

MTA SZTAKI és MTA Biológiai Kutató Intézet

A Balaton ökológiai folyamatainak szimulációja

Csáki Péter, Kutas Tibor, Lovas Lászlóné és Herodek Sándor

Bevezetés

A növekvő ipari és mezőgazdasági termelés számos hatása károsítja a természetes emberi környezetet (talajerosió, vizek szennyeződése, légszennyeződés stb.). Napjainkban már közhellyé vált, hogy a természeti környezet védelme az egyik legsürgetőbb, bár igen nehéz és költséges feladat. A hatékony gyakorlati intézkedések előkészítéséhez szükség van a környezetvédelmi célú tudományos kutatásokra, a sokszor nem kellőképpen feltárt bonyolult összefüggések jobb megismerésére.

A különféle szárazföldi területek és vizek életének rendszerszemléletű vizsgálatával az ökológia foglalkozik, amely az adott területet vagy vizet benépesítő élővilágot, a környezetével együtt egységes rendszerként kezeli, figyelembe véve a sajátos törvényszerűségeket és a külső hatásokat. Az ilyen ökoszisztémák kutatásának egyik hatékony eszköze a matematikai rendszermodellezés, valamint a számítógépes szimuláció, hiszen sok beavatkozás hatása közvetlen kísérlettel nem is vizsgálható (pl. a kísérlet tönkretelheti az ökológiai rendszert, vagy a kísérlet nem kivitelezhető a rendszer méretei miatt).

A tavak esetében a legnagyobb problémát a mezőgazdaság és a települések által a vizekbe juttatott nagymennyiségű növényi tápsók okozta eutrofizálódás jelenti, amely elsősorban a növényi termelés növekedésében realizálódik (6,8).

Az utóbbi évtizedben hazánk egyik legnagyobb természeti értékét, a Balatont is a rohamos eutrofizálódás fenyegeti. A trofitás az ÉK-DNy-i hossz tengely mentén növekszik és maximális értékét a Keszthelyi öbölben éri el (3,4). A jelenség lényege, hogy az egyre szaporodó üdülőtelepek (2 millió üdülő 10 millió napot tölt a Balaton mellett) szennyvize és a mezőgazdaság egyre növekvő műtrágya-felhasználása révén állandóan nő a tóban a növényi tápanyag, elsősorban a foszfát és a nitrát koncentrációja.

Ennek hatására a száras növények, mint a hinár és a nád, de az aprótestű lebegő növények, az algák is nagymértékben elszaporodnak. A magas alga-koncentráció a vizet kellemetlen megjelenésűvé teszi és az üdülők ilyen vízbe már nem hajlandók bemenni.

