

Njegovo veličanstvo ugljik

Prof. dr. sc. Vladimir Vukadinović

Uvod

Ugljik (C) je kemijski element atomskog broja i atomske mase 12,0107. Po masi je četvrti najčešći element u svemiru i 15 najzastupljeniji u Zemljinoj kori u kojoj ga je 99,8% u mineralima sedimentnih stijena, uglavnom karbonatima (vapnencima i dolomitima). Suha tvar biljaka tvar sadrži prosječno 45 % C, 45 % O i 6 % H i čini prosječno 95 %, pa i više, više ukupne suhe tvari. Ugljik biljke usvajaju iz zraka, a kisik i vodik iz vode i to u ogromnim količinama, a ugljik, premda je njegova atomska masa mala, čini gotovo polovicu suhe tvari. Nakon usvajanja iz atmosfere ugljik (tzv. *asimilacija*) se prvo ugrađuje u šećere (*ugljikohidrate*) u procesu *fotosinteze* u zelenom lišću kojim se energija Sunca (svjetlosna energija) transformira u kemijsku energiju organskih spojeva koji zatim pokreću sve žive organizme na Zemlji.

Najveći rezervoar ugljika na Zemlji su tla čiji se organski C (OC) procjenjuje se na 1.550 Pg (Pg; petagram = 10¹⁵ grama), a anorganski C na 950 Pg, oba do 1 m dubine. Tlo sadrži više ugljika od atmosfere (750 Pg) i biomase (620 Pg) zajedno, dok oceani i mora sadrže 38,4 Pg C, a fosilna goriva 4.500 Pg. Istraživanja pokazuju da je zbog intenzivne proizvodnje hrane i manjeg povrata ugljika žetvenim ostacima i organskim gnojem iz poljoprivrednih tala izgubljeno 50 - 75 % od izvorne količine organskog ugljika. Na gubitak ugljika značajno utječe povećana erozija i jače ispiranje iz tla u odnosu na prirodne ekosustave, zatim krčenje šuma, povećavanje površina pod poljoprivrednim zemljištem, rast urbanih i industrijskih zona, rudnika itd., tako da je procjena gubitka po jednom hektaru za većinu poljoprivrednih tala 20 - 40 t tijekom povijesti poljoprivrednog korištenja zemljišta.

Koncentracija ugljičnog dioksida (CO₂) u atmosferi porasla je od predindustrijskog doba (1850. god.) s ~280 ppm (*parts per million*) *na trenutno (04.07.2023.) ~422,78 ppm (0.042278 %), ili čak za 50,99 % i trenutno raste po stopi od ~2,79 % ili 0,66 ppm godišnje.* Povećanje emisije CO₂ neposredna je posljedica sve većeg korištenja fosilnih goriva, krčenja šuma koje fotosintezom usvajaju i ugrađuju ugljik u organsku tvar (tzv. *sekvestracija C*), spaljivanja biomase, odnosno žetvenih ostataka, regulacije tresetišta i močvara i dr. *Biosfera*, iako samo tanak sloj na površini Zemlje, nezamjenjiv je transformator energije Sunca u kemijsku energiju organskih, odnosno ugljikovih spojeva *jer je fotosinteza jedinstven fizikalno-kemijski mehanizam energetskog inputa kojim biljke, alge i fotosintetske bakterije koriste svjetlosnu energiju za sintezu organske tvari.* To je temeljni fiziološki proces koji omogućuje cjelokupan život na Zemlji, ali se samo neznatan dio fotosintetske produkcije koristi kao hrana, a ostatak kao gorivo ili sirovina za industriju i dr. Velik značaj fotosinteze je održavanja ciklusa kruženja ugljika i drugih elemenata u prirodi. Naime, koncentracija CO₂ u atmosferi je vrlo mala (trenutno 0,0423 % volumno) te se svake godine 10 % cjelokupnog CO₂ atmosfere reducira fotosintezom do ugljikohidrata.

Utjecaj povećane koncentracije CO₂ u atmosferi na klimu i biljnu proizvodnju

Sve brže klimatske promjene, nestašica hrane i vode te rastuća populacija globalni su problemi, a do 2050. godine na Zemlji će živjeti 2 milijardi ljudi više (*trenutno nas ima 8.043.419.800, 10. srpnja 2023. u 08:00^h*) za koje treba osigurati dovoljno hrane. *Posljedično, intenziviranje poljoprivredne proizvodnje na sve manjim površinama uz sve veću potrošnju mesa i mliječnih proizvoda te uz stagnaciju povećanja proizvodnje najvažnijih prehrambenih usjeva i sve veću proizvodnju usjeva za biogoriva* (trenutno uzgajanih na ~9 % poljoprivrednih površina) utječu na brz porast koncentracije ugljika u atmosferi, ubrzavaju klimatske pojave i sve češće klimatske ekscesa (toplotne udare, suše, poplave, oluje, grad i dr.).

