

Doroteja Bitunjac^{1*}

KRATKOROČNA ZNANSTVENA MISIJA „KALIBRACIJA I VALIDACIJA MODELA BIOME- BGC MUSO ZA SIMULACIJE HRASTOVIH ŠUMA U EUROPI“

Kratkoročna znanstvena misija (engl. Short-term Scientific Mission, STSM) razmjena je između znanstvenika uključenih u određenu COST (European Cooperation in Science and Technology) akciju, omogućujući znanstvenicima da posjete instituciju ili laboratorij u drugoj državi članici COST-a. COST akcija „PROCLIAS - Process-Based Models for Climate Impact Attribution across Sector“ (CA19139, 2020. - 2024. godina) ima za cilj razviti zajedničke protokole, usklađene skupove podataka i zajedničko razumijevanje kako provesti međusektorske studije utjecaja klime koristeći različite procesne modele na regionalnoj i globalnoj razini. U organizaciji COST akcije PROCLIAS, doktorandica Doroteja Bitunjac s Hrvatskog šumarskog instituta, Zavoda za uređivanje šuma i šumarsku ekonomiku, sudjelovala je na STSM-u u Zvolenu, Slovačkoj, u periodu 26.09. - 27.10.2022., pod mentorstvom stručnjakinje za procesno modeliranje šumskih ekosustava, Dr. Kataríne Merganičove sa Slovak Academy of Sciences, Institute of Landscape Ecology (Slovačka) i Czech University of Life Sciences Prague, Faculty of Forestry and Wood Sciences (Češka). Doktorandica Bitunjac i mentorica Dr. sc. Merganičová radile su na kalibraciji i validaciji biogeokemijskog modela Biome-BGCMuSo za hrastove šume. Biogeokemijsko modeliranje šumskih ekosustava u RH je u razvoju. Na Hrvatskom šumarskom institutu, na Zavodu za uređivanje šuma i šumarsku ekonomiku, koristi se procesni model Biome-BGCMuSo (BBGCMuSo, Hidy i sur. 2012; Hidy i sur. 2022). BBGCMuSo simulira tokove i zalihe ugljika (C), dušika i vode u sustavu tlo-biljka-atmosfera. Simulacija procesa je na dnevnoj rezoluciji, a model je pokrenut meteorološkim varijablama, ekofiziološkim parametrima sastojine i stanišnim karakteristikama. Ovaj model unaprijeđena je verzija Biome-BGC modela, jednog od prvih i vjerojatno najpoznatijih procesnih modela ekosustava (Running i Hunt 1993) koji se koristi za simulaciju razvoja brojnih kopnenih ekosustava diljem svijeta. Glavna promjena BBGCMuSo-a u odnosu na njegovu inačicu je postojanje višeslojnog profila tla. BBGCMuSo parametriziran je za šumu hrasta lužnjaka (Hidy i sur. 2016) koristeći tokove C i biometrijske podatke iz dugoročne pokusne stanice u gospodarskoj jedinici Jastrebarski lugovi (Anić i sur. 2018). S obzirom da se model kontinuirano unaprijeđuje, nove zakonitosti i biološki procesi ugrađuju se u jednadžbe modela te se povećava broj parametara i varijabli u modelu, stoga je svaku unaprijeđenu verziju modela potrebno iznova kalibrirati i validirati. Unaprijeđena verzija modela, BBGCMuSo v.6.2 (Hidy i sur. 2021), do sad nije kalibrirana i validirana za šume hrasta lužnjaka u RH. Svrha STSM-a je bila testirati mogućnost modela BBGCMuSo za simulaciju promjene zaliha organskog C u mineralnom sloju tla u šumama hrasta lužnjaka. Šume hrasta lužnjaka pokrivaju oko 29% površine šuma u RH prema važećoj Šumskogospodarskoj osnovi područja Republike Hrvatske (Ministarstvo poljoprivrede 2016-

¹ Hrvatski šumarski institut, Zavod za uređivanje šuma i šumarsku ekonomiku, Trnjanska cesta 35, 10000 Zagreb, Hrvatska

