

Daljinska mjerenja fotosintetske aktivnosti

Uvod

Fotosinteza je ključan biološki proces na Zemlji, kojim zelene biljke, alge i neki mikroorganizmi koriste energiju sunčeve svjetlosti za pretvaranje ugljikova dioksida i vode u kisik i organske spojeve, poput glukoze. Kroz fotosintezu, biljke proizvode neophodne ugljikohidrate koji osiguravaju energiju za njihov rast i razvoj, dok u atmosferu otpuštaju kisik, čineći ga dostupnim za disanje svih aerobnih organizama (Taiz & Zeiger, 2015). Fotosinteza je temelj globalnog ekosustava i života na Zemlji, jer biljke zauzimaju ključnu ulogu u hranidbenim lancima i ciklusu ugljika (Lambers i sur., 2008).

U poljoprivredi, razumijevanje fotosintetske aktivnosti može pomoći u optimizaciji proizvodnje usjeva. Praćenje promjena u fotosintetskoj aktivnosti omogućava pravovremenu intervenciju, kao što je poboljšanje navodnjavanja ili primjene gnojiva, što dovodi do povećanja prinosa (Jones, 1999; 2014a). U ekologiji, fotosintetska aktivnost biljaka ključna je za praćenje zdravlja ekosustava, jer fluktuacije u fotosintetskoj aktivnosti mogu ukazivati na stres uzrokovan okolišnim promjenama kao što su suša ili onečišćenje (Zhu i sur., 2016). Klimatske znanosti koriste podatke o fotosintetskoj aktivnosti za procjenu sposobnosti ekosustava da sekvstriraju ugljik i odgovore na promjene u klimatskim uvjetima (Ciais i sur., 2013).

Daljinska mjerenja (engl. *remote sensing*) obuhvaćaju tehnologije za prikupljanje podataka o Zemljinoj površini i vegetaciji s pomoću senzora koji se nalaze na udaljenosti, najčešće na satelitima, bespilotnim letjelicama (dronovima) ili avionima. Ovi senzori mjere refleksiju sunčeve svjetlosti ili emitiranu energiju iz biljaka i drugih površina. Biljke apsorbiraju određene valne duljine svjetlosti tijekom fotosinteze, dok druge reflektiraju, što omogućava senzorskim sustavima da detektiraju različite aspekte vegetacijskog zdravlja, uključujući fotosintetsku aktivnost (Zarco-Tejada i sur., 2013). Daljinska mjerenja omogućavaju neinvazivno praćenje vegetacije na velikim površinama, čime se eliminira potreba za fizičkim uzorkovanjem ili mjerenjem. Korištenjem različitih spektralnih indeksa, kao što su *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) i *Photochemical Reflectance Index* (PRI), moguće je odrediti razinu fotosintetske aktivnosti i zdravlja biljaka, te identificirati područja koja su podložna stresu ili imaju slab rast (Gamon i sur., 1997).

Temeljni cilj daljinskih mjerenja je omogućiti kontinuirano praćenje zdravlja biljaka i njihovih ekosustava na globalnoj razini, uz minimalnu intervenciju i troškove. Praćenje fotosintetske aktivnosti kroz daljinska mjerenja omogućava precizno praćenje poljoprivrednih kultura, što može pomoći poljoprivrednicima da donesu informirane odluke o navodnjavanju, gnojidbi i zaštiti usjeva od bolesti ili štetnika (Schlemmer i sur., 2013). U ekologiji, ova tehnologija je ključna za otkrivanje promjena u vegetacijskim pokrovu, uključujući utjecaje klimatskih promjena, deforestaciju i degradaciju zemljišta (Running i sur., 2004). Daljinska mjerenja također omogućavaju znanstvenicima praćenje globalnog ciklusa ugljika i hranjivih tvari kroz procjene fotosintetsku aktivnost šuma, travnjaka i poljoprivrednih zemljišta. Ova metoda postaje sve važnija u vremenu kada su klimatske promjene značajan globalni izazov, jer precizno praćenje ekosustava omogućava procjene utjecaja klimatskih promjena na sposobnost vegetacije da sekvstrira ugljik i osigura stabilnost ekosustava (Ciais i sur., 2013).

Fotosintetska aktivnost i važnost njezina praćenja

Fotosinteza je najveći sintetski proces na Zemlji, a fotosintetski organizmi godišnje fiksiraju oko $1,06 \times 10^{14}$ kg (106 milijardi tona) ugljika u organske spojeve (neto primarna produktivnost). To čini oko 1 % poznatih svjetskih rezervi fosilnih goriva (ugljen, plin i nafta) ili deset puta više od trenutne svjetske godišnje potrošnje energije. Izvor ugljika u procesu fotosinteze je 0,04 % CO_2 prisutnog u zraku (oko 8×10^{14} kg ugljika), kao i CO_2 otopljen u jezerima i oceanima (oko 400×10^{14} kg ugljika). Osim organskih spojeva, fotosintezom nastaje još jedan neophodan produkt za sve aerobne organizme – kisik (O_2). Trenutnom brzinom, cjelokupni atmosferski sadržaj kisika obnavlja se fotosintezom svakih 2000 godina (Nobel, 2020). Fotosinteza obuhvaća niz koraka koji djeluju s izuzetno visokom učinkovitošću: apsorpcija svjetlosti u antenskom sustavu fotosintetskog aparata, primarni prijenos elektrona u reakcijskim centrima, stabilizacija energije sekundarnim procesima kroz stvaranje NADPH i ATP-a te biokemijske reakcije asimilacije CO_2 u organske spojeve (Stirbet i sur., 2020).