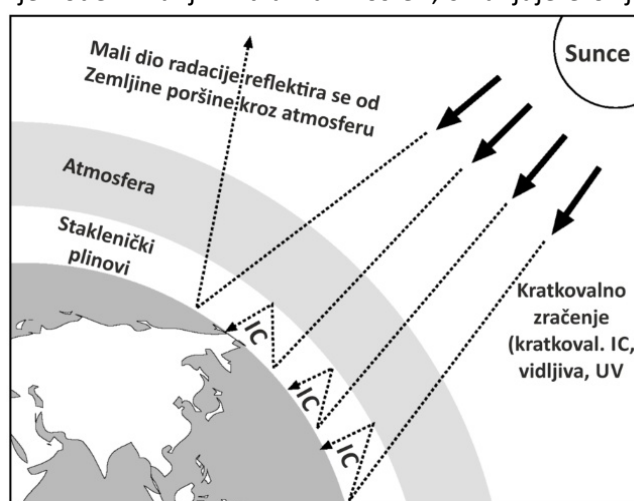
Ideja i kako iznaći rješenje ima više, ali većina ih zahtjeva radikalne promjene u metabolizmu biljaka (npr. poboljšanje efikasnosti fotosinteze, bolje iskorištavanje povećanja konc. CO₂ u atmosferi, bržu i bolju raspodjelu fotosintata unutar biljaka, bolju interakciju biljaka i mikroorganizama, povezivanje C₃ i efikasnije C₄-fotosinteze, genomska istraživanja i kreiranje kultivara tolerantnijih na stresna okruženja i dr.). *Naime, mišljenje fizičara Freemana Daysona da „ako uspijemo kontrolirati što biljke rade s ugljikom, njegova*

sudbina je u našim rukama”, vjerojatno nije posve točna jer on nije smatrao globalno zatopljenje kao ozbiljnu prijetnju, ali svakako bi usporilo porast CO₂ u atmosferi. Stoga je za očekivati da će češće i dugotrajnije suše smanjit vlagu tla i otežati usvajanje hraniva, ali i smanjiti sadržaj humusa zbog pojačane oksidacije organske tvari u tlu što će dodatno smanjiti poljski vodni kapacitet i produktivnost usjeva. Poznato je kako humus zadržava vodu u omjeru 1:2,6 do 1:6 te bi povećanjem humusa u tlu s ~2 na 3 % (što nije lako, niti brzo, ali je moguće postići promjenom poljoprivredne prakse, npr. zaoravanjem svih žetvenih ostataka, češćom primjenom organskih gnojiva, zelenom gnojidbom, primjenom konzervacijske obrade tla i dr.) omogućilo zadržavanje ~540.000 kg ha⁻¹ vode (čak i više), što je ekvivalent od ~54 mm oborina. Mnoga istraživanja pokazala su da konzervacijska obrada smanjuje zbijanje i eroziju tla uza povećanje organsku tvar i bolju infiltracije vode u tlu te će takva praksa vjerojatno biti sve češća, premda nije prikladna za sve agroekosustave.

Ugljik u tlu

Organska tvar je ključna komponenta tla koja utječe na njegova fizička, kemijska i biološka svojstva, uvelike doprinoseći njegovom pravilnom funkcioniranju o kojem ovise ljudska društva. Ona povećava plodnost tla poboljšavajući njegovu strukturu, utječe na zadržavanje vode i hranjivih tvari u rizosferi, smanjuje eroziju što poboljšava kvalitetu podzemne i površinske slatke vode. Od početaka povijesti ljudi su shvatili da poljoprivredna proizvodnja iscrpljuje produktivnost tla i sposobnost proizvodnje hrane, ali tek u novijoj povijesti produktivnost tla čvrsto se povezuje s razinom organske tvari u njemu, pri čemu treba razlikovati ukupni ugljik (TOC; Total Organic Carbon) koji je pohranjen u organskoj tvari tla (SOM; Soil Organic Matter) te C u tlu (SOC; Soil Organic Carbon) čini prosječno 58 % organske tvari tla (SOM).

Općenito, poljoprivredno zemljište je globalno oskudan resurs te je zbog porasta broja stanovnika, njegove *degradacije, onečišćenja, krčenja šuma, erozije i širenja pustinja (dezertifikacije), učinka klimatskih*



Slika 1. Efekt staklenika

promjena, urbanizacije i dr. na raspolaganju sve manje poljoprivrednog, posebice plodnog tla, pri čemu na raspoloživo zemljište konkuriraju i drugi brojni korisnici (urbanizacija, infrastruktura, rekreacija itd.).

Danas je jasno kako krčenje šuma i uništavanje prašuma znatno doprinosi povećanju razine atmosferskog CO₂ povezanog s klimatskim promjenama (npr. na Amazonsku prašumu, čija je površina do 1970. god. bila 4.100.001 km², a 2022. god. iznosi 3.268.049 km², otpada polovica cjelokupne proizvodnje kisika na Zemlji), dok smanjenje razine SOM zbog obrade tla smanjuje infiltraciju oborina i skladištenje vlage u tlu što utječe na sve češću pojavu poplava. Poremećaj tla površinskom obradom također dovodi do povećane erozije i ispiranja hranjivih tvari iz tla, što izaziva *eutrofikaciju* (i posljedično cvjetanje algi) unutar kopnenih vodenih i obalnih ekosustava.

