Baština Akademije nauka i umjetnosti Bosne i Hercegovine

Zemljište kao faktor razvoja poljoprivrede i zaštite životne sredine u Bosni i Hercegovini: Zemljište

Čustović, Hamid; Ljuša, Melisa; Beus, Vladimir

2026

https://bastina.anubih.ba/handle/123456789/866

Preuzeto s Baštine Akademije nauka i umjetnosti Bosne i Hercegovine

https://bastina.anubih.ba/

DOI: 10.5644/PI2026.223.06

ODRŽIVO GOSPODARENJE POLJOPRIVREDNIM ZEMLJIŠTEM KAO PREDUVJET INTENZIFIKACIJE POLJOPRIVREDNE PROIZVODNJE

Danijel Jug[1], Irena Jug[1], Boris Đurđević[1], Bojana Brozović[1], Monika Marković[1], Vedran Lederer[1]
[1]*Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek*
djug@fazos.hr

APSTRAKT

Održivo gospodarenje poljoprivrednim zemljištem predstavlja temeljni preduvjet za dugoročnu produktivnost, ekološku stabilnost i sigurnost opskrbe hranom. Suočena s rastućim izazovima klimatskih promjena, degradacije tla i smanjenja plodnosti, suvremena poljoprivreda mora prijeći s konvencionalnih, resursno-intenzivnih sustava na modele temeljene na održivosti, otpornosti i kružnosti. Ovaj pregledni rad pruža sveobuhvatan prikaz aktualnih znanstvenih spoznaja i praktičnih pristupa održivom gospodarenju zemljištem kao pokretaču održive intenzifikacije poljoprivredne proizvodnje. Naglasak je na praksama koje istodobno poboljšavaju zdravlje tla i povećavaju produktivnost, poput konzervacijske i regenerativne poljoprivrede, integriranog gospodarenja hranivima, precizne poljoprivrede te primjene poboljšivača tla.

U radu se tlo promatra kao višefunkcionalan sustav – ne samo kao podloga za rast biljaka, već i kao ključna komponenta globalnog ciklusa ugljika te rezervoar bioraznolikosti i usluga ekosustava. Analiziraju se suvremeni koncepti poput „intenzifikacije kroz održivost“ i „rješenja temeljenih na prirodi“ (nature-based solutions), koji omogućuju povećanje prinosa bez širenja poljoprivrednih površina ili dodatnog opterećenja okoliša. Posebna pozornost posvećuje se praćenju pokazatelja kvalitete tla (organski ugljik, struktura, biološka aktivnost, ravnoteža hraniva) te primjeni digitalnih tehnologija i geoprostornih podataka za donošenje odluka u upravljanju zemljištem.

U završnom dijelu naglašava se i društveno-ekonomska dimenzija održivog gospodarenja tlom, uključujući važnost odgovarajućih politika, edukacije i sudjelovanja dionika. Integracijom agronomskih inovacija s okolišnim i društvenim aspektima, održivo gospodarenje tlom postaje temelj klimatski pametne poljoprivrede te ključan alat za izgradnju otpornijih poljoprivrednih sustava, postizanje sigurnosti hrane i klimatske neutralnosti do 2050. godine.

Ključne riječi: održivo gospodarenje tlom, održiva intenzifikacija, konzervacijska poljoprivreda, regenerativna poljoprivreda, zdravlje tla, klimatske promjene, sigurnost hrane.

UVOD

Tijekom posljednjeg desetljeća istraživačka, politička i medijska pozornost u velikoj se mjeri usmjerila na fizičku dostupnost hrane, koja se tradicionalno promatra kroz prizmu razine poljoprivredne proizvodnje i produktivnosti usjeva. Ovakav pristup proizlazi iz uvriježenog stava da povećanje ukupne proizvodnje hrane izravno pridonosi postizanju globalne sigurnosti opskrbe hranom. U tom kontekstu, često se navodi tvrdnja kako će, kako bi se zadovoljile prehrambene potrebe rastuće svjetske populacije, globalna proizvodnja hrane morati porasti za 70 % do 2050. godine (FAO, 2009). Takve su procjene postale svojevrsni okvir političkog i znanstvenog diskursa o budućnosti poljoprivrede, potičući ulaganja u intenzifikaciju proizvodnje i tehnološke inovacije. Prema najnovijim procjenama Ujedinjenih naroda (UN, 2024), porast svjetskog stanovništva u slijedećih 25 godina iznosio bi gotovo 20 % što bi značajno utjecalo na poljoprivrednu proizvodnju koja bi trebala zadovoljiti sve veću potražnju za hranom. Prema procjenama Organizacije za hranu i poljoprivredu UN-a svjetska biljna i stočarska proizvodnja bi se morala značajno povećati (McKenzie i Williams, 2015) što bi za zemlje u razvoju značilo pokrivanje oko 80 % potrebnog povećanja, dok bi se ostatak postigao proširenjem površina obradivog zemljišta uglavnom na račun šuma, što je nepoželjno s obzirom na potrebu skladištenja ugljika radi ublažavanja klimatskih promjena uzrokovanih ljudskim djelovanjem (FAO, 2003).

