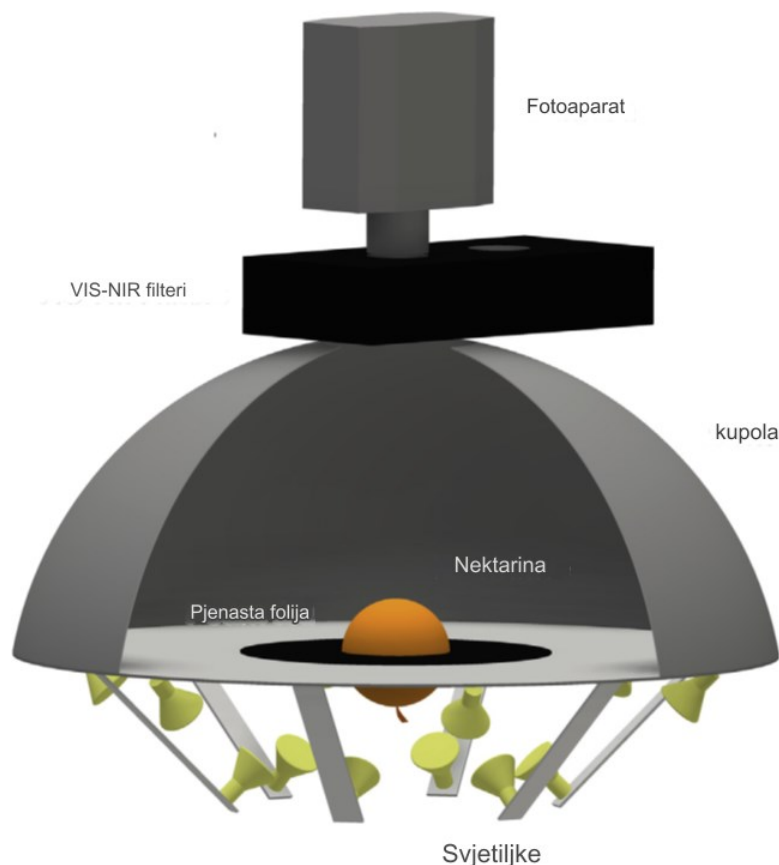
Slika 8.- Shematski prikaz promatranog objekta sa označenim nedostatcima (Baek i sur., 2019.)

2.4. Upotreba hiperspektralnih sustava za procjenu unutarnje kvalitete nektarine

Nektarina (*Prunus persica* L. Batsch var. *Nucipersica*) jedno je od voća kojemu se pridaje velika pažnja u posljednjih nekoliko godina s ciljem povećanja kvalitete i izgleda. (Munera i sur., 2017.). Plodovima nektarine često nedostaje okus i ujednačena kvaliteta. Čest nedostatak plodova nektarina je prevelika tvrdoća (Iglesias i Echeverría, 2009.). Dozrijevanje nektarina povezuje se s postupcima skladištenja koji pomažu procesima dozrijevanja (Crisosto, 1994.).

Nedestruktivnom metodom pomoću hiperspektralnih kamera lako se utvrđuje stanje ploda prije plasiranja na tržište. S točnim informacijama o zdravstvenom stanju i

karakteristikama ploda nektarine može se kvalitetnije upravljati sustavima za skladištenje plodova s ciljem postizanja bolje kvalitete u trenutku plasiranja na tržište. Ova tehnika analize plodova integrira konvencionalno snimanje i spektroskopiju kako bi istovremeno dobili spektralne i prostorne informacije ploda nektarine (Qin i sur., 2013.). Najraširenija metoda snimanja hiperspektralnim kamerama je metoda „prijenosa“. Hiperspektralno snimanje metodom „prijenosa“ temelji se na projekciji jake svjetlosti prema promatranom objektu te mjerenju refleksije, apsorpcije i prijenosa upadnog zračenja (Nicolai i sur., 2007.). Metoda „prijenosa“ može biti manje osjetljiva na svojstva površine promatranog objekta, stoga je bolja za analizu sastava i unutarnjih poremećaja (Schaare i Fraser, 2000.). Kada se hiperspektralno snimanje koristi na ovaj način, kamera je pozicionirana na suprotnoj strani promatranog objekta i analizira svjetlosnu energiju propuštenu kroz uzorak te trajno zapisuje zapažanja (Slika 9.). Metoda „prijenosa“ predstavlja idealno rješenje u detekciji poremećaja „split pit“. „Split pit“ je naziv za poremećaj koji se manifestira u obliku pucanja ploda dužinom „šavova“ egzokarpa, a pucanje nastavlja u smjeru koštice (Munera i sur., 2019.). Posljedica ovog poremećaja je intenziviranje truljenja i širenje bolesti s ispucalog voća na zdravo voće tijekom skladištenja (Tani i sur., 2007.) Tijekom početka razvoja bolesti, simptomi se ne uočavaju sve dok se plod ne razlomi i pregleda iznutra (Kritzinger i sur., 2017.). Hiperspektralne kamere uočavaju i najmanji trag pojave simptoma ovog poremećaja te uz sustave selekcije plodova lako možemo odvojiti one zaražene od zdravstveno ispravih i time prevenirati širenje bolesti i gubitke u proizvodnji (Munera i sur., 2019.).



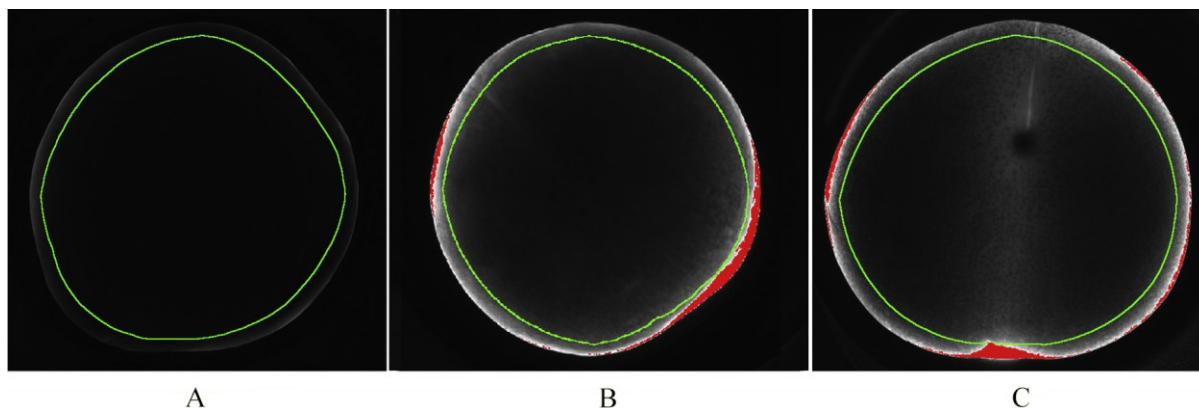
Slika 9.- Shema hiperspektralnog sustava u modu prijenosa (Munera i sur., 2019.)

Munera i sur. 2019. dobili su izvrsne rezultate u procjeni unutarnje kvalitete nektarina primjenom sustava hiperspektralne transmisije. Plodovi nektarine sorata 'Big Top' i 'Magique' pregledavani su sustavima hiperspektralnih kamera (630-900 nm) tijekom dozrijevanja plodova u kontroliranim uvjetima. Dobiveni su rezultati s točnošću od 94,7% u detekciji plodova s razdvojenom košticom (Slika 10.) sorte 'Big Top'. Točnost od 95% i 94% postignuta je u klasifikaciji kultivara 'Big Top' i 'Magique' prema pragu čvrstoće. Dobiveni rezultati pokazuju visoku točnost i velik potencijal hiperspektralnih sustava za procjenu kvalitete ploda nektarine (Munera i sur., 2019.).



Slika 10.- Primjer ploda nektarine sa razdvojenom košticom (Munera i sur., 2019.)

Konačna analiza ploda hiperspektralnim transmisijskim sustavom temelji se na broju mogućih zasićenih piksela u određenom spektralnom području. U istraživanju je prikazan plod hiperspektralnim sustavom s istaknutim pikselima koji u odgovarajućem omjeru, s obzirom na valnu duljinu, navode sustav na donošenje konačne odluke o ocjeni ploda. Sustav je u ovom slučaju, kalibriran tako da klasificira plodove nektarine u tri skupine ovisno o njegovim karakteristikama. Skupina „A“ predstavlja nedozreli plod, u skupinu „B“ spadaju zreli i zdravi plodovi, a u skupinu „C“ sustav svrstava sve plodove sa nedostacima (Slika 11.) (Munera i sur., 2019.).