Sekvestracija ugljika je proces vezivanja, osiguravanja i skladištenja ugljičnog dioksida iz atmosfere u tlu tako da ne uzrokuje zagrijavanje atmosfere (tzv. *efekt staklene bašte* ili *efekt staklenika*, Slika 1.) te se tim procesom sprječava zagrijavanje Zemlje zbog porasta koncentracije tzv. *stakleničkih plinova* u atmosferi (ugljični dioksid - CO₂, CH₄-metan, dušikov oksid, N₂O, HFC i PFC - fluorougljici, SF₆ - sumporheksafluorid i dr.) ne dopuštaju gubitak topline isijavanjem u svemir već ju reflektiraju nazad na površinu Zemlje (Slika 1.). Proces sekvestracije može smanjiti, pa i zaustaviti tzv. ljudski "ugljični otisak", a postoje tri glavne vrste sekvestracije ugljika: biološka, geološka i tehnološka. *Biološka sekvestracija ugljika* (koju obavljaju mikroorganizmi tla pod određenim uvjetima) je vezivanje (skladištenje) ugljičnog dioksida u tlu (u vidu karbonata) i oceanima koji apsorbiraju ~25 % CO₂ koje emitira antropogena aktivnost. *Geološka sekvestracija ugljika* je vrlo skup proces skladištenja ugljičnog dioksida u podzemnim geološkim formacijama, odnosno poroznim stijenama, dok je *tehnološka sekvestracija ugljika hvatanje* i fiksiranje ugljičnog dioksida iz atmosfere i in-

dustrijskih izvora, poput proizvodnje čelika ili cementa, termo energetskih postrojenja poput elektrana ili prerade prirodnog plina.

Porast koncentracije CO₂ u atmosferi dokazano utječe na veći intenzitet fotosinteze, odnosno tvorbu organske tvari i to se već desetljećima primjenjuje za obogaćivanje zraka ugljičnim dioksidom u staklenicima i plastenicima (tzv. *kontrolirani uvjeti uzgoja*) jer intenzivira rast uzgajanih biljaka i povećava prinosa. Stoga se namjerno povećanje konc. CO₂ u zatvorenim prostorima može smatrati gnojibom ugljikom, kao što se i navodnjavanje može smatrati gnojibom kisikom i vodikom. Naime, konc. CO₂ u zatvorenim prostorima može se lokalno povećati na jednostavan i jeftin način (npr. iz prirodnih izvora CO₂, djelovanjem kiseline na karbonatne stijene, primjenom jeftinog tehničkog CO₂ iz čelične boce itd.). Budući da je ugljični dioksid za oko 1,5 puta gušći od zraka, općenito su prinosi usjeva u nizinama veći zbog nešto više koncentracije (naravno, povećanju prinosa u nizinama pomaže i viša temperatura). Važno je naglasiti da se konc. CO₂ iznad 0,5 % smatra nezdravom, iznad 3 % ne utječe više na povećanje intenziteta fotosinteze, a iznad 5 % opasna je po život. Mnoge simulacije s promjenom konc. CO₂ pokazuju da je za porast visine prinosa od 25 % zaslužan porast s 280 ppm s početka industrijskog razdoblja na trenutnih 420 ppm i da bi daljnjim porastom konc. ugljičnog dioksida u atmosferi prinosa usjeva mogao još porasti.

Mnogi pokazatelji zdravlja tla često nisu izravno povezani s visinom prinosa, premda se, primjerice sadržaj organske tvari u tlu prihvaća kao primarni indikator njegovog zdravlja zbog pozitivne korelacije s brojnim biološkim, kemijskim i fizičkim indikatorima. Međutim, izravni dokazi koji povezuju veći unos organske tvari u tlo s povećanjem prinosa su pak ograničeni. Također, ima još dosta uzročno-posljedičnih interakcija agrotehničke prakse s tipom tla i klimom, u odnosu na organsku tvar tla i visinu prinosa, koje nisu posve jasne. Naime, premali broj studija bavio se ispitivanjem takvih interakcija, npr. između stabilnosti zemljišnih agregata, sadržaja labilnog/lakomineralizirajućeg ugljika i intenziteta disanja tla kao općeg pokazatelja biogenosti tla s prinosom usjeva.

Recentna istraživanja u SAD „ispiranja“ ugljičnog dioksida vodom iz suhog tla pokazala su da je to dobar pokazatelj mikrobiološke aktivnosti tla i da dobro korelira s više svojstava tla, ali i višegodišnjom visinom prinosa u sušnim i semiaridnim regijama SAD pa se metoda provjerava i za druge agroekološke uvjete. Budući da je metoda dovoljno pouzdana za procjenu stope *N-mineralizacije*, može poslužiti za redukciju N-gnojidbe i smanjenje ekološkog opterećenja okoliša bez značajnog pada visine prinosa. Velika prednost ove nove metode za procjenu zdravlja tla je što se ne koriste nikakve kemikalije, a mjerenje je brzo i jeftino. Metoda je veoma slična mjerenju tzv. disanju tla (mjerenje CO₂ koji potječe od disanja biljnih korijena i mikroorganizma rizosfere) koja se obavlja izravno na polju (ili uzorcima tla čuvanim do mjerenja u hladnjaku), pri čemu temperatura, vlaga, sadržaj hranjivih tvari i razina kisika u tlu, kao i način obrade, mogu rezultirati veoma različitim intenzitetom disanja.