Međutim, sve veći broj znanstvenika i stručnjaka upozorava da je takvo kvantitativno razumijevanje sigurnosti hrane pojednostavljeno i da prikriva složenost globalnih prehrambenih sustava (Godfray i Garnett, 2014; Tomlinson, 2013). Problem nesigurnosti hrane ne proizlazi isključivo iz nedovoljne proizvodnje, već je u znatnoj mjeri povezan s nepravednom i neravnomjernom distribucijom, gubitcima i rasipanjem hrane, kao i sa socijalnim, institucionalnim i ekonomskim barijerama koje ograničavaju pristup resursima poput obradivih površina, vode i tržišta (FAO, IFAD, UNICEF, WFP & WHO, 2023). Stoga povećanje proizvodnje, iako nužno u nekim regijama, nije dovoljno jamstvo za postizanje globalne prehrambene sigurnosti, a posebice ako se istodobno ne rješavaju i pitanja pravednosti, pristupačnosti i održivosti. Alexandratos i Bruinsma (2012) ističu da je sigurnost hrane samo djelomično povezana s ukupnim proizvodnim kapacitetom svijeta, „do te mjere da postaje gotovo irelevantna“. Oni naglašavaju potrebu prelaska s jednostavne paradigme rasta proizvodnje prema integriranom pristupu koji uključuje poboljšanje učinkovitosti korištenja resursa, smanjenje gubitaka hrane, promicanje lokalnih prehrambenih sustava i održivih modela potrošnje. Takvo promišljanje približava koncept sigurnosti hrane širem okviru održive transformacije poljoprivrede i agroekološkog upravljanja krajolikom, gdje je u središtu ne samo količina proizvedene hrane, već i način na koji se ta hrana proizvodi, distribuira i konzumira.

Održivo gospodarenje poljoprivrednim zemljištem predstavlja temeljni preduvjet za postizanje uravnotežene i dugoročno održive intenzifikacije poljoprivredne proizvodnje, koja mora zadovoljiti rastuće potrebe za hranom uz istodobno očuvanje okoliša i prirodnih resursa (Jug i sur, 2022).

U kontekstu klimatskih promjena, degradacije tla i smanjenja plodnosti, poljoprivreda se nalazi pred izazovom da istodobno poveća produktivnost i očuva ekosustavne funkcije tla, uključujući skladištenje ugljika, regulaciju vode i podršku bioraznolikosti (FAO i ITPS, 2015)**.** Takva ravnoteža čini osnovu održive transformacije poljoprivrednih sustava, koja je u središtu globalnih razvojnih politika poput Ciljeva održivog razvoja (SDG 2, SDG 13 i SDG 15) te Europskog zelenog plana (EU Green Deal).

Ovaj pregledni rad analizira suvremene pristupe i prakse održivog upravljanja poljoprivrednim zemljištem, s posebnim naglaskom na konzervacijsku i regenerativnu poljoprivredu, optimizirano gospodarenje hranivima i organskom tvari tla te digitalne tehnologije za precizno praćenje stanja tla i usjeva. Konzervacijska poljoprivreda (Jug i sur., 2018) temelji se na minimalnom narušavanju tla obradom, trajnom pokrovu i raznolikosti usjeva, dok regenerativna poljoprivreda ide korak dalje te se snažno usmjerava na okolišnu dimenziju održivosti, koja uključuje teme poput poboljšanja zdravlja tla**,** optimizacije upravljanja resursima**,** ublažavanja klimatskih promjena **te** unaprjeđenja kruženja hraniva i kakvoće i dostupnosti vode (Schreefel i sur., 2020). Integracija preciznih i digitalnih tehnologija – poput senzora, satelitskih podataka, sustava za upravljanje varijabilnim unosima i umjetne inteligencije – omogućuje detaljno razumijevanje prostorne heterogenosti tla i učinkovitije upravljanje resursima (Gebbers i Adamchuk, 2010).

Poseban naglasak stavljen je na koncept „intenzifikacije kroz održivost" (sustainable intensification), koji podrazumijeva povećanje prinosa uz istodobno smanjenje negativnih utjecaja na okoliš (Pretty i sur., 2018). Ovaj pristup, za razliku od konvencionalne intenzifikacije, ne temelji se isključivo na povećanom unosu energije i inputa, već na inovacijama koje poboljšavaju učinkovitost proizvodnje, kružno gospodarstvo i otpornost agroekosustava. Osim ekoloških aspekata, u radu se razmatraju i ekonomske i društvene dimenzije održivog gospodarenja poljoprivrednim zemljištem, koje uključuju pravednu raspodjelu prinosa i prihoda, uključenost poljoprivrednika te poticajne javne politike i tržišne mehanizme.