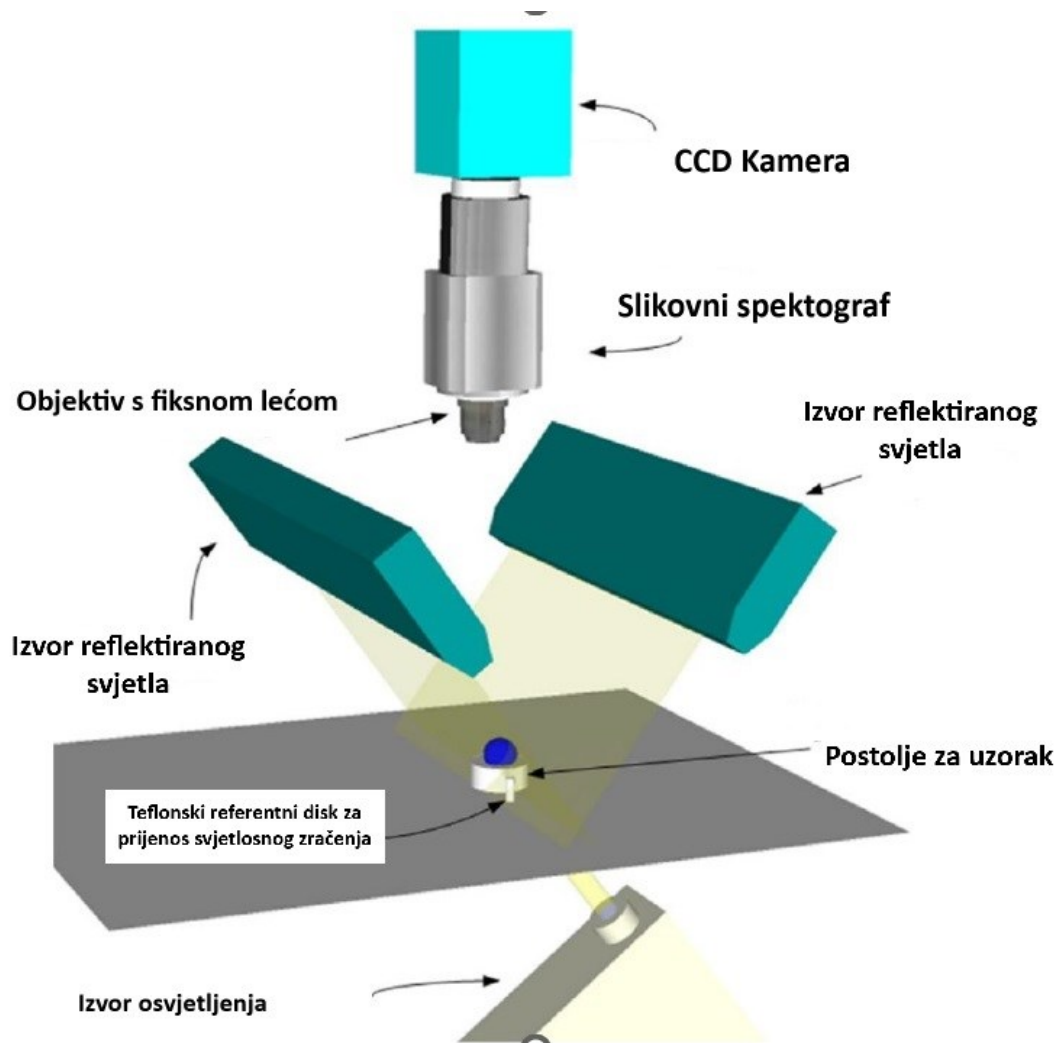
Slika 11. - Primjer hiperspektralne analize nedozrelog, zrelog i zdravog ploda te ploda sa razdvojenom košticom (Munera i sur., 2019.)

2.5. Analiza unutarnje kvalitete američke borovnice hiperspektralnim sustavima

Analiza borovnica podrazumijeva mjerenje topive suhe tvari i indeksa čvrstoće. Dobar pokazatelj kvalitete ploda je sadržaj topljivih čvrstih tvari koji se obično određuje iz soka ekstrahiranog iz mesa ploda metodom refraktometrije (Noh i Lu, 2007.). Čvrstoća je vrlo bitan faktor kvalitete. Mekšanje ploda potiče razvoj plijesni i enzimsko posmeđivanje što rezultira nekvalitetnim plodovima nepoželjnim na tržištu jednako kao i u masi zdravih plodova (Leiva-Valenzuela i sur., 2014.).

Hiperspektralni sustavi „Vis NIR“ omogućuju procjenu nutritivnog sadržaja i praćenje dehidracije bobica (Sinelli i sur., 2008.). Također, pomoću hiperspektralnih sustava u cijelosti se izgrađuju modeli analize kvalitete (Yang i sur., 2012.). Hiperspektralna snimka borovnice sadrži velik broj spektralnih slika na kojima je svaki piksel povezan s određenim dijelom vidljivog ili približno infracrvenog spektra. Među metodama snimanja najčešće su metoda refleksije, interakcije i transmisije (Nagata i sur., 2005.). Zbog utjecaja geometrije ploda na proces analize metodom transmisije, metoda refleksije predstavlja kvalitetniji izbor za analizu borovnica (Leiva-Valenzuela i sur., 2014.) Točnost analize interne kvalitete borovnica prikazali su Leiva-Valenzuela i sur., 2013. godine.

Istraživanje potvrđuje visoku točnost u predviđanju unutarnjih svojstava kvalitete plodova borovnice pomoću hiperspektralnih sustava (Slika 12.). Snimanje valnim duljinama 400-1000nm obuhvaća vidljivi dio spektra i spektar blizu infracrvenog. Metode refleksije i prijenosa prikazuju slike borovnica u tri različite orijentacije tj. površinu uz petljku, ekvatorijalnu površinu i područje oko čaške (Leiva-Valenzuela i sur., 2014.).



Slika 12.- Shematski prikaz hiperspektralnog sustava za snimanje plodova borovnice (Leiva-Valenzuela i sur., 2014.)

Kako bi utvrdili točnost dobivenih rezultata snimanjem hiperspektralnim sustavom, paralelno je utvrđen sadržaj topive suhe tvari destruktivnom metodom. Rezultati istraživanja pokazuju anomalije i pogreške u radu sustava na površinama uz čaške, ali istovremeno i odlične rezultate u predviđanju interne kvalitete snimanjem ekvatorijalnog područja i površine uz peteljku. Uz anomalije vezane uz kvalitetu kalibracije i postavljanja promatranog objekta, sustav prepoznaje nedostatke ploda i utvrđuje i uzima u proračun podatke vezane uz sadržaj topljive suhe tvari i čvrstoće ploda. Na anomalije predviđanja interne kvalitete ploda mogu utjecati površinske karakteristike područja snimanja (Sugiyama i sur., 2010.). Također, rezultat istraživanja upućuje na jednostavniji sustav sortiranja borovnica prema unutarnjoj kvaliteti korištenjem refleksije umjesto destruktivnih metoda (Leiva-Valenzuela i sur., 2014.).

Destruktivne metode za kvalitetnu analizu uključuju uništenje uzorka za razliku od analize hiperspektralnim sustavima. Nedestruktivna analiza omogućuje prodaju i preradu analiziranih uzoraka ili implementaciju klasifikacije ovim sustavom u linije proizvodnje netom prije pakiranja ili plasiranja na tržište. U istraživanju su se paralelno na istim uzorcima koristile dvije metode, metoda prijenosa i metoda refleksije. Istraživanje potvrđuje prednost metode

refleksije nad metodom prijenosa zbog točnijih rezultata uspoređenih s rezultatima destruktivnih metoda.

2.6. Detekcija faze zrelosti ploda obične borovnice hiperspektralnim sustavima

Plodovi borovnice (*Vaccinium myrtillus*) dozrijevaju u različito vrijeme ovisno o vegetacijskim uvjetima i genetici biljne vrste (Slika 13.). Jedan grozd istovremeno može sadržavati sve faze rasta bobice uključujući mlade i nedozrele zelene bobice, poluzrele crvenkaste bobice i one potpuno zrele, tamnoplave boje (Yang i sur., 2014.). Zbog neujednačenog dozrijevanja ploda, proizvodnja borovnice uključuje zahtjevno raspoređivanje radne snage u periodu berbe kako bi izbjegli propadanje plodova. Često je teško razlikovati zrele od poluzrelih plodova i prema vizualnoj inspekciji odrediti točno vrijeme berbe i pretpostaviti količinu prinosa (Yang i sur., 2014.). Hiperspektralno snimanje predstavlja odličan alat u otkrivanju kvalitete voća faktorima poput zrelosti, čvrstoće, sadržaja škroba itd.



Slika 13.- Primjer bobica borovnice različitog stupnja zrelosti na istom grozdu (Yang i sur., 2014.)

Veliku prepreku u korištenju hiperspektralnih sustava predstavljaju vanjski uvjeti u kojima bi bilo potrebno vršiti snimanje kako bi se dobili podatci na licu mjesta. Uglavnom se sva istraživanja provode u laboratorijima koji predstavljaju idealno okruženje zbog stabilnog unutarnjeg izvora svjetla i statičnosti ploda (Yang i sur., 2012.). Mjerenje na terenu često uključuje korištenje sunčevog svjetla za izvor osvjetljenja dok pozadinu ploda ne čine samo lišće i ostala biljna masa nego i tlo, sjena i objekti u voćnjaku. Također, distrakciju za kameru predstavljaju i sličnosti poput boje nedozrelog ploda i lista (Yang i sur., 2014.). Snimanjem hiperspektralnim kamerama na otvorenom dobivamo snimke s vrlo visokom rezolucijom što znači da slike imaju nekoliko stotina traka različitih valnih duljina koje mogu biti u korelaciji i smetati sustavu (Cai i sur., 2007.). Problem preklapanja i korelacije velikog broja traka rješava

se metodama poput analize glavnih komponenti „PCA“ i izdvajanja maksimalnog udjela šuma „MNF“. Odvojivost traka može se mjeriti transformiranog divergencijom, Bhattacharyyinom udaljenošću i Jeffries-Matusita udaljenošću (Yang i sur., 2011.) Glavna zadaća ovih metoda jest ukloniti sve preklapljene trake i pozadinske informacije slike kako bi se fokus usmjerio točno u promatrani objekt. Yang i sur., 2014. godine prikazali su znanstvenim radom točnost i kvalitetu primjene hiperspektralnih sustava na stablima borovnice.

U istraživanju koje je provedeno na Sveučilištu Georgia (Alma, SAD) 2012. godine na uzorku od 40 nasumično odabranih stabala borovnice prikupljeno je sveukupno 40 hiperspektralnih snimaka. Koristila se metoda hiperspektralnog snimanja s linijski skenirajućim spektrometrom (Slika 14.) (Yang i sur., 2014.).



Slika 14.- Hiperspektralna kamera sa linijski skenirajućim spektrometrom (Yang i sur., 2014.)

Izvorna slika sadržavala je 776 traka s najvećom spektralnom rezolucijom od 0,79nm, a nakon združivanja traka dobiveno je 388 hiperspektralnih traka sa spektralnom rezolucijom od 1,59nm. Dobivene su snimke u spektralnom rasponu od 398-1010nm i prostorne razlučivosti 1mm. Sustav je korištenjem tri nadzorna klasifikatora („K- nearest neighbor“ ili KNN; „support vector machine“ ili SVM i „adaptive boosting“ ili „AdaBoost“) napravio točnu klasifikaciju plodova prema stupnju zrelosti (Yang i sur., 2014.). Dobiveni rezultati prikazuju točnost od preko 96,9% u detekciji zrelih bobica, točnost od preko 97,5 % srednje zrelih bobica i točnost od preko 97% u detekciji nezrelih bobica borovnice (Slika 15.) (Yang i sur., 2014.).



Slika 15.- Stvarna primarna slika grozda borovnice uslikana hiperspektralnom kamerom (Yang i sur., 2014.)

