

MTA SzTAKI, MTA Biológiai Kutató Intézet

A Balaton eutrofizálódási folyamatainak leírását célzó  
matematikai modellek

Kutas Tibor, Csáki Péter, Herodek Sándor

Bevezetés

Egy természetes ökoszisztémában a tápanyag többé-kevésbé zárt körben forog: a növények felveszik a tápsókat a talajból (vagy vizből), a növényeket elfogyasztják az állatok, az állatok ürüléke és hullája visszajut a talajba (vizbe), azt elbontják a baktériumok - így a holt szerves anyagból ismét felszabadulnak a tápsók és így tovább. A civilizáció ezt a körfolyamatot alapvetően megszüntette. A mezőgazdaságban megtermelt szerves anyag nagy részét a városi lakosság fogyasztja el, a végtermék azonban nem jut vissza a talajba, hanem a csatornázás révén a vizekbe kerül. Ennek eredménye a tavak növényi tápanyagban való felúsulása. Ezt a folyamatot - ökológiai következményeivel együtt - nevezzük eutrofizációnak. Az eutrofizálódás az elmúlt évtizedekben sorra támadta a gazdaságilag fejlett államok tavait, a leggazdagabb országokban (USA, NSzK, Svédország, stb.) ebben az évtizedben már az eutrofizálódás megfordítása, a tavak "gyógyítása" van napirenden. Ez olyan többszáz km<sup>2</sup> felületű tavak esetében, mint amilyen a Bala-

ton is, többmilliárd forintnak megfelelő összeget igényel.

A Balaton eutrofizálódását viszonylag korai stádiumban sikerült a hidrobiológusoknak kimutatni, amikor még mód van a "megelőző védekezésre". Bármilyen beavatkozás azonban kihatással van a Balaton egész ökológiai rendszerére, ezért szükség van a rendszer minél jobb megismerésére. Ennek és ezen keresztül a döntések előkészítésének egyik hatékony eszköze a tó ökoszisztémáját leíró matematikai modell.

Összetett rendszerek leírásánál és számítógépes szimulációjánál felmerülő lényeges probléma, hogy a rendszer milyen tulajdonságait emeljük ki, milyen részfolyamatokat vegyünk figyelembe, mennyi legyen a rendszert leíró állapotváltozók száma, milyen matematikai apparátust alkalmazzunk. Tavak matematikai modellezésénél az egyik szélsőséges példa a Vollenwieder féle "modell" [7], amely egyszerű összefüggést ad a nyári maximális alगतömeg valamint a tó felületegységére eső foszforterhelés, az átlagos vízmélység és az átlagos vízkicserélődési idő között. (Ez az empirikusan igazolt formula azonban csak a mélyvizű tavak egy csoportjára érvényes.) A másik véglet R. A. Park modellje [2], [5], ahol minden, a biológia által ismert részfolyamatot figyelembe vesz, az állapotváltozók száma is nagy - 20-nál több. Az ilyen részletes modellek precizitása azonban a nem kellően tisztázott összefüggések, a sok, nehezen vagy nem meghatározható paraméter miatt alacsony. Feladatunk olyan modellsorozatot konstruálni, amelynek első tagja is a lényeg-

ges összefüggéseket és a legfontosabb folyamatokat leírja és felhívja a szaktudományok figyelmét a pontosabb leírás-hoz szükséges, eddig nem, vagy nem elég részletesen vizsgált folyamatokra. Az új kutatások eredményeit pedig a későbbi modellekbe lehet beépíteni.

### 1. A BEM modell

Munkacsoportunk kidolgozta a Balaton Eutrofizálódási Modelljének (BEM) néhány változatát. Múlt évi előadásunkban már ismertettünk egy 8 komponensből álló viztest modellt, amelyben a tavi anyagforgalom főbb útjait irtuk le: az algák a fénytől, a nitrát és foszfát koncentrációtól függően szerves anyagot képeznek, az algákat a zooplankton, a zooplanktont a halak fogyasztják, minden élőlény exkrétumát és hulláját a bakterioplankton bontja le, ami által a foszfát és nitrát újra felszabadul. Ezt a modellünket több szempontból is megváltoztattuk és szimulációs futtatások segítségével összehasonlítottuk az egyes változatok viselkedését.

A változtatások főként a Balaton legfontosabb sajátosságainak figyelembe vételét célozták.

