

## Критички преглед тренутног стања истраживања утицаја климатских промена на одрживо коришћење земљишта

### A critical review of the current state of climate change impact research on sustainable use of land

Жељко Џелетовић<sup>1\*</sup>, Александар Симић<sup>2</sup> / Željko Dželetović<sup>1\*</sup>, Aleksandar Simić<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Универзитет у Београду, Институт за примену нуклеарне енергије (ИНЕП), Банатска 31-Б, 11080 Земун, Србија / University of Belgrade, Institute for the Application of Nuclear Energy (INEP), Banatska 31-B, 11080 Zemun, Serbia

<sup>2</sup>Универзитет у Београду, Пољопривредни факултет, Немањина 6, 11080 Земун, Србија / University of Belgrade, Faculty of Agriculture, Nemanjina 6, 11080 Zemun, Serbia:

\*Аутор за преписку / Corresponding author

Рад примљен / Received: 12.04.2024, Рад прихваћен / Accepted: 07.05.2024.

**Сажетак:** Климатске промене и неодрживо коришћење земљишта воде ка смањењу земљишта као ресурса и његовом трајном губитку. Адекватним газдовањем са стајњаком и земљиштем могу се у значајној мери смањити емисије гасова стаклене баште (N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>). За конвенционалну производњу економски параметри су основно мерило успешности. На супрот, за органску пољопривреду одрживост екосистема и плодност земљишта су основа успешности. Продискутовани су начини повећања везивања угљеника земљиштем и наглашена је сложена динамика земљишне органске материје. Најновија истраживања усмерена су на изналагање одговарајућих поступака коришћења земљишта којима се ублажавају ефекти климатских промена. Стални травњаци, који заузимају 19% пољопривредних површина у Србији и налазе се претежно на земљиштима ниске плодности, могу допринети знатно већој производњи биомасе и везивању органског угљеника. Услед климатских промена, природна вегетација и гајени усеви ће бити изложени повећаном ризику од суша и екстремних временских догађаја. Последично, то ће имати неповољан утицај и на земљиште и на динамику земљишне органске материје.

**Кључне речи:** климатске промене, гасови стаклене баште, стајњак, везивање угљеника, ливаде, травњаци.

**Abstract:** Climate change and unsustainable land use are leading to a reduction in this resource and its permanent loss. Appropriate management of manure and soils can significantly reduce greenhouse gas emissions (N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>). In conventional production, economic parameters are the fundamental measure of success. In contrast, for organic agriculture, ecosystem sustainability and soil fertility are the basis of success. Ways to increase soil carbon sequestration have been discussed and the complex dynamics of soil organic matter have been highlighted. Recent research aims to find appropriate land use practices under grasslands that mitigate the effects of climate change. Permanent grasslands, which occupy 19% of the agricultural land in Serbia and mainly found on soils with low fertility, can contribute to significantly higher biomass production and organic carbon sequestration. Due to climate change, natural vegetation and cultivated crops will be at increased risk of droughts and extreme weather events. Thus will have an unfavourable impact on both soil and soil organic matter dynamics.

**Keywords:** climate change, greenhouse gases, manure, carbon sequestration, meadows, grasslands.

<sup>1</sup>[orcid.org/0000-0001-9166-7094](https://orcid.org/0000-0001-9166-7094), e-mail: [zdzeletovic@inep.ac.rs](mailto:zdzeletovic@inep.ac.rs)

<sup>2</sup>[orcid.org/0000-0002-7605-3796](https://orcid.org/0000-0002-7605-3796), e-mail: [alsimic@agrif.bg.ac.rs](mailto:alsimic@agrif.bg.ac.rs)

## УВОД / INTRODUCTION

Климатске промене се сматрају највећом глобалном претњом одрживом развоју (Нои, 2021b). Као резултат антропогених активности, укупна концентрација атмосферског  $\text{CO}_2$  се значајно повећала од 1750. године, са 280 на 385 ppmv и сада знатно премашује пред-индустријске вредности. Глобални пораст концентрације  $\text{CO}_2$  је углавном због сагоревања фосилних горива, док је допринос промена у начину коришћења земљишне површине мањи (Macías et al., 2010). Многбројна истраживања наглашавају да ће континуирано подизање концентрације атмосферског  $\text{CO}_2$  негативно утицати на статус азота (N) код већине  $\text{C}_3$  биљака, што води ка смањењу нутритивне вредности усева (Myers et al., 2014). Индиректан утицај загревања се често испољава и на продужење сезоне раста. Међутим, докази опсежних истраживања Angert et al. (2005) сугеришу да загревање у многим животним срединама продужава сезонске сушне услове и смањује усвајање угљеника. Климатске промене и глобално загревање ће вероватно повећати учесталост екстремних временских догађаја, стварајући додатне стресне услове за раст и развој биљака. У пољским условима, усеви су изложени комбинацији стресова који се најчешће јављају истовремено. Суша, топлота, хладноћа, недостатак хранљивих материја и вишак соли или токсичних метала су главни фактори животне средине који ограничавају продуктивност биљака и утичу на квалитет хране у пољопривреди (Zhu, 2016).

Према Cronin et al. (2020), климатске промене ће смањити погодна подручја за гајење усева у јужним регионима, а повећати их у северним регионима, што се посебно односи на површине под ливадама и травњацима у Русији и Кини. Потенцијална производна подручја ће се померити ка северу, а то би потенцијално могло значајно утицати на употребу и трговину биомасом. У ублажавању ефеката климатских промена, одрживо коришћење земљишта и праксе управљања могу пружити вишеструке користи за човечанство (Нои, 2021b). Земљиште се категорише као обновљив природни ресурс, што подразумева да је коришћење у складу са процесом обнове и доступности тог ресурса. Међутим, неодрживо коришћење довело је до смањења овог ресурса и његовог трајног губитка, због чега се последњих година, овај ресурс категорише као необновљив (Илић, 2019).

