



A HAZA SZOLGÁLATÁBAN

Opponensi vélemény

Dr. Szabó Sándor: „Vízínövények és algák közötti kölcsönhatások változó környezetben”

című MTA doktori értekezéséről

Általános értékelés

Dr. Szabó Sándor értekezése egy több évtizedes, következetesen felépített kutatói életmű szintézise, amely a vízi ökoszisztémák működésének egyik alapvető kérdését, az elsődleges termelők közötti kölcsönhatásokat vizsgálja. A munka a hazai és nemzetközi édesvízi ökológia egyik legkritikusabb kérdéskörével, a sekély állóvizek elsődleges termelői közötti biotikus interakciókkal foglalkozik. A globális klímaváltozás és az eutrofizáció együttes hatása alapjaiban rendezi át vízi ökoszisztémáinkat, gyakran az ökoszisztéma-szolgáltatások romlását (pl. biodiverzitás csökkenése, vízminőség romlása) idézve elő. A szerző kutatásai elméleti alapot nyújtanak a stabil ökológiai állapotok közötti átmenetek (regime shifts) megértéséhez, ami elengedhetetlen a fenntartható vízgazdálkodáshoz.

A disszertáció erőssége, hogy nem csupán egy-egy részproblémára fókuszál, hanem integrált ökológiai keretben vizsgálja az algák és makrofitonok közötti kölcsönhatásokat. A szerző kísérletes és terepi eredményeket egyaránt felhasználva tárja fel azokat a mechanizmusokat, amelyek a vízi rendszerek állapotát meghatározzák.

A bemutatott eredmények nemcsak alapkutatási szempontból fontosak, hanem közvetlenül kapcsolódnak a vízgazdálkodási és vízminőség-védelmi gyakorlat kérdéseihez is több szempontból is. Pl. egyértelműen megmutatja, hogy a bentikus algák állapota erősen függ a makrofita vegetáció által módosított fény- és élőhelyi viszonyoktól, ami VKI szempontból időbeli és térbeli torzításokhoz vezethet. Az eredmények arra is utalnak, hogy a tápanyagok biológiai megkötése és visszaforgása jelentős időbeli variabilitást okoz a vízoszlop tápanyagkoncentrációiban, ami torzíthatja a fitoplankton-alapú ökológiai állapotminősítést. A makrofiton dominancia időszakában a víz alacsony tápanyagszintje kedvező állapotot jelezhet, míg a biomassza lebomlását követően gyors algareakció és állapotromlás figyelhető meg, anélkül, hogy a külső terhelés változna.



A kutatási háttér és tudományos kontextus

Az értekezés világosan bemutatja az eutrofizáció és a klímaváltozás együttes hatását a vízi ökoszisztémákra, rávilágít arra, hogy a különböző primer producens csoportok közötti verseny kulcsszerepet játszik az ökoszisztéma-szolgáltatások alakulásában. Különösen értékes a dolgozatban az alternatív stabil állapotok elméletének alkalmazása, valamint annak kísérletes alátámasztása. A szerző nem pusztán hivatkozik a nemzetközi irodalomra, hanem saját eredményeivel hozzájárul az elmélet finomításához.

A dolgozat szerkezete

A disszertáció tematikusan szervezett fejezetekből épül fel, amelyek önálló kutatási egységeket képviselnek, és a szerző publikációs eredményeire épülnek; megjegyzendő ugyanakkor, hogy a dolgozatban kilenc, míg a téziszfűzetben tíz közlemény kerül megjelölésre.

A disszertáció szerkezete jól követhető, a fejezetek önálló, koherens kutatási egységeket alkotnak. Ugyanakkor a különböző fejezetekben bemutatott mechanizmusok – így a tápanyag-dinamika, a pH-visszacsatolások, a fénylimitáció és az epifitikus algák szerepe – egyértelműen ugyanazon ökológiai rendszer egymással összefüggő elemei, amelyek integrált értelmezése a jelenleginél hangsúlyosabban is megjelenhetne. Különösen a pH szerepének kettőssége, valamint az epifiton–makrofiton kölcsönhatások esetében lenne indokolt egy egységes, visszacsatolásokon alapuló rendszerértelmezés egyértelmű megfogalmazása. Egy összefoglaló, koncepcionális modell vagy ábra beillesztése jelentősen erősítené a dolgozat szintetizáló jellegét, és világosabban bemutatná az egyes mechanizmusok közötti kapcsolatokat.