Disanje tla je izravna posljedica biološke aktivnosti koja integrira aktivnost svih živih organizama tla i osim oslobađanja CO₂ živa komponenta tla (*tzv. biota; živi organizmi tla; 5-20 t ha⁻¹ ili još više u plodnom tlu*) mobilizira niz hranjivih tvari i elemenata ishrane razgradnjom organskih tvari, npr. humusa, žetvenih ostataka, organskog gnoja, korijenja i izumrlih mikroorganizama te povećana biološka aktivnost utječe na ključne fizičke, biološke i kemijske procese tla, odnosno njegovu bolju funkcionalnost. Također, od nedavno se pokušava utvrditi sadržaj organskog ugljika tla brzo, indirektnom metodom pomoću prijenosnog reflektometra koji emitira 10 valnih dužina svjetlosti u vidljivom i bliskom infracrvenom području (365-940 nm), a cijena takvog uređaja je vrlo niska (~350 \$, dok laboratorijsko mjerenje *IC-analizatorom* zahtijeva uređaje od ~100.000 \$. Rezultati mjerenja OC prijenosnim (ručnim) *reflektometrom* su dovoljno pouzdani za poljoprivrednu praksu, a očekuje se da će primjena strojnog učenja još podići razinu pouzdanosti takvih prijenosnih i jeftinih analizatora.

Rezultati kontrole plodnosti na području istočne Hrvatske (2003. - 2015. god.) na ~25.000 uzoraka tla pokazali su kako je prosječan sadržaj organskog ugljika u tlu 53,18 t ha⁻¹ (min. 7,24 do max. 214,77 t ha⁻¹), odnosno 91,68 t ha⁻¹ humusa. Preračunato u ukupni dušik (N_u) to iznosi ~4.584 kg ha⁻¹ te se uz prosječnu stopu mineralizacije humusa od 1 % može prosječno očekivati ~46 kg N ha⁻¹ god⁻¹ (raspoloživog dušika kojeg ne treba primijeniti gnojibom).

Ugljik je esencijalni (neophodni) element biljne ishrane i ključna komponenta plodnosti tla, premda velika većina (99 %) poljoprivrednih tala sadrži vrlo malo organske tvari (SOM), tek 2 - 5 % u odnosu na njegov anorganski dio (primarne i sekundarne minerale). U tlu se nalazi nekoliko vrsta organske tvari tla: 1) Čestice organskog ugljika promjera $\phi = 0,05 - 2,00$ mm koje se brzo razgrađuju u nekoliko tjedana do CO_2 ili humificiraju/transformiraju u humus, 2) Humus koji je relativno stabilna tvar (traje godinama ili desetljećima) izgrađena od velikih molekula koloidne veličine čestica $\phi < 2 \mu\text{m}$ (*humini, huminske i fulvo kiseline*, kao i drugi organski spojevi koji potječu iz mrtvih biljaka i organizama i 3) Rezistentna ugljična tvar stabilna stotinama godina. Zbog jedinstvene uloge humusa u produktivnim svojstvima tla, humus je dormantna snaga ili uspravna moć tla, temelj njegove prirodne plodnosti, odnosno izvor energije i plodnosti "Majke Zemlje".

Humus i njegova svojstva

Humus je u tlu aktivna *koloidno-organska frakcija* koja se lako povezuje na različite načine s mineralnim česticama i tako nastaju stabilni *organomineralni kompleksi* koji su temelj *agregiranja* čestica tla u *strukturne agregate*. Otuda stabilnost strukturnih agregata tla neposredno ovisi o količini i kakvoći humusa u tlu, a njegova količina ovisi od unosa svježeg organske tvari u tlo i njene transformacije do humusnih komponenti (humifikacija), s jedne strane, a s druge od brzine razlaganja humusa, odnosno intenziteta njegove mineralizacije (dekompozicije).

Sposobnost različitih reakcija humusa s mineralnom frakcijom tla kao i njegova izrazita moć sorpcije vode i hraniva u zoni korijena (*rizosfera*) i iona hranjivih elemenata utječe na *KIK (kationski izmjenjivački kapacitet)* te mu osigurava prvorazredan značaj za plodnost tla i primarnu organsku produkciju. Veoma je značajna uloga humusa i u tvorbi kompleksnih spojeva s metalima (*kelati*) koje biljke lako mogu usvajati, a nisu podložni ispiranju ili različitim mogućnostima *imobilizacije*. Budući da teški metali imaju izraženu sklonost keltiranju, organska tvar tla zadržava ih u površinskom sloju tla te je tako spriječena njihova infiltracija, odnosno premještanje u podzemne vode. Također, značajna je uloga organske tvari tla u sprječavanju kemijske fiksacije fosfata u sprječavanju kemijskog vezivanja fosforne kiseline s željezom i aluminijem nakon gnojidbe fosforim gnojivima na kiselim tlima (tzv. *humat efekt*). Dakle, humus je izvor energije za mikroorganizme, „ljepilo“ teksturnih čestica te neophodan za strukturu tla, on je i naročito važan u opskrbi biljaka fosforom, kalcijem i željezom te kao izvor dijela P, S, K, Fe i nekih drugih biogenih elemenata.