A Balaton felszíne  $600 \text{ km}^2$ , átlagos mélysége 3,2 m. Ez a két adat a tó két fontos sajátosságát mutatja. A felszín nagysága és ennek következtében az egyes részek különböző trofitási állapota miatt a tavat általában több medencére szokták osztani. A medencéket külön-külön próbáljuk leírni, majd később hidrológiai modellel kötjük össze

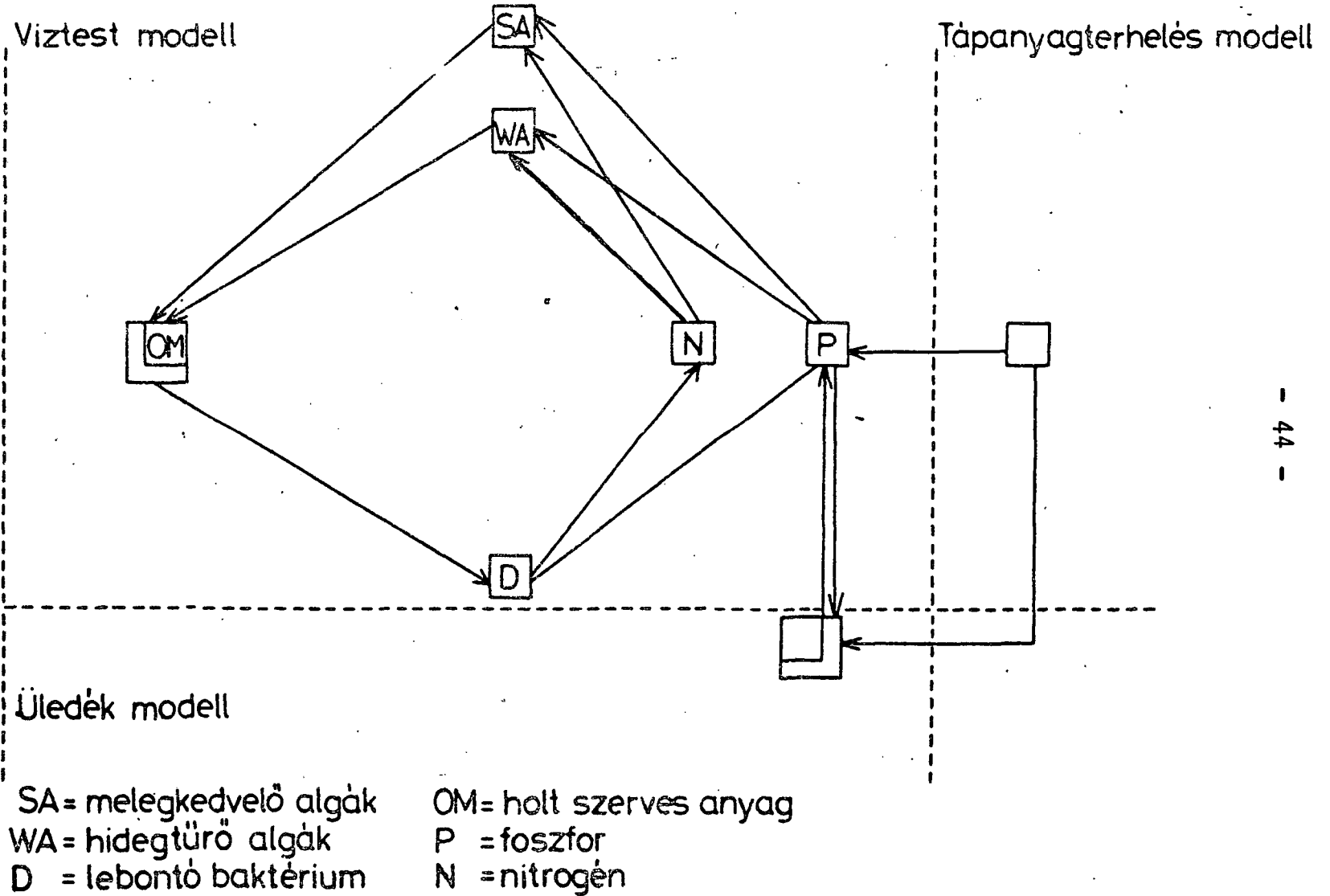
őket.