Módszertani megközelítés

A dolgozat egyik legnagyobb erőssége a kísérletes megközelítés következetes alkalmazása. A szerző kontrollált laboratóriumi kísérleteket, többfaktoros kezeléseket, valamint részletes analitikai méréseket alkalmaz. Kvantitatív növekedési ráta elemzéseket, elemdinamikai vizsgálatokat végez és integráltan értelmezi a kémiai és biológiai folyamatokat.



A tézisek értékelése

A tézisek világosan szerkesztettek, logikusan követik a disszertáció felépítését, és jól tükrözik a dolgozat fő tudományos eredményeit. A szerző egyértelműen megfogalmazza az egyes vizsgálati egységekhez kapcsolódó új megállapításokat, különösen a tápanyagkompetíció, a pH-szabályozás, valamint a makrofiton–alga kölcsönhatások mechanizmusainak feltárása terén. Ugyanakkor a tézisek – hasonlóan a disszertáció egészéhez – elsősorban tematikus egységek mentén rendeződnek, és kevésbé jelenik meg bennük az eredmények integrált értelmezése. Egy összefoglaló, szintetizáló jellegű tézis – amely a különböző mechanizmusokat egységes rendszerként, például az alternatív stabil állapotok keretében foglalja össze – tovább erősítené a tézisek koncepcionális súlyát és nemzetközi beágyazottságát. Összességében a tézisek megfelelően reprezentálják a dolgozat tudományos eredményeit, ugyanakkor az integráló jelleg hangsúlyosabb megjelenítése tovább növelné azok tudományos értékét.

Tudományos eredmények és újdonságok

A dolgozat legfontosabb új eredményei az alábbiakban foglalhatók össze:

1. Algák és békalencsék közötti kompetíció mechanizmusai
 - Kimutatja, hogy az algák gyors tápanyagfelvétele és pH-emelő hatása jelentős növekedésgátló tényező.
2. Alternatív stabil állapotok mechanisztikus értelmezése
 - Kísérletes bizonyítékokat szolgáltat arra, hogy a rendszerállapotok közötti váltás küszöbjellegű.
3. Makrofiton dominancia fenntartásának folyamatai
 - Az alámerült növények többféle mechanizmussal képesek viaszorítani a versenytársakat.
4. pH mint kulcstényező szerepének igazolása
 - A lúgosodás mint ökológiai szabályozó mechanizmus kiemelt jelentőségű.
5. Epifitikus algák és közvetett hatások szerepe
 - A kölcsönhatások hálózatos jellegének bemutatása.



Kritikai észrevételek

A dolgozat magas színvonalát és egységét tovább erősítené a különálló fejezetek közötti szintetizáló ábra vagy modell. A regime shift folyamatok kvantitatív modellezése (pl. threshold modellek) tovább növelné a nemzetközi hatást. A terepi validáció hangsúlyosabb bemutatása erősítené az alkalmazhatóságot, jó lett volna annak egy önálló, összefoglaló tárgyalása. Egyes helyeken a statisztikai módszerek részletesebb bemutatása indokolt lenne, mert így az elemzések logikája és reprodukálhatósága nem minden esetben teljesen egyértelmű. Pl. A 3. fejezetben (algák–békalencse kompetíció) a szerző ezt írja: „Az algafajok egyenkénti hatásának vizsgálata során az egyes algakezelt kultúrák klorofill alapú növekedési rátáit Tukey-tesztel vetettük össze.” Illetve: „Algafajok kombinált hatásának kísérletében [...] páronkénti összehasonlítások (PÖ) segítségével [hasonlítottuk össze].” De nem derül ki, hogy volt-e ANOVA előtte (amihez a Tukey tartozik), illetve, hogy milyen modell (egyfaktoros, többfaktoros?). Nincs szó arról, hogy ellenőrizték-e a normalitást (pl. Shapiro–Wilk), vizsgálták-e a varianciahomogenitást. Bár az ábrán látszik, hogy $n = 3$ (pl. hibásávoknál), de nincs kimondva, hogy ez minden kezelésre igaz-e. Nem derül ki, hogy a páronkénti összehasonlítás hogyan történt, t-próba, korrekció (Bonferroni) volt-e? Nincs megadva a szignifikanciaszint pontos kezelése.

Az ábrák esetében jó lett volna mindenhol élni a színezés adta lehetőségekkel, sok helyütt a vonalak összefolynak, alig lehet követni egy-egy változás lefutását (pl. 24., 25. ábra).