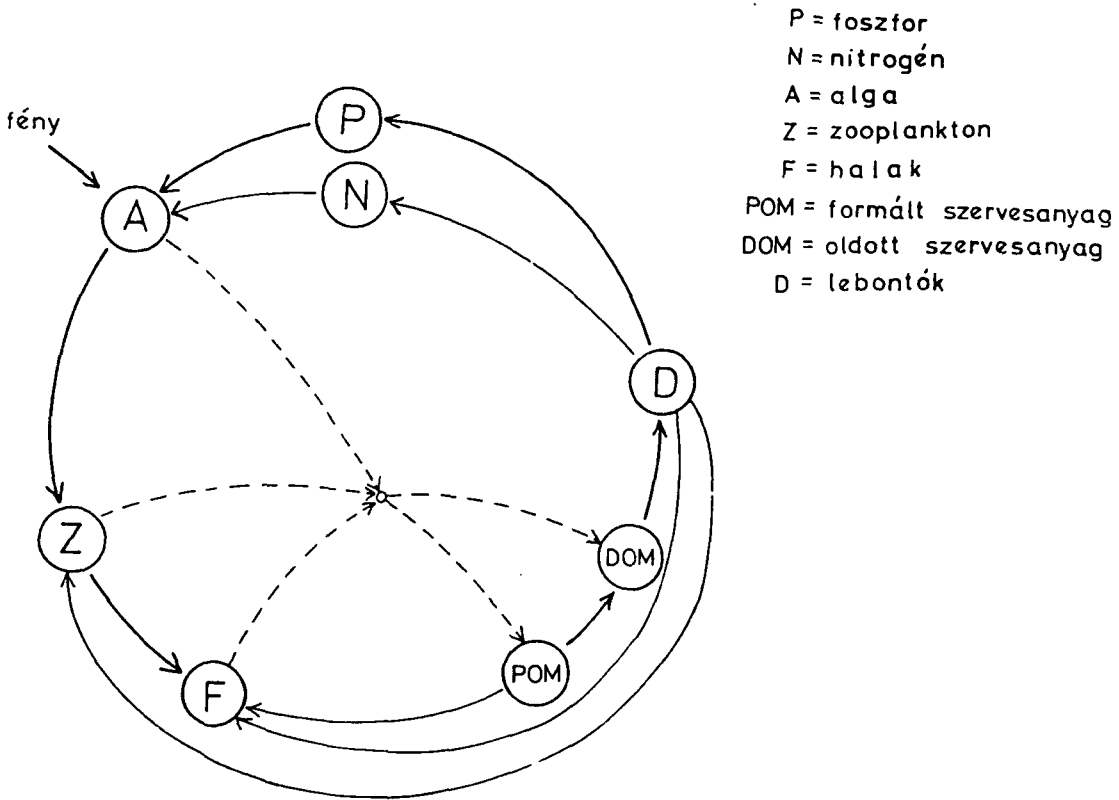
Ezen problémák megoldását célzó kutatások meggyorsítására és összehangolására a Magyar Tudományos Akadémia - az Országos Környezetvédelmi Tanács felkérésére - elvállalta "A Balaton és vízgyűjtő-területe komplex környezetvédelmi kutatási programját"-nak irányítását. E kutatási program keretében ez év elején kaptunk megbízást az MTA-tól a Balaton komplex ökológiai, matematikai modelljének kidolgozására. A modell rendszerszemlélettel integrálhatja az egyes szakterületeken kapott eredményeket, elősegítheti a rendszer viselkedésének megértését és megfelelő adatok birtokában jelezheti a rendszer reakcióját a különböző tápanyag-terhelésre.

Az előadásban munkacsoportunk által végzett modellezési és simulációs tevékenység kezdeti fázisáról számolunk be.

### 1. A tavi ökoszisztéma és modellje

Egy tó eutrofizálódásának vizsgálatához kidolgozandó modellben a legfontosabb állapotváltozók: a tóban lévő, ill. ide bejutó növényi tápanyagok, az egyes élőlények és az élettelen szerves anyagok mennyisége. Az irodalomban található tómodellek különböző részletességgel osztják kompartmentekre az élő és élettelen anyagok különböző létformáit és a változásokat differenciálegyenletek segítségével írják le (1,5,7). A modell kidolgozásának kezdeti szakaszában természetesen nem célszerű a vizsgált rendszer részletes leírása, ennél fontosabb, hogy tapasztalatokat szerezzünk a rendszer természetéről, a paraméterek kalibrálásánál jelentkező nehézségekről, valamint, hogy fokozatos fejlesztéssel ismerjük meg a modell tulajdonságait. Ezért első közelítésként egy egyszerű, kevés kompartmentből álló és aránylag nem túl sok paramétert tartalmazó, jól kezelhető modellt dolgoztunk ki, amely azonban tükrözi az ökológiai rendszerekre jellemző fő körfolyamatot: a növények szervesanyag-termelését, az állatok szervesanyag-átépítését és a bakteriális lebontást. Modellünk szerkezetét az 1. ábra mutatja be.

A modell nyolc kompartmentet tartalmaz, amelyek között a következő folyamatok zajlanak (az ábrán nyilakkal jelöljük):



1. ábra

a foszfát és nitrát szervesanyagokból a napfény energiájának segítségével a vízben lebegő algák szerves anyagot képeznek (fotoszintézis). Az algát a vízben lebegő apró állatok tömege, a zooplanktonok fogyasztják. Ezekkel viszont a halak táplálkoznak. Az állatok a táplálék nem hasznosított részét partikulált szerves anyag formájában ürítik ki. Minden élőlény kiválaszt oldott szerves anyagot, de pusztulásuk után anyaguk egy része is oldott anyagba megy. Végül a lebontó baktériumok a szerves anyagot szervesetlenné alakítják vissza.