Asimilacija ugljika fotosintezom ključan je proces u metabolizmu biljaka, a na nju značajno utječu uvjeti okoline. U prirodnim uvjetima, opstanak svakog organizma u ekosustavu ovisi o njegovoj sposobnosti prilagodbe okolini. Kada biljke rastu u optimalnim uvjetima, njihovu produktivnost određuje učinkovitost fotosintetskog aparata. Međutim, u promjenjivom okolišu, biljke prilagođavaju svoj metabolizam kako bi se nosile s okolišnim stresom i održale ravnotežu između proizvodnje i potrošnje energije (Scheibe, 2019).

Fotosintetski aparat dizajniran je za apsorpciju velikih količina svjetlosne energije i njezinu pretvorbu u kemijsku energiju. Na molekularnoj razini, energija fotona može biti štetna, osobito u nepovoljnim uvjetima. Višak svjetlosne energije može uzrokovati stvaranje reaktivnih vrsta kisika, poput superoksida, singletnog kisika i peroksida. Ako se svjetlosna energija ne rasprši na siguran način, prekomjerna ekscitacija koja dolazi do reakcijskog centra fotosustava može dovesti do njegove inaktivacije i oštećenja, poznatog kao fotoinhibicija (Taiz & Zeiger, 2015). Dinamička fotoinhibicija događa se svakodnevno kada je list izložen visokim razinama svjetlosti. Tada se kvantni prinos smanjuje, ali stopa fotosinteze ostaje nepromijenjena jer se apsorbirana energija usmjerava prema fotoprotektivnom rasipanju topline. Međutim, fotoinhibicija postaje izraženija na niskim temperaturama, a kronična u ekstremnim klimatskim uvjetima kada zbog nemogućnosti fotoprotekcije dovodi do oštećenja fotosintetskog aparata, smanjenja kvantnog prinosa i smanjenja maksimalne stope fotosinteze (Taiz & Zeiger, 2015).

Fotokemijske reakcije u tilakoidnim membranama i metabolizam ugljika u stromi kloroplasta primarna su mjesta oštećenja zbog toplinskog stresa uzrokovanog niskim ili visokim temperaturama (Yang i sur., 2009; Mathur i sur., 2014). Nedostatak vode negativno utječe na fotosintetsku aktivnost jer su molekule vode donori elektrona u fotosintetskom transportnom lancu elektrona. Čak i blagi nedostatak vode uzrokuje zatvaranje puči (stoma), što smanjuje neto fotosintezu kako bi se spriječio daljnji gubitak vode. No, zatvaranje puči smanjuje opskrbu ribuloza-1,5-bisfosfat karboksilaze/oksigenaze ugljikovim dioksidom, favorizirajući njezinu oksigenaznu aktivnost. Nemogućnost korištenja svjetlosne energije uzrokuje neravnotežu u lancu transporta elektrona (Foyer i sur., 2012), povećava proizvodnju reaktivnih vrsta kisika (Miller i sur., 2010), utječe na omjer fotosintetskih pigmenta u antenskim sustavima (Li & Kim, 2022) te dovodi do dezorganizacije tilakoidnih membrana kloroplasta (Zhu i sur., 2021).

Nedostatak hranjivih tvari također utječe na strukturu i funkciju fotosintetskog aparata, uglavnom ometanjem sinteze ključnih fotosintetskih komponenti. Primjerice, na sintezu klorofila izravno utječu nedostatak dušika, magnezija i željeza (Huang i sur., 2004; Jin i sur., 2015; Samborska i sur., 2018), dok dušik, željezo i sumpor izravno utječu na sintezu proteinskih komponenti fotosintetskog aparata

(D'Hooghe i sur., 2013). Kalcij i kalij su ključni za stabilizaciju membrana i staničnu signalizaciju (Rampino i sur., 2006), a kalcij je također važan za funkcioniranje kisik razvijajućeg kompleksa, reakcijskih centara fotosustava i transport elektrona (Hussein i sur., 2009). Na fotosintezu utječe i nedostatak fosfora, uglavnom neizravno, usporavanjem proizvodnje ATP-a i NADPH (Wu i sur., 2006; Xu i sur., 2007). Nedostatak hranjivih tvari ne samo da izravno utječe na strukturu i funkciju fotosintetskog aparata, već i smanjuje potražnju za fotoasimilatima, što dovodi do smanjenja rasta i akumulacije biomase (Lu i sur., 2001).

U prisutnosti dovoljne količine svjetlosti, veće koncentracije CO₂ potiču veću stopu fotosinteze. Međutim, izravan učinak povećanja koncentracije CO₂ u atmosferi, uz zanemarivanje popratnih čimbenika poput promjena temperature zraka, dostupnosti vode, hranjivih tvari i drugih uvjeta, rezultira povećanjem koncentracije CO₂ u međustaničnim prostorima. To dovodi do smanjenja otvaranja puči i smanjene transpiracije. Biljke tu promjenu djelomično kompenziraju povećanjem temperature lista, što pospešuje gubitak vode. Kod udvostručenja razine CO₂ u atmosferi, transpiracija bi se mogla smanjiti za 25 do 40 %. Također se očekuje da bi udvostručenje razine CO₂ u atmosferi moglo podići trenutnu stopu fotosinteze kod C3 biljaka (koje čine 95 % svih biljaka) za 30 do 60 %, dok bi utjecaj na C4 biljke (manje od 1 % biljaka, ali sa značajnim doprinosom globalnoj primarnoj produkciji od 20 %) bio minimalan (Nobel, 2020).

