

## GYEPEK SZÉN-DIOXID FORGALMÁNAK MODELLEZÉSE

### Bevezetés

A meteorológia feladata a légköri folyamatok megismerése, míg az élő és élettelen környezet közötti kölcsönhatások vizsgálatával az ökológia foglalkozik. A két tudományágnak látszólag kevés köze van egymáshoz. Van azonban egy fontos érintkezési területük: a talaj-növény rendszer kölcsönhatása a légkörrel. A folyamatok sokrétűek és összetettek, fizikai, kémiai és biológiai jellegűek.

A számítógépes numerikus modellezés forradalmasította a meteorológiát: lehetővé tette az időjárás és az éghajlat számszerű előrejelzését. A talaj-növény-légkör rendszer meteorológiai vonatkozású modellezésében az energia-, a momentum- és a vízháztartási folyamatokon van a hangsúly. E modelleket biofizikai modelleknek is nevezik. A talaj-növény-légkör rendszer ökológiai alkalmazású modellezésében a momentumátvitel kevésbé érdekes, ugyanakkor az energia- és vízháztartás folyamatainak leírása kiegészül a szén- és a nitrogénforgalom teljes vagy részleges taglalásával. E modelleket már nem biofizikai, hanem biogeokémiai modelleknek nevezik.

A meteorológiai és az ökológiai vizsgálatok legfontosabb kapcsolódási pontja a növényállomány és a légkör közötti anyagcsere, ezen belül a párolgási és szén-dioxid csere folyamatának modellezése. Míg a múltban elsősorban a vegetáció vízháztartása érdekelte a szakembereket, napjainkra a szén-dioxid forgalom alakulása is az érdeklődés homlokterébe került. A légkör szén-dioxid háztartásában, és így a légköri üvegházhatás alakulásában ugyanis a bioszféra meghatározó szerepet játszik. Az ökológiai modellekben a vízgőz és a szén-dioxid

csere együtt vizsgálendő, mert a vízgőzcsere intenzitása meghatározza a szén-dioxid csere intenzitását is.

A légkör szén-dioxid ( $\text{CO}_2$ ) koncentrációja az ipari forradalom előtti 280 ppm-es értékről (ppm: milliomod térfogatrész) mostanra elérte a 380 ppm-et. Napjainkban az emberiség a fosszilis tüzelőanyagok (szén, kőolaj, földgáz) elégetésével évi kb. 6,3 milliárd tonna szenet juttat szén-dioxid formájában a légkörbe, ami a teljes légköri  $\text{CO}_2$  mennyiség közel 1%-a. Az erdőirtások során, amellet, hogy évente újabb 1,7 milliárd tonna szén kerül a légkörbe, egyúttal pusztul a  $\text{CO}_2$  egyik fő nyelője, a vegetáció (IPCC, 2001). Az antropogén források által kibocsátott szén-dioxidnak csak egy része marad a légkörben, a többit felveszik az óceánok és a bioszféra.

A mérések és a modellszámítások szerint az utóbbi évtizedekben a szárazföldi ökológiai rendszerek növekvő szerepet játszanak a globális szén-dioxid körforgalomban, az antropogén eredetű légköri szén-dioxid felvételében, elsősorban az északi félgömb mérsékelt éghajlati övében (IPCC, 2001).

A bioszféra-talaj rendszer érzékeny széntároló (rezervoár): az éghajlat megváltozására (csapadék, hőmérséklet, besugárzás, stb.) a bioszféra szénforgalma gyorsan és jelentősen megváltozhat, ami az üvegházhatáson keresztül visszahat magára az éghajlatra. Amíg az elmúlt tízezer évben a bioszféra által respirációval leadott és fotoszintézise révén felvett szén mennyisége kiegyenlített volt, addig az utóbbi két-három évtizedben a bioszféra nettó szénfelvevővé vált (McGuire et al., 2001; Cao et al., 2002). Így mérsékli a növekvő szén-dioxid kibocsátással együtt járó légköri kon-

centráció-növekedés ütemét, ezzel az üvegházhatás gyorsabb erősödését, ezen keresztül pedig az éghajlatváltozást. Kérdéses azonban, hogy e labilis szén-rezervoár a hőmérséklet további emelkedésével nem válik-e nettó szén-dioxid forrássá már a közeljövőben? Erre utaló jeleket látunk az 1997 óta folyó hazai mérésekben (Haszpra et al., 2005), de ennek a veszélynek a reális és közeli voltát jelzi a globális légköri szén-dioxid koncentráció növekedésének utóbbi években tapasztalt szokatlanul magas üteme is (<http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg/trends/>), amelyet nem az antropogén kibocsátás növekedése generál.