## 1. УПРАВЉАЊЕ ЗЕМЉИШТЕМ И ЕМИСИЈА ГАСОВА СТАКЛЕНЕ БАШТЕ / LAND MANAGEMENT AND GREENHOUSE GAS EMISSIONS

Емисије  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  из земљишта могу значајно утицати на равнотежу гасова стаклене баште у атмосфери. Управљање земљиштем на нивоу фарме може утицати и на ниво органског угљеника у земљишту и на емисије  $\text{CO}_2$ , на пример, заоравање остатака усева има тенденцију да повећа проток  $\text{CO}_2$  (Nishigaki et al., 2021). Емисије гасова стаклене баште у 2020. години у Србији процењене су на 1.144 Gg  $\text{CO}_2$  еквивалента. Приближно 70% ових емисија је у облику  $\text{CH}_4$ , а остатак у виду  $\text{N}_2\text{O}$  (Вишковић и сар., 2022).

*Емисије азот-оксида*

Микробиолошка нитрификација и денитрификација су одговорне за емисију  $\text{NO}$  и  $\text{N}_2\text{O}$ . Они су нуспроизводи у нитрификацији и прелазни производи (интермедијери) у току денитрификације. Од количине азота унетог у земљиште, око половине се изнесе са поља жетвом усева, док се преостали део азота инкорпорира (улази) у земљишну органску материју или се изгуби ка другим деловима животне средине. При том, истраживање чинилаца који контролишу губитке азота је сложено, због њихове вишеструкости и узajамне повезаности (van Cleemput and Voesckx, 2005). Азот који се не усвоји кореном усева може се претворити у  $\text{N}_2\text{O}$ , који у емисији гасова стаклене баште има 298 пута већи потенцијал загревања од  $\text{CO}_2$  (Jansson and Hofmockel, 2020). Извор азота има суштински утицај на величину емисије гасова. На пример, губици азота емисијама  $\text{N}_2$  и  $\text{N}_2\text{O}$  су значајно већи са амонијум сулфатом него са уреом (Grageda-Cabrera et al., 2004). Истраживање Chirinda et al. (2021) је показало да неорганско N-ђубриво тежи да даје већи интензитет емисије  $\text{N}_2\text{O}$ , чак и када се примењују упола мање количине азота, него када се примењују органска N-ђубрива. Због тога, примена неорганских азотних ђубрива је посебно забрињавајућа у поређењу са органским ђубривима.

Чиниоци који утичу на емисије  $\text{N}_2\text{O}$  могу бити специфични за регион и варирати у различитим климатским условима, зависе од земљишне минерализације/имобилизације и нитрификације (Song et al., 2021) и садржаја глине у земљишту (Miller et al., 2020). Продужено влажно време, пак, може повећати емисије  $\text{N}_2\text{O}$  због побољшаних анаеробних услова у земљишту (Chirinda et al., 2021). Не постоје значајније разлике у емисијама  $\text{N}_2\text{O}$  између гајених усева са обрадом

и без обраде земљишта. Из перспективе ублажавања климатских промена, императив је смањити емисије  $N_2O$  смањењем уноса азота у земљиште или финим подешавањима процеса у циклусу азота, како би се амонијак потпуно оксидовао у нитрат без производње  $N_2O$ , као нуспроизвода (Jansson and Hofmockel, 2020). Фертилизација минералним азотом, посебно уреом, је одговорна за 19,0-20,3% укупних емисија амонијака које се емитују из пољопривреде (Skorupka and Nosalewicz, 2021). Због тога се и развијају различите стратегије, као што су инхибирање уреазе и технологије премазивања гранула азотних ђубрива с циљем смањења емисија  $N_2O$  из земљишта, са различитим нивоима успеха (Ribeiro et al., 2020).

#### Емисије метана и угљен-диоксида

Главни губици угљеника (C) из земљишта су у облику  $CO_2$  минерализацијом органске материје. Пожари, такође, узрокују директне емисије ка атмосфери, као и промене у саставу вегетације и врста, које утичу на динамике терестријалних резерви угљеника у наредним деценијама. Емисија угљеника из земљишта иницијално зависи од стопе производње  $CO_2$  или  $CH_4$  у систему земљиште-биљка, а после тога и од стопе гасовите дифузије и протока масе од зем-

љишне воде ка атмосфери; у функцији земљишне влаге и одлика текстуре. Стопе ефлукса земљишног  $CO_2$  у екосистемима зависе од типа земљишта, његове дубине и биљне врсте, у жбунастим састојинама и високо-планинским земљиштима се крећу од 1,2-7,8 g C m<sup>-2</sup> дан<sup>-1</sup> (Dawson and Smith, 2007).

У том смислу, од посебног значаја су тресетишта и пермафрост. Тресет покрива само 3% Земљине површине, али садржи 30% залиха глобалног површинског угљеника у земљишту (Cavicchioli et al., 2019). Одводњавање, ископавање тресета и прекомерна испаша изазвали су озбиљну деградацију тресетишта и повећану емисију  $CO_2$  (Córdova et al., 2022; Zhou et al., 2021). При том, мање анаеробно окружење у деградираним тресетишту води до смањења емисија  $CH_4$  (Zhou et al., 2021). Пермафрост, стално смрзнуто земљиште, које чини око 11% глобалне земљишне површине, складишти скоро половину укупног угљеника у земљишту на глобалном нивоу. Jansson and Hofmockel (2020) сугеришу да је 5-15% ових залиха угљеника подложно разградњи током процеса одмрзавања пермафроста изазваног глобалним загревањем, што би може довести до значајних емисија  $CO_2$  и  $CH_4$ .

