

AGRIVOLTAIKA U VOĆARSKOJ PROIZVODNJI – INTEGRACIJA FOTONAPONSKIH SUSTAVA U VOĆNIM NASADIMA

AGRIVOLTAICS IN FRUIT PRODUCTION – INTEGRATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN ORCHARDS

**Š. Kolega, M. Lisjak, M. Zorica, Jelena Ravlić, A. Zdrilić,
Marija Špoljarević, D. Bošnjak, T. Kos**

SAŽETAK

Agrivoltaika-AV (eng. agrivoltaics) ili agrosolarni sustavi, odnosno integracija solarnih panela u poljoprivredi, već se smatra inovativnim pristupom koji omogućuje dvostruko iskorištavanje zemljišta. Donosi istovremeno koristi za proizvodnju hrane i dobivanje električne energije iz obnovljivih izvora. Iako se primjenjuje u različitim sektorima biljne proizvodnje, voćarstvo se ističe kao pogodno područje zbog višegodišnjeg karaktera nasada i osjetljivosti pojedinih voćnih vrsta na mikroklimatske promjene uslijed promjena klime. Ovaj rad donosi pregled dosadašnjih znanstvenih saznanja o primjeni AV u voćarstvu, s naglaskom na utjecaj na mikroklimu ispod panela i ekološko fiziološki odgovor biljke, prinos i kvalitetu plodova, te održivost gospodarstva. Analizirani su povoljni i nepovoljni učinci na različite voćne vrste te su razmotreni ključni tehnički i dizajnerski aspekti implementacije. Također je istaknut potencijal AV na smanjenje potrošnje vode, zaštitu od temperaturnih stresova i povećanje energetske neovisnosti, te su navedeni primjeri eksperimentalnih projekata u Hrvatskoj i svijetu.

Ključne riječi: fotonaponski sustavi, mikroklimatski uvjeti, obnovljivi izvori energije, održiva poljoprivreda, sinergija energije i hrane.

ABSTRACT

Agrivoltaics (AV), also known as agrosolar systems, refers to the integration of photovoltaic panels into agricultural land use and is increasingly recognized as an innovative approach enabling dual land utilization. This concept simultaneously supports food production and the generation of renewable solar energy. Although implemented across various crop production

sectors, fruit growing stands out as particularly suitable due to the perennial nature of orchards and the sensitivity of certain fruits to microclimatic shifts caused by climate change. This paper provides an overview of current scientific findings on the application of AV in fruit production, with emphasis on its impact on the microclimate beneath the panels, the eco-physiological plant response, yield and fruit quality, as well as overall farm sustainability. Both the beneficial and adverse effects on different fruits are analyzed, alongside key technical and design considerations for successful implementation. The potential of AV systems to reduce water consumption, mitigate thermal stress, and enhance energy independence is also highlighted, supported by examples of experimental projects in Croatia and worldwide.

Keywords: photovoltaic systems, microclimatic conditions, renewable energy sources, sustainable agriculture, energy and food synergy.

UVOD

Poljoprivreda i prerađivački sektor zajedno troše oko 30 % svjetske energije i proizvode preko trećine stakleničkih plinova, što naglašava potrebu prelaska na obnovljive izvore energije (Magarelli i sur., 2024.). Zbog klimatskih promjena i potrebe za obnovljivim izvorima energije, raste nadmetanje između proizvodnje hrane i solarne energije na istim površinama (Farja i Maciejczak, 2021.) zbog čega prenamjena plodnih poljoprivrednih površina u solarne elektrane može ugroziti sigurnost dostatnosti hrane i prehrambene potrebe rastuće populacije (Smith i sur., 2020; Weselek i sur., 2019.). U tom se kontekstu agrivoltaika (AV) pojavljuje kao perspektivna tehnologija koja istovremeno generira električnu energiju pomoću solarnih fotonaponskih (PV, eng. *photovoltaic*) panela i omogućuje uzgoj usjeva ispod ili između tih panela, kao pomirljivo rješenje. Drugim riječima, AV sustavi građeni su od istih fotonaponskih panela kao i konvencionalne PV elektrane, no obično ih se postavlja u manjoj gustoći ili s panelima veće prozirnosti kako bi usjevi ispod njih dobili dovoljno svjetlosti čime značajno raste ukupna proizvodnja (prinos + električna energija) po hektaru (Dupraz i sur., 2011.).