KONCEPT ODRŽIVOG GOSPODARENJA ZEMLJIŠTEM I GLOBALNI IZAZOVI

Održivo gospodarenje poljoprivrednim zemljištem (engl. Sustainable Land Management, SLM) podrazumijeva integrirani skup praksi, načela i institucionalnih okvira usmjerenih na dugoročno očuvanje produktivnosti tla, biološke raznolikosti i ekosustavnih funkcija, uz racionalno korištenje prirodnih resursa i prilagodbu klimatskim promjenama. Riječ je o konceptu koji nadilazi čisto agronomske pristupe te uključuje socijalne, ekonomske i okolišne dimenzije upravljanja prirodnim kapitalom (Hurni i sur., 2015; WOCAT, 2007).

Prema definiciji FAO-a, održivo gospodarenje poljoprivrednim zemljištem obuhvaća „usvajanje praksi koje omogućuju proizvodnju hrane, vlakana i drugih dobara uz očuvanje potencijala tla i vode za buduće generacije" (FAO, 2011; FAO, 2024.).

Tlo se, iz pedološke i ekološke perspektive, smatra neobnovljivim resursom na ljudskoj vremenskoj skali (Lal, 2015), jer su procesi formiranja pedosfere izuzetno spori. U širokom prosjeku, za nastanak jednog centimetra tla potrebno je od nekoliko stotina do tisuću godina. Stoga svaki gubitak tla zbog erozije ili njegove degradacije bilo kojeg oblika, predstavlja trajni gubitak ekološke funkcije kao i smanjenje sposobnosti tla za podržavanje uzgoja usjeva, skladištenja vode i hraniva te ublažavanje klimatskih ekstrema. Prema izvješću FAO-a i Međuvladinog tehničkog panela za tlo (ITPS), više od 33 % svjetskih tala već je degradirano, pri čemu se kao najizraženiji procesi degradacije navode: erozija, zakiseljavanje, zaslanjivanje, gubitak organske tvari i zbijenost tla (FAO i ITPS, 2015). Ovi procesi ne samo da smanjuju prinos i ekonomsku isplativost proizvodnje, već i ugrožavaju funkcionalnu otpornost cjelokupnog (agro)ekosustava.

Klimatske promjene djeluju kao multiplikator rizika degradacije tla, potičući sinergijske procese poput smanjenja vlažnosti tla, povećanja evaporacije, češćih i intenzivnijih suša i toplinskih valova te ubrzane mineralizacije organske tvari (IPCC, 2019). Smanjenje sadržaja organske tvari u tlu ima dalekosežne posljedice: smanjuje se agregatna stabilnost, vodni kapacitet i biološka aktivnost tla, dok se povećava emisija stakleničkih plinova (Smith i sur., 2020). Lal (2015) naglašava da degradacija tla nije samo agronomski problem, već i klimatsko-ekološki izazov, jer tlo ima ključnu ulogu u globalnom ciklusu ugljika. Procjenjuje se da tla na globalnoj razini sadrže više od 1500 Gt organskog ugljika, što je dvostruko više od količine u atmosferi. Zbog toga poljoprivredna tla predstavljaju najveći kopneni rezervoar ugljika (Batjes, 2016).

U tom kontekstu, održivo gospodarenje zemljištem postaje strateški instrument u globalnim politikama za ublažavanje i prilagodbu klimatskim promjenama. Izravno je povezano s nekoliko, već prethodno spomenutih, ciljeva održivog razvoja (SDG 2, SDG 13 i SDG 15) te s načelima Europskog zelenog plana i inicijative „Healthy Soils for Europe". Ključno pitanje koje se pritom postavlja jest kako povećati poljoprivrednu produktivnost bez daljnje degradacije poljoprivrednih proizvodnih, ali i drugih resursa.

Upravo se na tom spoju produktivnosti i očuvanja razvijaju suvremeni koncepti konzervacijske, regenerativne i klimatski pametne poljoprivrede, koji predstavljaju različite, ali komplementarne pristupe unutar šireg okvira održivog gospodarenja zemljištem (Chandra i sur., 2017, 2018; Kassam i sur., 2019). Konzervacijska poljoprivreda usmjerena je na minimizaciju antropogenih poremećaja tla i očuvanje njegovih proizvodnih svojstava, dok regenerativna poljoprivreda ima širi kontekst, nastojeći obnoviti izgubljene funkcije tla i bioraznolikost. S druge strane, klimatski pametna poljoprivreda (CSA) predstavlja integracijski okvir koji povezuje gospodarenje tlom s ublažavanjem emisija, prilagodbom klimatskim promjenama i povećanjem produktivnosti (FAO, 2013; Lipper i sur., 2014).

Ovi pristupi, iako različiti u operativnom smislu, dijele zajednički cilj - transformaciju poljoprivrede iz ekstraktivnog (konvencionalni, intenzivno-inputni model poljoprivrede, koji se temelji na velikoj upotrebi mineralnih gnojiva, pesticida i goriva, intenzivnoj obradi tla koja uključuje oranje, fokusiranju prvenstveno ili isključivo na maksimalne prinose, iscrpljivanju prirodnih resursa - organske tvari, vode, bioraznolikosti i dr.) u regenerativni sustav, u kojem se tlo promatra ne kao pasivan medij, nego kao dinamičan ekosustav i ključni element održive proizvodnje hrane. U toj paradigmi težina je na obnovi plodnosti tla i biološke aktivnosti, povećanju sadržaja organskog ugljika i kruženju hraniva, jačanju otpornosti agroekosustava na sušu i eroziju te integraciju ekoloških i društvenih koristi (npr. zdravlje tla, kvaliteta vode, dobrobit zajednice). Drugim riječima, to znači prijelaz s poljoprivrede koja "uzima više nego što vraća" na poljoprivredu koja "proizvodi i obnavlja" - kako tlo, tako i širi ekosustav.