Табела 1. Поступци за смањење емисија гасова из стајњака

Table 1. Procedures for reducing gas emissions from manure

I.	<p><b>Адекватно чување и коришћење стајњака као сировине за добијање биогаза.</b> Адекватно чување стајњака подразумева његову стабилизацију као отпадног нуспроизвода кроз физичке и хемијске процесе разлагања и трансформација отпадних састојака у хомогене крајње производе за поновну употребу, са смањеним непријатним мирисима и испарењима органских једињења (Kostic et al., 2020). Стајњак представља и супстрат за производњу биогаза, тако да се кроз процес анаеробне ферментације смањују се емисије гасова стаклене баште. Анаеробном ферментацијом се ефикасно уклања његов потенцијал ка гасовитим емисијама <math>NH_3</math> и других гасовитих једињења, стабилизује се органска материја, а производ разградње који се назива остатак ферментације има боље одлике од самог стајњака у погледу побољшавања својстава земљишта (може се користити као органско ђубриво - земљишни побољшивач). У Србији се тренутно прерађује само око 250.000 тона стајњака (око 33% је чврсти стајњак) у биогасним постројењима, махом на великим газдинствима (Вишковић и сар., 2022).</p>
II.	<p><b>Додавање средстава којим ће се везати гасови из стајњака.</b> Додавање зеолита, пре свега клиноптиолита, показује способност везивања амонијака из говеђег стајњака до чак 98% и на тај начин чува азот, који се може ефикасно користити за фертилизацију пашњака (Simić et al., 2014) и травњака (Živanović et al., 2014). Примена зеолита у пољопривреди базира се на њиховом високом дехидратационом капацитету и способности за везивање других супстанци механизмима јонске измене или адсорпцијом (Ракић и сар., 2015).</p>

#### Стајњак као извор емисија гасова стаклене баште

Стајњак нарочито доприноси емисијама  $CH_4$ . Фецес преживара је богат анаеробним архејама, које су метаногени микроорганизми и доприносе производњи  $CH_4$ . У Србији, од укупне количине

стајњака, 81% се налази на најмањим газдинствима, са мање од 100 условних грла (УГ), док се на великим газдинствима са преко 1.000 УГ, генерише око 12% укупне количине стајњака (Вишковић и сар., 2022). Доминантне врсте стајњака су течни свињски стајњак и говеђи

чврсти и течни стајњак. У Србији се генерише око 8,6 милиона  $m^3$  природног течног стајњака (осока) и око 20,4 милиона тона свежег чврстог стајњака (Вишковић и сар., 2022). Директно из стајњака се у 2020. години емитовало око 23 Gg  $CH_4$  и 1 Gg  $N_2O$ . Индиректно се из управљања стајњаком емитује још око 1,1 Gg  $N_2O$ . Укупне емисије гасова с ефектом стаклене баште пореклом од стајњака износиле су у Србији у 2020. години око 1.144 Gg  $CO_2$  еквивалената (Вишковић и сар., 2022). Смањење емисија ових гасова из стајњака може се остварити на два начина (табела 1).

Производња и коришћења стајњака у пољопривреди Војводине показују да заступљеност стоке од 25 УГ/100 ha, при постојећој структури сточног фонда, омогућује потенцијално задовољење потреба у стајњаку са око 22%, мада реално употребљиве количине стајњака обезбеђују задовољење свега 10% потреба (Бошњак и сар., 2007). При том, испитивања плодности земљишта у Војводини указују на забрињавајући удео земљишта (око 48%) са мање од 3% хумуса. У таквим условима улога стајњака, као органског ђубрива, у одржању и повећању хумуса је од посебног значаја. Постојећи капацитети и структура обрадивих површина у Војводини, уз претпоставку ђубрења сваке пете године и уношење средњих доза стајњака, према Бошњак и сар. (2007), захтевају заступљеност стоке од 114 УГ/100 ha.

## 2. ДИНАМИКА ЗЕМЉИШНЕ ОРГАНСКЕ МАТЕРИЈЕ / DYNAMICS OF SOIL ORGANIC MATTER

Климатске промене имају значајан утицај на биланс угљеника у земљишту. На глобалном нивоу, растуће температуре су резултирале вишим хетеротрофним дисањем и испаравњем органског угљеника из земљишта, а тиме и емисијама  $CO_2$ ; мада је ово делом и због појачаног раста биљака и аутотрофне фиксације (Jansson and Hofmosskel, 2020). Микроорганизми у земљишту играју кључну улогу у кружењу органског угљеника у земљишту, али још увек нам недостаје довољно научних знања за изградњу квантитативних модела којима се може предвидети веза између коришћења земљишта и управљања њиме (Cavicchioli et al., 2019; Jansson and Hofmosskel, 2020).

Земљишна органска материја је стабилизована са три главна механизма. Прво, хемијска стабилизација је резултат хемијског везивања земљишне органске материје са земљишним минералима (честице глине и праха). Друго, био-

хемијска стабилизација је узрокована хемијским комплексним процесима између супстрата, као што су лигнини и полифеноли и земљишних честица. И коначно физички, агрегатни облик физичких баријера између микроорганизама и ензима и њихових супстрата (Jones and Donnelly, 2004). Наиме, микробни остатак представља важан извор стабилног органског угљеника у земљишту (Kallenbach et al., 2016). Угљеник који се налази дубље у земљишту често је физички и/или хемијски заштићен од напада микроорганизама.