A modell állapotváltozóinak az egyes kompartmentek egységnyi víztérfogatra jutó anyagmennyiségét választottuk (élőlények esetében ezt szárazanyagban adjuk meg), és mg/l-ben fejezzük ki. Ezek változását első közelítésben a következő nemlineáris differenciálegyenlet-rendszerrel írjuk le:

$$\begin{aligned} \dot{B}_A &= \text{PROD} - \text{RES}_A - \text{EXCR}_A - \text{MORT}_A - \text{GRAZ}_A \\ \dot{B}_Z &= \text{UPT}_Z - \text{RES}_Z - \text{EXCR}_Z - \text{DEF}_Z - \text{MORT}_Z - \text{GRAZ}_Z \\ \dot{B}_F &= \text{UPT}_F - \text{RES}_F - \text{EXCR}_F - \text{DEF}_F - \text{MORT}_F \\ \dot{B}_D &= \text{UPT}_D - \text{RES}_D - \text{EXCR}_D - \text{MORT}_D - \text{GRAZ}_D \\ \dot{C}_P &= \text{EX}_P - \text{PHUPT} + \text{PLOAD} \\ \dot{C}_N &= \text{EX}_N - \text{NUPT} + \text{NLOAD} \\ \dot{C}_{\text{DOM}} &= \text{EX}_{\text{DOM}} + \text{DMORT} - \text{DUPT} + \text{HIDR} \\ \dot{C}_{\text{POM}} &= \text{PDEF} + \text{PMORT} - \text{PUPT} - \text{HIDR} \end{aligned}$$

ahol  $B_A$ ,  $B_Z$ ,  $B_F$  és  $B_D$  állapotváltozók az alga, zooplankton, halak, illetve lebontók egységnyi víztérfogatra jutó mennyisége (biomassa), a  $C_P$ ,  $C_N$ ,  $C_{\text{DOM}}$  és  $C_{\text{POM}}$  állapotváltozók pedig a foszfor, nitrogén, oldott, illetve partikulált szerves anyag koncentrációja a vízben. Az egyenletek jobboldalán szereplő mennyiségek természetesen függenek egymástól és az állapotváltozóktól. (Az időfüggést sehol nem tüntetjük fel.) A következőkben ezeket fejtjük ki részletesebben.

### 1.1. Elsődleges termelés

Az algák fotoszintézise révén megvalósuló szervesanyagtermelést az egyenletekben a

$$\text{PROD} = \text{PMAX} \cdot \min(U_P, U_N, U_L) \cdot \text{TEMP}_A \cdot B_A$$

formulával adjuk meg. Ez a termelés pillanatnyi sebességét jelenti, amely tehát egyenesen arányos az algák pillanatnyi biomasszájával és

függ a hőmérséklettől ( $TEMP_A$ ), a fényintenzitástól ( $U_L$ ), valamint a vízben lévő foszfor ( $U_P$ ) és nitrogén mennyiségétől ( $U_N$ ). Az

$$U_P = \frac{C_P}{HC_P + C_P}, \quad U_N = \frac{C_N}{HC_N + C_N}$$

formulák (Michaelis-törvény) megadják, hogy a vízben lévő foszfor és nitrogén mennyisége milyen mértékben limitálja a termelést. A  $HC_P$  és  $HC_N$  paraméterek az ún. féltelítettségi konstansok.

A víz egy adott mélységében a fény elsődleges termelést limitáló tényezőjét szintén a Michaelis-törvénnyel adjuk meg, amelynek átlagolásával egy  $Z$  mélységű víztestre vonatkozólag az

$$U_L = \frac{1}{\beta Z} \cdot \log \frac{HL + L_0}{HL + L_Z}$$

átlagos limitálási tényezőt kapjuk, ahol  $L_Z = L_0 e^{-\beta Z}$  a fény intenzitása  $Z$  mélységben,  $HL$  a féltelítettségi konstans,  $\beta$  pedig a fényelnyelési konstans, amelyet két komponensre bontunk:

$$\beta = EXT + EXT_A \cdot B_A,$$

ahol az  $EXT_A$  paraméter az egységnyi alga-biomassza okozta fényelnyelést,  $EXT$  pedig (amely időfüggő lehet) az egyéb okokból származó fényelnyelést jelenti.