Praćenje fotosintetske aktivnosti ključno je za razumijevanje zdravlja biljaka, procjenu poljoprivrednih prinosa i ocjenu stanja ekosustava. Fotosintetska aktivnost biljaka odražava njihovu prilagodbu promjenjivim okolišnim uvjetima i može pružiti rane indikacije stresa uzrokovanog sušom, nedostatkom hranjivih tvari, bolestima ili napadima štetnika (Jones, 2014b). U poljoprivredi, praćenje fotosintetske aktivnosti omogućuje optimiziranje korištenja resursa, što može poboljšati prinos i kvalitetu usjeva. Osim toga, različiti podaci o fotosintezi mogu pomoći u prepoznavanju ranih znakova bolesti, omogućavajući pravovremene intervencije i smanjenje gubitaka (Schlemmer i sur., 2013).

U ekološkom kontekstu, praćenje fotosintetske aktivnosti ključan je alat za razumijevanje dinamike ciklusa ugljika i sposobnosti vegetacije za sekvencijaciju ugljika. Klimatske promjene mogu značajno utjecati na fotosintezu i produktivnost biljaka, što ima dalekosežne posljedice za globalne ekosustave (Ciais i sur., 2013). Podaci o fotosintetskoj aktivnosti mogu se koristiti i za praćenje promjena u vegetacijskom pokrovu, omogućujući prepoznavanje područja pogođenih deforestacijom i degradacijom tla, te pružaju osnovu za ocjenu učinkovitosti mjera očuvanja okoliša (Running i sur., 2004).

Temeljni principi daljinskih mjerenja

Biljke apsorbiraju, reflektiraju i emitiraju energiju kroz elektromagnetski spektar, što omogućuje njihovo praćenje s pomoću daljinskih senzora. Različiti dijelovi spektra, poput vidljive svjetlosti i bliskog infracrvenog (NIR) područja, pružaju ključne informacije o stanju biljaka i njihovoj fotosintetskoj aktivnosti. Klorofil u biljkama apsorbira svjetlost prvenstveno u crvenom (oko 680 nm) i plavom (oko 450 nm) dijelu spektra, dok reflektira zelenu svjetlost (Taiz & Zeiger, 2015). Međutim, biljke također snažno reflektiraju svjetlost u bliskom infracrvenom dijelu spektra (700-1300 nm), što je ključna karakteristika za daljinska mjerenja.

Refleksija u bliskom infracrvenom spektru povezana je s unutarnjom strukturom lista, posebno s međustaničnim prostorima. Zdrave biljke reflektiraju više NIR svjetlosti zbog svoje očuvane strukture,

dok stresirane ili oštećene biljke reflektiraju manje NIR svjetlosti jer im je struktura lista narušena (Gamon i sur., 1997). Mjerenjem refleksije u tim dijelovima spektra, istraživači mogu precizno procijeniti stanje vegetacijskog pokrova i zdravlje biljaka.

U daljinskim mjerenjima dostupno je nekoliko signala za otkrivanje fiziološkog statusa biljaka. Indeksi vegetacije temelje se na omjerima reflektiranih valnih duljina kako bi se kvantificirala fotosintetska aktivnost, sadržaj klorofila i opće stanje biljaka. Najpoznatiji i najšire korišteni indeks vegetacije je NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), koji koristi refleksiju u crvenom i bliskom infracrvenom spektru za procjenu vegetacijske pokrivenosti. NDVI se izračunava kao omjer razlike između reflektiranih NIR i crvenih valnih duljina u odnosu na njihovu ukupnu refleksiju:

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

Vrijednosti NDVI indeksa kreću se od -1 do 1, pri čemu su pozitivne vrijednosti povezane s gustom i zdravom vegetacijom, dok su negativne vrijednosti povezane s vodom, tlom ili umjetnim površinama (Tucker, 1979).

Fluorescencija klorofila (ChlF) i indeks fotokemijske refleksije (PRI - *Photochemical Reflectance Index*) mogu detektirati kratkoročni odgovor fotosinteze na promjene okoliša. Oba signala su povezana s rasipanjem topline fotosustava II. PRI je važan indeks koji se koristi za procjenu učinkovitosti fotosinteze, jer je osjetljiv na promjene u refleksiji svjetlosti u zelenom dijelu spektra (oko 531 nm), koje nastaju zbog promjena u fotosintetskoj aktivnosti. Vrijednosti PRI indeksa kreću se od -1 do 1, pri čemu više vrijednosti ukazuju na povećanu fotosintetsku aktivnost, dok niže vrijednosti mogu ukazivati na stres ili smanjenu aktivnost (Gamon i sur., 1997; Trotter i sur., 2002; Atherton i sur., 2016). PRI se koristi za utvrđivanje razine stresa i predviđanje stopa fotosinteze, jer je u snažnoj korelaciji s oslobađanjem apsorbirane energije u obliku topline i kvantnim prinosom fotokemijskih reakcija fotosustava II kada se mjeri na razini jednog lista. Međutim, njegova primjena ima manji značaj kada se koristi na većim skalama, unutar iste krošnje, između različitih vrsta ili unutar vegetacijskog pokrova (Nakamura i sur., 2024).