Amíg nem ismerjük pontosan a bioszféra viselkedését, addig nem tudjuk megbízhatóan előre jelezni a szén-dioxid légköri koncentrációjának változását, és ezen keresztül az éghajlatváltozást. A bioszféra viselkedésének megértéséhez először az ökoszisztémák szintjén bekövetkező szén-dioxid forgalom változás lehetséges okait kell tisztáznunk. Mivel az ökológiai rendszerek szénforgalma számos tényezőtől függ, a működésük megértéséhez fizikai, kémiai és biológiai folyamataik minél pontosabb ismerete szükséges. Ehhez a mérések mellett a legmegfelelőbb eszközként a folyamatok matematikai leírását felhasználó, számítógépes ökoszisztéma modellek kínálóznak.

Jelen tanulmányban egy ökológiai modell hazai viszonyokra való adaptálásának első eredményeit mutatjuk be.

### A talaj-növény-légkör rendszer ökológiai modellezése

Már az 1970-es években megjelentek az ökológiai rendszerek működését szimuláló, közvetlenül a növények fiziológiai folyamatainak

matematikai leírásán alapuló modellek, melyeket elsősorban a legnagyobb széntárolóknak feltételezett erdőségek szénforgalmának leírására fejlesztettek ki. Ezek képesek voltak hozzávetőleg megadni a növények reakcióját a változó környezeti feltételekre. Az utóbbi évek egyik fontos felismerése volt, hogy az erdők mellett az Eurázsia-ban és Észak-Amerikában jelentős területet borító gyepek ugyancsak fontos szerepet játszanak a globális szén-dioxid körforgalom alakításában, így ezek vizsgálata is nélkülözhetetlen (Suyker and Verma, 2001).

A modellezés nélkülözhetetlen része a számítási eredmények verifikálása, azaz összevetése a megfigyelésekkel. A modellek különböző környezeti feltételekhez, különböző ökológiai rendszerekre való adaptálásához szükség van minél pontosabb helyi mérési adatokra. A nyugat-magyarországi gyepek területek vizsgálatához a hegyhátsági (Vas megye, 46°57'N, 16°39'E, 248 m – Barcza et al., 2003) mérőállomásról állnak rendelkezésre adatok. Itt két éven keresztül (1999–2000) folytak nagy pontosságú, közvetlen anyagáram mérésen alapuló (ún. eddy-kovariancia elven működő) felszín-légkör szén-dioxid csere mérések kvázi-természetes fajösszetételű gyepek felett. Ezek a mérések lehetővé teszik, hogy a világon rendelkezésre álló ökológiai modellek valamelyikét a hazai viszonyokhoz igazítsuk.

### A Biome-BGC

Részletes dokumentáltsága és a széleskörű használat során nyert kedvező tapasztalatok miatt hazai célokra a Biome-BGC modellt választottuk. Ezt a modellt az 1990-es években az Amerikai Egyesült Államokban, a Montanai Egyetemen fejlesztették ki (Running and Hunt, 1993; White et al., 2000). Felépítése folytán, megfelelő paramétere-

zés mellett, különböző ökológiai rendszerek működésének leírására is alkalmas. Bár a modell nitrogén- és vízforgalmat is kezel, elsősorban a növényi szénforgalom legfontosabb paramétereinek, az ökológiai rendszer nettó szén-cseréjének (Net Ecosystem Exchange – NEE), a bruttó elsődleges terméknek (Gross Primary Product – GPP) és az ökológiai rendszer teljes respirációjának (Total Ecosystem Respiration – TR) meghatározására használatos.

Az ökológiai modellek adaptációja során komoly probléma, a gyakorta hiányos dokumentáció mellett, hogy a modell által igényelt bemenő paraméterek kisebb vagy nagyobb részének a vizsgált helyszínre vonatkozó értékeit nem ismerjük (White et al., 2000). Ennek a problémának a részbeni kiküszöbölését szolgálja a Biome-BGC ún. spin-up („felfutási”, kiegyenlítő) futási módja. A spin-up futás során a modell szimulálja a vizsgált ökológiai rendszer fejlődését. Az ismert adatok és hosszú távú (valós vagy szimulált) meteorológiai adatsorok felhasználásával meghatározza a helyileg nem ismert környezeti és növényélettani paraméterek egyensúlyi értékeit (pl. a talaj szervesanyag-tartalma, a vizsgált ökológiai rendszer szén- és nitrogéntartalma, stb.). Az így kapott értékek feltehetően megközelítőleg jól tükrözik a valóságban is kialakult állapotokat. Az ismert és a spin-up futás során meghatározott paraméterértékeket használja aztán a modell kiindulási adatokként a második, ún. normál futási fázis során, az ökológiai rendszer működésének napi léptékű szimulálásához.