Резерве угљеника су веће у хладнијим него у топлијим климатским условима, и у влажним и слабо дренираним земљиштима у поређењу са сувљим и добро дренираним земљиштима. Током сезоне пролеће-лето бактеријске популације су веће него током сезоне јесен-зима, због утицаја температуре. Када температура земљишта расте, активност и бројност микроорганизама се повећава, а остаци се минерализују брже. При том, највеће залихе органског угљеника су у земљишту под шумом, а најниже под травном вегетацијом (Видојевић и сар., 2021). У полу-сушним регионима количина органске материје у земљишту се повећава са повећањем надморске висине (Göl, 2017). На већим надморским висинама снижава се температура земљишта и тиме успорава микробиолошка активност, што за последицу има појаву акумулације и смањења минерализације органске материје (Видојевић и сар., 2021).

## 3. СЕКВЕСТРАЦИЈА (ВЕЗИВАЊЕ) ЗЕМЉИШНОГ УГЉЕНИКА / SEQUESTRATION OF SOIL CARBON

Један од најзначајнијих проблема у пољопривредној производњи је смањење садржаја органске материје у земљишту. Интензивно коришћење земљишта током последњих деценија у великој мери је утицало на промену његових особина. Погоршању својстава земљишта подједнако је допринела хемизација пољопривреде, као и интензивније коришћење пољопривредне механизације. Наиме, плодност земљишта представља динамично стање свих физичких, хемијских и биолошких својстава и процеса у земљишту, од којег зависи продуктивност биљне производње. Везивање угљеника у терестријалним екосистемима подразумева усвајање атмосферског угљеника у процесу фотосинтезе и његову акумулацију у живим организмима и земљишту. Начин на који угљеник у земљишту може бити повећан су (Whitmore et al., 2015): (I) повећање стопа улаза (уноса) органске материје;

(II) смањење стопе његове разградње биолошким или хемијским начинима; (III) повећање стопе његове стабилизације физичко-хемијском заштитом у оквиру агрегата и органско-минералних комплекса; и (IV) повећање дубине (волумена) земљишта за секвестрацију CO<sub>2</sub> максималном брзином. Повећање садржаја органске материје у горњем слоју земљишта представља посебан изазов, јер краткорочни профити надмашују дугорочне циљеве (Ingram et al., 2014).

Просторне и временске варијације секвестрације угљеника у земљишту и емисијама гасова стаклене баште у земљишту зависе од климе, начина коришћења земљишта, топографије, текстуре земљишта итд. (Zhu et al., 2021). Њивска земљишта се одликују већим вредностима капацитета секвестрације угљеника у поређењу са њиховим девичанским аналозима (Семенов и сар., 2008). Према Семенов и сар. (2008), највећи капацитет секвестрације угљеника земљиштем је у излуженом чернозему, а најнижи у типичном земљишту тундре. Zhu et al. (2021) су установили да на органски угљеник у земљишту на простору парцеле величине 70 m × 70 m утичу и топографија и текстура земљишта, док на већем распону земљишног простора (2 km × 2 km), органски угљеник у земљишту је углавном под утицајем текстуре земљишта. Методе газдовања које повећавају производњу крме, као што су: фертилизација, наводњавање, међусетва трава и легуминоза, интензивирање испаше и уношење земљишних глиста, имају потенцијал да повећају земљишну органску материју. Фертилизација редукује коренску биомасу гајених усева, а вишак хранива, посебно азота, може резултовати у смањењу органског угљеника у земљишту (Jandl et al., 2007). Увођење продуктивнијих крмних трава, такође, повећава секвестрацију (Jones and Donnelly, 2004).

Према Grageda-Cabrera et al. (2004), за принос усева, побољшање квалитета земљишта и ефикасност ђубрења азотом, најбољи је систем конвенционалне обраде земљишта са уношењем биљних остатака, без обзира на ротацију усева. С друге стране, у односу на конвенционалну производњу, у којој су економски параметри основно мерило успешности, органска пољопривреда се ослања на локално доступне ресурсе са фарме и основа успешности ове производње је одрживост екосистема и плодност земљишта. Међутим, и овакав систем производње може да има одређене негативне утицаје на својства земљишта, посебно ако производња није у потпуности у складу са принципима орган-

ске пољопривреде (Манојловић и сар., 2021). Органска производња која се базира на употреби обновљивих извора енергије и као систем који је прилагођен локалним производним условима, могла би се сматрати одрживом алтернативом интензивној производњи, јер више води рачуна о заштити животне средине (Манојловић и сар., 2021).

Земљишни побољшивачи, посебно биоугаљ, заговарају се као обећавајућа технологија за истовремено повећање приноса усева и ублажавања климатских промена (Wankhede et al., 2021); тако да је од недавно дошло до процвата релевантних истраживања (Hou, 2021a). Биоугаљ настаје у процесима пиролизе органске материје при ниским концентрацијама кисеоника, у којима се сложене органске форме угљеника везују у простије, при том редукујући отпуштање CO<sub>2</sub> у атмосферу. Биоугаљ као компонента са високим садржајем угљеника и високим апсорпционим капацитетом повољно утиче на физичке и хемијске особине земљишта (Прекоп и сар., 2022) као што су: рН, густина, порозност, влажност и температура, али и на приступачност микро и макроелемената за биљке, као и на повећање активности и присутност микроорганизама у земљишту. Оглед у пољу Shi et al. (2021) изведен у периоду од једне деценије, открио је да примена биоугља значајно повећава садржај и неорганског и органског угљеника у земљишту, са најзначајнијим повећањем садржаја честица органског угљеника. Међутим, такође је утврђено да примена биоугља даје смањење органског угљеника повезаног са фракцијом праха и глине, вероватно због утицаја биоугља на природни угљеник у земљишту (Shi et al., 2021).