Jedna od najučinkovitijih metoda za istraživanje funkcionalnosti fotosintetskog aparata je mjerenje fluorescencije klorofila. Fluorescencija klorofila prirodna je pojava prisutna u svim fotosintetskim organizmima. Ona predstavlja elektromagnetsko zračenje koje emitira klorofil, a koje se ne koristi u fotosintezi niti se pretvara u toplinsku energiju (Žurek i sur., 2014; Kalaji i sur., 2017). Intenzitet fluorescencije klorofila obrnuto je proporcionalan udjelu energije koji se koristi u fotosintezi te pruža izravne i neizravne informacije o svim svjetlosnim fazama fotosinteze: fotolizi vode, transportu elektrona, stvaranju pH razlike preko tilakoidnih membrana, sintezi ATP-a (Kalaji i sur. 2017) i raznim regulatornim procesima (Brestič i sur. 2012).

Mjerenje fluorescencije klorofila pomaže u otkrivanju ranih promjena u funkcioniranju i strukturi fotosintetskog aparata (Strasser i sur., 2004; Kalaji i sur., 2016). Također, pruža vrijedne informacije o fiziološkom stanju biljaka, što je ključno za razumijevanje fizioloških promjena do kojih dolazi u promjenjivim uvjetima okoliša, poput nedostatka hranjivih tvari (Živčák i sur., 2014; Samborska i sur., 2019), solnog stresa (Dąbrowski i sur., 2016), temperaturnog stresa (Yang i sur., 2009; Kalaji i sur., 2011) i suše (Oukarroum i sur., 2009; Goltsev i sur., 2012; Kalaji i sur., 2016). Korištenjem senzora koji mogu detektirati emisije fluorescencije biljaka, istraživači mogu pratiti zdravlje vegetacije u velikim ekosustavima (Maxwell & Johnson, 2000).

Većina toplinskih infracrvenih (TIR) senzora koji se koriste za analizu vegetacije mjeri emitirano zračenje u infracrvenom (IR) području srednjeg dometa (3–8 μm) i, češće, u IR području dugog dometa (8–14 μm) (Kuenzer & Dech, 2013; Zhu i sur., 2018). Površinska temperatura biljaka ovisi o različitim kemijskim, biološkim i fizikalnim svojstvima, pružajući vrijedan uvid u fiziološke obrasce (Still i sur., 2019). Na primjer, u uvjetima nedostatka vode, biljke zatvaraju puči, što smanjuje transpiraciju i povećava unutarnju temperaturu lista. Daljinsko mjerenje temperature lista može pomoći u prepoznavanju biljaka pod utjecajem toplinskog stresa ili suše (Buitrago i sur., 2016; Coates i sur., 2015). Na većim razmjerima, toplinski podaci mogu poboljšati klasifikaciju vegetacijskog pokrova te se koristiti za procjenu prostorne distribucije određenih vrsta i zajednica (Barnes i sur., 2021), kao i pružiti vrijedne informacije o razmjeni vode i energije između biljaka, tla i atmosfere, što je korisno za upravljanje okolišem. Termalni senzori mogu biti postavljeni na dronove, avione ili satelite, omogućujući praćenje vegetacije na velikim površinama u realnom vremenu (Meron i sur., 2010).

Za prikupljanje podataka o fotosintetskoj aktivnosti biljaka koriste se različiti senzori postavljeni na satelite, dronove, avione ili stacionarne platforme. Ovi senzori bilježe refleksiju svjetlosti u različitim dijelovima elektromagnetskog spektra, što omogućava kontinuirano praćenje vegetacije na lokalnim, regionalnim i globalnim skalama

Sateliti kao što su Landsat i MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) imaju ključnu ulogu u globalnom praćenju vegetacije. Landsat senzori, koji djeluju još od 1970-ih godina, omogućuju visoku prostornu rezoluciju (30 metara), što ih čini idealnim za praćenje promjena u vegetacijskom pokrovu i korištenju zemljišta (Wulder i sur., 2016). MODIS, koji je lansiran 1999. godine, pruža nižu prostornu rezoluciju (250-1000 metara), ali pokriva cijelu Zemlju svakih jedan do dva dana, omogućujući kontinuirano praćenje globalnih vegetacijskih obrazaca i klimatskih promjena (Justice i sur., 2002).

Bespilotne letjelice (dronovi) opremljene multispektralnim kamerama postale su sve popularniji alat za precizno praćenje vegetacije na manjim površinama. Multispektralne kamere snimaju refleksiju u nekoliko uskih spektralnih područja, uključujući crvenu, zelenu i infracrvenu svjetlost. Korištenjem dronova moguće je dobiti podatke visoke prostorne i vremenske rezolucije, što omogućuje praćenje biljaka u realnom vremenu te identifikaciju ranih znakova stresa uslijed nedostatka vode, bolestima ili napadima štetnika (Lelong i sur., 2008).

Hiperspektralni senzori snimaju refleksiju svjetlosti u stotinama uskih valnih duljina, što omogućuje preciznu analizu kemijskog sastava biljaka i tla. Ovi senzori pružaju detaljne podatke o fotosintetskoj aktivnosti, sadržaju klorofila i vodnom statusu biljaka, ali su skuplji i kompleksniji za korištenje u usporedbi s multispektralnim sensorima (Zarco-Tejada i sur., 2013).