2.7. Detekcija gljivičnih infekcija u plodu jagode pomoću hiperspektralnog sustava

Jagode (*Fragaria x ananasa*) su jedna od najpopularnijih voćnih vrsta u svijetu što pripisujemo njihovim nutritivnim svojstvima poput sadržaja vitamina C i kalija te njihovom prepoznatljivom slatkom okusu (Skrovankova i sur., 2015.). Plodove jagode karakterizira vrlo kratak period trajanja zbog osjetljive strukture i velike brzine metabolizma tijekom čuvanja, što ih čini osjetljivim na mehanička oštećenja tkiva i infekcije uzrokovane patogenim gljivicama, virusima i bakterijama (Pan i sur., 2014.).

Rano otkrivanje zaraženih plodova uvelike smanjuje troškove propadanja ploda i omogućuje selekciju i odvajanje zaraženih plodova od onih zdravih sa ciljem izolacije zaraze. Zaraze gljivicama vrlo su opasne kod pakiranja jagoda zbog brzog širenja bolesti čak i kod vrlo malog broja zaraženih plodova u ambalaži. Osim gubitka kvalitete, određene gljivice proizvode i mikotoksine koji uzrokuju infekcije ili alergije kod ljudi (Gallo i sur., 2015.).

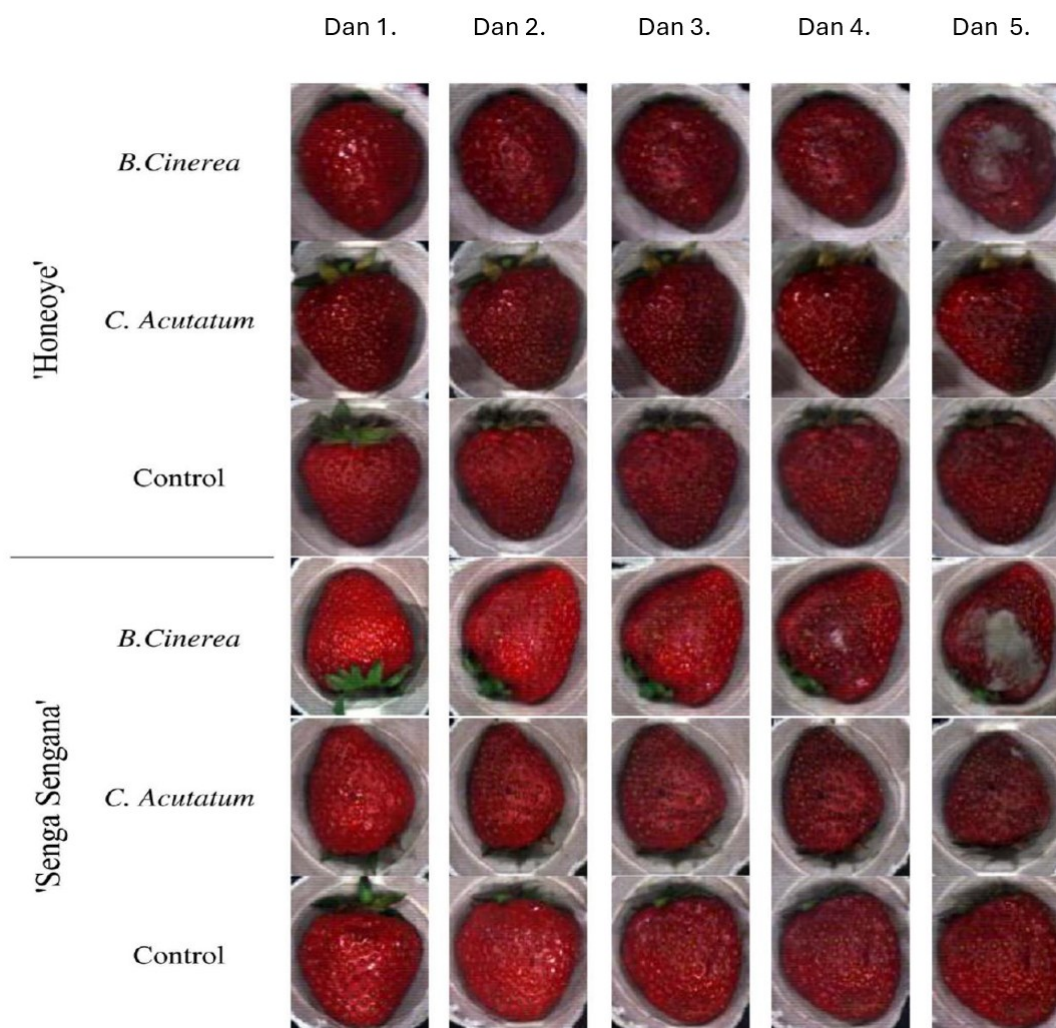
Kvaliteta i zdravstveno stanje ploda jagode analiziralo se donedavno tradicionalnim metodama poput tekućinske kromatografije, masene spektrometrije, raznih fizikalno kemijskih tehnika i pretežno destruktivnim tehnikama što ograničava broj istovremeno analiziranih plodova i zahtjeva duže vrijeme (Sanzani i sur., 2016.). VNIR hiperspektralna metoda snimanja, uz visoku točnost, uspješno je primijenjena na predviđanju parametara kvalitete jagoda kao što je boja (Giovannini i sur., 2014.), čvrstoća (Liu i sur., 2014.), otkrivanje ozljeda (Tallada i sur., 2006.), sadržaj vode (ElMasry i sur., 2007.), sadržaj askorbinske kiseline i sadržaj fenola (Amodio i sur., 2017.).

U poljoprivredno-prehrambenoj industriji osnovni cilj je utvrditi kvalitetu i zdravstveno stanje ploda što hiperspektralnim sustavima činimo potpuno neinvazivno (Teena i sur., 2014.). Hiperspektralni sustavi su se pokazali odličnim za detektiranje gljivičnih bolesti ploda jagode snimanjem u rasponu od 960-1700nm što spada u blisko infracrveno područje

zračenja. Sustav detektira infekciju uzrokovanu patogenom gljivicom (*Aspergillus flavus*) čak 48 sati nakon inokulacije kada je kontaminacija gljivicama okom nevidljiva (Siedliska i sur., 2018.).

Maksimalna točnost u klasifikaciji plodova i pojedinih vrsta patogenih gljiva iznosi 97,8%, a dobivena je primjenom hiperspektralnog VNIR sustava u analizi plodova s izoliranim gljivičnim vrstama *Penicillium chrysogenum*, *Fusarium moniliforme*, *Aspergillus parasiticus*, *Trichoderma viride* i *Aspergillus flavus* (Yao i sur., 2008.). Dobiveni rezultati istraživanja pokazuju da se korištenjem hiperspektralnih sustava, potpuno nedestruktivno, može utvrditi prisutnost patogena u fazi kada su okom nevidljivi i uz to dobiti točan podatak o vrsti patogena kojom je promatrani plod zaražen.

Siedliska i sur. (2018.) utvrdili su primjenu i visoku točnost u otkrivanju gljivičnih patogena na jagodama kultivara 'Sena Sengana' i 'Honeoye' prikupljenim u jugoistočnom dijelu Poljske u regiji Lublin. Navedene sorte su odabrane zbog razlika u kemijskom sastavu i osjetljivosti na gljivične infekcije. Sorta 'Honeoye' otpornija je na infekcije patogenih gljiva *Botrytis cinerea* i *Colletotrichum actuatum* u odnosu na sortu 'Sena Sengana' (Denoyes-Rothan i sur., 1999.). Inokulaciji uzorka od ukupno 2700 prethodno odabranih plodova jagode iste veličine navedenih sorata, prethodila je sterilizacija svih plodova uranjanjem u otopinu natrijevog hipoklorita (Wang i sur., 2012.). Za istraživački znanstveni rad korištene su dvije patogene gljive (*Botrytis cinerea* i *Colletotrichum actuatum*). Hiperspektralno snimanje inokuliranih plodova vršeno je metodom refleksije, a sustav je koristio dva linearna hiperspektralna skenera na visini od 40 cm iznad objekta koji je promatran na pokretnoj traci s mogućnošću regulacije brzine. Hiperspektralna kamera u ovom istraživanju, s visokom točnošću, prikazuje i klasificira plodove obje analizirane sorte jagoda zaražene dvjema patogenim gljivama (Slika 16.). Kod sorte 'Sena Sengana' postignuta je točnost od 88,3 % - 97,2 %, a kod sorte 'Honeoye' točnost od 88,3% - 90% (Siedliska i sur., 2018.).



Slika 16.- Primjer razvoja patogena na plodovima jagode u dnevnim intervalima uz primjer zdravih plodova (Siedliska i sur., 2018.)

2.7.1. Otkrivanje bolesti lišća jagoda korištenjem hiperspektralnih sustava

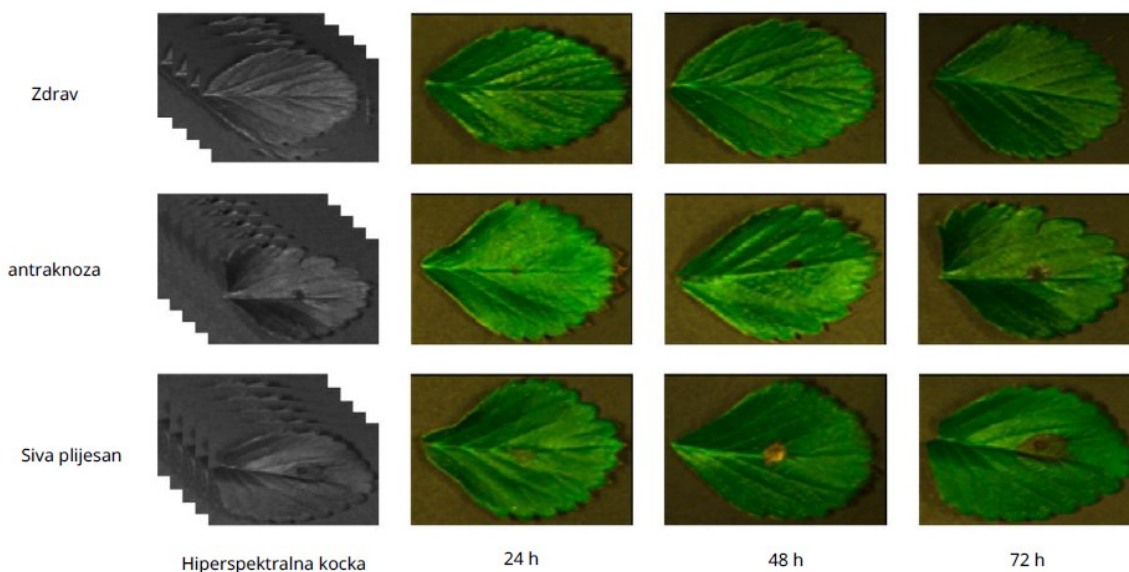
Antraknoza i siva plijesan dvije su od najrazornijih bolesti jagoda koje uzrokuju velike gubitke prinosa diljem svijeta (Malek i sur., 2020.). Antraknozu uzrokuju gljive roda *Colletotrichum* spp. koje oštećuju različita tkiva biljke jagode. Zaraza se često manifestira u obliku smeđih mrlja na lišću, udubljenih crnih mrlja i nekrotičnih lezija od peteljki do plodova što uzrokuje sušenje biljke (Jiang i sur., 2021.). Navedene bolesti s lakoćom mogu umanjiti prinose i za preko 50% (Malek i sur., 2020.). Za razliku od antraknoze, sivu plijesan uzrokuje *Botrytis cinerea* čiju prisutnost možemo primijetiti kako na plodu tako i na ostalim dijelovima biljke. Siva plijesan se često može primijetiti na listovima biljke jagode u obliku žuto-smeđih mrlja u početku, a kasnije po potpuno uvenulom lišću.