Prvi spomen AV koncepta pripisuje se Adolfu Goetzbergeru i Arminu Zastrowu 1982. godine. Autori su u radu objavljenom te godine predstavili ideju kombiniranja pretvorbe solarne energije s uzgojem biljaka (Goetzberger i Zastrow, 1982.). Koncept nije zaživio sve do 2004., kada je Akira analizirao rast usjeva pod fotonaponskim modulima i promovirao tehnologiju pod nazivom "dijeljenje solarne energije" (Akira i Sekiyama, 2020.). Prva svjetska

AV elektrana izgrađena je na vinogradima Domaine de Nidolères na području Francuske (Carrausse, 2024.). Osim što proizvode električnu energiju, AV paneli štite usjeve od visokih temperatura, prekomjerne insolacije i tuče (Reher i sur., 2025.). Uvođenje solarnih panela u voćne nasade povećava energetske samodostatnost gospodarstava i smanjuje ovisnost o fosilnim gorivima, što je ključno za održivost voćarske proizvodnje (Chalgynbayeva i sur., 2024.; Magarelli i sur., 2024.).

DEFINICIJA I PRIMJENA U POLJOPRIVEDI

Agrivoltaika (AV), odnosno agrosolari se definiraju kao sustavi koji integriraju poljoprivrednu proizvodnju i tehnologiju fotonaponskih ćelija na istom zemljištu (Barron-Gafford i sur., 2025.). Ovakav koncept dualnog korištenja zemljišta značajno povećava njegovu ukupnu produktivnost, istovremeno smanjujući emisije stakleničkih plinova i optimizirajući potrošnju vode (Ghasemi i Sadeghkhan, 2025.). Produktivnost zemljišta često se izražava pojmom *land equivalent ratio* (eng. LER), definiranom kao zbroj relativnih prinosa u AV sustavu naspram pojedinačne proizvodnje (usjeva ili električne energije) na istoj površini. Dakle, LER veći od 1 znači da kombinirana proizvodnja premašuje sumu odvojenih sustava (Deb i Dutta, 2022.). Pregledom dosadašnje literature utvrđeno je kako korištenje AV nudi pogodnosti poput povoljnih mikroklimatskih uvjeta (snižavanje temperature i zaštita od izravne sunčeve svjetlosti) te dodatnih prihoda poljoprivrednicima, uz kontinuirani rast istraživanja posljednjih godina (Ghasemi i Sadeghkhan, 2025.). Međutim, odgovor različitih voćnih vrsta na zasjenu izrazito je raznolik i ovisi prije svega o sorti i klimi. Smatra se da ne postoji univerzalni stupanj zasjenjenosti ispod kojeg nema negativnih učinaka, te studije često pokazuju kontradiktorne rezultate za različite uvjete (Magarelli i sur., 2024.).

MIKROKLIMATSKI UČINCI ISPOD AV PANELE

Sustavi AV značajno modificiraju mikroklimatske uvjete ispod foto panela utječući na temperaturu i vlažnost zraka ispod panela, temperaturu i vlažnost tla, te količinu osvjetljenja ispod panela čime utječu ne samo na uzgajanu kulturu već i na biološku aktivnost ispod panela, primjerice na aktivnost oprašivača. Uvjeti zasjene ispod panela omogućavaju hladniju i vlažniju mikroklimu nego u otvorenom uzgoju, čime se ublažavaju temperaturni ekstremi i nedostatak vlage (Barron-Gafford i sur., 2025.; Weselek i sur., 2021.).

Prema dosadašnjim istraživanjima, strukture s AV panelima stvarajući zasjenu smanjuju maksimalne dnevne temperature za 3 do 4 °C i povećavaju relativnu vlažnost zraka, što može rezultirati smanjenjem evapotranspiracije i manjim potrebama za navodnjavanjem (Juillion i sur., 2022.; Chalgynbayeva i sur., 2024.; Ghasemi i sur., 2021.).