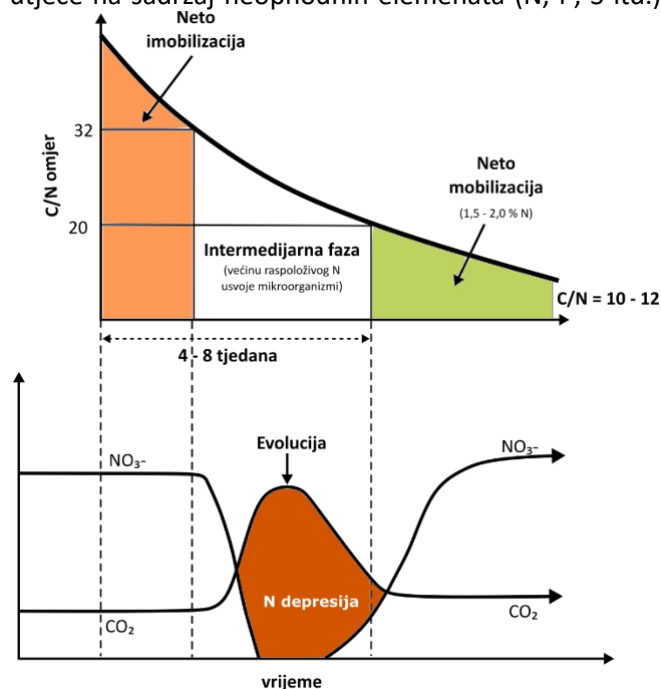
Nerazumno korištenje biomase kao biogoriva može imati nesagledive posljedice na plodnost tla. Naime, iscrpljivanjem fosilnih goriva, posebice nafte i plina, biomasa postaje sve važniji izvor energije, a žetveni ostaci najveći su dio ukupne biomase i imaju kalorijsku moć $18,6 \times 10^9 \text{ J t}^{-1}$ ($\sim 3 \times 10^6 \text{ kcal t}^{-1}$) što je ~ 50 % vrijednosti ugljena ili ~ 33 % nafte. Suha tvar biomase sadrži 15 - 60 % *celuloze*, 10 - 30 % *hemiceluloze*, 5 - 30 % *lignina*, 2 - 15 % *proteina*, do 10 % topljivih tvari kao što su šećeri, amino kiseline, amino šećeri i organske kiseline te 40 - 50 % ugljika i 2 - 5 % N. Dakle, žetveni ostaci predstavljaju veoma važan izvor organske tvari jer imaju značajan utjecaj na biološka (*zemljišna mikroflora* je pretežito *heterotrofna* i ne može živjeti bez organske tvari), kemijska i fizikalna svojstva poljoprivrednih tala i ne treba ih nipošto smatrati otpadom, niti poteškoćom za obradu tla.

Količina žetvenih ostataka može se približno procijeniti uz pomoć žetvenog indeksa (omjera biološkog i merkantilnog prinosa). Uobičajeni žetveni indeks za pšenicu i ječam je 1,5, za kukuruz, soju i zob 1,0, za krumpir i šećernu repu 0,25. Dakle, uz prinos pšenice od 5 t¹ ha treba računati s 7,5 t¹ ha slame, uz prinos kukuruza od 10 t ha⁻¹ jednaka je i količina žetvenih ostataka, dok šećerna repa uz prinos korijena od 60 t ha⁻¹ ostavlja 15 t ha⁻¹ glava i lišća. Gospodarenje žetvenim ostacima često prati dvojba kako postupiti. Mnoga istraživanja jasno pokazuju da žetveni ostaci imaju istu hranidbenu vrijednost kao stajnjak pa znanost zastupa obavezno zaoravanje žetvenih ostataka, nikako njihovo spaljivanje, premda to može predstavljati manje tehnički probleme zbog usitnjavanja i zaoravanja velike biološke mase (npr. u pripremi tla za sjetvu pšenice poslije berbe kukuruza). Također, mineralizacija velikih količina svježeg organske tvari zahtjeva dodatnu N-gnojidbu za sprječavanje tzv. *dušičnog manjka (dušična depresija)* kad je sjetva unutar 6 tjedana od prethodne žetve, odnosno zaoravanja žetvenih ostataka (potrebna količina N za sprječavanje N-depresije može se dovoljno pouzdano izračunati). S druge strane, žetveni ostaci su kao izvor mineralnih hraniva od slabijeg interesa jer

sadrže puno celuloze, a malo N, P, K i ostalih biogenih elemenata, a njihovo korištenje za proizvodnju energije proizvođačima znatno popravlja profit kad je cijena hrane niska.

Dekompoziciju organske tvari u tlu obavljaju mikroorganizmi (*mineralizacija i humifikacija*), bakterije i gljive pri čemu bakterije preferiraju razgradnju jednostavnijih organskih spojeva, npr. korijenske izlučevine i svježije biljne ostatke, dok gljive radije razlažu lignin i druge kompleksnije spojeve, npr. vlaknaste biljne ostatke, drvo i humus tla. Žetveni ostaci pak mogu imati vrlo širok C/N omjer (npr. kod pšenične slame približno 100 : 1), ali mikrobiološka aktivnost u tlu dovodi do postupnog sužavanja tog omjera, a oslobođenu kemijsku energiju koriste mikroorganizmi za svoje potrebe (*kemosinteza*). Sve dok C/N omjer ne padne na određenu vrijednost (<33 : 1), sav oslobođeni dušik koriste mikroorganizmi za svoje potrebe i tako izazivaju *dušični manjak*, a mogućnost usvajanja dušika korijenskim sustavom viših biljaka započinje tek kad je C/N < 25 : 1 (Slika 2.). Važno je naglasiti kako je dušik ugradnjom u živu tvar mikroorganizama tek privremeno izgubljen za ishranu bilja (tzv. *biološka fiksacija dušika*) koja traje nekoliko tjedana sve do ugibanja mikroorganizama (odnosno do mineralizacije njihove nežive biomase).