Tradicionalne metode borbe protiv navedenih bolesti se obično oslanjaju na primjenu fungicida u trenutku kada se bolest može vidjeti okom, što također dovodi do

negativnih učinaka zbog neprofesionalne upotrebe fungicida i zagađenja okoliša opasnim otpadom (Jiang i sur., 2021.).

Ranim otkrivanjem bolesti smanjuju se potencijalne štete od širenja bolesti na zdrave biljke i potrebno je manje fungicidne aktivne tvari što također doprinosi uštedu i racionalizaciju korištenja kemijskih tvari u voćnjaku. Hiperspektralni sustavi, uz kvalitetne klasifikatore uzorka, mogu utvrditi prisutnost zaraze vrlo brzo i na listu. Stupanj zaraze i spektralno ponašanje listova mogu drastično varirati s obzirom na proteklo vrijeme inokulacije. Za kvalitetnu analizu obavezno je provesti kalibraciju sustava korištenjem plodova prethodno ciljano inficiranih željenom vrstom patogena (Jiang i sur., 2021.). Priprema sustava sastoji se od četiri vrlo bitna koraka: a) priprema podataka o lišću jagode za namjernu infekciju, b) dobivanje hiperspektralnih slika uzoraka (400 – 1000nm) i ispravljanje dobivenih slika, c) analiza hiperspektralnih slika i razvijanje klasifikacijskih modela za identifikaciju antraknoze i sive plijesni te d) procjena učinka (Jiang i sur., 2021.).

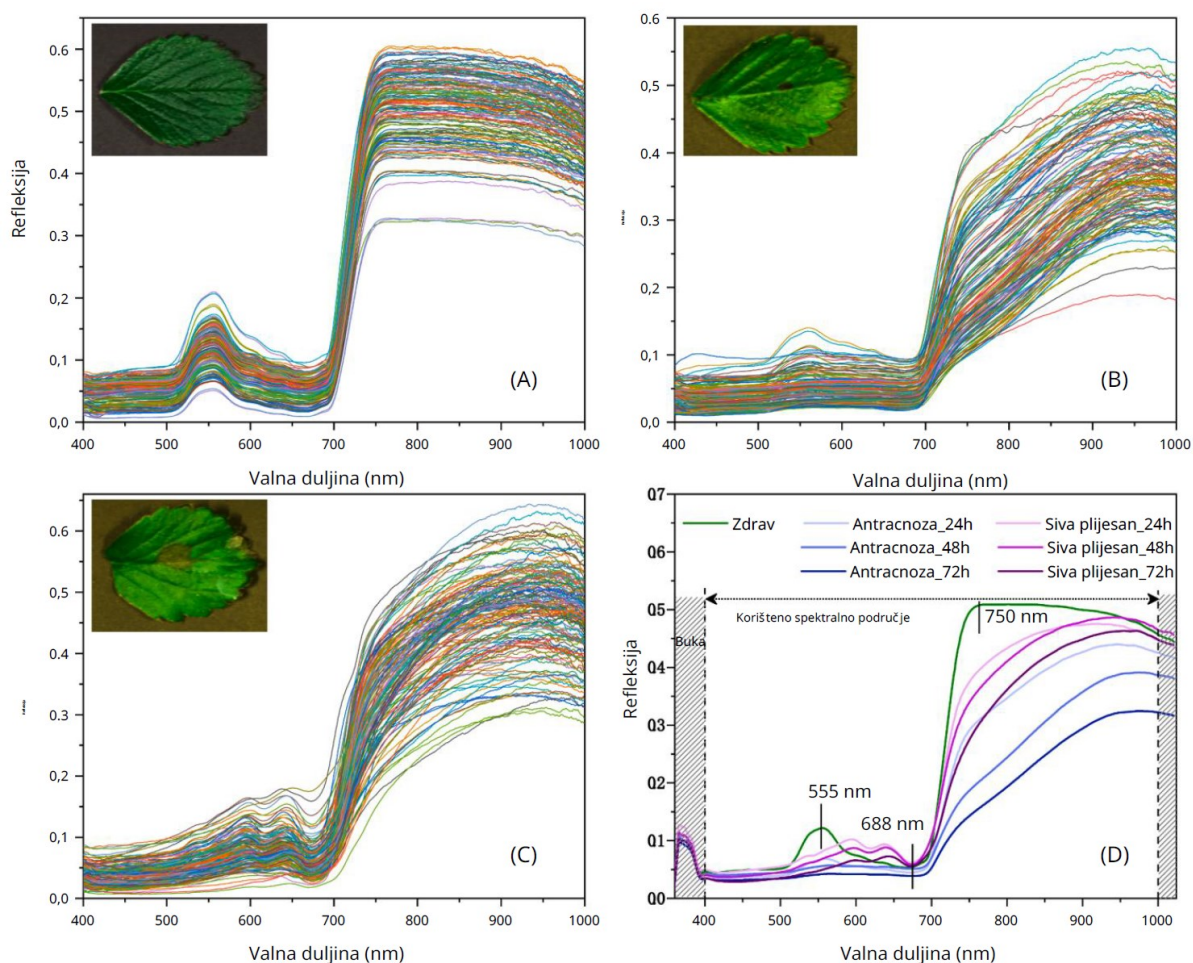
Jiang i sur. (2021.) istraživali su hiperspektralni sustav za analizu lišća jagode s ciljem utvrđivanja prisutnosti patogenih gljiva *Botrytis cinerea* i gljiva roda *Colletotrichum* spp. Uzorak od 298 zaraženih listova i 149 kontrolnih, sniman je u tri navrata u razmaku od 24 sata kako bi se omogućilo širenje simptoma (Slika 17.). Hiperspektralni sustav za istraživanje sastojao se od standardnih halogenih svjetiljki za izvor osvjetljenja, nepomične platforme za uzorak, leće, spektrografa i kamere.



Slika 17.- Primjer uzoraka u različitim intervalima sa vidljivim simptomima zaraze (Jiang i sur., 2021.)

Utvrđili su visoku točnost u klasifikaciji zaraženih listova patogenim gljivama u različitim fazama razvoja. Točnost analize raste s vremenom razvoja patogena, ali i u prvim fazama razvoja klasificira listove s oku nevidljivim simptomima bolesti. U prvih 24 sati razvoja patogena hiperspektralni sustav klasificira inficirani organ biljke sa točnošću od 100%. Dobiveni rezultati pokazuju izvanrednu točnost u detekciji zaraženog lišća metodom refleksije te utvrđuju točnu vrstu patogena i klasificiraju uzorak s obzirom na zdravstveno stanje i vrstu koja uzrokuje simptome zaraze (Slika 18.). Istraživanje dokazuje da se primjenom

hiperspektralnih sustava u proizvodnji jagoda može, uz kvalitetan sistematski pristup analizi, uvelike smanjiti šteta uzrokovana patogenima i povećati ušteda u primjeni fungicida (Jiang i sur., 2021.).

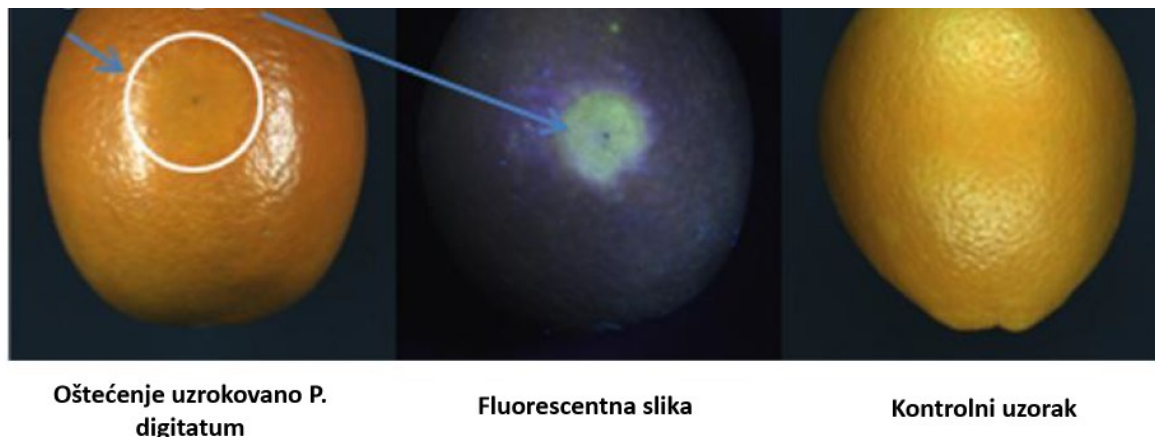


Slika 18.- Primjer vida hiperspektralnog sustava kroz prikaz različitih valnih duljina ovisno o zdravstvenom stanju lista i prisutnosti vrste patogena (Jiang i sur., 2021.)