U pokusima na različitim kulturama zabilježene su zbog prosječnih smanjenja dostupne fotosintetski aktivne radijacije (FAR) od oko 30 %, niže temperature tla i zraka ispod panela (Weselek i sur., 2021.). Istodobno na drugom istraživanju izmjeren je porast relativne vlažnosti zraka u zasjenjenim zonama (Ukwu i sur., 2025.), dok u svom radu Barron-Gafford i sur. (2025.) navode kako AV ublažava popodnevni toplinski stres biljaka i smanjuje isparavanje, omogućujući održavanje vodenog statusa različitih usjeva. Ovakve promjene rezultiraju usporenom evapotranspiracijom i duljim zadržavanjem vlage u tlu ispod panela. Istraživanje u nasadu jabuka na području Francuske potvrdilo je da AV ublažava stres uzrokovan visokim temperaturama i smanjuje potrebu za navodnjavanjem (Juillion i sur., 2022.). U istom su pokusu na primjeru zasjenjivanja dinamičkim sustavom nasada jabuka Juillion i sur. (2022.) zabilježili da su maksimalne dnevne temperature zraka pod panelima bile niže za 3,8 °C uz povećanje relativne vlažnosti za 14 %, što je rezultiralo i smanjenjem potreba za navodnjavanjem od 6 do 31 % uz prosječnu zasjenu nasada od 50 do 55% što znači da osim ublažavanja toplotnog stresa u nasadu AV može smanjiti mogućnost pojave ožegotina na plodovima.

Pored toga, AV paneli mogu poslužiti kao korisna staništa za oprašivače. Primjerice, petogodišnje praćenje raznolikosti kukaca na području američke savezne države Minnesota pokazalo je značajan porast raznolikosti cvjetnica i kukaca uz značajno povećanje broja domaćih pčela u blizini 'solarno-oprašivačkih staništa' (Walston i sur., 2024.).

Međutim, postavljanje panela u nasad donosi i svoje izazove u proizvodnji. Pod panelima dolazi do reduciranja FAR-a koji dopire do biljaka, te ovisno o gustoći postavljanja i kutu panela, izloženost biljaka osvjetljenju može biti smanjena. U belgijskom istraživanju pokrivenost nasada kruški monofacijalnim panelima iznosila je 25 % i dovela je do smanjenja svjetlosti oko 24 % u području krošnje (Reher i sur., 2025.), dok su Vélez i sur. (2025.) u nasadu jabuke sorte Gala koristili poluprozirne panele sa 70 % pokrova koji su propuštali oko 40 % svjetlosti. Dinamički sustavi pomiču panele i tijekom dana, dajući više svjetlosti kad je potrebno (npr. u ranim fazama razvoja ploda) i

stvarajući zasjenu u najtoplijem dijelu dana (Chopard i sur., 2021.). Takav pametni pristup omogućuje bolje zadovoljavanje potreba usjeva za osvjetljenjem i proizvodnju električne energije u bitnim fazama dana.

EKOFIZIOLOŠKI ODGOVOR BILJAKA POD ZASJENOM

Ekofiziološki odgovor biljke predstavlja fiziološke i biokemijske procese koje pojedina biljka razvija kako bi se prilagodila promjenama u okolišu. Taj odgovor može biti na abiotске (osvjetljenje, voda, temperatura ili hraniva) ili biotske (interakcija s drugim organizmima) stresore, uključuje promjene u organizmu biljke, te omogućuje prilagodbu na različite stresne uvjete (Ainsworth i sur., 2016.). Tako se poljoprivredne kulture prilagođavaju na zasjenu pod panelima pomoću raznih fizioloških prilagodbi.

Pod umjerenom zasjenom mnoge kulture mogu zadržati ili čak povećati dnevnu asimilaciju ugljika. Primjerice, Barron-Gafford i sur. (2025.) navode da AV ublažava “popodnevni depresivni” efekt fotosinteze, održavajući ili povećavajući dnevnu brzinu asimilacije CO₂. Zahvaljujući smanjenom deficitu tlaka vodene pare (eng. Water Pressure Deficit) i nižim temperaturama, biljke su duže ostale fotosintetski aktivne i otvarale puči, što je značajno povećalo vodnu efikasnost. Mupambi i sur. (2022.) navode da se efikasnost iskorištavanja vode (eng. Water Use Efficiency) kod AV može povećati za 150 do 300 % u odnosu na konvencionalni uzgoj bez panela, uz smanjenu potrebu za navodnjavanjem.