* doroteja@sumins.hr

2025) i iznimno su bitni šumski ekosustavi s ekonomske i ekološke strane. Šumski ekosustavi uklanjaju značajnu količinu atmosferskog C, vežući ga u tlo i svoju drvenu i lisnu biomasu. Najveće pohranište C u šumskim ekosustavima je tlo (Pan i sur. 2011), koje prema IPCC vodiču (IPCC 2006) uključuje organski C (engl. Soil Organic Carbon, SOC) u mineralnom sloju tla do određene dubine tla. S obzirom da je SOC jedno od pet pohraništa C u Nacionalnom inventaru stakleničkih plinova (engl. National Greenhouse Gas Inventory Report) za koje je obavezno izvješćivanje o emisijama/odlivima C, važno je što točnije procijeniti zalihe i promjene zaliha C u ovom pohraništu. Izmjera promjena SOC zaliha iznimno je zahtjevna s obzirom na veliku prostornu varijabilnost C u tlu i spor proces akumulacije C u tlo (Jandl i sur. 2007). Kako bi se smanjila nesigurnost procjene promjena zaliha SOC-a, potrebne su uzastopne nacionalne inventure tla, a u nedostatku istih, promjene zaliha C mogu se procijeniti primjenom modela. Procesni modeli skupovi su jednadžbi kojima se u nekom ekosustavu simuliraju biološki i biokemijski procesi u čijoj je osnovi kruženje glavnih elemenata ekosustava (C, dušik, voda). Procesni modeli korisni su za i) procjenu nemjerljivih ili teško mjerljivih varijabli ekosustava (npr. SOC), ii) utvrđivanje utjecaja okolišnih uvjeta, načina gospodarenja i biotskih ili abiotskih nepogoda na dinamiku ekosustava i iii) projekcije razvoja ekosustava primjenom različitih klimatskih scenarija. U šumarstvu se procesni modeli primjenjuju u brojne svrhe poput modeliranja rasta stabala i šumskih sastojina i njihove dinamike (Mäkelä 2003; Merganičová i Merganič 2014; Ostrogović Sever i sur. 2017) ili modeliranja kruženja i zaliha C u šumskim ekosustavima (Ostrogović Sever i sur. 2021; Juntilla i sur. 2023), u sadašnjim i budućim uvjetima.

Rad s modelom BBGCMuSo tijekom STSM-a podijeljen je u nekoliko faza: i) analiza osjetljivosti, ii) kalibracija modela, iii) validacija modela.

Analiza osjetljivosti (engl. Sensitivity Analysis) (Reed i sur. 2022) koristi se za utvrđivanje parametara modela s najvećim utjecajem na odabrane izlazne varijable modela. BBGCMuSo kompleksan je model s velikim brojem ekofizioloških parametara i varijabli, stoga je njegova kalibracija računalno iznimno zahtjevna i dugotrajna. Analizom osjetljivosti optimizira se vrijeme trajanja kalibracije modela odabirom najutjecajnijih parametara koji će biti uključeni u kalibraciju. Prije provedbe analize, postavljen je inicijalni set ekofizioloških parametara i definirani su njihovi prihvatljivi rasponi na temelju pregleda literature. Analiza osjetljivosti provedena je dvjema metodama: testirajući individualne parametre (engl. One-at-a-Time) i testirajući grupu parametara (engl. All-at-a-Time). Utjecaj individualnih parametara testiran je na slijedeće izlazne varijable modela: neto razmjena C između atmosfere i ekosustava (engl. Net Ecosystem Exchange, NEE), bruto primarna produkcija ekosustava (engl. Gross Primary Production, GPP), respiracija ekosustava (engl. Ecosystem Respiration, Reco), i zalihe C u nadzemnoj živoj biomasi, listincu (O horizont tla) i SOC-u. Za parametre s najvećim utjecajem na izlazne varijable provedena je analiza osjetljivosti grupe parametara koristeći RBBGCMuSo paket (Hollós i Barcza 2020) u R softveru (R Core Team 2021). Analizom osjetljivosti pronađeni su najutjecajnijih parametri koji su zatim korišteni u kalibraciji modela.