Zaključno, značaj ugljika u ishrani bilja je nezamjenjiv te ga je opravdano smatrati prvim esencijalnim elementom, ili *kraljem biogenih elemenata*, jer osim što čini kostur svekolike organske tvari, SOM u tlu određuje i stabilizira njegovu strukturu, povećava kapacitet za vodu i sorpciju iona u bioraspoloživom obliku, utječe na sadržaj neophodnih elemenata (N, P, S itd.) i drugo. Također, organska tvar tla je osnovni izvor



Slika 2. [Promjena C/N omjera i konc. nitrata u N-mineralizaciji žetvenih ostataka](#)

energije i za mikroorganizme tla pa bi značajnim gubitkom ili nestankom organske tvari tla došlo do katastrofalnih posljedica po čitav život na Zemlji. [Otu-da je humus kao proizvod žive tvari i njen prirodni izvor, rezerva i stabilizator organskog života na Zemlji.](#)

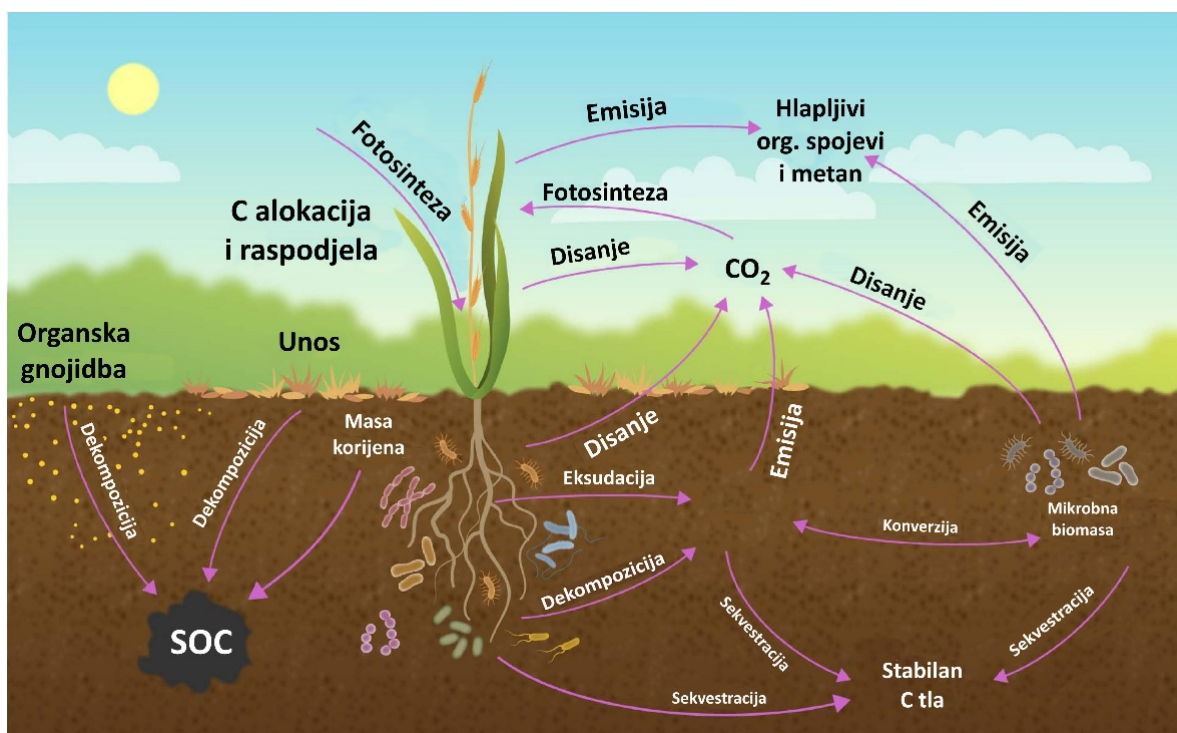
U tlima pod prirodnim biocenozama intenzitet nastanka i razgradnje organske tvari je uravnotežen, što rezultira stabilnim sadržajem humusa, ali [uključivanjem tla u poljoprivrednu proizvodnju neizbježno se intenziviraju procesi razgradnje te otuda pokazuju sklonost gubitku humusa](#). Brzina kojom pada sadržaj organske tvari ovisan je o sustavu gospodarenja i korištenja nekog tla pa se kod provođenja svake agrotehničke mjere mora razmatrati kako će se to odraziti na bilancu organske tvari tla. Potrebno je naglasiti kako je pad sadržaja organske tvari u tlu prilično spor proces, ali pod "normalnim" okolnostima korištenja tla.

Dinamika organskog ugljika u tlu

[Velik broj matematičkih i kompjutorskih modela je do sada kreirano za utvrđivanje bilance organske tvari u tlu, prije svega kako bi razumjeli dinamiku organskog ugljika u tlu u odnosu na svojstva tla, vrstu usjeva, plodored, klimu, agrotehniku](#) (konzervacijska i no-till obrada pokazuju znatno veću sekvestraciju CO₂ u odnosu na klasičnu obradu) i dr. Procjena bilance organskog ugljika u tlu uobičajeno se obavlja za višegodišnje razdoblje [pri čemu je neobično važan plodored \(prostorna i vremenska izmjena usjeva\) i plodosmjena \(izmjena usjeva na istoj parceli\)](#), jer se neki usjevi češće pojavljuju na istoj površini. Budući da dinamika organske tvari (Slika 3.) ovisi o više čimbenika čiji učinak nije još potpuno poznat, nerijetko se definira tzv. *efektivna organska tvar (EOM)* koja je dostupna najmanje godinu dana nakon unosa u tlo svježije organske tvari (žetvenih ostataka, organskog ili zelenog gnoja). Stoga žitarice doprinose 1,00 - 1,21 t C ha⁻¹, šećerna repa 0,51 t C ha⁻¹, a krumpir tek s 0,40 t C ha⁻¹.