Daljinska mjerenja koriste ove napredne tehnologije za kontinuirano praćenje zdravlja biljaka i promjena u vegetaciji, što ih čini nezamjenjivim alatima u poljoprivredi, ekologiji, klimatologiji i znanosti o Zemlji.

Prednosti, ograničenja i budućnost daljinskih mjerenja

Daljinska mjerenja su moćan alat koji pruža nekoliko ključnih prednosti u praćenju vegetacije i poljoprivrednih sustava. Glavna prednost daljinskih mjerenja je sposobnost pokrivanja velikih geografskih područja u kratkom vremenu. Satelitski senzori, poput Landsata i MODIS-a, omogućuju praćenje vegetacije na globalnoj razini, dok dronovi i avioni omogućuju precizno praćenje na lokalnim

razinama (Wulder i sur., 2016). Ova prostorna pokrivenost čini daljinska mjerenja posebno korisnim u praćenju promjena u okolišu, poput deforestacije, šumskih požara ili suša. Daljinska mjerenja ne zahtijevaju fizički kontakt s biljkama, što ih čini idealnim za praćenje osjetljivih ekosustava ili teško dostupnih područja. Za razliku od tradicionalnih metoda uzorkovanja, omogućuju prikupljanje podataka bez ometanja okoliša, što je osobito važno u zaštićenim područjima ili ekološki osjetljivim zonama (Jones, 1999; 2014a; 2014b). Nadalje, daljinska mjerenja omogućuju stalno praćenje vegetacije tijekom dugog razdoblja. Satelitski senzori pružaju podatke svakodnevno ili u redovitim intervalima, što omogućuje praćenje sezonskih promjena, rasta usjeva i dugoročnih trendova povezanih s klimatskim promjenama. Ova vremenska dimenzija omogućuje poljoprivrednicima, znanstvenicima i donosiocima odluka da bolje razumiju dinamiku vegetacije i prilagode svoje strategije (Justice i sur., 2002).

Iako daljinska mjerenja pružaju mnoge prednosti, postoje određena ograničenja koja treba uzeti u obzir. Prije svega, daljinska mjerenja zahtijevaju preciznu kalibraciju senzora kako bi se osigurala točnost prikupljenih podataka. Senzori na satelitima, dronovima ili avionima moraju biti pažljivo podešeni kako bi se izbjegle pogreške uzrokovane promjenama u atmosferi, kutovima sunčeve svjetlosti ili drugim čimbenicima (Verrelst i sur., 2015). Također, obrada velikih količina podataka koje generiraju daljinski senzori može biti izazovna, jer zahtijeva specijalizirani softver i stručnjake za analizu podataka. Optički senzori, koji se koriste u daljinskim mjerenjima, mogu biti ograničeni u oblačnim područjima jer oblaci blokiraju prolazak svjetlosti do tla. U šumovitim područjima, gusta krošnja može spriječiti prikupljanje podataka o tlu i vegetaciji ispod stabala. Ovi problemi mogu se ublažiti upotrebom radarskih senzora koji mogu prodrijeti kroz oblake i vegetaciju, no ti senzori imaju svoja ograničenja u preciznosti (Moreira i sur., 2013). Iako satelitski senzori omogućuju praćenje velikih površina, njihova prostorna rezolucija često nije dovoljna za detaljno praćenje pojedinačnih biljaka. Dronovi i avioni s višom rezolucijom mogu pružiti detaljnije podatke, ali još uvijek postoji ograničenje u kapacitetu za praćenje specifičnih biljaka na velikim područjima. Ovaj problem djelomično se može riješiti kombiniranjem metoda, npr. integracijom daljinskih senzora i terenskih podataka (Lelong i sur., 2008).

Napredak u tehnologiji senzora značajno je poboljšao mogućnosti daljinskih mjerenja, čineći ih sve preciznijima i svestranijima. Hiperspektralne kamere, koje prikupljaju podatke iz stotina uskih spektralnih područja, pružaju detaljne informacije o kemijskom sastavu biljaka i njihovoj fotosintetskoj aktivnosti. Ove kamere mogu detektirati promjene u sadržaju klorofila, vode i drugih ključnih pokazatelja zdravlja biljaka, omogućujući raniju detekciju stresa ili bolesti (Zarco-Tejada i sur., 2013). Satelitski senzori, poput onih na Landsat 8 i Sentinel-2 omogućuju sve bolju prostornu i spektralnu rezoluciju, što je ključno za detaljnije praćenje vegetacije i promjena u okolišu manjih područja u poljoprivredi i ekološkim istraživanjima (Wulder i sur., 2016).

Kombinacija daljinskih mjerenja s umjetnom inteligencijom (AI) i strojnim učenjem otvara nove mogućnosti za analizu velikih količina podataka i predviđanje promjena u vegetaciji. Algoritmi strojnog učenja mogu analizirati ogromne količine podataka generiranih satelitima, dronovima i drugim sensorima kako bi identificirali obrasce koji su nevidljivi ljudskom oku (Verrelst i sur., 2015). Primjerice, algoritmi mogu otkriti suptilne promjene u refleksiji svjetlosti koje ukazuju na rani stres kod biljaka, što omogućava pravovremene intervencije u poljoprivredi. Ova tehnologija također može pomoći u predviđanju budućih promjena u vegetaciji, na temelju prošlih podataka i trenutačnih uvjeta, omogućujući bolje planiranje u poljoprivredi i upravljanje prirodnim resursima (Verrelst i sur., 2015).