Kalibracija modela proces je podešavanja parametara modela kako bi modelirani podaci bili što bliži izmjerenim podacima. U kalibraciji modela korištena je GLUE metoda (engl. Generalised Likelihood Uncertainty Estimation) (Beven i Binley 2014). GLUE metodom optimizira se odabrani skup parametara primjenjujući definiranu funkciju vjerojatnosti (engl. Likelihood Function) na temelju usporedbe simuliranih vrijednosti odabrane izlazne varijable s njezinim izmjerenim vrijednostima. Broj iteracija modela iznosio je 10.000, odnosno model je pokrenut 10.000 puta sa izmijenjenim, generiranim setom odabranih parametara, a koji se nalaze u definiranom rasponu vrijednosti. Za kalibraciju modela korištena su dva tipa podataka za razdoblje 2008. - 2017.: 1) visoko-frekventni tokovi C – dnevne vrijednosti za NEE, GPP i Reco prikupljene sa mjerne stanice za praćenje tokova CO₂ (engl. Eddy-Covariance Tower, EC), postavljene u šumi hrasta lužnjaka u G.J. Jastrebarski lugovi (Anić i sur. 2018) i 2) dugoročne zalihe C – godišnje vrijednosti zaliha C u nadzemnoj živoj biomasi, listincu i SOC-u izmjerene na trajnim pokusnim plohama unutar područja otiska (engl. Footprint) EC-a. Rezultat kalibracije može biti set parametara čijom su primjenom modelirane vrijednosti za neke od odabranih izlaznih varijabli modela izvan prihvatljivog i očekivanog raspona vrijednosti. Stoga se provela naknadna obrada podataka metodom

engl. Conditional Interval Reduction Method (Hollós i sur. 2022) koja koristi algoritam stabla odluke (engl. Decision Tree) za utvrđivanje raspona vrijednosti parametara unutar kojih se nalazi najveći broj izlaznih varijabli s modeliranim vrijednosti u prihvatljivom rasponu. Kalibracija modela provedena je u R softveru koristeći RBBGCMuSo paket. Rezultat kalibracije i naknadne obrade podataka najprikladniji je set parametara čijom se primjenom ostvaruje najbolje podudaranje modeliranih i izmjerenih vrijednosti varijabli od interesa.

Validacija modela je proces usporedbe modeliranih i izmjerenih vrijednosti na novom setu podataka koji je neovisan od kalibracije. Kako bi se ispitala primjenjivost modela za procjenu promjene SOC-a u mineralnom dijelu tla, potrebna su dugoročna praćenja zaliha C u tlu. Jedan od takvih eksperimenata je kronosekvenca u šumi hrasta lužnjaka u G.J. Jastrebarski lugovi (Ostrogović Sever i sur. 2019), u kojoj su provedena 3 uzastopna (2012., 2017., 2022. godina) uzorkovanja mineralnog sloja tla u skladu s IPCC metodologijom (IPCC 2006). U procesu validacije, modelirane su promjene zaliha SOC-u u sedam sastojina kronosekvenca za desetogodišnje razdoblje (2012.-2022.) i uspoređene s izmjerenim podacima primjenom statističke mjere normalizirane vrijednosti korijena kvadrata srednje pogreške (engl. Normalised Root Mean Square Error, NRMSE). Dodatno je testirana primjenjivost kalibriranog modela za procjenu zaliha C u nadzemnoj živoj biomasi, listincu i SOC-u u hrastovim šumama na području Europe, usporedbom modeliranih podataka s podacima izmjerenim na trajnim pokusnim ploham u sklopu projekta Czech University of Life Sciences Prague „EVA 4.0. Strategic Project“.

Rezultate STSM-a doktorandica Bitunjac predstavila je 25.10.2022. na pozivnom predavanju na Department of Forest Harvesting, Logistics and Ameliorations, Faculty of Forestry, Technical University Zvolen u Zvolenu.

LITERATURA

Anić M, Sever Ostrogović MZ, Alberti G, Balenović I, Paladinić E, Peressotti A, Tijan G, Večenaj Z, Vuletić D, Marjanović H, 2018. Eddy covariance vs. biometric based estimates of net primary productivity of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) forest in Croatia during ten years. *Forests* 9(12): 764. <https://doi.org/10.3390/f9120764>.

Beven K, Binley A, 2014. GLUE: 20 years on. *Hydrological Processes* 28: 5897–5918. <https://doi.org/10.1002/hyp.10082>.

Hidy D, Barcza Z, Haszpra L, Churkina G, Pintér K, Nagy Z, 2012. Development of the Biome-BGC model for simulation of managed herbaceous ecosystems. *Ecological Modelling* 226: 99–119. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.11.008>.