KONZERVACIJSKA POLJOPRIVREDA KAO TEMELJ ODRŽIVOG GOSPODARENJA TLOM

Konzervacijska poljoprivreda (Conservation Agriculture, CA) predstavlja jedan od najvažnijih pristupa održivom gospodarenju tlom i temelji se na tri osnovna načela: (1) minimalnom narušavanju tla obradom, (2) trajnom pokrovu tla biljnim ostacima ili sekundarnim usjevima te (3) raznolikosti usjeva kroz rotaciju u plodoredu i/ili međuusjeve (FAO, 2015).

Ova načela djeluju sinergijski, čime se osigurava stabilnost i otpornost tla, smanjuje erozija i degradacija te potiče dugoročna produktivnost agroekosustava. Za razliku od konvencionalne obrade, koja uključuje duboko oranje i intenzivnu upotrebu strojeva, CA promiče biološki aktivne, samoregulirajuće sustave, u kojima tlo postaje i opstaje kao živi medij, a ne samo supstrat za uzgoj biljaka.

Praksa minimalnog narušavanja tla obradom smanjuje mehaničku degradaciju strukture i zadržava prirodnu poroznost, čime se poboljšava infiltracija vode i smanjuje površinsko otjecanje (Hobbs i sur., 2007). Time se smanjuje i erozija, što je posebno važno u područjima s intenzivnim oborinama (vodena erozija), ali sve češće i u područjima s jačim i učestalijim vjetrovima (vjetrena erozija). Stalni biljni pokrov (mrtvi i živi) dodatno doprinosi stabilnosti površinskog sloja, smanjujući isušivanje i ublažavajući temperaturne ekstreme, a istodobno osigurava akumulaciju organske tvari tla koja je ujedno i izvor energije za mikroorganizme tla. Rotacija usjeva, treći princip CA, omogućuje raznolik unos hraniva, smanjuje pritisak na proizvodnju te doprinosi boljim odnosima između tla, biljaka i mikrobiološke zajednice (Kassam i sur., 2019).

Brojna su istraživanja pokazala kako CA može značajno povećati količinu i stabilnost organskog ugljika u tlu (SOC), poboljšati agregatnu strukturu te smanjiti gubitke hraniva (Pittelkow i sur., 2015; Lal, 2015). Prema Giller i sur. (2015), konzervacijska poljoprivreda ima značajan potencijal poboljšanja održivosti poljoprivrede, ali njezin utjecaj na prinos nije univerzalan.

Najveće koristi ostvaruju se u sušnim područjima i na tlima slabije kvalitete, dok se u vlažnijim područjima ili monokulturnim sustavima mogu javiti početni gubici prinosa. CA izravno doprinosi ublažavanju klimatskih promjena i jačanju otpornosti poljoprivrede na sušu, eroziju i degradaciju tla.

Unatoč brojnim prednostima, primjena CA nije univerzalno uspješna (Kassam i sur., 2018; Jug i sur., 2025). U hladnijim i vlažnim klimatskim zonama, plitka konzervacijska obrada može dovesti do nakupljanja vlage, sporijeg zagrijavanja tla u proljeće i smanjene mineralizacije dušika, što može ograničiti početni rast biljaka. Također, kod teških glinastih tala može doći do zbijanja i slabije aeracije. U takvim uvjetima ovaj sustav obrade tla zahtijeva preciznu prilagodbu lokalnim agroekološkim uvjetima, uključujući izbor sekundarnih usjeva, dubinu sjetve i pravilno upravljanje biljnim ostacima.

Osim biotehničkih izazova, postoji i socioekonomska dimenzija primjene CA. Brojni autori ističu kao uspjeh CA ovisi o dostupnosti tehničkog znanja, financijskih poticaja i institucionalne potpore (Kassam i sur., 2019; Giller i sur., 2015). U prvim godinama nakon uvođenja CA prakse, poljoprivrednici često ne uočavaju značajno veći pozitivan učinak na visinu prinosa, dok se pozitivni učinci na strukturu tla i biološku aktivnost obično javljaju tek nakon nekoliko vegetacijskih sezona. Kako bi se pozitivni učinci realizirali u što je moguće kraćem roku, potrebna je dugoročna edukacija poljoprivrednih proizvođača, dosljedno provođenje politike potpora i participativni pristup s transferom znanja između znanstvenika, savjetodavnih službi i proizvođača.