2.8. Otkrivanje ranih simptoma propadanja agruma hiperspektralnim sustavima

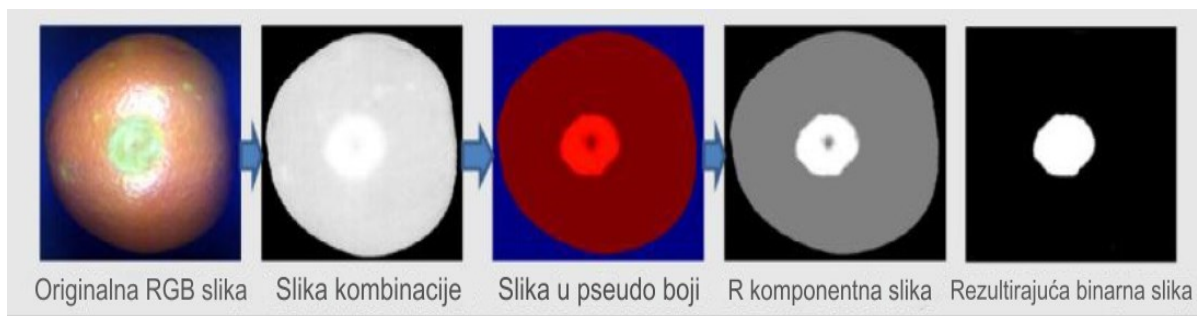
Agrumi predstavljaju globalno važne voćarske proizvode čija svjetska proizvodnja premašuje i 150 milijuna tona godišnje. Najveći uzročnik propadanja agruma je patogena gljiva *Penicillium* spp. koja utječe na procese nakon berbe i plasiranje ploda na tržište (Palou i sur., 2011.). Vrlo često svega nekoliko zaraženih plodova prenese patogen na kompletnu uskladištenu masu. Rado otkrivanje zaraze među plodovima vrlo je teško jer se kao i kod većine patogena simptomi u fazi razvoja ne vide na plodu. Razlika između potpuno zdravog ploda i onog zaraženog u početnim stadijima gotovo da i nema. Prve metode otkrivanja zaraženih plodova bile su bazirane na vizualnoj analizi plodova u tamnim prostorijama uz

emitiranje ultraljubičastog svjetla (Slika 19.) zbog zaraženog tkiva koje u tim uvjetima emitira žutu fluorescentnu boju (Momin i sur., 2013.).



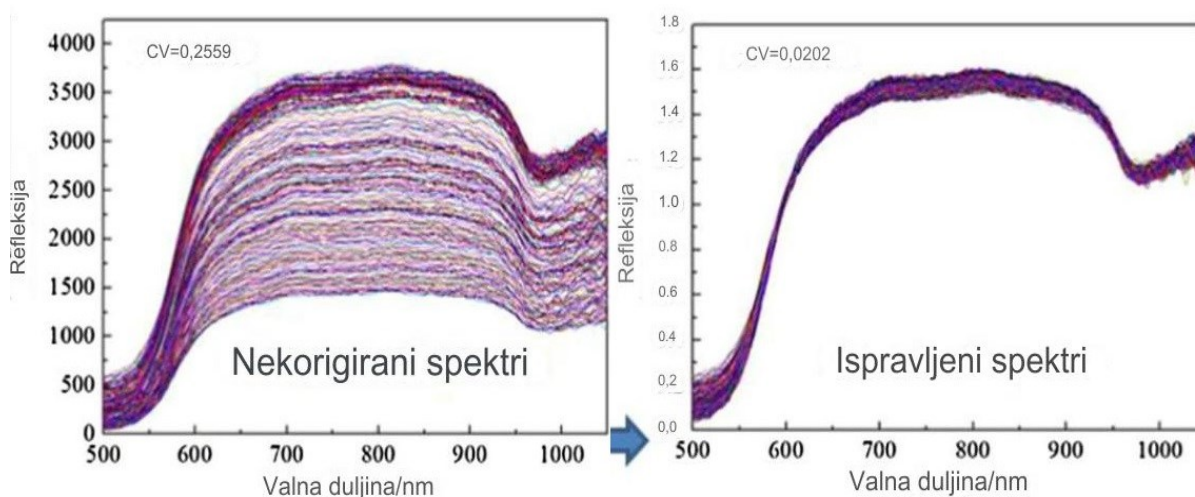
Slika 19.- Primjer emitiranja žuto-fluorescentne boje područja zaraženog patogenom pod ultraljubičastim svjetlom (Li i sur., 2016.)

Zbog potencijalne štete za ljudsko zdravlje prilikom izlaganja konstantnom ultraljubičastom zračenju razvijene su alternativne metode otkrivanja ranih simptoma propadanja agruma. Strojni vid temeljen na hiperspektralnim kamerama postao je široko korišten za automatizaciju inspekcije oštećenja voćarskih proizvoda (Cubero i sur., 2011.). Među prvim metodama analize predstavljena je hiperspektralna metoda snimanja temeljena na podesivim filtrima s tekućim kristalima „LCTF“. Metoda s podesivim filtrima s tekućim kristalima ima dug period prikupljanja potrebnih informacija s površine ploda što ju čini neprikladnom za korištenje u stvarnom vremenu na pokretnim trakama (ElMasry i sur., 2013.). U potrazi za prikladnim sustavom za automatiziranu analizu plodova agruma, Li i sur. (2016) predstavili su odlične rezultate u primjeni hiperspektralnih sustava kod naranče sorte 'Newhall'. Kako bi sa sigurnošću utvrdili prisutnost patogena, plodovi s vidljivim simptomima tretirani su visokom relativnom vlagom i odgovarajućom temperaturom atmosfere. Hiperspektralni sustavi metodom refleksije omogućili su dobivanje slika u stvarnim radnim automatiziranim uvjetima. Ručno postavljene plodove u inspekcijску komoru nisu okretani kako bi simptomi zaraze bili u centru fokusa već nasumično što odgovara uvjetima automatiziranog uvida (Li i sur., 2016.). Dobivene spektralne slike obrađene su pomoću softverskog programa kako bi se u potpunosti uklonile smetnje i područja van interesa sustava za analizu (Slika 20.).



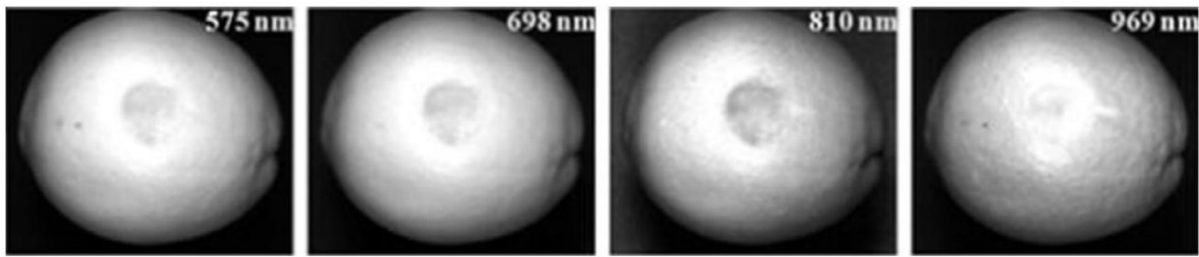
Slika 20.- Shema procesa dobivanja binarne slike za izolaciju područja interesa za analizu (Li i sur., 2016.)

Pošto se slike dobivaju metodom refleksije, sustav zaprima mnogo više valnih duljina spektra zračenja nego što mu je potrebno za donijeti odluku o zdravstvenoj ispravnosti ploda agruma. Sustav automatski, netom prije posljednjeg koraka u analizi promatranjem valnih duljina reflektiranih od promatranog objekta, uklanja višak nepotrebnih valnih duljina iz zapisa o pojedinom plodu. Na osnovi preostalih valnih duljina donosi konačnu odluku o klasi u koju spada promatrani plod. Stvarne valne duljine reflektirane od analiziranog ploda vidimo u prikazanom grafu prije i poslije korekcije (Slika 21.).

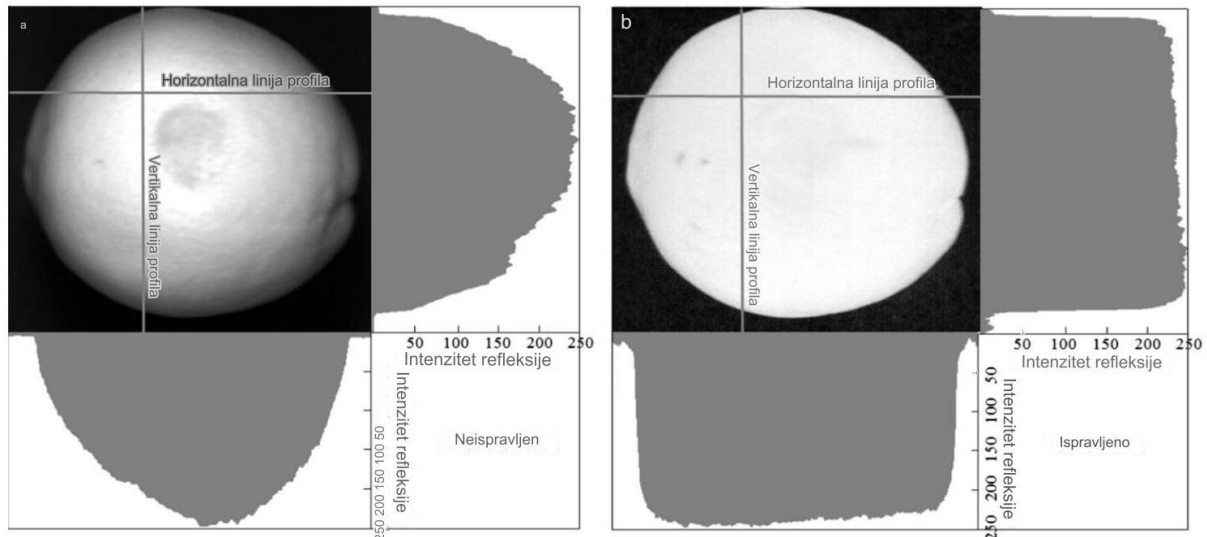


Slika 21.- Primjer automatske korekcije valnih duljina spektra dobivenog metodom refleksije (Li i sur., 2016.)

Uz korekciju refleksijom dobivenih valnih duljina potrebno je prilagoditi i emitirane valne duljine sustava osvjetljenja kako bi se što više suzio spektar potreban za uočavanje simptoma bolesti. Pojednostavljeno, sustav osvjetljenja emitira zadan spektar valnih duljina prema promatranom objektu kako bi sa sigurnošću pokrio potreban spektar za utvrđivanje nedostataka. Za što točniju analizu uzorka odabiremo četiri slike različitih valnih duljina (Slika 22.). Potrebno je maksimalno ukloniti nepotrebne valne duljine koje mogu navesti sustav na pogrešnu klasifikaciju ploda (Li i sur., 2016.). Uklanjanje nepotrebnih valnih duljina može biti komplicirano i dugotrajno u slučaju da je spektar preširok. Da bi olakšali sustavu eliminaciju nepotrebnih valnih duljina vršimo i korekciju emitiranih valnih duljina u užu spektar svjetlosnog zračenja koji pokriva potrebe utvrđivanja nedostataka (Slika 23.).