Integracija daljinskih mjerenja s Internetom stvari (IoT) otvara nove mogućnosti za pametno upravljanje poljoprivrednim sustavima. IoT senzori, postavljeni na poljima, mogu pratiti ključne parametre poput

vlage tla, temperature i hranjivih tvari u stvarnom vremenu, dok daljinska mjerenja pružaju širu sliku o stanju vegetacije (Bauer i sur., 2015). Kombinacija ovih tehnologija omogućava precizno upravljanje resursima u poljoprivredi, optimizaciju navodnjavanja i gnojidbe te smanjenje troškova i negativnih utjecaja na okoliš. Ova integracija je ključna za razvoj održivih poljoprivrednih praksi koje mogu zadovoljiti rastuće potrebe za hranom uz smanjenje ekoloških pritisaka (Ruddell & Kumar, 2017).

Zaključak

Daljinska mjerenja fotosintetske aktivnosti predstavljaju neinvazivnu, učinkovitu i široko primjenjivu metodu za praćenje zdravlja biljaka na globalnoj razini. Korištenjem spektralnih indeksa poput NDVI-a i PRI-ja, fluorescencije klorofila i termalne infracrvene tehnologije, omogućeno je kontinuirano praćenje fotosinteze, što doprinosi preciznijem razumijevanju vegetacijskih procesa u različitim ekosustavima. Ove metode pružaju ključne informacije za poljoprivredu, ekologiju i klimatske znanosti, omogućujući detekciju stresa kod biljaka, procjenu poljoprivrednih prinosa i praćenje globalnih klimatskih promjena.

Prednosti daljinskih mjerenja, kao što su velika prostorna pokrivenost i mogućnost kontinuiranog praćenja, čine ih idealnim alatima za praćenje vegetacije na velikim područjima. Ipak, određena ograničenja uključuju potrebu za kalibracijom senzora, složenu obradu podataka te izazove pri mjerenju gustih šumskih pokrova ili u oblačnim uvjetima.

S tehnološkim napretkom, posebice razvojem hiperspektralnih kamera i poboljšanjem rezolucije satelitskih snimaka, uz integraciju umjetne inteligencije i IoT tehnologija, daljinska mjerenja postaju sve preciznija i pouzdanija. Ovi napredci omogućuju detaljnije analize vegetacije, ranu detekciju stresa kod biljaka i poboljšano upravljanje poljoprivrednim praksama, što doprinosi razvoju održive poljoprivrede i očuvanju okoliša.

Literatura:

1. Atherton, J., Nichol, C. J., & Porcar-Castell, A. (2016). Using spectral chlorophyll fluorescence and the photochemical reflectance index to predict physiological dynamics. *Remote Sensing of Environment*, 176, 17-30.
2. Barnes, M. L., Yoder, L., & Khodaei, M. (2021). Detecting winter cover crops and crop residues in the midwest us using machine learning classification of thermal and optical imagery. *Remote Sensing*, 13(10), 1998.
3. Bauer, T., Pavlik, R., Rzasna, M., Pringle, K., Schulz, P., & Kämpf, M. (2015). Integration of IoT and remote sensing data for precision agriculture applications. *Sensors*, 15(4), 1-12.
4. Brestič, M., Živčák, M., Kalaji, H. M., Carpentier, R., Allakhverdiev, S. I. (2012). Photosystem II thermostability in situ: environmentally induced acclimation and genotype-specific reactions in *Triticum aestivum* L. *Plant Physiology and Biochemistry*, 57, 93-105.
5. Buitrago, M. F., Groen, T. A., Hecker, C. A., & Skidmore, A. K. (2016). Changes in thermal infrared spectra of plants caused by temperature and water stress. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 111, 22-31.

6. Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., & Chhabra, A. (2013). Carbon and other biogeochemical cycles. In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, & P. M. Midgley (Eds.), *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 465-570). Cambridge University Press.
7. Coates, A. R., Dennison, P. E., Roberts, D. A., & Roth, K. L. (2015). Monitoring the impacts of severe drought on southern California chaparral species using hyperspectral and thermal infrared imagery. *Remote Sensing*, 7(11), 14276-14291.
8. Dąbrowski, P., Baczeńska, A. H., Pawluśkiewicz, B., Paunov, M., Alexantrov, V., Goltsev, V., et al. (2016). Prompt chlorophyll a fluorescence as a rapid tool for diagnostic changes in PSII structure inhibited by salt stress in Perennial ryegrass. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 157, 22–31.
9. D’Hooghe, P., Escamez, S., Trouverie, J., Avice, J.-C. (2013). Sulphur limitation provokes physiological and leaf proteome changes in oilseed rape that lead to perturbation of sulphur, carbon and oxidative metabolisms. *BMC Plant Biology*, 13 (1), 23.
10. Foyer, C. H., Neukermans, J., Queval, G., Noctor, G., and Harbinson, J. (2012). Photosynthetic control of electron transport and the regulation of gene expression. *Journal of Experimental Botany*, 63, 1637–1661.
11. Gamon, J. A., Serrano, L., & Surfus, J. S. (1997). The photochemical reflectance index: An optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia*, 112(4), 492-501.
12. Goltsev, V., Zaharieva, I., Chernev, P., Kouzmanova, M., Kalaji, H. M., Yordanov, I., et al. (2012). Drought-induced modifications of photosynthetic electron transport in intact leaves: Analysis and use of neural networks as a tool for a rapid non-invasive estimation. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Bioenergetics*, 1817, 1490–1498.
13. Huang, Z.-A., Jiang, D.-A., Yang, Y., Sun, J.-W., Jin, S.-H. (2004). Effects of nitrogen deficiency on gas exchange, chlorophyll fluorescence, and antioxidant enzymes in leaves of rice plants. *Photosynthetica* 42 (3), 357-364.
14. Hussein, M.M., Abd El-Kader, A.A., Mona, A.M.S., 2009. Mineral status of plant shoots and grains of barley under foliar fertilization and water stress. *Research journal of agriculture and biological sciences*, 5, 108-115.
15. Jin, X., Yang, G., Tan, C., Zhao, C. (2015). Effects of nitrogen stress on the photosynthetic CO₂ assimilation, chlorophyll fluorescence, and sugar-nitrogen ratio in corn. *Scientific Reports* 5.
16. Jones, H. G. (1999). Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95(3), 139-149.
17. Jones, H.G. (2014a). Remote sensing of plant stresses and its use in irrigation management. *Acta Horticulturae*, 1038, 239-247.
18. Jones H. G. (2014b). The use of indirect or proxy markers in plant physiology. *Plant, cell & environment*, 37(6), 1270–1272.