U konačnici, konzervacijska poljoprivreda stoga nije samo skup tehnoloških postupaka, već konceptualni okvir za transformaciju poljoprivrednih sustava prema većoj održivosti. Kao temelj održivog gospodarenja tlom, CA omogućuje smanjenje degradacije i povećanje otpornosti agroekosustava, ali njezina učinkovitost ovisi o integraciji ekoloških, ekonomskih i društvenih aspekata. U kombinaciji s regenerativnim i klimatski pametnim praksama, CA ima potencijal postati ključni mehanizam prijelaza s ekstraktivne prema regenerativnoj poljoprivredi, u skladu s globalnim ciljevima održivog razvoja i klimatske neutralnosti do 2050. godine.

REGENERATIVNA POLJOPRIVREDA - EVOLUCIJA KONCEPTA ODRŽIVOSTI

Regenerativna poljoprivreda (Regenerative Agriculture, RA) predstavlja evolucijski iskorak u odnosu na klasične koncepte održivosti u poljoprivredi. Za razliku od konzervacijske poljoprivrede, koja se prvenstveno usredotočuje na očuvanje postojećih resursa i sprječavanje degradacije tla, regenerativna poljoprivreda ide korak dalje te nastoji aktivno obnoviti biološke, kemijske i fizikalne funkcije tla. Ona se temelji na ideji da poljoprivreda ne mora biti neutralna prema okolišu, nego da može djelovati pozitivno i regenerativno, potičući zdravlje ekosustava, bioraznolikost i otpornost agroekosustava na klimatske promjene (Lal i sur., 2018; Newton i sur., 2020).

Koncept regenerativne poljoprivrede razvijao se od 1980-ih, a snažan zamah dobio je tijekom posljednjeg desetljeća kao odgovor na globalne izazove degradacije tla, gubitka organske tvari i emisija stakleničkih plinova iz poljoprivrede. Iako ne postoji jedinstvena definicija (Schreefel i sur., 2020) može se reći kako se RA temelji na sljedećim zajedničkim postulatima: poboljšanju zdravlja tla, optimizaciji upravljanja resursima, ublažavanju klimatskih promjena, unapređenju kruženja hraniva u tlu i povećanju dostupnosti vode (Liniger i Critchley, 2007). Te su teme usko povezane s konceptom usluga ekosustava, jer regenerativne prakse doprinose pružanju proizvodnih funkcija (ljudska hrana, stočna hrana, vlakna), regulacijskih funkcija (regulacija klime, pročišćavanje vode, smanjenje erozije) i potpornih funkcija (formiranje tla, kruženje hraniva).

Središnji element RA jest obnova zdravlja tla kroz povećanje sadržaja organske tvari i biološke aktivnosti. To se postiže kombinacijom sekundarnih usjeva, višegodišnjih kultura, kompostiranja, integriranog upravljanja stočarstvom, konzervacijskom obradom tla i rotacijom usjeva. Lal i sur. (2018) ističu da takve prakse potiču sekvestraciju ugljika, odnosno dugotrajno vezanje atmosferskog CO_2 u organsku tvar tla, čime se istodobno poboljšava njegova struktura, zadržavanje vlage i otpornost na eroziju. Procjenjuje se da bi globalno povećanje organskog ugljika u tlu za samo 0,4 % godišnje moglo kompenzirati značajan dio antropogenih emisija CO_2 (Minasny i sur., 2017).

Uz ekološku dimenziju, regenerativna poljoprivreda uključuje i socijalno-ekonomske aspekte, poput poboljšanja ljudskog zdravlja, dobrobiti ruralnih zajednica i ekonomske održivosti obiteljskih gospodarstava (Giller i sur., 2021). U tom smislu RA promiče holistički pristup koji povezuje zdravlje tla, zdravlje biljaka, životinja i ljudi. Ipak, implementacija ovakvog sustava zahtijeva dugoročno promišljanje i promjenu paradigme - od kratkoročnog maksimiziranja prinosa prema višedimenzionalnom upravljanju koje uključuje otpornost, regeneraciju i kružno gospodarstvo.

Unatoč rastu popularnosti, RA se suočava s izazovima u znanstvenom dokazivanju učinkovitosti. Newton i sur. (2020) i Giller i sur. (2021) upozoravaju da pojam "regenerativno" često ostaje konceptualno nejasan te da nedostaje standardiziran okvir za mjerenje i verifikaciju rezultata. Stoga se sve više naglašava potreba za razvojem indikatora regeneracije tla (npr. organski ugljik tla, stabilnost strukturnih agregata tla, bioraznolikost tla), kao i ekonomskih i društvenih pokazatelja (Schreefel i sur., 2020).

Regenerativna poljoprivreda može se promatrati i kao most između agroekologije i klimatski pametne poljoprivrede (Climate Smart Agriculture, CSA). Dok agroekologija naglašava društvenu pravednost i tradicionalno znanje, a CSA prilagodbu klimatskim promjenama i smanjenje emisija, RA povezuje te pristupe kroz praktične mehanizme obnove tla i povećanje produktivnosti. Time se stvara integrirani okvir koji ujedinjuje ekološku obnovu i ekonomsku isplativost, što je ključno za održivost poljoprivrednih sustava u dugoročnom smislu.