Tijekom tvorbe humusa (*humifikacija*) najveći dio CO₂ vraća se u atmosferu, a samo se 20 - 30 % ugljika ugradi u novonastali humus. Stopa humifikacije niska je za ugljikohidrate (<20 % transformira se u humus), dok se lignin, tanin i fenolne komponente humificiraju s više od 75 %. Važno je spomenuti da se dušik humificira s koeficijentom od približno 50 %.

Višegodišnjom kontrolom plodnosti Osječko-baranjske županije dobiveno je veliki broj podataka koji su omogućili utvrđivanje prosječnog sadržaja od 53 t C ha⁻¹, a uz stopu razgradnje organske tvari od 2 % za naše agroekološko područje, godišnji gubitak ugljika procijenjen je na 1,064 t C ha⁻¹ (Slika 4.). Tako izgubljena količina OC ne može biti nadoknađeno niti zaoravanjem ukupne mase žetvenih ostataka pšenice jer je procijenjen gubitak OC -1,261 t ha⁻¹god⁻¹), ali zaoravanjem žetvenih ostataka soje može, jer je u tom slučaju bilanca C pozitivna. Zbog toga je razumijevanje transformacije žetvenih ostataka u procesu mineralizacije i tvorba humusa ključ u rasvjetljivanju biogeokemijskog ciklusa ugljika jer karakter transformacije organske tvari u tlu utječe na količinu, strukturu i svojstva sintetiziranih humusnih tvari.



Slika 3. Transfer atmosferskog CO₂ u organsku tvar i pedološki ugljik u ekosustavima

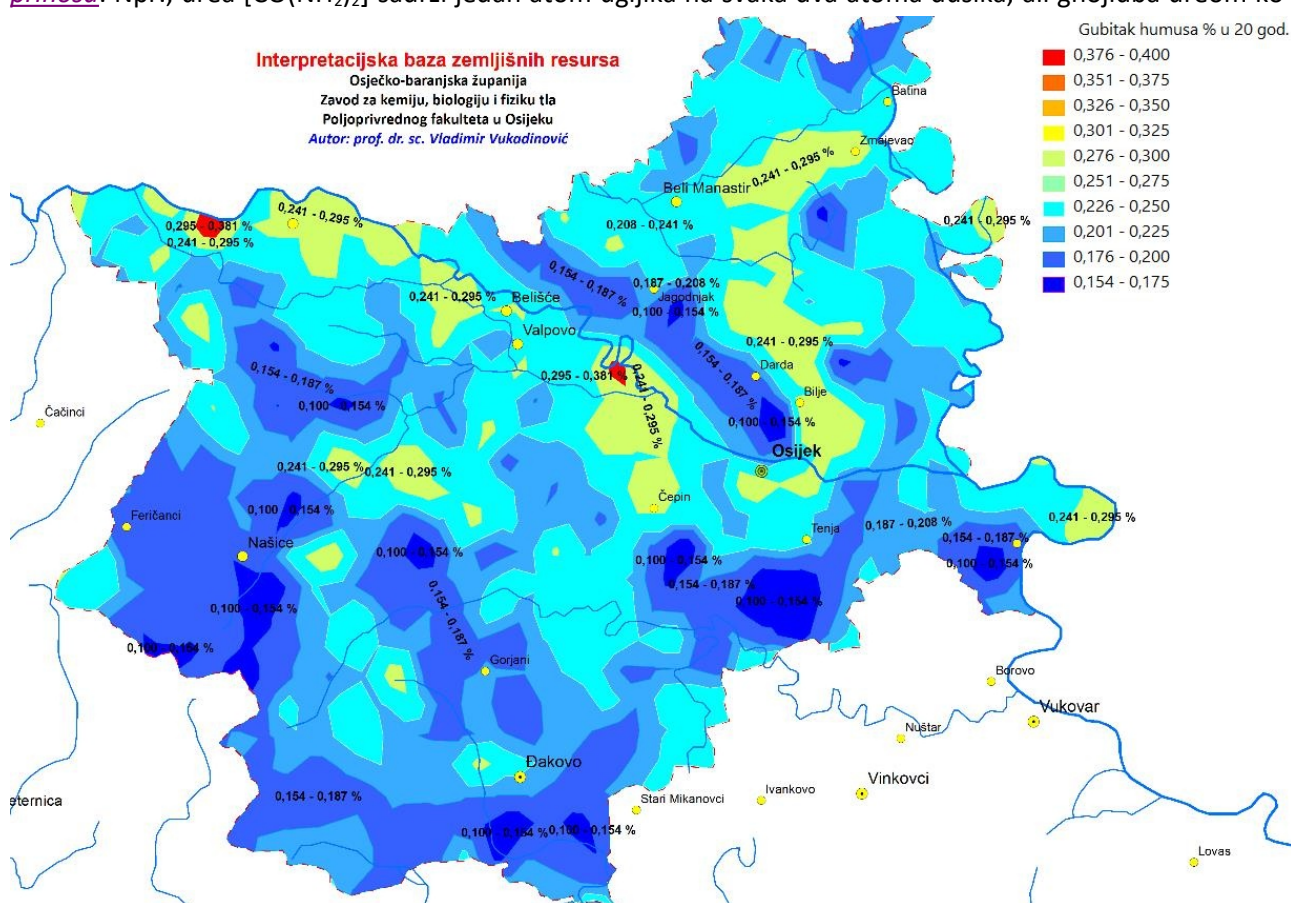
Stopa ili *koeficijent mineralizacije* organske tvari u agroekološkom području istočne Hrvatske rijetko dostiže 2 % razgradnje organske tvari ovisno o mehaničkom sastavu tla, sadržaju i kakvoći organske tvari, pH reakciji i oksidoredukciji, biogenosti, temperaturi i vlažnosti tla te prisutnosti elemenata ishrane. Potencijal mineralizacije organske tvari u istočnoj Slavoniji kreće se u širokom rasponu između 0,5 i 2,0 % organske tvari godišnje (može se empirijski procijeniti, npr. kalkulatorom pNmin) što uz prosječno 2,0 % organske tvari tla iznosi 15 - 60 kg N ha⁻¹god⁻¹ mineraliziranog dušika čija je efikasnost u ishrani bilja slična mineralnoj gnojdbi (30 - 70 % u prvoj godini primjene).