A másik adat azt mutatja, hogy a fenéküledék a nyílt-vízzel intenzív kétirányú kapcsolatban van. A mély tavaknál a foszfor magában a víztestben tárolódik, sekély tavaknál azonban főleg az iszapban. Az iszap, mint memória, még a tápanyagszennyezés megszüntetése után hosszú ideig is "emlékezteti" a tavat az intézkedések elkésett voltára - folyamatosan adva le a korábban adszorbeált foszfort. A növényi tápanyag nagyrésze a vízgyűjtőről, illetve a szennyvizcsatornákból érkezik a Balatonba. Ennek modelljét - a víz-üledék-foszfat kicserélődési folyamatával együtt - egy másik előadás ismerteti.

A víztestmodellben a zooplanktont és a halakat elhagytuk, mivel a balatoni zooplankton mennyisége csekély, az algák által termelt szerves anyag csak 1-5 %-át fogyasztják, és a lehalászott halmennyiség a fotoszintézis során termelt szerves anyagnak csak egy ezrelékét éri el.

Mélyebb tavakkal szemben a sekély Balaton nyáron erősen felmelegszik, és az év folyamán elég határozottan elkülönül egymástól a hideg és meleg vízre jellemző algatársulás. Ezért modellünkben az algákat két komponensre bontottuk, különböző hőmérsékleti feltételeket képviselő paraméterekkel.

A fentiek alapján a jelenlegi modell fő anyagáramlásait az 1. ábra mutatja be.



1. ábra

Az élőlény komponenseket (melegkedvelő alga, hidegtűrő alga, lebontó baktérium) leíró egyenletek a következő típusúak:

$$\frac{dB}{dt} = UPT - RES - EXCR - MORT - GRAZ - SED + SUP$$

ahol UPT a két alga komponensnél az elsődleges termelést, a baktériumoknál a holt szerves anyag felvételét jelenti. RES a légzés általi, EXCR az exkréció általi, GRAZ a ragadozás általi, MORT a természetes mortalitás általi biomassa csökkenését írja le. A SED és SUP tagok az élőlények lesüllyedését a fenékre illetve felkavarodásukat a fenékről fejezi ki.

Vizsgáljunk meg részletesen két folyamatot. Az algák elsődleges termelése:

$$UPT = PMAX \cdot TEMP \cdot U \cdot B$$

Itt PMAX a maximális (ideális körülmények közötti) elsődleges termelést jelenti, természetesen a két alga komponensnél különböző értékekkel. A TEMP a hőmérsékleti limitálást jelenti, melynek értéke 1, ha a vízhőmérséklet optimális az alga számára, egyébként 0 és 1 közé esik. Az U tényezőben a többi tényező limitálását, nevezetesen a foszfát-nitrát és fény limitálást foglaltuk össze.

$$U_i = \min(U_1, U_2, U_3)$$
$$U = U_1^{U_i} \cdot U_j^{U_i} \cdot U_l$$

ahol

$$U_1 = \frac{1}{z \cdot \text{TOTEXT}} \cdot \left[ \exp\left(1 - \frac{L_0 \cdot \exp(-z \cdot \text{TOTEXT})}{\text{LOPT}}\right) - \exp\left(1 - \frac{L_0}{\text{LOPT}}\right) \right]$$

$$U_2 = \frac{C_p}{\text{HP} + C_p},$$

$$U_3 = \frac{C_N}{\text{HN} + C_N},$$

ahol HP és HN az ugynevezett féltelítettségi konstansok,  $C_p$  és  $C_N$  foszfát ill. nitrátkoncentráció a vízben, TOTEXT a víz fénykioltási együtthatója, a széltől való függésének - ez is a tó sekélységének következménye - meghatározására külön nemlineáris görbeillesztést végeztünk.  $L_0$  a globális sugárzás a víz felszínén, LOPT az elvi optimális megvilágítás az algák számára,  $z$  a víztest mélysége.

A másik lényeges részfolyamat a természetes mortalitás, amelyre több képletet próbáltunk ki, míg jelenlegi modelünkben a mortalitás a vízhőmérséklet exponenciális függvénye:

$$\text{MORT} = \text{MCRIT} \cdot \text{MR}^{\text{T}-\text{TCRIT}} \cdot B$$

TCRIT a kritikusan magas hőmérséklet, MCRIT ezen a hőmérsékleten a mortalitási arány.