Füf felszín fölötti eddy kovariancia mérés Hegyhátsálon (Kern Anikó felv.)

### A Biome-BGC magyarországi alkalmazása

A hegyhátsági gyepekre vonatkozóan nem álltak rendelkezésünkre részletes talajtani és növénytani adatok. A tényleges számítások megkezdéséhez ezért nem nélkülözhetjük a Biome-BGC modellt spin-up fázisát. Ez a vizsgált ökológiai rendszer több évtizedes, egyensúlyra törekvő fejlődését szimulálja, amelyhez meteorológiai adatok is szükségesek. Hegyhátsárra ilyen hosszú meteorológiai adatsorok sem állnak rendelkezésre, ezért a szimulációhoz a Kelet Anglia Egyetem Klímakutató Csoportjának (Climate Research Unit [CRU], University of East Anglia, Norwich, Egyesült Királyság) hosszútávú, rácsponos éghajlati adatállományának Hegyhátsál körzetére vonatkozó adatait használtuk (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/>; New et al., 2002). A CRU adatbázisa havi átlagértékeket tartalmaz, míg a Biome-BGC használatához napi adatokra van szükség. Virtuális napi adatok előállítására a C2W időjárás-generátort alkalmaztuk,

amely egy sztochasztikus modell révén, Hegyhátsál földrajzi helyzete és a CRU adatbázisából ismert éghajlati jellemzők (átlaghőmérséklet, csapadékösszeg, stb.) ismeretében a havi adatokból virtuális napi adatokat generált (Bürger, 1997).

A *spin-up* fázis során a növényélettani paramétereket még nem módosítottuk, a modell-dokumentáció ajánlásait alkalmaztuk (White et al., 2000). Az eredeti növényélettani paraméterekkel és a *spin-up* futtatás során kapott környezeti paraméterek felhasználásával a modell már hozzátétőlegesen jól adta vissza a terepi mérések értékeit, de a korreláció a mért és számított anyagáramok (NEE, GPP, TR) között még a kívánatosnál gyengébb volt. Szembetűnő volt a produktivitás és a téli respiráció túlbecslése. A modell még további finomhangolásra szorult, amit a szaknyelv kalibrációnak nevez.

A kalibráció során a paraméterek értékeinek változtatásával keressük azt a paraméterérték-együttest, amely mellett a modell a leghívőbbben adja vissza a tesztidőszak mérési eredményeit. Feltételezhető, hogy az így meghatározott paraméterértékekkel a mérések által már le nem fedett időszakokra is jó közelítéssel a valóságnak megfelelő eredményeket kapunk, azaz a modell alkalmas a vizsgált ökológiai rendszer viselkedésének elfogadható pontosságú szimulálására.

A Biome-BGC, más folyamat-orientált ökológiai modellekhez hasonlóan, sokparaméteres, erősen nemlineáris rendszer. A paraméterek értékeinek egyenkénti, egymás utáni behangolása jó eséllyel nem vezet el az optimális paraméterérték készlethez. A számításokat tehát elvben minden ésszerű paraméterérték-kombinációra el kellene végezni, ami egy ilyen sokparaméteres rendszer esetében irreális feladat lenne.