Za pšenicu bilanca organskog dušika uvijek je negativna (što vrijedi i za sva ostala strna žita), zaoravali dio ili cjelokupnu slamu nakon žetve, što uvijek rezultira trendom pada koncentracije humusa u tlu. Simulacija bilance OC (Slika 4.) za agroekološko područje Osječko-baranjske županije pokazuje pad humusa od prosječno ~0,21 % u 20 godišnjem periodu. Taj gubitak je vjerojatno nešto niži jer se pšenica najčešće uzgaja u plodoredima s kukuruzom (veća biomasa i veći koeficijent humifikacije u odnosu na žitarice), ali i sojom, uljanom repicom i suncokretom. Kad je plodored uzak, a strna žita se pojavljuju u plodoredu svake druge ili treće godine, u nedostatku organskog gnoja proizvođači bi trebali prakticirati zelenu gnojdbu kako bi zaustavili pad organske tvari, a time i produktivnu sposobnost svojih tala. Uz odnošenje žetvenih ostataka, ili njihovo spaljivanje, treba gubitku ugljika pridodati i gubitak dušika koji je procijenjen na 433 kg N ha⁻¹ u 20-godišnjem

periodu. *U trogodišnjoj plodosmjeni pšenice gubitak iznosi ~145 kg N ha⁻¹ 20 god⁻¹, a to je praktično gubitak (trošak) jednogodišnje gnojidbene N potrebe, ne računajući izgubljene i druge biogene elemente.*

Humus nastaje isključivo biokemijskim putem pri čemu aktivnost mikroorganizama, koji sudjeluju u tom procesu (*gljive, bakterije, aktinomicete, ali i kišne gljeste*), ovisi o uvjetima u kojima djeluju. Najznačajniji čimbenici su vodnozračni režim tla, pH-reakcija, temperatura, količina i sastav svježe unesene organske tvari u tlo. Odlučujući faktor razgradnje svježe unesene organske tvari u tlo su uvjeti oksido-redukcije. *Naime, metabolizam mikroorganizama određen je oksido-redukcijskim potencijalom (E_h) tla pa u oksidacijskim uvjetima (E_h ≥ +300 mV; aerobni uvjeti) djeluju aerobni mikroorganizmi jer tlo sadrži dovoljno kisika.* Kod E_h = - 100 do + 300 mV organsku tvar razlažu fakultativno anaerobni mikroorganizmi, a u redukcijskim uvjetima (E_h ≤ -100 mV) anaerobni mikroorganizmi. Otuda je *reakcija tla (pH) izravno povezana s njegovim oksido-redukcijskim potencijalom (E_h se također mjeri pH-metrom, ali standardnom vodikovom elektrodom) i jašan je pokazatelj niza agrokemijskih (fizikalnih, kemijskih i bioloških) svojstava tla* važnih za ishranu bilja. pH 6,5 - 7,3 označava *neutralno*, pH > 7,3 *alkalno (oksidacijski uvjeti)*, a pH < 6,5 *kiselost tlo (redukcijski uvjeti)*.

Postoji veliki izbor spojeva na zemlji koji sadrže ugljik, ali ne djeluju svi pozitivno na plodnost tla i povećanje prinosa. Npr., urea [CO(NH₂)₂] sadrži jedan atom ugljika na svaka dva atoma dušika, ali gnojidba ureom ko-



Slika 4. *Prostorna procjena gubitka humusa (%) modelom Hélin-Dupuis u 20-godišnjem razdoblju (kriging temeljem 24.699 uzoraka tla pri izvoženju pšenične slame na prostoru Osječko-baranjske županije* risti biljkama zbog dušika, a ne ugljika, kisika ili vodika. Zatim, primjena komposta, žetvenih ostataka, biouglijena i sličnih materijala osigurava energetski bogate spojeve za mikroorganizme i tvorbu humusa, ali unosi i hranjive tvari u tlo te mogu imati i različite biostimulacijske učinke. Stoga je obogaćivanje tla ugljikom bolje uraditi promjenom poljoprivredne prakse kao što je primjena reducirane obrade, sjetva siderata, uključujući međusjevere, odnosno ne ostavljati tlo „golim“, zaoravanje žetvenih ostataka, primjena organskih i kompostiranih gnojiva *i drugim načinima koji pospješuju rast biljaka i jačaju biogenost tla.*