Az élettelen komponenseket (vizben oldott foszfát és nitrát, vízben levő holt szerves anyag) leíró egyenletek a következő típusúak:

$$\frac{dc}{dt} = \text{MORTR} + \text{EXCRR} - \text{UPTR} - \text{SED} + \text{SUP} + \text{LOAD} - \text{OUTFLOW}$$

MORTR és EXCRR az élők mortalitásának illetve exkréciójának megfelelő hányada. UPTR a foszfátra és nitrátra az algák, a holt szerves anyagra a lebontó baktériumok tápanyagfelvételét jelenti. A további négy tag a víztestnek a környezettel való kapcsolódását jelenti. Az első kettő a már fentebb leírt, a tó számára különösen jelentős víztest-fenéküledék kapcsolatot írja le. Jelenleg az üledékbe irányuló foszfát-outputról azt feltételezzük, hogy a víz foszfát-tartalmával és a fotoszintézis intenzitásával arányos (utóbbi a biogén mészképződésen keresztül), de ezt az elképzelést a további vizsgálatok módosíthatják. Ezt modellünkben a következő képlet írja le:

$$\text{SED} = \text{PSR} \cdot C_p \cdot (\text{UPT}_{\text{SA}} + \text{UPT}_{\text{WA}}),$$

ahol PSR a süllyedési arány,  $\text{UPT}_{\text{SA}}$  és  $\text{UPT}_{\text{WA}}$  a két alga kompartment elsődleges termelése. A LOAD tag jelenti a szomszéd medencéből történő átfolyást, illetve a tó vízgyűjtőjéről jövő terhelést. Az utolsó tag a következő medencébe illetve a Sióba történő átfolyást szimbolizálja.

A szimulációs futtatások során felhasználtuk az Országos Vízügyi Hivatal és a Meteorológiai Szolgálat globális sugárzás, szélerősség, valamint vízhőmérsékleti adatait is (1976-77 évi, naponta végzett mérések). Felhasználtuk továbbá Szemesen ugyanezen időszakban szimul-



tán végzett alga biomaszsa és fénykioltási együttható méréseket is [3]. Ezek alapján keressük a modell paramétereinek olyan értékeit, amelyek mellett a modell által szolgáltatott alga biomaszsa értékei jól illeszkednek a mért adatokhoz.

## 2. A modell szimulációs programja

Az ismerttetett modell dinamikájának vizsgálatára szimulációs programot készítettünk. A szimulációt három programra bontottuk:

- a.) előkészítés: kezdőértékek, paraméterek beolvasása, stb.
- b.) szimulátor: a folyamat szimulációja megadott kezdőponttól megadott végpontig;
- c.) eredménykijelzés: a szimulátor által egy file-on szolgáltatott eredményekről tetszőlegesen kiválasztott változók kiíratása, kirajzolása.

A szimulátor lényeges sajátossága, hogy a rendszer komponenseit a hozzájuk tartozó adatstruktúra (a programban: objektum) képviseli. Az adatstruktúra ennek megfelelően tartalmazza a paramétereket és az állapotváltozó (biomaszsa, ill. koncentráció), a tápanyagfelvétel, respiráció, stb. folyamatait reprezentáló változókat. A szimulátor két részből áll:

- a.) általános rész: biztosítja a folyamat lépésenkénti előrehaladását, az adott idősza-

kokban bekövetkező események akcióira a vezérlés átadást, valamint a numerikus integrálást;

- b.) a modellt tartalmazó speciális rész a modell komponenteivel, az egyenletrendszerrel. Ebben a részben történik az összes változó értékeinek kiírása megadott időpontokban valamely file-ra.

Az előkészítő és eredménykijelző program modell-független. Ezek egy paramétertáblázat, illetve egy változótáblázat segítségével ismerik fel az adott modellt. Az eredménykijelző programnak megadható, hogy mely változókat írja és rajzolja ki. (természetesen futásonként több rajz is megadható).

Köszönetnyilvánítás: Köszönetet mondunk Jolánkai Gézá-  
nak (WITUKI) értékes tanácsaiért, megjegyzéseiért, valamint az adatok fáradságos munkával történt összegyűjtéséért.

#### I r o d a l o m

- [1] C. W. Chen, G. T. Orlob: Ecologic Simulation for Aquatic Environments, in Systems Analysis and Simulation in Ecology vol. III. (ed. B. C. Patten) Acad. Press. 1975. pp. 476-588.
- [2] R. Haines, D. K. Leung: MS. CLEANER Documentation, Version 2.15 (Ref. Man. 1975)