19. Justice, C. O., Vermote, E., Townshend, J. R., Defries, R., Roy, D. P., Hall, D. K., & Wolfe, R. E. (2002). The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1228–1249.
20. Kalaji, H. M., Bosa, K., Kościelniak, J., and Hossain, Z. (2011). Chlorophyll a Fluorescence—A Useful Tool for the Early Detection of Temperature Stress in Spring Barley (*Hordeum vulgare* L.). *OMICS: A Journal of Integrative Biology*, 15, 925–934.
21. Kalaji, H. M., Jajoo, A., Oukarroum, A., Brestic, M., Zivcak, M., Samborska, I. A., et al. (2016). Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, 38, 102.
22. Kalaji, H. M., Schansker, G., Brestic, M., Bussotti, F., Calatayud, A., Ferroni, L., et al. (2017). Frequently asked questions about chlorophyll fluorescence, the sequel. *Photosynthesis Research*, 132, 13–66.
23. Kuenzer, C., & Dech, S. (Eds.). (2013). Theoretical background of thermal infrared remote sensing. In *Thermal infrared remote sensing* (Vol. 17, pp. 1–26). Springer Netherlands.
24. Lambers, H., Chapin, F. S., & Pons, T. L. (2008). *Plant physiological ecology*. Springer Science & Business Media.
25. Lelong, C. C. D., Pinet, P. C., Poilve, H., & Parch, F. (2008). Hyperspectral imagery and machine learning for vineyard mapping and monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 112(10), 3089–3100.
26. Li, M., & Kim, C. (2022). Chloroplast ROS and stress signaling. *Plant Communications*, 3, 100264.
27. Lu, C., Zhang, J., Zhang, Q., et al. (2001). Modification of photosystem II photochemistry in nitrogen deficient maize and wheat plants. *Journal of Plant Physiology*, 158:1423–1430.
28. Mathur, S., Allakhverdiev, S. I., and Jajoo, A. (2011). Analysis of high temperature stress on the dynamics of antenna size and reducing side heterogeneity of Photosystem II in wheat leaves (*Triticum aestivum*). *Biochimica et biophysica acta*, 1807(1), 22–29.
29. Maxwell, K., & Johnson, G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence: A practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345), 659–668.
30. Meron, M., Tsipris, J., Orlov, V., Alchanatis, V., & Cohen, Y. (2010). Crop water stress mapping using aerial thermal imagery. *Precision Agriculture*, 11, 148–162.
31. Miller, G., Suzuki, N., Ciftci-Yilmaz, S., and Mitter, R. (2010). Reactive oxygen species homeostasis and signalling during drought and salinity stresses. *Plant, Cell & Environment*, 33, 453–467.
32. Moreira, A., Prats, P., Scheiber, R., & Krieger, G. (2013). Single-pass interferometric synthetic aperture radar for remote sensing: Techniques and applications. *Remote Sensing of Environment*, 132, 208–223.
33. Nakamura, Y., Tsujimoto, K., Ogawa, T., Noda, H. M., & Hikosaka, K. (2024). Correction of photochemical reflectance index (PRI) by optical indices to predict non-photochemical quenching (NPQ) across various species. *Remote Sensing of Environment*, 305, 114062.