Első lépésként az egyes paraméterek értékeit külön-külön mó-

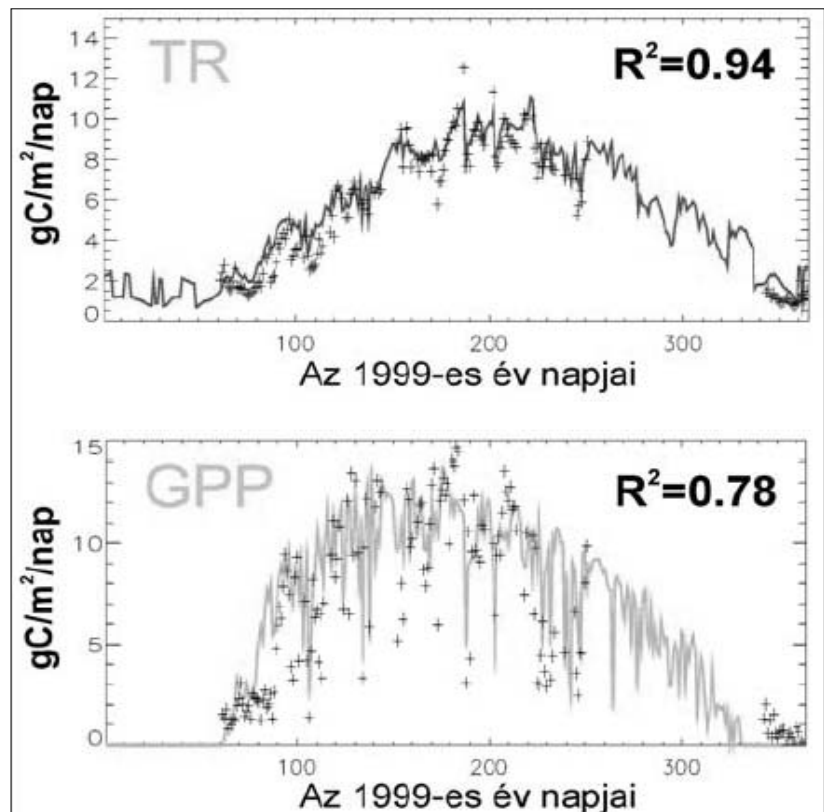
dosítottuk, és kiválasztottuk azokat a paramétereket, amelyek módosítására a modell-eredmény lényegesen megváltozott (érzékenység-analízis). A kalibrációt a továbbiakban csak ezekre a paraméterekre végeztük. A többi paraméter értékére a modell nem érzékeny, az értékek esetleges pontatlansága az eredményeket lényegesen nem befolyásolja. A Biome-BGC növényélettani paraméterei közül a modell a sztóma vezetőképességére\* bizonyult a legérzékenyebbnek. Ennek magyarázata abban rejlik, hogy a sztóma vezetőképessége erősen befolyásolja a növényi produktivitást, és ezen keresztül az ökológiai rendszerek szénháztartását.

A modell-kalibráció egyik lehetséges matematikai megvalósítási módja a Bayes-féle statisztikai közelítés (Mosegaard and Tarantola, 1995; Kennedy and O'Hagan, 2001). A Bayes-féle kalibráció bár-

milyen matematikai modellre alkalmazható, de előnyei igazán az olyan erősen nemlineáris, sok paraméterrel használó, komplex modellek esetén érvényesülnek, mint amilyenek a folyamat-orientált ökológiai rendszer modellek is.

A Bayes-féle kalibráció során az érzékenység analízissel kiválasztott paraméterek értékeit – az ésszerű tartományokon belül – véletlenszerűen kombináljuk, és az ezekkel a kiindulási értékekkel végzett modellszámítások eredményeit összevetjük a mérési adatokkal.

A kalibrációs eljárás nyomán lényegesen megnőtt a számított és a mért adatok közti korreláció (1. ábra), csökkent a produktivitás téli túlbecslése. A kalibrált modell meglehetősen pontossággal visszaadja a vegetációs periódus kezdetén megfigyelhető hirtelen produktivitás-növekedés. A kalibrációt követően a Biome-BGC modell lényegében alkalmassá vált arra,



1. ábra: A hegyhátsáli kvázitermészetes fajösszetételű gyepről mért (+) és a Biome-BGC modell kalibrált változatával számított (folytonos vonal) teljes respirációja (TR - fent), valamint bruttó elsődleges terméke (GPP - lent) 1999-re vonatkozóan

hogy segítségével megvizsgálhasuk a környezeti tényezőkben bekövetkező esetleges változásoknak (pl. éghajlatváltozás, változás a tápanyag-ellátottságban, stb.) az ökológiai rendszerekre, illetve azok szénháztartására gyakorolt hatását.

### Összefoglalás

Az éghajlat-modellezés az ökológiai visszacsatolások figyelembevételével, azaz a fizikai folyamatok mellett a biológiai és kémiai folyamatok számszerűsítésével, pontosabbá válik. Ugyancsak nem elhanyagolható szempont, hogy az ökológiai rendszerek folyamatainak modellezése révén közvetlen gazdasági jelentőségű információkhoz is juthatunk. Vizsgálhatjuk a növényi produktivitás változását a környezeti tényezők változásának függvényében, beleértve ez utóbbiba mind az éghajlati változásokat, mind pedig a közvetlen emberi beavatkozást (öntözés, trágyázás, stb.). A hazai viszonyokra adaptált, bekalibrált Biome-BGC modell már ma is alkalmas a nyugat-dunántúli gyepes területek viselkedésének kielégítő pontosságú szimulálására. A hazai környezetpolitikai döntések megalapozásához, illetve a regionális/globális szén-dioxid forgalom alaposabb megértéséhez a továbbiakban a modellt igyekszünk kiterjeszteni a Magyarországot, és általában a közép-európai régiót jellemző vegyes vegetációjú területek (mezőgazdasági területek, rétek, erdők, stb.) eredő szénforgalmának leírására. Ehhez jó alapot adnak a Hegyhátsálon 1997 óta folyó regionális skálájú felszín-légkör szén-dioxid forgalom mérések (Haszpra et al., 2005; Haszpra és Barcza, 2005).