Zaključno, regenerativna poljoprivreda predstavlja evolucijski koncept održive poljoprivrede koji teži ne samo očuvanju nego i aktivnoj obnovi funkcija tla i ekosustava. Njezina vrijednost leži u sposobnosti da poveže znanost, praksu i politiku, omogućujući transformaciju poljoprivrede iz ekstraktivnog u regenerativni sustav. Uspješna implementacija RA zahtijeva razvoj znanstveno utemeljenih pokazatelja, potporu politika i uključivanje poljoprivrednika kao sukreatora znanja, što je ključno za postizanje klimatske neutralnosti i globalne prehrambene sigurnosti do 2050. godine.

DIGITALNE TEHNOLOGIJE I PRECIZNA POLJOPRIVREDA U SLUŽBI ODRŽIVOSTI

Razvoj digitalnih tehnologija otvorio je nove mogućnosti za integrirano upravljanje poljoprivrednim zemljištem i prirodnim resursima općenito. Koncept precizne poljoprivrede temelji se na korištenju senzora, dronova, satelitskih snimaka i sustava umjetne inteligencije za praćenje prostorne varijabilnosti tla i biljaka (Gebbers i Adamchuk, 2010). Time se omogućuje racionalnije korištenje proizvodnih resursa, gnojiva i pesticida, optimizira se navodnjavanje te se smanjuju troškovi i emisije iz poljoprivrede (Mulla, 2013).Kombinacija regenerativnih i digitalnih praksi sve se češće promatra kao "Regenerative Agriculture 4.0", odnosno integracija agroekoloških načela s tehnološkim inovacijama (El Bilali i Allahyari, 2018).

Međutim, implementacija takvih tehnologija suočava se s ograničenjima – visoki troškovi, potreba za tehničkim znanjem i pristupom podacima često sprječavaju male i srednje poljoprivrednike u mogućnosti njihove primjene (Rose i Chilvers, 2018). Stoga digitalna tranzicija mora biti inkluzivna, s naglaskom na otvorene baze podataka i pravednu dostupnost tehnologija.

EKONOMSKE I DRUŠTVENE DIMENZIJE ODRŽIVOG GOSPODARENJA ZEMLJIŠTEM

Iako se održivost često promatra kroz biotehničku prizmu, njezina ekonomska i društvena dimenzija jednako su važne. Učinkovito upravljanje poljoprivrednim zemljištem mora biti ekonomski isplativo, socijalno pravedno i institucionalno podržano (Pretty i sur., 2018). Empirijske analize pokazuju da održive prakse dugoročno povećavaju profitabilnost smanjenjem inputa i degradacije prirodnih resursa (Smith i sur., 2020).

S druge strane, bez odgovarajućih javnih politika i tržišnih poticaja, poljoprivrednici često nemaju motivaciju za usvajanje održivih tehnologija. Europski zeleni plan i Zajednička poljoprivredna politika (CAP 2023–2027) naglašavaju potrebu za plaćanjem usluga ekosustava, odnosno nagrađivanjem poljoprivrednika za praksu koja donosi okolišne koristi. Time se održivo gospodarenje zemljištem transformira iz tehničkog pristupa u sveobuhvatni socioekonomski model ruralne otpornosti.

ZAKLJUČAK

Održivo gospodarenje poljoprivrednim zemljištem ključan je preduvjet za osiguranje dugoročne produktivnosti, prehrambene sigurnosti i otpornosti agroekosustava na klimatske promjene. Analiza literature pokazuje da koncepti konzervacijske i regenerativne poljoprivrede nude učinkovit okvir za obnovu funkcija tla, smanjenje degradacije i povećanje bioraznolikosti. Međutim, njihova uspješnost ovisi o lokalnim agroekološkim uvjetima, socioekonomskim kontekstima i potpori javnih politika. Integracija digitalnih tehnologija i preciznog upravljanja resursima otvara mogućnost značajnog povećanja učinkovitosti i transparentnosti, ali zahtijeva ulaganja u znanje, infrastrukturu i jednak pristup podacima. Daljnji napredak prema intenzifikaciji poljoprivredne proizvodnje kroz održivost, zahtijeva multidisciplinarni pristup koji spaja znanstvene spoznaje, političke instrumente i praktična iskustva poljoprivrednika. Održivo gospodarenje tlom stoga nije samo tehničko pitanje, nego i strategija društvene i ekonomske transformacije ruralnih prostora u skladu s ciljevima klimatske neutralnosti i održivog razvoja do 2050. godine.