34. Nobel, P. S. (2020). *Physicochemical and Environmental Plant Physiology* (5th ed.). Academic Press.
35. Oukarroum, A., Schansker, G., and Strasser, R. J. (2009). Drought stress effects on photosystem I content and photosystem II thermotolerance analyzed using Chl a fluorescence kinetics in barley varieties differing in their drought tolerance. *Physiologia Plantarum*, 137, 188–199.
36. Rampino, P., Pataleo, S., Gerardi, C., Mita, G., Perrotta, C. (2006). Drought stress response in wheat: physiological and molecular analysis of resistant and sensitive genotypes. *Plant, Cell & Environment*, 29 (12), 2143-2152.
37. Ruddell, B. L., & Kumar, P. (2017). Ecohydrologic process networks: A blueprint for distributed ecosystem-wide measurement, modeling, and data mining. *Water Resources Research*, 53(3), 1238-1263.
38. Running, S. W., Nemani, R. R., & Heinsch, F. A. (2004). A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *BioScience*, 54(6), 547-560.
39. Samborska, I. A., Kalaji, H. M., Sieczko, L., Goltsev, V., Borucki, W., & Jajoo, A. (2018). Structural and functional disorder in the photosynthetic apparatus of radish plants under magnesium deficiency. *Functional plant biology : FPB*, 45(6), 668–679.
40. Samborska, I. A., Kalaji, H. M., Sieczko, L., Borucki, W., Mazur, R., Kouzmanova, M., et al. (2019). Can just one-second measurement of chlorophyll a fluorescence be used to predict sulphur deficiency in radish (*Raphanus sativus* L. *sativus*) plants? *Current Plant Biology*, 19, 100096.
41. Scheibe, R. (2019). Maintaining homeostasis by controlled alternatives for energy distribution in plant cells under changing conditions of supply and demand. *Photosynthesis research*, 139(1-3), 81–91.
42. Schlemmer, M., Gitelson, A., Schepers, J., Ferguson, R., Peng, Y., Shanahan, J., & Rundquist, D. (2013). Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 25, 47-54.
43. Still, C., Powell, R., Aubrecht, D., Kim, Y., Helliker, B., Roberts, D., ... & Goulden, M. (2019). Thermal imaging in plant and ecosystem ecology: applications and challenges. *Ecosphere*, 10(6), e02768.
44. Stirbet, A., Lazár, D., Guo, Y., & Govindjee, G. (2020). Photosynthesis: basics, history and modelling. *Annals of botany*, 126(4), 511–537.
45. Strasser, R. J., Tsimilli-Michael, M., and Srivastava, A. (2004). "Analysis of the Chlorophyll a Fluorescence Transient BT - *Chlorophyll a Fluorescence: A Signature of Photosynthesis*," in, eds. G. C. Papageorgiou and Govindjee (Dordrecht: Springer Netherlands), 321–362.
46. Taiz, L., & Zeiger, E. (2015). *Plant physiology and development* (6th ed.). Sinauer Associates.
47. Trotter, G. M., Whitehead, D., & Pinkney, E. J. (2002). The photochemical reflectance index as a measure of photosynthetic light use efficiency for plants with varying foliar nitrogen contents. *International Journal of Remote Sensing*, 23(6), 1207-1212.
48. Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150.

49. Verrelst, J., Camps-Valls, G., Muñoz-Marí, J., Rivera, J. P., Veroustraete, F., Clevers, J. G. P. W., & Moreno, J. (2015). Optical remote sensing and the retrieval of terrestrial vegetation biogeophysical properties—A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 108, 273-290.
50. Wulder, M. A., Masek, J. G., Cohen, W. B., Loveland, T. R., & Woodcock, C. E. (2016). Opening the archive: How free data of Landsat changed the science and society. *Remote Sensing of Environment*, 122(3), 2-10.
51. Wu, C., Wang, Z., Sun, H., Guo, S. (2006). Effects of different concentrations of nitrogen and phosphorus on chlorophyll biosynthesis, chlorophyll a fluorescence, and photosynthesis in *Larix olgensis* seedlings. *Frontiers of Forestry in China*, 1 (2), 170-175.
52. Xu, H. X., Weng, X. Y., Yang, Y. (2007). Effect of phosphorus deficiency on the photosynthetic characteristics of rice plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 54:741–748.
53. Yang, J., Kong, Q., and Xiang, C. (2009). Effects of low night temperature on pigments, chl a fluorescence and energy allocation in two bitter melon (*Momordica charantia* L.) genotypes. *Acta Physiologiae Plantarum*, 31, 285–293.
54. Zarco-Tejada, P. J., González-Dugo, V., & Berni, J. A. (2013). Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*, 117, 322-337.
55. Zhu, X. G., Long, S. P., & Ort, D. R. (2016). Improving photosynthetic efficiency for greater yield. *Annual Review of Plant Biology*, 61, 235-261.
56. Zhu, L., Suomalainen, J., Liu, J., Hyypä, J., Kaartinen, H., & Haggren, H. (2018). A review: Remote sensing sensors. In R. B. Rustamov, S. Hasanova, & M. H. Zeynalova (Eds.), *Multi-purposeful application of geospatial data*. InTech.
57. Zhu, J., Cai, D., Wang, J., Cao, J., Wen, Y., He, J. (2021). Physiological and anatomical changes in two rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes under drought stress conditions. *Oil Crop Science*, 6, 97–104.
58. Žurek, G., Rybka, K., Pogrzeba, M., Krzyżak, J., Prokopiuk, K. (2014). Chlorophyll a fluorescence in evaluation of the effect of heavy metal soil contamination on perennial grasses. *PLoS ONE*, 9.
59. Živčák, M., Olšovská, K., Slamka, P., Galambošová, J., Rataj, V., HB, S., et al. (2014). Application of chlorophyll fluorescence performance indices to assess the wheat photosynthetic functions influenced by nitrogen deficiency. *Plant, Soil and Environment*, 60, 210–215.

Doc. dr. sc. Vesna Peršić,

Dr. sc. Tamara Đerđ,

Prof. dr. sc. Branimir K. Hackenberger