Hidy D, Barcza Z, Marjanović H, Ostrogović Sever MZ, Dobor L, Gelybo G, Fodor N, Pinter K, Churkina G, Running S, Thornton P, Bellocchi G, Haszpra L, Horvath F, Suyker A, Nagy Z, 2016. Terrestrial ecosystem process model Biome-BGCMuSo v4.0: summary of improvements and new modeling possibilities. *Geoscientific Model Development* 9: 4405-4437. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-4405-2016>.

Hidy D, Barcza Z, Hollós R, Thornton P, Running SW, and Fodor N, 2021. User's Guide for Biome-BGC MuSo 6.2. URL: http://nimbus.elte.hu/bbgc/files/Manual_BBGCMuSo_v6.2.pdf (pristupljeno u listopadu 2022).

Hidy D, Barcza Z, Hollós R, Dobor L, Acs T, Zacháry D, Filep T, Pásztor L, Incze D, Dencso M, Tóth E, Merganicová K, Thornton P, Running S, Fodor N, 2022. Soil-related developments of the Biome-BGCMuSo v6.2 terrestrial ecosystem model. *Geoscientific Model Development* 15: 2157-2181. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-2157-2022>.

Hollós R, Barcza Z, 2020. Sensitivity analysis of Biome-BGCMuSo using the RBBGCMuso package [WWW Document]. URL: https://nimbus.elte.hu/agromo/files/musoSensi_usage.html (pristupljeno u lipnju 2022).

- Hollós R, Fodor N, Merganičová K, Hidy D, Árendás T, Grünwald T, Barcza Z, 2022. Conditional interval reduction method: A possible new direction for the optimization of process based models. *Environmental Modelling & Software* 158: 105556. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105556>.
- IPCC, 2006. Agriculture, forestry and other land use. In: Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K (eds) 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC, Hayama, Japan, pp. 4.7-4.83.
- Jandl R, Lindner M, Vesterdal L, Bauwens B, Baritz R, Hagedorn F, Johnson DW, Minkkinen K, Byrne KA, 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 137: 253-268. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003>.
- Junttila V, Minunno F, Peltoniemi M, Forsius M, Akujärvi A, Ojanen P, Mäkelä A, 2023. Quantification of forest carbon flux and stock uncertainties under climate change and their use in regionally explicit decision making: Case study in Finland. *Ambio* 52(11): 1716-1733. <https://doi.org/10.1007/s13280-023-01906-4>.
- Mäkelä A, 2003. Process-based modelling of tree and stand growth: towards a hierarchical treatment of multiscale processes. *Canadian Journal of Forest Research* 33(3): 398-409. <https://doi.org/10.1139/x02-130>.
- Merganičová K, Merganič J, 2014. The Effect of Dynamic Mortality Incorporated in BIOME-BGC on Modelling the Development of Natural Forests. *Journal of Environmental Informatics* 24(1).
- Ministarstvo poljoprivrede, 2018. Šumskogospodarska osnova područja Republike Hrvatske za period 2016-2025. godine.
- Ostrogović Sever MZ, Paladinić E, Barcza Z, Hidy D, Kern A, Anić M, Marjanović H, 2017. Biogeochemical modelling vs. tree-ring measurements - comparison of growth dynamic estimates at two distinct oak forests in Croatia. *SeeFor-South-East European Forestry* 8: 71-84. <https://doi.org/10.15177/seeFor.17-17>.
- Ostrogović Sever MZ, Alberti G, Delle Vedove G, Marjanović H, 2019. Temporal evolution of carbon stocks, fluxes and carbon balance in pedunculate oak chronosequence under close-to-nature forest management. *Forests* 10: 814. <https://doi.org/10.3390/f10090814>.
- Ostrogović Sever MZ, Barcza Z, Hidy D, Kern A, Dimoski D, Miko S, Hasan O, Grahovac B, Marjanović H, 2021. Evaluation of the Terrestrial Ecosystem Model Biome-BGCMuSo for Modelling Soil Organic Carbon under Different Land Uses. *Land* 10: 968. <https://doi.org/10.3390/land10090968>.
- Pan Y, Birdsey RA, Fang J, Houghton R, Kauppi PE, Kurz WA, (...), Hayes D, 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333(6045): 988-993.
- R Core Team, 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/> (pristupljeno u rujnu 2021).
- Reed P, Hadjimichael A, Malek K, Karimi T, Vernon, C, Srikrishnan V, Gupta R, Gold D, Lee B, Keller K, Thurber T, Rice J, 2022. Addressing Uncertainty in MultiSector Dynamics Research. Zenodo, 122 p. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6110623>.