Slika 22.- Primjer četiri slike različitog spektra istog ploda (Li i sur., 2016.)



Slika 23.- Primjer automatske korekcije intenziteta refleksije u odnosu na horizontalne i vertikalne linije profila promatranog objekta (Li i sur., 2016.)

Rezultati istraživanja pokazuju točnost od 98,6% u identifikaciji zaraženih plodova agruma i klasifikaciji plodova s obzirom na njihovo zdravstveno stanje. Na osnovi od svega četiri slike različitih valnih duljina istog ploda sustav je s visokom točnošću utvrdio prisutnost patogena na površini ploda agruma. Također, istraživanje je dokazalo prednost korištenja hiperspektralnih sustava u odnosu na konvencionalnu spektroskopiju zbog mogućnosti klasifikacije ploda sa svega četiri slike istog ploda. Konvencionalne spektroskopske metode ne mogu vizualizirati raspadnuta pod površinska područja ploda agruma (Li i sur., 2016.). Iz ove analize izvlači se jedinstven zaključak koji govori da su multispektralni i hiperspektralni sustavi adekvatniji za kontrolu prisutnosti patogena koji uzrokuju propadanje citrusa (Li i sur., 2016.).

3. Zaključak

Hiperspektralni i multispektralni sustavi kamera predstavljaju odličan alat u preciznoj poljoprivredi. Omogućuju uvid u stanje ploda koji ljudskim vidom ne možemo postići. U ovom radu su predstavljeni osnovni tipovi multispektralnih i hiperspektralnih sustava u različitim uvjetima korištenja. Navedene su i objašnjene osnovne metode rada različitih tipova sustava kamera. Zahvaljujući modernim sustavima kamera, možemo precizno pratiti razvoj bolesti i prisutnost patogena na plodovima i drugim biljnim organima. Pravovremena reakcija na pojavu okom nevidljivih simptoma bolesti, možemo ostvariti veliku uštedu zbog smanjenja gubitaka u proizvodnji i skladištenju. Također, tržištu osiguravamo zdravstveno ispravnije voće s daleko manjom šansom pojave bolesti u trenutku prodaje. Tijekom proizvodnje lakše otkrivamo nedostatke i simptome bolesti i pravovremeno provodimo mjere zaštite bilja. Zahvaljujući trajnom zapisivanju podataka analize, sustavi se mogu koristiti i za dugoročno promatranje promjena na biljkama. Sustavi se koriste i na proizvodnim površinama i u prostorima za kontrolu voća. Zatvoreni prostori osiguravaju kvalitetnije okruženje za dobivanje preciznih rezultata analize. Uz prilagodbu okoline sustava i preciznu kalibraciju, u stanju smo otkriti nedostatke u trenutku nastajanja. Hiperspektralni sustavi omogućuju prevenciju širenja patogena i klasifikaciju plodova s obzirom na prisutnost nedostataka. Navedeni sustavi predstavljaju područje interesa agronoma zbog velike učinkovitosti i nedestruktivnog pristupa analizi. Manu hiperspektralnih sustava predstavlja visoka cijena ulaganja, te su zbog toga prikladni za velike proizvođače. Dinamika istraživanja hiperspektralnih sustava sve je veća. Razvoj tehnologije za preciznu poljoprivredu raste eksponencijalno. Zahvaljujući sve većem broju proizvođača navedenih sustava, povećava se i raznolikost primjene. Također, dinamika razvoja ulijeva nadu u široku primjenu multispektralnih i hiperspektralnih sustava i u Hrvatskoj.

4. Popis literature

1. Amodio, M.L.; Ceglie, F.; Chaudhry, M.M.A.; Piazzolla, F. i Colelli, G. (2017.). Potential of NIR spectroscopy for predicting internal quality and discriminating among strawberry fruit from different production systems. *Postharvest Biology and Technology*. 125, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.11.013>.
2. Baek, I.; Byoung-Kwan, C.; Gadsden, A.S.; Eggleton, C.; Oh, M.; Mo, C. i Kim, M.S. (2019.). A novel hyperspectral line-scan imaging method for whole surfaces of round shaped agricultural products. *Biosystems engineering* 188 57-66.
3. Bellon-Maurel, V. (1992.). Application de la spectroscopie proche infrarouge au controlee en ligne de la qualite des fruits et legumes. These de doctorat. L'institut National Polytechnique de Toulouse, France.
4. Bin, L.; Ma, T.; Bai, L.; Inagaki, T.; Seki, H. i Tsuchikawa, S. (2024.). Three-dimensional visualization and detection of early bruise in apple based on near-infrared hyperspectral imaging coupled with geometrical influence correction. *Postharvest Biology and Tehcnology*. 210. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112753>.
5. Brosnan, T. i Sun, D.W. (2004.).Improving quality inspection of food products by computer vision. *Journal of Food Engineering*. 61 3-16. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00183-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00183-3).
6. Cai, S.; Du, Q. i Moorhead, R.J. 2007. Hyperspectral imagery visualization using double layers. *IEEE Transmittance and Geoscience. Remote* 45 (10), 3028–3036.
7. Carlini, P.; Massantini, R. i Mencarelli, F. (2000.). Vis-NIR measurement of soluble solids in cherry and apricot by PLS regression and wavelength selection. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*. 48, 5236–5242.
8. Clark, C.J.; McGlone, V.A. i Jordan, R.B. (2003.). Detection of brownheart in 'Braeburn' apple by transmission NIR spectroscopy. *Postharvest Biology and Technolgy* 28, 87–96. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00122-9](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00122-9).
9. Crisosto, C. H. (1994). Stone fruit maturity indices: A descriptive review. *Postharvest News and Information*. 5, 65e68.
10. Cubero, S.; Aleixos, N.; Moltó, E.; Gómez-Sanchis, J. i Blasco, J. (2011.). Advances in machine vision applications for automatic inspection and quality evaluation of fruits and vegetables. *Food Bioprocess Technology*. 4, 487–504.
11. Davies, A.M.C. (2000.). William Herschel and the discovery of near infrared. *Spectroscopy. Eur.* 12, 10-16.
12. Denoyes-Rothan, B.; Lafargue, M.; Guerin, G. i Clerjeau, M. (1999.). Fruit resistance to *Colletotrichum acutatum* in strawberries. *Plant Diseases*. 83 (6), 549–553.
13. Diels, E.; Dael, M.; Keresztes J.; Vanmaercke, S.; Verboven, P.; Nicolai, B.; Saeys, W.; Ramon, H. i Smeets, B. (2017.). Assesment of bruise volumes in apples using X-ray computed tomography. *Postharvest Biology and Technology*. 128 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.01.013>.
14. Du, Z.; Zeng, X.; Li, X.; Ding, X.; Cao, J. i Jiang, W. (2020.). Recent advances in imaging techniques for burise detection in fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*. 99 133-141. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.024>.
15. ElMasry, G.; Sun, D.W. i Allen, P. (2013.). Chemical-free assesment and mapping of major constituents in beef using hyperspectral imaging. *Journal of Food Engineering*. 117 235-246. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.02.016>.

16. ElMasry, G.; Wang, N.; ElSayed, A. i Michael Ngadi (2007.) – Hyperspectral imaging for nondestructive determination of some quality attributes for strawberry. *Journal of Food Engineering*. 81 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.10.016>.
17. Franck, C.; Lammertyn, J.; Ho, Q.T.; Verboven, P.; Verlinden, B. i Nicolai, B.M. (2007.). Browning disorders in pear fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 43 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.08.008>.
18. Fu, H.; Du, W.; Yang, J.; Wang, W.; Wu, Z. i Yang Z. (2023.). Bruise measurement of fresh market apples caused by repeated impacts using a pendulum method. *Postharvest Biology and Technology*. 195. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.112143>.
19. Gallo, A.; Giuberti, G.; Frisvad, J.C.; Bertuzzi, T. i Nielsen, K.F. (2015.). Review on mycotoxin issues in ruminants: occurrence in forages, effects of mycotoxin ingestion on health status and animal performance and practical strategies to counteract their negative effects. *Toxins* 7 (8), 3057–3111.
20. Giovannini, D.; Quacquarelli, I.; Ranieri, M. i Faedi, W. (2014.) Feasibility study of NIR application to strawberry internal fruit quality traits. *Acta Horti*. 1049, 947–954.
21. Golic, M. i Walsh, K.B. (2006.). Robustness of calibration models based on near infrared spectroscopy for the in-line grading of stone fruit for total soluble solids content. *Analytica Chimica Acta* 555, 286–291. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.09.014>.
22. Greensill, C.V. i Walsh, K.B. (2002.). Calibration transfer between miniature photodiode array-based spectrometers in the near infrared assessment of mandarin soluble solids content. *Journal of Near Infrared Spectrosc*. 10, 27–35.
23. He, X.; Yang, X.; Fu, X.; Jiang, X. i Rao, X. (2021.). Assesing soluble solid content and texture of pear during shelf-life period by single snapshot spatial frequency domain imaging. *Biosystems Engineering*. 212 252-263. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.10.016>.
24. Herrera, J.; Guesalaga, A. i Agosin, E. (2003.). Shortwave-near infrared spectroscopy for non-destructive determination of maturity of wine grapes. *Measurements in Science and Technolgy* 14, 689–697.
25. Hussein Zaharan , Olaniyi A. Fawole, Umezuruike Linus Opara (2019.). Bruise damage susceptibility on pomegranates (*Punica granatum* L.) and impact on fruit physiological response during short term storage. *Scientia Horticulturae*. 246 664-674. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.026>.
26. Hussein, Z.; Fawole, O.A. i Opara U.O. (2020.) Effects of burising and storage duration on physiological response and quality attributes of pomegranate fruit. *Scientia Horticulturae*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109306>.
27. Iglesias, I.; i Echeverri´a, G. (2009). Differential effect of cultivar and harvest date on nectarine colour, quality and consumer acceptance. *Scientia Horticulturae*, 120, 41e50. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.09.011>.
28. Il'yasov, S.G. i Krasnikov, V.V. (1991.). *Physical Principals of Infrared Irradiation of Foodstuffs*. Hemisphere Publishin Corporation, New York, USA.
29. Jiang, Q.; Wu, G.; Tian, C.; Li, N.; Yang, H.; Bai, Y.; Zhang, B. (2021.). Hyperspectral imaging for early identification of strawberry leaves diseases with machine learning and spectral fingerprint features. *Infrared Physics and Technology*. 118. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103898>.