U istraživanju Ukwu i sur. (2025.), polja graha pod umjerenom zasjenom pokazala su poboljšane fiziološke pokazatelje rasta: povećana je fotokemijska konverzija svjetlosti u energiju te su prinosi pod panelima bili veći nego na normalnog razini osvjetljenja. Time se potvrđuje da AV u toplim i suhim uvjetima može održavati visoki fotosintetski i hidrološki učinak usjeva.

UTJECAJ AV NA PRINOS I KVALITETU PLODOVA

AV sustavi mogu dovesti do promjena u prinosu kod uzgajanih kultura, pri čemu se često bilježi umjereni pad prinosa u odnosu na kontrolni dio.

Kod voćnih kultura najčešće se očekuje smanjenje rodnosti. Reher i sur. (2025) za kruške u Belgiji navode 15 % prosječno manji urod ispod panela nego u kontrolnom dijelu nasada. Međutim, parametri kakvoće plodova (npr. sadržaj šećera, čvrstoća mesa i boja) ostali su nepromijenjeni.

Zasjena panelima dovela je i do promjene oblika plodova krušaka (npr. povećanje udjela plodova u obliku “boce”), ali s nepromijenjenim bitnim kemijskim i organoleptičkim karakteristikama u takvim plodovima. Naprotiv, kod uzgoja brusnica pod panelima je, uz pad prinosa, zabilježena značajno manja čvrstoća ploda i niža koncentracija topive suhe tvari, iako boja ploda nije značajno promijenjena (Mupambi i sur., 2022.). Juillion i sur. (2022.) navode prosječni pad uroda jabuka za 29 % pod poluprozirnim i neprozirnim panelima. No, dugoročno gledano, smanjenjem broja cvjetova, zasjena pozitivno utječe na opterećenje prinosa tijekom godina (Juillion i sur., 2022.). Magarelli i sur. (2024.) ističu kako zasjena voćnog nasada do 30 % može optimizirati fotosintezu i kvalitetu plodova bez dugoročnog negativnog utjecaja na prinose.

U dugogodišnjem pokusu Weselek i sur. (2021.) navode kako su se prinosi ratarskih kultura pod AV panelima kretali unutar ± 20 % u odnosu na otvoreni uzgoj bez panela.

TEHNIČKI ASPEKTI I IZAZOVI U IMPLEMENTACIJI AV SUSTAVA

U praksi je ključno pravilno dimenzioniranje i stabilna konstrukcija AV sustava. AV moduli se obično postavljaju nekoliko metara iznad tla kako bi se omogućio nesmetan prolaz traktora i druge mehanizacije. Time se održava dovoljna količina svjetlosti na kulturama. Primjerice, Weselek i sur. (2021.) navode da se pažljivim rasporedom modula i kutom postavljanja može zadržati 60 do 70 % dostupne sunčeve radijacije ispod panela. Dodatni izazovi uključuju i vrste panela (neprozirni, poluprozirni, monofacijalni i bifacijalni), kao i dinamičke sustave za praćenje sunca.

Neprozirni moduli mogu značajno smanjiti količinu dostupne FAR i tako uzrokovati smanjenje prinosa i kvalitete plodova. Poluprozirni ili transparentni moduli omogućuju veći prolaz svjetlosti što omogućuje veće prinose i kvalitetu u usporedbi s nepropusnim panelima. Neprozirni moduli pripadaju monofacijalnim panelima, dok su transparentni moduli gotovo uvijek bifacijalni (Campana i sur., 2021.; Schindele i sur., 2020.; Weselek i sur., 2021.). Bifacijalni moduli propuštaju više svjetlosti prema biljkama, istovremeno koristeći reflektiranu svjetlost s tla. Mupambi i sur. (2022.) navode da bifacijalni moduli propuštaju više svjetlosti na biljke uz mogućnost prilagodbe nagiba, dok smanjenje gustoće rasporeda modula do 30 W/m² osigurava optimalnu količinu svjetlosti za biljke (Ali Khan Niazi i Victoria, 2023.; Campana i sur., 2021.).

Najskuplje i tehnički najzahtjevnije izvedbe su moduli s praćenjem sunčeve putanje, no takvi paneli omogućuju visoku iskoristivost solarne energije i optimiziraju kut upada svjetlosti na biljke i tlo. Ipak, tehnološki zahtjevi i visoki troškovi ostaju ozbiljna prepreka, a izgradnja i održavanje visokih konstrukcija otpornijih na vjetar i tuču znatno povećava inicijalnu investiciju.