#### 4. ЗЕМЉИШНЕ ПОВРШИНЕ ПОД ЛИВАДАМА И ПАШЊАЦИМА / LAND AREAS UNDER MEADOWS AND PASTURES

У светлу дебата око глобалних климатских промена проузрокованих ефектом стаклене баште, травњаци су класификовани као значајно складиште угљеника, због већег садржаја органске материје у поређењу са ораничним земљиштима. Глобалне процене о релативним количинама угљеника у различитим типовима вегетације сугеришу да површине под травама вероватно доприносе са >10% у укупним залихама биосфере. Емисије CO<sub>2</sub> под травњацима су у позитивној корелацији са садржајем глине у земљишту (Miller et al., 2020). У ливадским земљиштима у умереном климату се 2/3 земљишног органског угљеника налази у површинских 0-40

ст дубине, у овој дубини се налази 87% коренова биљака (Jones and Donnelly, 2004). Већи садржај земљишног органског угљеника је забележен на парцелама под легуминозама или смешама истих са травама у поређењу са парцелама под житарицама и окопавинама. Уношењем ових биљних остатака у земљиште густина бактеријске популације се значајно повећава. Такође, повећава се и популација денитрификујућих бактерија (Grageda-Cabrera et al., 2004). С друге стране, изостављање фертילизације или коришћење само минералних ђубрива доводи до опадања резерви земљишног органског угљеника.

Перманентни или стални травњаци заузимају око 19% пољопривредне површине Србије (Статистички годишњак РС, 2022) и имају важну улогу у производњи сточне хране. Већина природних травњака се налази у брдско-планинском подручју (слика 1). Нарочито је значајно подручје западне Србије, где је присутно интензивно и



Слика 1. Земљишне површине под ливадама на Повлену

Figure 1. Land areas under meadows in Mt. Povlen, Serbia

Велики утицај имају и климатске промене кроз смањење падавина и нерегуларност дистрибуције током вегетационе сезоне (Стричевић и сар., 2021). Вегетација природних травњака ће бити изложена повећаном ризику од суша, јер се недостатак воде очекује већ крајем маја, када се исцрпе залихе воде у земљишту, и трајаће све до првих значајнијих киша у септембру. Истраживања на глобалном нивоу указују да је отпорност природних травњака на екстремне суше и њихов опоравак у корелацији са средњим годишњим сумама падавина (Stuart-Haëntjens et al., 2018). С обзиром на то да се суме падавина

екстензивно сточарство. Производни потенцијал ливада и пашњака се уопште или недовољно користи, с тим да су травњаци на већим надморским висинама у вишеструко неповољнијем положају. Природни услови су неповољнији за интензивну производњу, рељеф је стрмији (слика 2), а земљишта су лоших агрохемијских особина (Симић, 2018). Продукција ливада на нивоу Србије је, у просеку, свега 2,3 тоне  $ha^{-1}$  суве материје, а пашњака око 2 тоне  $ha^{-1}$ . Садржај хумуса у травњацима нпр. западне Србије је веома варијабилан, а уочен је и дефицит фосфора и азота (Симић, 2018). Приступачност хранива у перманентним травњацима има јак утицај на биодиверзитет биљних врста, покривност и доминацију појединих врста у биљном покривачу (Симић, 2018). У земљишту под травњаком акумулација нитрата је већа у сувљој години, услед смањеног испирања нитрата и губитака  $N_2O$ . Највише  $NH_4-N$  се задржи у слоју 0-10 cm, а само  $NO_3-N$  се креће наниже по дубини земљишног профила (Jones et al., 2007).



Слика 2. Стрме земљишне површине под ливадама на Златибору

Figure 2. Steep land areas under meadows on Mt. Zlatibor, Serbia

неће битније мењати на подручју Србије, може се очекивати опстанак природних травњака и поред повећања дефицита воде. Отпорност на сушу ће развијати природну разноврсност и ширење врста отпорних на високе температуре и оскудицу воде на уштрб осетљивих трава, поготово у сушнијим подручјима на пливим земљиштима (Стричевић и сар., 2021). При том, ниске температуре ни до сада нису имале значајнији утицај на природне травњаке, тако да ће се ризик од стреса изазваног ниским температурама или опасност од измрзавања у будуће смањивати.

## 5. ДИСКУСИЈА / DISCUSSION

Употреба минералних ђубрива је дуго била кључно средство за надокнађивање изношења хранљивих материја и тиме постизање повећаних приноса (Krasilnikov et al., 2022). Верује се да је примена ђубрива била одговорна за најмање 50% повећања приноса усева у 20. веку. Међутим, због неодговарајуће употребе минералних ђубрива (тј. када се користе у вишку или у недостатку), пореметило продуктивност и функционалност многих земљишта, што показују не само хемијски индикатори, већ и физички и биолошки (Krasilnikov et al., 2022). Стога, неправилна технологија фертилизације може имати негативан утицај на здравље земљишта и екосистема. Здравље земљишта се дефинише као способност земљишта да функционише као живи систем, унутар граница екосистема и коришћења земљишта, да одржи здравље и продуктивност биљака и животиња, и да одржи или побољша квалитет воде и ваздуха. При том, угљеников циклус који највише доприноси антропогеним климатским променама, још увек, упркос деценијским истраживањима, представља значајну непознаницу.