30. Kawano, S.; Fujiwara, T. i Iwamoto, M. (1993.). Nondestructive determination of sugar content in Satsuma mandarin using near infrared (NIR) transmittance. *Journal of Japan Society of Horticultural Science*. 62, 465–470.
31. Keresztes, J.C.; Goodarzi, M. i Saeys W. (2016.). Real-time pixel based early apple bruise detection using short wave infrared hyperspectral imaging in combination with calibration and glare correction techniques. *Food Control*. 66 215-226. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.02.007>.
32. Kim, G.; Lee, K.; Choi, K.; Son, J.; Choi, D. i Kang, S. (2004.). Defect and ripeness inspection of citrus using NIR transmission spectrum. *Quality and safety evaluation laboratory, National agricultural mechanization research institute, 249 Seodundong, Suwon, 441-100, Republic of Korea*
33. Kim, Y.; Zhang, Q. i Reid, J.F. (2001). Fuzzy logic for image quality control of a field crop imaging sensor. *IFAC Proceedings Volumes*. 34 215-220. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)41708-3](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)41708-3).
34. Kim, D.; Burks, T. F.; Ritenour, M. A. i Qin, J. (2014). Citrus black spot detection using hyperspectral imaging Daegwan. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 7(6), 20e27. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20140706.004>.
35. Kritzinger, I.; Lötze, E. i Jooste, M. (2017). Stone hardening and broken stones in Japanese plums (*Prunus salicina* Lindl.) evaluated by means of computed tomography scans. *Scientia Horticulturae*, 221, 1e9. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.04.008>.
36. Lammertyn, J.; Nicolai, B.; Ooms, K.; De Smedt, V. i De Baerdemaeker, J. (1998.). Non-destructive measurement of acidity, soluble solids, and firmness of Jonagold apples using NIR spectroscopy. *Transmittance. ASAE* 41, 1089–1094.
37. Lee, H.J.; Kim, T.C.; Kim, S.J. i Park S.J. (2005.). Bruising injury of persimmon (*Diospyros kaki* cv. Fuyu). *Scientia Horticultutae*. 103 179-185. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.04.016>.
38. Leiva-Valenzuela, G.A.; Lu, R. i Aguilera J.M. (2014.). Assessment of internal quality of blueberries using hyperspectral transmittance and reflectance images with whole spectra or selected wavelengths. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 24 2-13. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2014.02.006> .
39. Leiva-Valenzuela, G. A. i Aguilera, J. M. (2013). Automatic detection of orientation and diseases in blueberries using image analysis to improve their postharvest storage quality. *Food Control*, 33(1), 166–173. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.02.025>.
40. Li, J.; Huang, W.; Tian, X.; Wang, C.; Fan, S. i Zhao C. (2016.). Fast detection and visualization of early decay in citrus using Vis-NIR hyperspectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*. 127 582-592. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.07.016> .
41. Li, Q.; Wang, M.; i Gu, W. (2002). Computer vision based system for apple surface defect detection. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2e3), 215e223. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00093-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00093-5).
42. Lin, P.; Yang, H.; Cheng, S.; Guo, F.; Wang, L. i Lin, Y. (2023.). An improved YOLOv5s method based bruises detection on apples using cold excitation thermal images. *Postharvest Biology and Technology*. 199. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112280>.

43. Liu, C.; Liu, W.; Lu, X.; Ma, F.; Chen, W.; Yang, J. i Zheng, L. (2014.). Application of multispectral imaging to determine quality attributes and ripeness stage in strawberry fruit. *PLoS One* 9 (2), e87818.
44. Liu, Y. i Ying, Y. (2005.). Use of FT-NIR spectrometry in non-invasive measurements of internal quality of 'Fuji' apples. *Postharvest Biology and Technology* 37, 65–71. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2005.02.013>.
45. Lu, R. (2001.). Predicting firmness and sugar content of sweet cherries using near-infrared diffuse reflectance spectroscopy. *Transmittance. ASAE* 44, 1265–1271.
46. Mahanti, N.K.; Pandiselvam, R.; Kothakota, A.; Ishwarya, P.S.; Chakraborty, S.K.; Kumar M. i Cozzolino D. (2022.). Emerging non-destructive imaging techniques for fruit damage detection : Image processing and analysis. *Trends in Food Science & Technology*. 120 418-438. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.12.021>.
47. Malek, M.; Ohno, T.; Suzuki H.; Kitamura H.; Kuroda K. i Shimizu, M. (2020.). A novel strain of endophytic *Streptomyces* for the biocontrol of strawberry anthracnose caused by *Glomerella cingulata*. *Microbiological Research*. 243. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126428>.
48. Martinsen, P. i Schaare, P. (1998.). Measuring soluble solids distribution in kiwifruit using near-infrared imaging spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*. 14, 271–281. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(98\)00051-9](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(98)00051-9).
49. McGlone, V.A.; Abe, H. i Kawano, S. (1997.). Kiwifruit firmness by near infrared light scattering. *J. Near Infrared Spectroscopy*. 5, 83–89 .
50. McGlone, V.A.; Jordan, R.B. i Martinsen, P.J. (2002.). Vis/NIR estimation at harvest of pre and post storage quality indices for 'Royal Gala' apple. *Postharvest Biology and Technology*. 25, 135–144. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(01\)00180-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(01)00180-6).
51. Mehinagic, E.; Royer, G.; Symoneaux, R.; Bertrand, D. i Jourjon, F. (2004.). Prediction of the sensory quality of apples by physical measurements. *Postharvest Biology and Technology*. 34, 257–269. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2004.05.017> .
52. Mehl, P. M.; Chao, K.; Kim, M. i Chen, Y. R. (2002). Detection of defects on selected apple cultivars using hyperspectral and multispectral image analysis. *Applied Engineering in Agriculture*, 18(2). <https://doi.org/10.13031/2013.7790>.
53. Momin, M.A.; Kuramoto, M.; Kondo, N.; Ido, K.; Ogawa, Y.; Shiigi, T. i Ahmad, U. (2013.). Identification of UV-fluorescence components for detecting peel defects of lemon and Yuzu using machine vision. *Engineering in Agriculture, Environment and Food* 6, 165–171. [https://doi.org/10.1016/S1881-8366\(13\)80004-3](https://doi.org/10.1016/S1881-8366(13)80004-3).
54. Munera, S.; Blasco, J.; Amigo, J. M.; Cubero, S.; Talens, P. i Aleixos, N. (2019.). Use of hyperspectral transmittance imaging to evaluate the internal quality of nectarines. *Biosystems engineering*. 182 54-64. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.04.001>.
55. Munera, S.; Amigo, J. M.; Blasco, J.; Cubero, S.; Talens, P. i Aleixos, N. (2017). Ripeness monitoring of two cultivars of nectarine using VIS-NIR hyperspectral reflectance imaging. *Journal of Food Engineering*, 214, 29e39. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.031>.
56. Nagata, M.; Tallada, J. G.; Kobayashi, T. i Toyoda, H. (2005). NIR hyperspectral imaging for measurement of internal quality in strawberries. 2005 ASAE Annual International Meeting Paper No 053131 (pp. 2–10).
57. Nicolaï, B.M.; Verlinden, B.E.; Desmet, M.; Saevels, S.; Theron, K.; Cubeddu, R.; Pifferi, A. i Torricelli, A. (2007.) Time-resolved and continuous wave NIR reflectance

- spectroscopy to predict firmness and soluble solids content of Conference pears. *Postharvest Biology and Technology*
58. Noh, H. K. i Lu, R. (2007.). Hyperspectral laser-induced fluorescence imaging for assessing apple fruit quality. *Postharvest Biology and Technology*, 43(2), 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.09.006>.
 59. Norris, K.H (1964). Desing and development of a new moisture meter. *Agriculture*. 45 370.
 60. Palou, L.; Smilanick, J.L.; Montesinos-Herrero, C.; Valencia-Chamorro, S. i Pérez-Gago, M.B. (2011.). Novel approaches for postharvest preservation of fresh citrus fruits. In: Slaker, D.A. (Ed.), *Citrus Fruits: Properties, Consumption and Nutrition*. NovaScience Publishers, Inc., NY, USA, pp. 1–45.
 61. Pan, L.; Zhang, W.; Zhu, N.; Mao, S. i Tu, K. (2014.). Early detection and classification of pathogenic fungal disease in post-harvest strawberry fruit by electronic nose and gas chromatography–mass spectrometry. *Food Research International*. 62, 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.02.020>.
 62. Park Y.S.; Leontowicz, H.; Leontowicz, M.; Namiesnik, J.; Suhaj, M.; Cvikrová, M.; Martincová, O.; Weisz M. i Gorinstein S. (2011.). Comparison of the contents of bioactive compounds and the level od antioxidant acivity in different kiwifurit cultivars. *Journal of Food Composition and Analysis*. 24 963-970.
 63. Qin, J.; Chao, K.; Kim, M. S.; Lu, R.; Burks, T. F. (2013.). Hyperspectral and multispectral imaging for evaluating food safety and quality. *Journal of Food Engineering*. 118 157-171 . <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.04.001> .
 64. Qin, J.; Chao, K.; Kim, M. S.; Lu, R. i Burks, T. F. (2013). Hyperspectral and multispectral imaging for evaluating food safety and quality. *Journal of Food Engineering*, 118(2), 157e171. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.04.001>.
 65. Rajapaksha, R. D.; Turner, D. N.; Vigil, J.; Frolova, L. V.; Altig, J. A.; Rogelj, S. i Ranasinghe, M. I. (2019.). Photo-physical properties of substituted 2,3-distyryl indoles: Spectroscopic, computational and biological insights. *Journal of Photochemistry and Photobiology, A: Chemistry*. 376 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.03.005>.
 66. Sanzani, S.M.; Reverberi, M. i Geisen, R. (2016.). Mycotoxins in harvested fruit and vegetables: insights in producing fungi biological role, conducive conditions, and tools to manage postharvest contamination. *Postharvest Biology and Technology*. 122, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.07.003>.
 67. Saranwong, S.; Sornsrivichai, J. i Kawano, S. (2001.). Improvement of PLS calibration for Brix value and dry matter of mango using information from MLR calibration. *Journal od Near Infrared Spectroscopy*. 9, 287–295.
 68. Schaare, P.N. i Fraser, D.G. (2000.). Comparison of reflectance, interactance and transmission modes of visible-near infrared spectroscopy for measuring internal properties of kiwifruit (*Actinidia chinensis*). *Postharvest Biology and Technology*.20, 175–184. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(00\)00130-7](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(00)00130-7).
 69. Schmilovitch, Z.; Mizrach, A.; Hoffman, A.; Egozi, H. i Fuchs, Y. (2000.). Determination of mango physiological indices by near-infrared spectrometry. *Postharvest Biology and Technology*. 19, 245–252. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(00\)00102-2](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(00)00102-2).
 70. Siedliska, A.; Baranowski, P.; Zubik, M.; Mazurek, W. i Sosnowska, B. (2018.). Detection of fungal infections in strawberry fruit by VNIR/SWIR hyperspectral imaging.