Az algák biomassza termelésükhöz foszfort és nitrogént vesznek fel a vízből, amelynek révén ezek mennyisége

$$PHUPT = PR \cdot PROD, \quad NUPT = NR \cdot PROD$$

sebességgel csökken, ahol a  $PR$  és  $NR$  paraméterek a szerves anyagban lévő foszfor és nitrogén arányát fejezik ki.

## 1.2. Táplálék-fogyasztás

A zooplankton, a halak és a lebontók táplálékukat a modellben az egyes kompartmentek anyagából veszik fel. Az egyenletekben szereplő  $UPT_i$  tagok az  $i$  kompartment által, a  $DUPT$ ,  $PUPT$  és  $GRAZ_i$  tagok pedig az  $i$  kompartmentből történő táplálékfogyasztás sebességét adják meg. Ezek a megfelelő  $CONS_{ij}$  tagok összegéből adódnak, ahol

$$CONS_{ij} = CMAX_j \cdot TEMP_i \cdot \frac{B_i \cdot B_j}{B_i + B_j}$$

a  $j$  kompartmentnek az  $i$  kompartmentből történő fogyasztásának sebességét jelenti.

## 1.3. Szervesanyag lebontás és leadás

Az élőlények életük folyamán tömegük egy részét leadják. E folyamatok sebességét az egyenletekben a következő formulákkal írhatjuk le:

respiráció	$RES_i = RMAX_i \cdot TEMP_i \cdot B_i$	$i=A, Z, F, D$
exkréció	$EXCR_i = EMAX_i \cdot TEMP_i \cdot B_i$	$i=A, Z, F, D$
defekáció	$DEF_i = DR_i \cdot UPT_i$	$i=Z, F$

ahol  $RMAX_i$ ,  $EMAX_i$ ,  $DR_i$  paraméterek,  $TEMP_i$  a hőmérsékleti limitáló tényező.

Ennek megfelelően a foszfor, a nitrogén, az oldott és partikulált szerves anyag mennyisége a vízben

$$EX_i = \sum_j EXCR_{ji} \cdot EXCR_i \quad PDEF = DEF_Z + DEF_F$$

sebességgel növekszik, ahol az  $EXCR_{ji}$ -vel kifejezett mennyiségek konstansok ( $j=P, N, D$ ,  $i=A, Z, F, D$ ).

#### 1.4. Mortalitás

Az élőlények pusztulási sebessége

$$MORT_i = [MCRIT_i - (MCRIT_i - MOPT_i) \cdot TEMP_i] \cdot B_i \quad i=A, Z, F, D$$

(amely hőmérsékletfüggő) és valamely  $MOPT_i$  és  $MCRIT_i$  értékek között adja az egységnyi biomasza pusztulását. Ennek anyaga az oldott és partikulált szerves anyagot gyarapítja

$$DMORT = \sum DMR_i \cdot MORT_i, \quad PMORT = \sum PMR_i \cdot MORT_i$$

sebességgel.

#### 1.5. A szerves anyag oldódását eredményező kémiai folyamatot

a

$$HIDR = HMAX \cdot TEMP_{POM} \cdot C_{POM}$$

tag, a foszfor és nitrogénterhelést (input) a PLOAD és NLOAD tagok képviselik az egyenletekben.

A fenti formulákban szereplő  $TEMP_i$  hőmérséklet okozta limitáló tényezőket

$$TEMP_i = V_i e^{1-V_i}, \quad V_i = \frac{(TCRIT_i - T)}{TCRIT_i - TOPT_i}$$

alakban adtuk meg, ahol T a hőmérséklet, a  $TOPT_i$  és a  $TCRIT_i$  pedig konstansok.