Ghasemi i Sadeghkhan (2025.) ukazuju da su tehnička složenost i logistička usklađenost sa standardnim operacijama (navodnjavanje, mehanizacija) glavno usko grlo buduće primjene AV sustava. U praksi je neophodno planirati prolaze i razmake stupova tako da se sve poljoprivredne aktivnosti mogu nesmetano odvijati, što je izazovno za ostvariti u već postojećim intenzivnim nasadima. Tehnička rješenja poput stabilnih konstrukcija, sustava praćenja sunca i bifacijalnih panela mogu optimizirati ravnotežu između propuštanja svjetla, energetske produktivnosti i potrebe za poljoprivrednom mehanizacijom (Campana i sur., 2021.; Schindele i sur., 2020.).

Dosadašnja hrvatska regulativa ne definira eksplicitno agrivoltaiku, već se na nju primjenjuju opći zakoni o obnovljivim izvorima energije i poljoprivrednom zemljištu. Studija autora Leto i sur. (2023.) ukazuje da se agrosolarni projekti trenutačno podudaraju sa standardnim postupcima za obnovljive izvore na poljoprivrednom zemljištu. Primjerice, izmjenama Zakona o poljoprivrednom zemljištu (NN 57/2022.) uvedena je mogućnost postavljanja „zelene energetske infrastrukture“ na iznajmljeno državnom zemljište uz suglasnost ministarstva. Studija preporučuje donošenje jasnih definicija i preduvjeta za postavljanje AV na poljoprivredno zemljište: AV u zakonu definirati kao dvostruku namjenu zemljišta, uskladiti agrotehničke mjere uz postavljanje panela i odrediti prostorne granice (npr. maksimalni udio pokrivenosti i prihvatljivo smanjenje prinosa) (Leto i sur., 2023.).

ODRŽIVOST, EFIKASNOST KORIŠTENJA RESURSA I EKONOMSKA ISPLATIVOST

Sustavi AV značajno doprinose održivosti i energetske neovisnosti. Znatan dio sunčevog zračenja se preusmjeri u električnu energiju, dok istodobno biljke iskorištavaju difuzno svjetlo. Time dolazi do smanjenja ukupnih emisija stakleničkih plinova u usporedbi s odvojenom proizvodnjom hrane i energije (Ghasemi i Sadeghkhan, 2025.). Sustav AV također poboljšava efikasnost korištenja vode: Reher i sur. (2025.) izvještavaju o smanjenoj evapotranspiraciji

i manjim potrebama za navodnjavanjem pod PV panelima. Mupambi i sur. (2022.) kvantificiraju to kao 14% manje vode za navodnjavanje i 150 do 300 % veću učinkovitost iskorištavanja vode (eng. Water Use Efficiency) u usporedbi s konvencionalnim sustavima.

Istovremeno se povećava ekonomska i agronomska efikasnost površine, odnosno $LER > 1$ (Reher i sur., 2025). S obzirom na paralelnu proizvodnju energije, ukupna iskorištenost zemljišta veća je nego u nasadima bez panela. Reher i sur. (2025.) navode kako je $LER=1,44$ za nasad krušaka s panelima, što znači da je AV nad kruškama istovremeno dala 44 % više ukupnog prinosa (hrana + el. energija) nego kod zasebne proizvodnje plodova u kontroli.

Nadalje, Mupambi i sur. (2022.) ističu da sustavi AV donose stabilnije prinose i do 15 puta veću profitabilnost zahvaljujući diverzifikaciji proizvodnje. Posljedične uštede vode i niži ugljični otisak potvrđuju da agrosolarni sustavi povećavaju otpornost i održivost poljoprivrede, osobito u klimatski izazovnim područjima.

U ekonomskoj analizi sustava AV na području Mađarske, Chalgybayeva i sur. (2024.) pokazali su povoljan neto trenutni prihod (eng. Net Present Value) od 70 milijuna EUR za AV sustav kapaciteta 38 MWp i povećanu konkurentnost u AV sustavima u nasadima jabuka, pri čemu je AV smanjila varijabilnu osnovicu troškova i poboljšala iskorištenost zemljišta ($LER > 1$).