71. Sinelli, N.; Spinardi, A.; Di Egidio, V.; Mignani, I. i Casiraghi, E. (2008.). Evaluation of quality and nutraceutical content of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.) by near and mid-infrared spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, 50(1), 31–36. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.03.013>.
72. Skrovankova, S.; Mlcek, J.; Sochor, J.; Baron, M.; Kynicky, J. i Jurikova, T. (2015.). Determination of ascorbic acid by electrochemical techniques and other methods. *International Journal of Electrochemical Science*. 10 2421-2431. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)04857-5](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)04857-5).
73. Sugiyama, J.; Tsuta, M. i Sun, D.W. (2010). Chapter 11 — Visualization of sugar distribution of melons by hyperspectral technique. In D. W. Sun (Ed.), *Hyperspectral imaging for food quality analysis and control* (pp. 349–368). San Diego: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374753-2.10011-5>.
74. Tallada, J.G.; Nagata, M.; Kobayashi, T.; (2006.). Non-Destructive estimation of firmness of strawberries (*Fragaria x ananassa* Duch.) using NIR hyperspectral imaging. *Environmental Control in Biology*. 44 (4), 245–255.
75. Tani, E.; Polidoros, A. N. i Tsaftaris, A. S. (2007). Characterization and expression analysis of FRUITFULL-and SHATTER-PROOFlike genes from peach (*Prunus persica*) and their role in split-pit formation. *Tree Physiology*, 27, 649e659.
76. Teena, M.A.; Manickavasagan, A.; Ravikanth, L. i Jayas, D.S. (2014.). Near infrared (NIR) hyperspectral imaging to classify fungal infected date fruits. *Journal of Stored Products Research*. 59, 306–313. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2014.09.005>.
77. Ventura, M.; De Jager, A.; De Putter, H. i Roelofs, F.P.M.M. (1998.). Non-destructive determination of soluble solids in apple fruit by near infrared spectroscopy (NIRS). *Postharvest Biology and Technology*. 14, 21–27. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(98\)00030-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(98)00030-1).
78. Wang, W.; Lawrence, K. C.; Ni, X.; Yoon, S.-C.; Heitschmidt, G. W. i Feldner P. (2015.). Near-infrared hyperspectral imaging for detecting Aflatoxin B1 of maize kernels. *Food Control*. 51 347-355. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.11.047>.
79. Wang, Q.; Tao, S.; Dubé, C.; Tury, E.; Hao, Y.J.; Zhang, S. i Khanizadeh, S. (2012.). Postharvest changes in the total phenolic content, antioxidant capacity and LPhenylalanine ammonia-Lyase activity of strawberries inoculated with *botrytis cinerea*. *J. Plant Studies*. 1 (2), 11.
80. Yang, C.; Lee, W. S. i Gader P. (2014.). Hyperspectral band selection for detecting different blueberry fruit maturity stages. *Computers and Electronics in Agriculture*. 109 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.08.009>.
81. Yang, C.; Lee, W. S.; i Williamson, J. G. (2012.). Classification of blueberry fruit and leaves based on spectral signatures. *Biosystems Engineering*, 113(4), 351–362. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.09.009>.
82. Yang, H.; Du, Q.; Su, H. i Sheng, Y. 2011. An efficient method for supervised hyperspectral band selection. *IEEE Transmittance and Geoscience Remote*. 8 (1), 138–142.
83. Yao Z.; Sakai, K.; Ye, X.; Akita, T. i Iwabuchi, Y. (2008.). Airborne hyperspectral imaging for estimating acorn yield based on the PLS B-matrix calibration technique. *Ecological Informatics*. 3 237-244. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2008.03.001>.

84. Zhang, C.; Zhao, C.; Huang, W.; Wang, Q.; Liu, S.; Li, J. i Guo Z. (2017.). Automatic detection of defective apples using NIR coded strucutred light and fast lightness correction. Journal of Food Engineering. 203 69-82. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.008>.
85. Zhang, B.; Huang, W.; Li, J.; Zhao, C.; Fan, S.; Wu, J. i Liu, C. (2014.). Principles, developments and applications of computer vision for external quality inspection of fruits and vegetables: A review. Food Research International. 62, 326e343. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.03.012>.

5. Popis ilustracija i tablica

- Slika 1. - Tipični NIR refleksijski spektar nekoliko voćnih vrsta u usporedbi (Nicolai i sur., 2007.)
- Slika 2. - Shematski prikaz metode (a) refleksije, (b) prijenosa i (c) interakcije blisko infracrvenih zraka (Nicolai i sur., 2007.)
- Slika 3. - Shematski prikaz hiperspektralnog linijskog sustava (Baek i sur., 2019)
- Slika 4.- Shema optičkog puta svjetla hiperspektralnog sustava (Baek i sur., 2019.)
- Slika 5.- Primjer prostorne kalibracije crvenim i plavim filmom (Baek i sur., 2019.)
- Slika 6.- Shema neobrađene slike hiperspektralnog linijskog sustava (Baek i sur., 2019)
- Slika 7.- Završna hiperspektralna linijska snimka ploda jabuke sa označenim nedostacima na površini (Baek i sur., 2019.)
- Slika 8.- Shematski prikaz promatranog objekta sa označenim nedostacima (Baek i sur., 2019.)
- Slika 9.- Shema hiperspektralnog sustava u modu prijenosa (Munera i sur., 2019.)
- Slika 10.- Primjer ploda nektarine sa razdvojenom košticom (Munera i sur., 2019.)
- Slika 11. - Primjer hiperspektralne analize nedozrelog, zrelog i zdravog ploda te ploda sa razdvojenom košticom (Munera i sur., 2019.)
- Slika 12.- Shematski prikaz hiperspektralnog sustava za snimanje plodova borovnice (Leiva-Valenzuela i sur., 2014.)
- Slika 13.- Primjer bobica borovnice različitog stupnja zrelosti na istom grozdu (Yang i sur., 2014.)
- Slika 14.- Hiperspektralna kamera sa linijski skenirajućim spektrometrom (Yang i sur., 2014.)
- Slika 15.- Stvarna primarna slika grozda borovnice uslikana hiperspektralnom kamerom (Yang i sur., 2014.)
- Slika 16.- Primjer razvoja patogena na plodovima jagode u dnevnim intervalima uz primjer zdravih plodova (Siedliska i sur., 2018.)
- Slika 17.- Primjer uzoraka u različitim intervalima sa vidljivim simptomima zaraze (Jiang i sur., 2021.)
- Slika 18.- Primjer vida hiperspektralnog sustava kroz prikaz različitih valnih duljina ovisno o zdravstvenom stanju lista i prisutnosti vrste patogena (Jiang i sur., 2021.)
- Slika 19.- Primjer emitiranja žuto-fluorescentne boje područja zaraženog patogenom pod ultraljubičastim svjetlom (Li i sur., 2016.)
- Slika 20.- Shema procesa dobivanja binarne slike za izolaciju područja interesa za analizu (Li i sur., 2016.)
- Slika 21.- Primjer automatske korekcije valnih duljina spektra dobivenog metodom refleksije (Li i sur., 2016.)
- Slika 22.- Primjer četiri slike različitog spektra istog ploda (Li i sur., 2016.)
- Slika 23.- Primjer automatske korekcije intenziteta refleksije u odnosu na horizontalne i vertikalne linije profila promatranog objekta (Li i sur., 2016.)

Tablica 1. - Pregled primjene NIR spektroskopije za mjerenje TST plodova voća (Nicolai i sur., 2007.)

6. Životopis

Osobni podaci

Ime / Prezime **Luka Hlišć**
Adresa Ulica Ive Tijardovića 42, 10000 Zagreb
Telefonski broj +385913033170

E-mail luka.hlisc12@gmail.com

Državljanstvo Hrvatsko

Datum rođenja 3. travnja 2003.

Spol Muško

Obrazovanje

Period 2021 – trenutno

Naziv i vrsta ustanove pružatelja obrazovanja Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet

Adresa ustanove pružatelja obrazovanja Svetošimunska cesta 25
10000 Zagreb

Period 2017. – 2021.

Naziv dodijeljene kvalifikacije / zvanje Agronomski tehničar

Naziv i vrsta ustanove pružatelja obrazovanja i osposobljavanja Agronomska škola Zagreb

Adresa ustanove pružatelja obrazovanja Ulica Gjure Prejca 2
10000 Zagreb

Osobne vještine i kompetencije

Materinski jezik **Hrvatski**

Drugi jezik

Samoprocjena

Razumijevanje		Govor		Pisanje
Slušanje	Čitanje	Govorna interakcija	Govorna produkcija	
Odlično	Odlično	Odlično	Odlično	Odlično

Engleski jezik

Dodatne informacije

Svestran i uvijek zainteresiran za nove spoznaje. Vrlo znatiželjan i inovativan. U slobodno vrijeme okupiran voćarstvom i preciznom mehanikom. Strastven zaljubljenik u prirodu i rekreativne aktivnosti. Posjedujem računalne i tehničke vještine koje sam stjecao tijekom odrastanja i školovanja. Također, za sebe smatram da posjedujem dobre komunikacijske i organizacijske vještine. Nastojim učiti strane jezike, usavršavati znanje na području agronomije i baviti se voćarstvom.