Ha  $PLOAD = NLOAD = 0$ , akkor a rendszer a foszforra és nitrogénre vonatkozóan zárt. A foszfor és nitrogén arányát a szerves anyag minden formájában közelítőleg azonosnak tekintjük (2). Ezért teljesülniük kell a

$$\dot{C}_P + PR (\dot{B}_A + \dot{B}_Z + \dot{B}_F + \dot{B}_D + \dot{C}_{DOM}) = \dot{C}_N + NR (\dot{B}_A + \dot{B}_Z + \dot{B}_F + \dot{B}_D + \dot{C}_{DOM} + \dot{C}_{POM}) = 0$$

feltételeknek, amelyekből összefüggéseket kapunk a  $PEXR_i$ ,  $NEXR_i$ ,  $DEXR_i$ ,  $EMAX_i$  és  $RMAX_i$  paraméterek között.

## 2. A modell verifikálása, a paraméterek kalibrálása

A modellel kapcsolatban mindenekelőtt azt a kérdést kell tisztázni, hogy milyen mértékben képes leírni egy tavi ökoszisztéma dinamikáját, illetve a paraméterértékek milyen választása mellett érhetünk el jó közelítést.

Tekintettel arra, hogy az egyenletek sok tekintetben csak durva közelítéssel írják le a rendszer működését, a modelltől egyelőre csak azt várjuk, hogy kvalitatív értelemben tükrözze helyesen a modellezett rendszert. A modell alapján több számítógépes szimulációt végeztünk a paraméterek és a kezdeti értékek változtatásával. A szimulációt a differenciálegyenletrendszer negyedrendű Runge-Kutta módszerrel történő numerikus megoldásával végeztük. Az eredményeket a sornyomtatón kiíratuk és kirajzoltattuk.

Az egyes futtatások eredményei alapján megállapítható, hogy a görbék lefutásának típusa (erősen oszcilláló vagy sima lefutásu) erősen függ a paraméterek értékeitől.

Megvizsgáltuk a modell validitását (verifikálás) olyan alapvető feltételek között, amelyek teljesítése esetén a modellnek meghatározott, ismert módon kell viselkednie. Ilyenek:

- a)  $L_0 = 0$  (nincs fény): az élők kihalnak (legelőször az algák),
- b) fény és hőmérséklet állandó: egyensúlyi állapot áll be,
- c) fény és hőmérséklet szezonálisan változik: téli időszakban az élők biomasszája lecsökken, majd emelkedik,
- d) az élők közül csak algák szerepelnek a modellben: biomasszájuk eleinte növekszik, majd a foszfor és nitrogén elfogyásakor kihalnak (foszfor input nélkül),
- e) az élők közül csak lebontók szerepelnek a modellben: rövid idő után minden foszforra és nitrogénné redukálódik.

Modellünket több irányban is fejleszteni kívánjuk a továbbiakban: a részfolyamatok matematikai leírásának pontosabbá tételével, az élőlények több kompartmentbe sorolásával, a foszfor és nitrogén input modellezésével és a meteorológiai tényezők figyelembevételével.



### Irodalom

- (1) C.W.Chen, G.J.Orlob: Ecologics simulation for aquatic environments, In: B.C.Patten: Systems Analysis and Simulation in Ecology. Acad.Press.New York, 1975.
- (2) H.L. Golterman: Physiological Limnology, Elsevier, New York, 1975.
- (3) Herodek S.: A balatoni fitoplankton-kutatás újabb eredményei, Annales Instituti Biologici (Tihany) Hung.Acad.Sci., Tihany, 1977- 181-198.
- (4) Javaslat a Balaton regionális komplex környezetvédelmi kutatási programjára (1976-80), Budapest, 1976.
- (5) S.E. Jörgensen: A eutrophication model for a lake, Ecological Modelling 2. (1976) 147-165.
- (6) Papp F., Felföldi L., Jolánkay G., Tóth L.: A Balaton eutrofizálódásának biológiai, kémiai, hidrológiai és hidraulikai jellemzése és a folyamat késleltetési módjai, Kézirat.
- (7) R.A.Park et al.: A generalized model for simulating lake ecosystems, Simulation, 23. (1974) 2.33 50.
- (8) G.A. Rohlich, ed.: Eutrophication, National Academy of Sciences, Washington, 1969.