PREGLED PILOT-PROJEKATA I PRIMJERA DOBRE PRAKSE

Pregled literature potvrđuje da su AV sustavi prilagodljivi u različitim klimatskim područjima i na različite kulture, što ilustriraju primjeri iz EU i svijeta (Ghasemi i Sadeghkhani, 2025., Reher i sur., 2025.; Ukwu i sur., 2025.).

Dosadašnji primjeri pilot-projekata potvrđuju izvedivost AV u različitim agro-ekosustavima. Reher i sur. (2025.) opisali su višegodišnje terensko istraživanje AV sustava u nasadu krušaka u Belgiji. Slično, Ukwu i sur. (2025.) izvještavaju o uspješnom AV sustavu u Nigeriji u kojem je mungo grah pod panelima pokazao povećani prinos. Širenje takvih inicijativa podržavaju i istraživačke mreže: primjerice, projekt Horizon SYMBIOSYST gradi prilagođena rješenja AV na poljima voćnjaka i povrtnjaka u Italiji, Španjolskoj i Nizozemskoj (SYMBIOSYST, 2021.).

Nadalje, u Francuskoj je postavljen eksperimentalni nasad jabuka pod AV panelima u razdoblju 2019. – 2021. Cilj ovog istraživanja bio je evaluirati utjecaj zaszene na vodne odnose, morfološke karakteristike i urod jabuka (Juillion i sur., 2022.). U Njemačkoj na području Gelsdorfa 2020. godine postavljeno je istraživanje u nasadu jabuka kako bi se utvrdio optimalan sustav za zaštitu od nepovoljnih vremenskih uvjeta (mraz, tuča, prekomjerna insolacija) te optimizaciju prinosa (Fraunhofer ISE, 2023.). Istraživanje je obuhvatilo 8 različitih sorti jabuke na kojima su testirana četiri različita sustava zaštite (folija, protugradne mreže, fiksni PV moduli i dinamički PV moduli). Cilj je utvrditi kako AV paneli mogu efikasno zamijeniti klasične zaštitne mreže. Istraživanje je u tijeku, te rezultati još uvijek nisu javno dostupni. Nadalje, koncept projekta AV u nasadu jabuke na području Mađarske pokazuje da kombinacijom energetske i poljoprivredne djelatnosti osim ekonomske koristi, može doći do smanjenja emisije CO₂ i povećanja učinkovitosti korištenja zemljišta (Chalgynbayeva i sur., 2024.).

U Republici Hrvatskoj trenutno je u provedbi pilot projekt u voćarskom sektoru - nasad jabuka pod PV panelima u sklopu projekta ANG (Agriculture Next Generation, fond EFRR) (Ravlić i sur., 2025.) koji je usmjeren je na razvoj agrivoltaike u okviru pametne poljoprivrede.

ZAKLJUČAK

Znanstvena zajednica sve više prepoznaje potencijal AV u voćarstvu. Dosadašnji primjeri pokazuju da uz odgovarajući dizajn AV sustavi mogu značajno povećati iskoristivost zemljišta i postići predvidljive prinose bez narušavanja kvalitete uzgajane kulture. Nadalje, potrebno je izvršiti dugoročna poljska istraživanja na različitim voćarskim kulturama i u različitim klimatskim područjima zbog varijabilnosti eko fizioloških odgovora biljaka na zasjenjivanje. Poseban fokus treba biti na praćenju učinaka na kvalitetu ploda, optimizaciji dizajna sustava i usporedbi rezultata iz prethodnih pilot-projekata sa različitih lokaliteta. Nedavna studija izrađena za EBRD detaljno analizira hrvatski pravni okvir za agrosolarne projekte te daje preporuke za njegovo usklađivanje i poboljšanje. Sveobuhvatna evaluacija troškova i koristi te ekosustava nužna je za daljnju integraciju AV u voćarsku proizvodnju na području Republike Hrvatske.