Посматране промене климатских услова од 1961. године до данас показују значајно повећање у промени температуре и промене у обрасцима падавина. Анализа будућих промена показује убрзано повећање температура до краја 21. века, што указује на потребу за хитним мерама за ублажавање негативних утицаја (Jovanović, Mentus, 2024). За период 1996-2015. година просечно повећање температуре на територији Србије износи 1,2°C (Vukojević et al., 2018). Због климатских промена и технолошког развоја очекује се повећање приноса у северној Европи, док ће у јужној и источној Европи негативан ефекат климатских промена бити ублажен технолошким развојем (Cosentino et al., 2012). Просторна расподела пораста температуре, интензивирање великих падавинских догађаја и смањење летњих падавина, показују продирање субтропске климе преко Србије и повећање високих температура и високих падавинских ризика (Vukojević et al., 2018). У областима јужне и источне Европе, климатске промене ће имати негативан ефекат на усевима, пре свега због могућих дефицита воде и могућих екстремних временских догађаја (нпр. продужени топлотни таласи, град, олује) који ће повећати варијабилност годишње производње и довести до контракције површина погодних за гајење традиционалних врста (Cosentino et al., 2012).

Иако биосфера и педосфера садрже мале резерве угљеника у односу на друге земљине

сфере (<0.01% укупног угљеника), њима циркулишу велике количине угљеника од атмосфере кроз фотосинтезу и минерално разлагање. Према Macías et al. (2010), повећање секвестрације угљеника се може поспешити у терестричним екосистемама: (I) Фаворизовањем раста биомасе; (II) Промовисањем и олакшавањем процеса карбонатизације; (III) Смањењем ерозије и фаворизовањем педогенезе; (IV) Развојем земљишних хоризоната богатих органском материјом; (V) Прекривањем деградираних и контаминираних земљишта; и/или (VI) Руковањем отпадом тако да се користе системи који минимизирају емисије гасова стаклене баште. Праксе конзервационе пољопривреде, као што су: нулта обрада земљишта и задржавање остатака, потенцијално би могле побољшати секвестрацију угљеника у површинском слоју земљишта (Deu et al., 2020). Међутим, закони о стајњаку и ђубривима, трошкови органских инпута и потреба за гајењем профитабилних усева су фактори који спречавају повећање садржаја органске материје у земљишту (Hijbeek et al., 2018).

## ЗАКЉУЧАК / CONCLUSION

Најновија истраживања усмерена су на изналажење одговарајућих поступака коришћења земљишта којима се ублажавају ефекти климатских промена. Стални травњаци, који се налазе претежно на земљиштима ниске плодности, могу допринети знатно већој производњи биомасе и везивању органског угљеника. Услед климатских промена, природна вегетација и гајени усеви ће бити изложени повећаном ризику од суша и екстремних временских догађаја. Последишно, то ће имати неповољан утицај и на земљиште и на динамику земљишне органске материје.

## Захвалница / Acknowledgements

Овај рад је финансиран од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије, Уговори бр. 451-03-66/2024-01/200019 (Ж. Целетовић) и 451-03-65/2024-01/200116 (А. Симић).

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- [1] Angert, A., Biraud, S., Bonfils, C., Henning, C.C., Buermann, W., Pinzon, J., Tucker, C.J., Fung, I. (2005). Drier summers cancel out the CO<sub>2</sub> uptake enhancement induced by warmer springs. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102 (31), 10823-10827.
- [2] Cavicchioli, R., Ripple, W. J., Timmis, K. N., Azam, F., Bakken, L. R., Baylis, M., Behrenfeld,