### Köszönetnyilvánítás

Köszönjük a Numerical Terradynamics Simulation Groupnak, a Montanai Egyetem fejlesztőinek, hogy rendelkezésünkre bocsátották

a Biome-BGC és a MTCLIM modelleket (<http://www.ntsg.umt.edu>), illetve Gerd Bürgernek, hogy elérhetővé tette számunkra a C2W program forráskódját. Köszönjük Ács Ferencnek (ELTE Meteorológiai Tanszék) értékes tanácsait.

**Hidy Dóra, Barcza Zoltán**  
**ELTE Meteorológiai Tanszék**  
**Haszpra László OMSZ**  
**Galina Churkina**  
**Max Planck Institute for**  
**Biogeochemistry, Jena**

### Irodalomjegyzék

- Barcza, Z., Haszpra, L., Kondo, H., Saigusa, N., Yamamoto, S. and Bartholy, J., 2003: Carbon exchange of grass in Hungary. *Tellus*, 55B: 187-196.
- Bürger, G., 1997: On the disaggregation of climatological means and anomalies. *Climate Research* 8, 183-194.
- Cao, M., Prince, S. D., and Shugart, H. H., 2002: Increasing terrestrial carbon uptake from the 1980s to the 1990s with changes in climate and atmospheric CO<sub>2</sub>. *Global Biogeochemical Cycles* 16, 1069-1082
- Haszpra L. és Barcza Z., 2005: Légköri szén-dioxid mérések Magyarországon. *Magyar Tudomány* 50/1, 104-112.
- Haszpra, L., Barcza, Z., Davis, K. and Tarczay, K., 2005: Long term tall tower carbon dioxide flux monitoring over an area of mixed vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology* 132, 58-77.
- IPCC, 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. (eds. J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C. A. Johnson). Cambridge University Press, Cambridge, U.K. and New York, U.S.A.

Kennedy, M. and O'Hagan, A., 2001: Bayesian calibration of computer models. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*. 63, 425-464.

McGuire, A. D., Sitch, S., Clein, J. S., Dargaville, R., Esser, G., Foley, J., Heimann, M., Joos, F., Kaplan, J., Kicklighter, D. W., Meier, R. A., Melillo, J. M., Moore, B. L., Prentice, I. C., Ramankutty, N., Reichenau, T., Schloss, A., Tian, H., Williams, L. J., and Wittenberg, U., 2001: Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century: Analyses of CO<sub>2</sub>, climate and land use effects with four process-based ecosystem models. *Global Biogeochemical Cycles* 15, 183-206.

Mosegaard, K., and Tarantola, A., 1995: Monte Carlo sampling of solutions to inverse problems.

*Journal of Geophysical Research* 100B, 12431-12447.

New, M., Lister, D., Hulme, M. and Makin, I., 2002: A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Research*, 21, 1-25.

Running, S. W. and Hunt, E. R. J., 1993: Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, Biome-BGC, and an application for global-scale models. In: *Scaling physiological processes: leaf to globe* (eds.: Ehleringer, J. R. and Field, C. B.). Academic Press, San Diego (CA), 141-158.

Suyker, A. E. and Verma, S. B., 2001: Year-round observations of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tall grass prairie. *Global Change Biology* 3, 279-290.

White, M. A., Thornton, P. E., Running, S. W. and Nemani, R. R., 2000: Parameterization and sensitivity analysis of the Biome-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls. *Earth Interactions* Vol. 4, 1-85.

## KISLEXIKON

[Cikkeinkben csillag jelzi azokat a kifejezéseket, amelyek a kislexikonban szerepelnek]

Folytatás a 19. oldalról

### Richardson kaszkadikus elve

Seres A. és Ács F.: *A szinoptikus helyzetek...*

A légkörben, mint egymással súrlódó, különböző méretű örvények összességével jellemezhető

közegben a mozgási energia folyamatos átalakulása a nagyobb kiterjedésű mozgásformáktól a hierarchia alacsonyabb lépcsőjén elhelyezkedő kisebb örvények irányába, egészen a molekuláris skáláig.

Összeállította: Gyuró György