LITERATURA

Alexandratos, N., Bruinsma, J. (2012). World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working paper No. 12-03. Rome, FAO

Batjes, N.H. (2016). Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks. Geoderma, 269, 61–68. doi:10.1016/j.geoderma.2016.01.034

Chandra, A., McNamara, K. E., Dargusch, P. (2017). Climate-smart agriculture: perspectives and framings. Climate Policy, 18(4), 526–541. https://doi.org/10.1080/14693062.2017.1316968

Chandra, A., McNamara, K. E., Dargusch, P. (2018). Climate-smart agriculture: Perspectives and framings. Climate Policy, 18(4), 526–541. https://doi.org/10.1080/14693062.2017.1413325

El Bilali, H., Allahyari, M. S. (2018). Transition towards sustainability in agriculture and food systems: Role of information and communication technologies. Information Processing in Agriculture, 5(4), 456–464. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.06.006

FAO (2003). World Agriculture: Towards 2015/2030 - An FAO Perspective. FAO, London

FAO (2011). *Towards a Global Soil Partnership: Sustainable Management of Soil Resources for Food Security and Climate Change Adaptation and Mitigation*. FAO

FAO (2015): The main principles of conservation agriculture. http://www.fao.org/ag/ca/1b.html

FAO and ITPS (2015) Status of the World's Soil Resources (SWSR)—Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy. http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf

FAO, IFAD, UNICEF, WFP, & WHO. (2023). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2023: Urbanization, Agrifood Systems Transformation and Healthy Diets Across the Rural–Urban Continuum*. Rome: FAO. https://doi.org/10.4060/cc3017en

FAO (2009). *How to Feed the World in 2050*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations

FAO (2013). Climate-smart agriculture sourcebook. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)

FAO (2024). Policy guidance note: Sustainable soil management – Opportunities and recommendations for decision makers. Santiago. https://doi.org/10.4060/cd0821en

Gebbers, R., Adamchuk, V.I. (2010). Precision agriculture and food security. Science (New York, N.Y.), 327(5967), 828–831. https://doi.org/10.1126/science.1183899

Giller, K.E., Andersson, J.A., Corbeels, M., Kirkegaard, J., Mortensen, D., Erenstein, O., Vanlauwe, B. (2015). Beyond conservation agriculture. Frontiers in Plant Science, 6, 870

Giller, K.E., Hijbeek, R., Andersson, J.A., Sumberg, J. (2021). Regenerative agriculture: An agronomic perspective. Outlook on Agriculture, 50(1), 13–25

Godfray, H.C.J., Garnett, T. (2014). Food security and sustainable intensification. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1639), 20120273. doi:10.1098/rstb.2012.0273

Hobbs, P.R., Sayre, K., Gupta, R. (2007). The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 543–555

Hurni, H., Giger, M., Liniger, H., Mekdaschi, R., Messerli, P., Portner, B., Schwilch, G., Wolfgramm, B., Breu, T. (2015). Soils, agriculture and food security: the interplay between ecosystem functioning and human well-being. Current Opinion in Environmental Sustainability, 15, 25–34. doi:10.1016/j.cosust.2015.07.009

IPCC (2019). *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems.* Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change

Jug, D., Jug, I., Brozović, B., Šeremešić, S., Dolijanović, Ž., Zsembeli, J., Ujj, A., Marjanovic, J., Smutny, V., Dušková, S., Neudert, L., Macák, M., Wilczewski, E., Đurđević, B. (2025). Conservation Soil Tillage: Bridging Science and Farmer Expectations-An Overview from Southern to Northern Europe // Agriculture, 15 (2025), 3; 1-31. doi: 10.3390/agriculture15030260

Jug, D., Jug, I., Brozović, B., Vukadinović, V., Stipešević, B., Đurđević, B. (2018). The role of conservation agriculture in mitigation and adaptation to climate change. Poljoprivreda, 24 (1), 35-44. https://doi.org/10.18047/poljo.24.1.5

Jug, I., Jug, D., Brozović, B., Vukadinović, V., Đurđević, B. (2022). *Osnove tloznanstva i biljne proizvodnje: Sveučilišni udžbenik*. Osijek: Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Fakultet agrobiotehničkih znanosti

Kassam, A., Friedrich, T., Derpsch, R. (2018). Global spread of Conservation Agriculture. International Journal of Environmental Studies, 76(1), 29–51. https://doi.org/10.1080/00207233.2018.1494927

Kassam, A., Friedrich, T., Derpsch, R. (2019). Global spread of conservation agriculture. *International Journal of Environmental Studies*, 76(1), 29–51.

Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875–5895

Lal, R., Smith, P., Jungkunst, H.F., Mitsch, W.J., Lehmann, J., Nair, P.K.R., McBratney, A.B., de Moraes Sá, J. C., Schneider, J., Zinn, Y.L., Skorupa, A.L.A., Zhang, H.-L., Minasny, B., Srinivasrao, C., Ravindranath, N.H. (2018). The carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems. Journal of Soil and Water Conservation, 73(6), 145A–152A. https://doi.org/10.2489/jswc.73.6.145A

Liniger, H.P., Critchley, W. (2007). *Where the Land is Greener: Case Studies and Analysis of Soil and Water Conservation Initiatives Worldwide.* Rome: FAO

Lipper, L., Thornton, P., Campbell, B.M., Baedeker, T., Braimoh, A., Bwalya, M., Torquebiau, E.F. (2014). Climate-smart agriculture for food security. Nature Climate Change, 4(12), 1068–1072

McKenzie, F.C., Williams, J. Sustainable food production: constraints, challenges and choices by 2050. Food Sec. **7**, 221–233 (2015). https://doi.org/10.1007/s12571-015-0441-1

Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., Cheng, K., Das, B.S., Field, D.J., Gimona, A., Hedley, C.B., Hong, S.Y., Mandal, B., Marchant, B.P., Martin, M., McConkey, B.G., Mulder, V.L., O'Rourke, S., Richer-de-Forges, A.C., Odeh, I., Padarian, J., Paustian, K., Pan, G., Poggio, L., Savin, I., Stolbovoy, V., Stockmann, U., Sulaeman, Y., Tsui, C.-C., Vågen, T.-G., van Wesemael, B., Winowiecki, L. (2017). Soil carbon 4 per mille. Geoderma, 292, 59–86. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002

Mulla, D.J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. Biosystems Engineering, 114(4), 358–371

Newton, P., Civita, N., Frankel-Goldwater, L., Bartel, K., Johns, C. (2020). What is regenerative agriculture? A review of scholar and practitioner definitions based on processes and outcomes. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 577723. doi: 10.3389/fsufs.2020.577723

Pittelkow, C.M., Liang, X., Linquist, B.A., van Groenigen, K.J., Lee, J., Lundy, M.E., van Gestel, N., Six, J., Venterea, R.T., van Kessel, C. (2015). Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. Nature, 517(7534), 365–368. https://doi.org/10.1038/nature13809

Pretty, J., Benton, T.G., Bharucha, Z.P., Dicks, L.V., Flora, C.B., Godfray, H.C.J., Goulson, D.G., Hartley, S., Lampkin, N., Morris, C., Pierzynski, G., Prasad, P.V., Reganold, J., Rockström, J., Smith, P., Thorne, P. and Wratten, S. (2018). Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. Nature Sustainability 1:441–446

Rose, D.C., Chilvers, J. (2018). Agriculture 4.0: Broadening responsible innovation in an era of smart farming. Front. Sustain. Food Syst. 2:87. doi: 10.3389/fsufs.2018.00087

Schreefel, L., Schulte, R.P.O., de Boer, I.J.M., Schrijver, A.P., van Zanten, H.H.E. (2020). Regenerative agriculture – the soil is the base. *Global Food Security*, 26, 100404. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100404

Smith, P., Soussana, J.F., Angers, D., Schipper, L., Chenu, C., Rasse, D.P., Batjes, N.H., van Egmond, F., McNeill, S., Kuhnert, M., Arias-Navarro, C., Olesen, J.E., Chirinda, N., Fornara, D., Wollenberg, E., Álvaro-Fuentes, J., Sanz-Cobena, A., Klumpp, K. (2020). How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. Global change biology, 26(1), 219–241. https://doi.org/10.1111/gcb.14815

Tomlinson, I. (2013). Doubling food production to feed the 9 billion: A critical perspective on a key discourse of food security in the UK. *Journal of Rural Studies*, 29, 81–90

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2024). *World Population Prospects 2024: Summary of Results* (UN DESA/POP/2024/TR/No 9). New York: United Nations

WOCAT (2007). Where the land is greener: Case studies and analysis of soil and water conservation initiatives worldwide. In H. Liniger & W. Critchley (Eds.)

Posebna izdanja ANUBiH CCXXIII, ODN 31, 80-91

SUSTAINABLE AGRICULTURAL LAND MANAGEMENT AS A PREREQUISITE FOR INTENSIFICATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

Danijel Jug[1], Irena Jug[1], Boris Đurđević[1], Bojana Brozović[1], Monika Marković[1], Vedran Lederer[1]
[1]*Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek*
djug@fazos.hr

ABSTRACT

Sustainable management of agricultural land represents a fundamental prerequisite for long-term productivity, ecological stability, and food security. Faced with increasing challenges of climate change, soil degradation, and declining fertility, modern agriculture must transition from conventional, resource-intensive systems to models based on sustainability, resilience, and circularity. This review paper provides a comprehensive overview of current scientific knowledge and practical approaches to sustainable land management as a driver of sustainable intensification of agricultural production. The focus is placed on practices that simultaneously improve soil health and increase productivity, such as conservation and regenerative agriculture, integrated nutrient management, precision farming, and the application of soil amendments.

The paper considers soil as a multifunctional system – not only as a physical medium for plant growth but also as a key component of the global carbon cycle and a reservoir of biodiversity and ecosystem services. Contemporary concepts such as "intensification through sustainability" and "nature-based solutions" are analyzed as frameworks that enable yield increase without expanding agricultural land or adding pressure to the environment. Particular attention is given to monitoring soil quality indicators (organic carbon, structure, biological activity, and nutrient balance) and to the application of digital technologies and geospatial data for decision-making in land management.

The final section emphasizes the socio-economic dimension of sustainable soil management, including the importance of appropriate policies, education, and stakeholder participation. By integrating agronomic innovations with environmental and social aspects, sustainable soil management becomes the foundation of climate-smart agriculture and a key tool for building more resilient agricultural systems, ensuring food security, and achieving climate neutrality by 2050.

Keywords: sustainable soil management, sustainable intensification, conservation agriculture, regenerative agriculture, soil health, climate change, food security.