- M. J., Boetius, A., Boyd, P. W., Classen, A. T. (2019). Scientists' warning to humanity: microorganisms and climate change. *Nature Reviews Microbiology*, 17, 569-586.
- [3] Chirinda, N., Trujillo, C., Loaiza, S., Salazar, S., Luna, J., Tong Encinas, L. A., Becerra López Lavalle, L. A., Tran, T. (2021). Nitrous oxide emissions from cassava fields amended with organic and inorganic fertilizers. *Soil Use and Management*, 37(2), 257-263.
- [4] Córdova, C., Garrido-Ruiz, C., Machuca, Á., Zagal, E., Orrego, R., Finot, V. (2022). Carbon dioxide emissions at local scale linked to soil heterotrophic activity from an experimentally simulated drained peatland in Western Patagonia (Tierra del Fuego, Chile). *Soil Use and Management*, 38(1), 304-317.
- [5] Cosentino, S.L., Testa, G., Scordia, D., Alexopoulos, E. (2012). Future yields assessment of bioenergy crops in relation to climate change and technological development in Europe. *Italian Journal of Agronomy*, 7(2), 154-166.
- [6] Cronin, J., Zabel, F., Dessens, O., Anandarajah, G. (2020). Land suitability for energy crops under scenarios of climate change and land-use. *GCB Bioenergy*, 12(8), 648-665.
- [7] Dawson, J.J.C., Smith, P. (2007): Carbon losses from soil and its consequences for land-use management. *Science of the Total Environment*, 382(2-3), 165-190.
- [8] Dey, A., Dwivedi, B. S., Bhattacharyya, R., Datta, S. P., Meena, M. C., Jat, R. K., Gupta, R. K., Jat, M. L., Singh, V. K., Das, D., Singh, R. G. (2020). Effect of conservation agriculture on soil organic and inorganic carbon sequestration and lability: A study from a rice-wheat cropping system on a calcareous soil of the eastern Indo-Gangetic Plains. *Soil Use and Management*, 36, 429-438.
- [9] Göl, C. (2017). Assessing the amount of soil organic matter and soil properties in high mountain forests in Central Anatolia and the effects of climate and altitude. *Journal of Forest Science*, 63(5), 199-205.
- [10] Grageda-Cabrera, O.A., Medina-Cázares, T., Aguilar-Acuña, J.L., Hernández-Martínez, M., Solís-Moya, E., Aguado-Santacruz, G.A., Peña-Cabriales, J.J. (2004). Pérdidas de nitrógeno por emisión de N<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O en diferentes sistemas de manejo y con tres fuentes nitrogenadas. *Agrociencia*, 38(6), 625-633.
- [11] Hijbeek, R., Pronk, A.A., van Ittersum, M.K., Tenberge, H.F.M., Bijttebier, J., Verhagen, A. (2018). What drives farmers to increase soil organic matter? Insights from the Netherlands. *Soil Use and Management*, 34(1), 85-100.
- [12] Hou, D. (2021a). Biochar for sustainable soil management. *Soil Use and Management*, 37(1), 2-6.
- [13] Hou, D. (2021b). Sustainable soil management and climate change mitigation. *Soil Use and Management*, 37 (2), 220-223.
- [14] Ingram, J., Mills, J., Freluh-Larsen, A., Davis, M., Merante, P., Ringrose, S., Molnar, A., Sanchez, B., Ghaley, B.B., Karaczun, Z. (2014). Managing soil organic carbon: a farm perspective. *Euro-Choices*, 13, 12-19.
- [15] Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., Johnson, D.W. (2007). How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, 137, 253-268.
- [16] Jansson, J. K., Hofmockel, K. S. (2020). Soil microbiomes and climate change. *Nature Reviews Microbiology*, 18, 35-46.
- [17] Jones, M.B., Donnelly, A. (2004). Carbon sequestration in temperate grassland ecosystems and the influence of management, climate and elevated CO<sub>2</sub>. *New Phytologist*, 164(3), 423-439.
- [18] Jones, S.K., Rees, R.M., Skiba, U.M., Ball, B.C. (2007). Influence of organic and mineral N fertilizer on N<sub>2</sub>O fluxes from a temperate grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121(1-2), 74-83.
- [19] Jovanović, L., Mentus, S. (2024). Ka nultoj neto emisiji CO<sub>2</sub> u proizvodnji gvožđa, *Ecologica*, 31(113), 1-10.
- [20] Kallenbach, C.M., Frey, S.D., Grandy, A.S. (2016). Direct evidence for microbial-derived soil organic matter formation and its ecophysiological controls. *Nature Communications*, 7, 1-10.
- [21] Kostic, B., Stevanovic, G., Lutovac, M., Lutovac, B., Ketin, S., Biocanin, R. (2020). Animal manure and environment. *Fresenius Environmental Bulletin*, 29 (3), 1289-1296.
- [22] Krasilnikov, P., Taboada, M.A., Amanullah (2022). Fertilizer Use, Soil Health and Agricultural Sustainability. *Agriculture*, 12(4), 462.
- [23] Macías, F., Camps Arbostain, M. (2010). Soil carbon sequestration in a changing global environment. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 15(6), 511-529.
- [24] Miller, G.A., Rees, R.M., Griffiths, B.S., Cloy, J.M. (2020). Isolating the effect of soil properties on agricultural soil greenhouse gas emissions under controlled conditions. *Soil Use and Management*, 36, 285-298.
- [25] Myers, S.S., Zanobetti, A., Kloog, I., Huybers, P., Leakey, A.D.B., Bloom, A.J., Carlisle, E., Dietterich, L.H., Fitzgerald, G., Hasegawa, T.,