A dolgozat egyik fontos, ugyanakkor nem kellően kiaknázott aspektusa a bemutatott eredmények vízminősítési, különösen a Víz Keretirányelv (VKI) szerinti ökológiai állapotértékelésre gyakorolt következménye. A kísérleti eredmények egyértelműen rámutatnak arra, hogy a tápanyagok jelentős része nem kerül tartósan eltávolításra a rendszerből, hanem a különböző biológiai és fizikai-kémiai kompartmentek (víz, algabiomassza, makrofíton, üledék) között dinamikusan átrendeződik. Ennek következtében a vízoszlop tápanyagkoncentrációja és az arra gyorsan reagáló fitoplankton közösség állapota erősen időfüggővé válik.

A makrofíton dominancia időszakában a tápanyagok biomasszába történő beépülése alacsonyabb vízoszlopi koncentrációkat eredményezhet, ami a fitoplankton-alapú minősítés során kedvezőbb ökológiai állapotot jelezhet. Ezzel szemben a makrofíton biomassza lebomlását követően a tápanyagok gyors visszajutása a vízbe intenzív algásodást idézhet elő, ami rövid időn belül az állapot



A HAZA SZOLGÁLATÁBAN

romlását eredményezi, anélkül, hogy a külső terhelés érdemben változna. Ez arra utal, hogy a fitoplankton-alapú minősítés bizonyos esetekben inkább a rendszer pillanatnyi állapotát, semmint annak hosszabb távú terhelési viszonyait tükrözi.

Hasonló következtetések vonhatók le a fitobentosz esetében is. A dolgozat által bemutatott kölcsönhatások – különösen a makrofíton által okozott árnyékolás, illetve a szubsztrátviszonyok módosulása – jelentős mértékben befolyásolhatják a bentikus algaközösségek biomasszáját és összetételét. Ennek következtében a fitobentosz-alapú minősítés szintén érzékeny lehet a makrofíton állomány időbeli változásaira, ami a térben és időben változó ökológiai állapotértékelések egyik lehetséges forrása.

Mindezek alapján megállapítható, hogy a dolgozat eredményei közvetlenül relevánsak a VKI szerinti biológiai minősítési rendszerek értelmezése szempontjából, ugyanakkor ezen összefüggések explicit tárgyalása, illetve a gyakorlati vízminősítési következmények részletesebb kifejtése tovább növelné a munka alkalmazott jelentőségét.

E megjegyzéseim azonban nem csökkentik a dolgozat tudományos értékét.

Kérdéseim

1. A szerző kísérletes rendszerekben azonosította a stabil állapotok közötti küszöbértékeket és maga is tárgyalja a vizsgálat korlátait. Milyen típusú terepi kísérleteket vagy hosszabb idősorú vizsgálatokat tartana szükségesnek az általánosíthatóság megerősítéséhez?
2. A pH kiemelt szabályozó szerepe a dolgozatban megjelenik, ugyanakkor annak elsődlegesen biológiai folyamatokból eredő, illetve visszacsatoláson keresztül önállóan ható karaktere nem kerül explicit egységes keretbe. Milyen mértékben tekinthető ez primer szabályozó tényezőnek, és mennyiben másodlagos következménye a biológiai folyamatoknak?
3. A dolgozat eredményei egyértelműen rámutatnak arra, hogy a tápanyagok biológiai megkötése és visszaforgása, valamint a makrofíton által módosított fény- és élőhelyi viszonyok jelentős időbeli variabilitást okozhatnak mind a fitoplankton, mind a fitobentosz közösségek szerkezetében és biomasszájában. Milyen konkrét mintavételi és értékelési ajánlásokat fogalmazna meg a szerző a VKI szerinti tavi fitoplankton és fitobentosz vizsgálatok számára annak érdekében, hogy az ökológiai állapot minősítése kevésbé legyen érzékeny a rövid távú, belső ökoszisztéma-dinamikából fakadó ingadozásokra? Különösen



A HAZA SZOLGÁLATÁBAN

érdekes lenne annak megítélése, hogy: indokolt-e a mintavételek időbeli sűrítése vagy szezonális kiterjesztése, illetve milyen módon lehetne ezáltal csökkenteni a minősítési bizonytalanságot.

Összegzés és ajánlás

Dr. Szabó Sándor doktori értekezése a hidrobiológia és ökológia területén kiemelkedő jelentőségű, magas tudományos színvonalú munka, amely jelentősen hozzájárul a vízi ökológia elméleti kereteinek bővítéséhez, a vízi ökoszisztémák működésének megértéséhez.

A disszertációt nyilvános vitára bocsátásra alkalmasnak tartom és sikeres védelem után javaslom az MTA doktora cím odaítélését.

Budapest, 2026. április 22.

Prof. Dr. Ács Éva
az MTA doktor