LITERATURA

1. Ainsworth, E. A., Bernacchi, C. J., Dohleman, F. G. (2016.): Focus on Ecophysiology. *Plant Physiology*, 172(2), 619–621. <https://doi.org/10.1104/PP.16.01408>
2. Akira, N., Sekiyama, T. (2020.): *Solar Sharing: Changing the world and life*. Access International Ltd.
3. Ali Khan Niazi, K., Victoria, M. (2023.): Comparative analysis of photovoltaic configurations for agrivoltaic systems in Europe. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 31(11), 1101–1113. <https://doi.org/10.1002/pip.3727>
4. Barron-Gafford, G. A., Murphy, P., Salazar, A., Lepley, K., Rouini, N., Barnett-Moreno, I., Macknick, J. E. (2025.): Agrivoltaics as a climate-smart and resilient solution for midday depression in photosynthesis in dryland regions. *Npj Sustainable Agriculture* 2025 3:1, 3(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s44264-025-00073-1>
5. Campana, P. E., Stridh, B., Amaducci, S., Colauzzi, M. (2021.): Optimisation of vertically mounted agrivoltaic systems. *Journal of Cleaner Production*, 325, 129091. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129091>
6. Carrausse, R. (2024.): À l'ombre des panneaux solaires, l'agrivoltaïsme. Retour sur une trajectoire sociotechnique de légitimation. *Développement Durable et Territoires*, Vol. 15, n°3. <https://doi.org/10.4000/13cqb>
7. Chopard, J., Bisson, A., Lopez, G., Persello, S., Richert, C., Fumey, D. (2021.): Development of a decision support system to evaluate crop performance under dynamic solar panels. 050001. <https://doi.org/10.1063/5.0055119>
8. Deb, D., Dutta, S. (2022.): The robustness of land equivalent ratio as a measure of yield advantage of multi-crop systems over monocultures. *Experimental Results*, 3, e2. <https://doi.org/10.1017/exp.2021.33>
9. Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., Ferard, Y. (2011.): Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*. 36. 2725-2732. [10.1016/j.renene.2011.03.005](https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005).
10. Farja, Y., Maciejczak, M. (2021.): Economic Implications of Agricultural Land Conversion to Solar Power Production. *Energies*, 14(19), 6063. <https://doi.org/10.3390/en14196063>
11. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2023.): APV-Obstbau (Orcharding) – Agrivoltaics as Resilience Concept for Adaptation to Climate Change in Orchard. PV-Obstbau (Orcharding) – Agrivoltaics as Resilience Concept for Adaptation to Climate Change in Orchard. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/apv-obstbau-orcharding.html>

12. Ghasemi, S., Sadeghkhan, I. (2025.): Toward Sustainable Energy-Agriculture Synergies: A Review of Agrivoltaics Systems for Modern Farming Practices. *Solar RRL*. <https://doi.org/10.1002/solr.202500041>
13. Goetzberger, A., Zastrow, A. (1982.): On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. *International Journal of Solar Energy*, 1(1), 55–69. <https://doi.org/10.1080/01425918208909875>
14. Juillion, P., Lopez, G., Fumey, D., Lesniak, V., Génard, M., Vercambre, G. (2022.): Shading apple trees with an agrivoltaic system: Impact on water relations, leaf morphophysiological characteristics and yield determinants. *Scientia Horticulturae*, 306, 111434. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111434>
15. Leto J., Karoglan M., Radman S., Matulić D., Andabaka Ž., Fruk G., Rastija M., Varga I., Kranjac D., Rošin J., Radunić M., Ninčević Runjić T., Čagalj M., Kontek M., Turković M. (2023): Studija o potencijalu uporabe solarne energije u poljoprivrednom sektoru i sektoru slatkovodne akvakulture u Hrvatskoj. OIE – Obnovljivi izvori energije Hrvatska. Dostupno na: <https://oie.hr/wp-content/uploads/2023/09/Studija-o-potencijalu-uporabe-solarne-energije-FINAL.pdf>
16. Magarelli, A., Mazzeo, A., Ferrara, G. (2024.): Fruit Crop Species with Agrivoltaic Systems: A Critical Review. *Agronomy*, 14(4), 722. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040722>
17. Mupambi, G., Sandler, H. A., Jeranyama, P. (2022.): Installation of an agrivoltaic system influences microclimatic conditions and leaf gas exchange in cranberry. *Acta Horticulturae*, 1337, 117–124. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1337.16>
18. Ravlić, J., Bošnjak, D., Kos, T., Zorica, M., Zdrilić, A., Kolega, Š., Lisjak, M. (2025.): The effect of agrivoltaic systems on phenological phases and photosynthetic pigment content of apple cultivars. In I. Majić Z. Antunović (Eds.), *Book of Abstracts of 60th Croatian and 20th International Symposium on Agriculture* (p. 158). Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek, University Josip Juraj Strossmayer in Osijek.
19. Reher, T., Willockx, B., Schenk, A., Bisschop, J., Huyghe, Y., Nicolai, B. M., Martens, J. A., Diels, J., Cappelle, J., Van de Poel, B. (2025.): Agrivoltaic cultivation of pears under semi-transparent panels reduces yield consistently and maintains fruit quality in Belgium. *Agronomy for Sustainable Development*, 45(3), 25. <https://doi.org/10.1007/s13593-025-01019-0>

20. Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Obergfell, T., Bopp, G., Reise, C., Braun, C., Weselek, A., Bauerle, A., Högy, P., Goetzberger, A., Weber, E. (2020.): Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Applied Energy*, 265, 114737. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114737>
21. Smith, P., Calvin, K., Nkem, J., Campbell, D., Cherubini, F., Grassi, G., Korotkov, V., Le Hoang, A., Lwasa, S., McElwee, P., Nkonya, E., Saigusa, N., Soussana, J., Taboada, M. A., Manning, F. C., Nampanzira, D., Arias-Navarro, C., Vizzarri, M., House, J., ... Arneth, A. (2020.): Which practices co-deliver food security, climate change mitigation and adaptation, and combat land degradation and desertification? *Global Change Biology*, 26(3), 1532–1575. <https://doi.org/10.1111/gcb.14878>
22. SYMBIOSYST (2021.): Creating new synergies between solar energy and agriculture, European Cross Cooperation for Agri-PV development (<https://www.symbiosyst.eu/>) Date accessed 21.06.2025.
23. Ukwu, U. N., Muller, O., Meier-Grüll, M., Uguru, M. I. (2025.): Agrivoltaics shading enhanced the microclimate, photosynthesis, growth and yields of vigna radiata genotypes in tropical Nigeria. *Scientific Reports*, 15(1), 1190. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84216-3>
24. Vélez, S., Bretzel, T., Pöter, R., Berwind, M. F., Trommsdorff, M. (2025.): Overhead Agrivoltaic Systems Delay Apple Ripening and Influence Maturation Patterns. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5527009/v1>
25. Walston, L. J., Hartmann, H. M., Fox, L., Macknick, J., McCall, J., Janski, J., Jenkins, L. (2024.): If You Build It, Will They Come? Insect Community Responses to Habitat Establishment at Solar Energy Facilities in Minnesota, USA: Article No. 014053. *Environmental Research Letters*, 19(1). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AD0F72>
26. Weselek, A., Bauerle, A., Hartung, J., Zikeli, S., Lewandowski, I., Högy, P. (2021.): Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(5), 59. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00714-y>
27. Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., Högy, P. (2019.): Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(4), 35. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>

28. Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., Högy, P. (2019.): Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(4), 35. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>
29. Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o poljoprivredi (2022.): Narodne novine br. 57/2022. https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2022_05_57_782.html

Adrese autora – Author's addresses:

Dr.sc. Šimun Kolega
e-mail: skolega@unizd.hr, dopisni autor
Marko Zorica, mag.ing.agr.
e-mail: mzorica@unizd.hr
Anđelo Zdrilić, mag.ing.agr.
e-mail: azdrilic@unizd.hr
Izv.prof.dr.sc Tomislav Kos
e-mail: tkos@unizd.hr
Odjel za ekologiju, agronomiju i akvakulturu
Sveučilište u Zadru
Trg kneza Višeslava 9, 23000 Zadar

Izv.prof. dr.sc. Miroslav Lisjak
e-mail: miroslav.lisjak@fazos.hr
Jelena Ravlić, mag. biol.
e-mail: jelena.ravlic@fazos.hr
Marija Špoljarević, mag.biol.
e-mail: marija.spoljarevic@fazos.hr
Dejan Bošnjak, mag.ing.agr
e-mail: dejan.bosnjak@fazos.hr
Zavod za mikrobiologiju
Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek,
Vladimira Preloga 1, 31000 Osijek

Primljeno – Received:

18.07.2025.

Revidirano – Revised:

20.09.2025.

Prihvaćeno – Accepted:

01.10.2025.