- Holbrook, N.M., Nelson, R.L., Ottman, M.J., Raboy, V., Sakai, H., Sartor, K.A., Schwartz, J., Seneweera, S., Tausz, M., Usui, Y. (2014). Increasing CO<sub>2</sub> threatens human nutrition. *Nature*, 510, 139-142.
- [26] Nishigaki, T., Sugihara, S., Kilasara, M., Funakawa, S. (2021). Carbon dioxide flux and soil carbon stock as affected by crop residue management and soil texture in semi-arid maize croplands in Tanzania. *Soil Use and Management*, 37(1), 83-94.
- [27] Ribeiro, R.H., Besen, M.R., Simon, P.L., Bayer, C., Piva, J.T. (2020). Enhanced-efficiency nitrogen fertilizers reduce winter losses of nitrous oxide, but not of ammonia, from no-till soil in a subtropical agroecosystem. *Soil Use and Management*, 36, 420-428.
- [28] Shi, S., Zhang, Q., Lou, Y., Du, Z., Wang, Q., Hu, N., Wang, Y., Gunina, A., Song, J. (2021). Soil organic and inorganic carbon sequestration by consecutive biochar application: Results from a decade field experiment. *Soil Use and Management*, 37(1), 95-103.
- [29] Simić, A., Rakić, V., Marković, J., Dželetović, Ž., Živanović, I. (2014). Effect of manure enriched with clinoptilolite on pasture yield and quality. In: *Grassland Science in Europe*, 19, EGF at 50: The Future of European Grasslands (Eds. Hopkins, A. et al.), European Grassland Federation and IBERS, Aberystwyth University, Gogerddan, UK, pp. 291-293.
- [30] Skorupka, M., Nosalewicz, A. (2021). Ammonia Volatilization from Fertilizer Urea - A New Challenge for Agriculture and Industry in View of Growing Global Demand for Food and Energy Crops. *Agriculture*, 11: 822.
- [31] Song, L., Zhang, J., Jin, G. (2021). Different responses of soil CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions to simulated N deposition in forests with divergent N transformation characteristics. *Soil Use and Management*, 37(1), 63-71.
- [32] Stuart-Haëntjens, E., De Boeck, H.J., Lemoine, N.P., Mänd, P., Kröel-Dulay, G., Schmidt, I.K., Jentsch, A., Stampfli, A., Andereggi, W.R.L., Bahn, M., Kreyling, J., Wohlgemuth, T., Lloret, F., Classen, A.T., Gougha, C.M., Smith, M.D. (2018). Mean annual precipitation predicts primary production resistance and resilience to extreme drought. *Science of the Total Environment*, 636, 360-366.
- [33] van Cleemput, O., Boeckx, P. (2005). Alternation of nitrogen cycling by agricultural activities, and its environmental and health consequences. *Gayana Botánica*, 62(2), 98-109.
- [34] Vukojević, A.J., Vujadinović, M.P., Rendulić, S.M., Djurdjević, V.S., Ruml, M.M., Babić, V.P., Popović, D.P. (2018). Global warming impact on climate change in Serbia for the period 1961-2100. *Thermal Science*, 22(6A), 2267-2280.
- [35] Wankhede, M., Dakhli, R., Manna, M., Sirothia, P., Rahman, M. M., Ghosh, A., Bhattacharyya, P., Singh, M., Jha, S., Patra, A. (2021). Long-term manure application for crop yield stability and carbon sequestration in subtropical region. *Soil Use and Management*, 37(2), 264-276.
- [36] Whitmore, A.P., Kirk, G.J.D., Rawlins, B.G. (2015). Technologies for increasing carbon storage in soil to mitigate climate change. *Soil Use and Management*, 31(S1), 62-71.
- [37] Zhou, W., Cui, L., Wang, Y., Li, W., Kang, X. (2021). Carbon emission flux and storage in the degraded peatlands of the Zoige alpine area in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Soil Use and Management*, 37(1), 72-82.
- [38] Zhu, J.K. (2016). Abiotic stress signaling and responses in plants. *Cell*, 167, 313-324.
- [39] Zhu, Q., Liao, K., Lai, X., Lv, L. (2021). Scale-dependent effects of environmental factors on soil organic carbon, soil nutrients and stoichiometry under two contrasting land-use types. *Soil Use and Management*, 37(2), 243-256.
- [40] Živanović, I., Simić, A., Rakić, V., Ras, V., Dželetović, Ž. (2014). Impact of ammonia-loaded zeolite on italian ryegrass growth and yield. *Contemporary Agriculture*, 63(3), 201-206.
- [41] Видојевић, Д., Манојловић, М., Ђорђевић, А., Савић, Р., Нешић, Љ., Ђокић, Б. (2021). Залихе органског угљеника у земљиштима Србије у односу на надморску висину. *Земљиште и биљка*, 70(2), 102-116.
- [42] Вишковић, М.И., Ђатков, Ђ.М., Несторовић, А.Ж., Мартинов, М.Л., Цветковић, С.М. (2022). Стајњак у Србији - количине и емисије гасова с ефектом стаклене баште. *Journal of Agricultural Sciences (Belgrade)*, 67(1), 29-46.
- [43] Илић, М. (2019). Педолошко наслеђе - вредновање и заштита. *Заштита природе*, 69(1-2), 5-14.
- [44] Манојловић, М., Штрбац, М., Ђирић, В., Чабилоски, Р., Ковачевић, Д., Петковић, К. (2021). Утицај органског и конвенционалног система пољопривредне производње на квалитет земљишта. *Летопис научних радова*, 45(2), 119-134.
- [45] Прекоп, Н., Шеремешић, С., Ђирић, В., Војнов, Б., Радовановић, Д. (2022). Могућности примене биоугља у системима одрживе пољопривреде. *Летопис научних радова*, 46(1), 46-56.

- [46] Ракић, В., Симић, А., Живановић, И., Рац, В., Рајић, Н. (2015). Употреба и значај природног зеолита у пољопривреди. Зборник научних радова (*Радови са XXIX Саветовања агронома, ветеринара, технолога и агроекономиста*, 25-26. фебруар 2015.), 21(1-2), 173-183.
- [47] Семенов, В.М., Иванникова, Л.А., Кузнецова, Т.В., Семенова, Н.А., Тулина, А.С. (2008). Минерализуемост органичког вещества и углерод-секвестрирујућа емкост почв зоналног реда. *Почвоведение*, 7, 819-832.
- [48] Симић, С. (2018). Стање плодности земљишта ливада и пашњака на подручју Западне Србије - предлог мера заштите и одрживог коришћења. Монографска студија. Пољопривредни факултет, Универзитет у Београду, Београд, стр. 81.
- [49] Статистички годишњак Републике Србије (2022). Ур.: Д. Гавриловић, Републички завод за статистику Србије, Београд, стр. 450. (<https://publikacije.stat.gov.rs/G2022/pdf/G20222055.pdf>)
- [50] Стричевић, Р.Ј., Симић, А.С., Вујадиновић Мандић, М.П., Соколовић, Д.Р. (2021). Утицај климатских промена на потребе природних травњака за водом у Србији. *Journal of Agricultural Sciences (Belgrade)*, 66(3), 291-307.