

Válasz Dr. Ács Éva bírálataira

Köszönöm Dr. Ács Évának hogy elvállalta az értekezés bírálatát. Köszönöm az értekezéssel kapcsolatos méltató sorait, továbbá konstruktív kritikai észrevételeit és javaslatait. Az alábbiakban ezekre válaszolok.

Kritikai észrevételek

1. 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.

Válaszom: Köszönöm a bíráló értékes észrevételét. A dolgozatban a 27., 34., 46., 53. és 54. ábrákat szántam olyan szintetizáló ábráknak, amelyek összefoglalják az egyes fejezetekben feltárt ökológiai kölcsönhatásokat. Egyetértek a bírálóval abban, hogy a további szintetizáló ábrák és az értekezés egészét integráló koncepcionális modell még jobban erősíthették volna a dolgozatot. A regime shift folyamatok kvantitatív, küszöbérték-alapú modellezése nagyon értékes kiegészítése lehetett volna a munkának. Ugyanakkor az értekezés elsődleges célja a makrofitonok, algák és környezeti tényezők közötti kölcsönhatások kísérletes feltárása volt, míg ennek matematikai modellezése már túlnyúlt volna a dolgozat keretein.

2. A terepi validáció hangsúlyosabb bemutatása erősítené az alkalmazhatóságot, jó lett volna annak egy önálló, összefoglaló tárgyalása.

Válaszom: Egyetértek azzal, hogy a laboratóriumi és mezokozmosz-kísérletek eredményeinek egy önálló fejezetben való terepi validációja tovább növelte volna az értekezés alkalmazhatóságát. A dolgozatban lehetőségtől függően törekedtem a kísérleti eredmények természetes rendszerekben történő alátámasztására. Ezeket holland csatornáknak végzett társszerzői vizsgálatok révén, valamint a Magyar Felszíni Vizek Adatbázisából és a MaPHYTE adatbázisból származó adatok felhasználásával oldottam meg. A hollandiai vizsgálatok során a makrofiton-felmérések és a vízkémiai mintavételek ugyanazon kutatócsoport által, azonos helyszíneken és azonos időpontban ugyanabból a mikrokörnyezetből teljesen homogén élőhelyekről történtek. Emiatt az akváriumi kísérletekben feltárt ökológiai kölcsönhatások terepi összevetésére a hollandiai terepi adatok tökéletesen megfeleltek. Ezzel szemben a hazai és európai adatbázisokban a makrofiton-, algológiai és vízkémiai felmérések a hollandiaitól eltérően más mintavételi protokoll szerint készültek. Az algológiai és vízkémiai minták oszlop-mintavételezéssel lettek begyűjtve, nem közvetlenül a makrofiton-állományok mikrokörnyezetéből. Ez a mintavételi sajátosság csökkenti az ökológiai összefüggések kimutathatóságát, ezért korlátozza a laboratóriumi eredmények terepi validációjának lehetőségeit.

3. 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.

Válaszom: Köszönöm a bíráló alapos észrevételét. Egyetértek abban, hogy a 3.2. fejezetben használt statisztikai módszerek részletesebb leírása javította volna az elemzések reprodukálhatóságát. A módszerleírás tömörségét figyelemben tartva emiatt több, ténylegesen elvégzett, de az eredményekben nem megjelenő statisztikai vizsgálat leírását kihagytam a dolgozat 3.2. fejezet statisztikai módszerek részéből. A bíráló a statisztikai módszerekkel kapcsolatos kérdéseire az alábbiakban válaszolok.

Az algafajok egyedi hatásának vizsgálata során a békalencsék relatív növekedési rátáinak normalitását Kolmogorov–Smirnov-próbát használtunk. A varianciák homogenitását Levene-tesztel ellenőriztük. A varianciák homogének voltak (Levene-próba, $P = 0,086$), ezért az adatok értékelésére egyfaktoros varianciaanalízist (ANOVA), majd Tukey-féle post hoc tesztet használtunk. A hibásávok minden kezelés három párhuzamos ismétlésének szórását mutatják ($n = 3$). Az adott szignifikanciaszinteket az 1. ábra jelmagyarázatában tüntettük fel (* $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; * $P < 0,001$). Az algafajok kombinált hatásának vizsgálatakor a kezelések összehasonlítását az SPSS General Linear Model moduljában páronkénti összehasonlításokkal (Pairwise Comparisons), LSD-korrekció alkalmazásával végeztük el. Ennek alapján a kevert algás kezelések a 8. napon szignifikáns gátló hatást mutattak a békalencsék növekedésére ($P < 0,05$), amely hatás a 10. napra tovább erősödött ($P < 0,001$).

4. 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).

Válaszom: Egyetértek a bírálóval, a színek alkalmazása több esetben valóban megkönnyítette volna az olvasó számára az adatsorok megkülönböztetését.

5. 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, makrofiton, üledék) között dinamikusán átrendeződik. Ennek következtében a vízoszlop tápanyagkoncentrációja és az arra gyorsan reagáló fitoplankton közösség állapota erősen időfüggővé válik. A makrofiton dominancia időszakában a tápanyagok biomasszába történő beépülése alacsonyabb vízoszlopi koncentrációkat eredményezhet, ami a fitoplankton-alapú minősítés során kedvezőbb ökológiai állapotot jelezhet. Ezzel szemben a makrofiton biomassza lebomlását követően a tápanyagok gyors visszajutása a vízbe intenzív algásodást idézhet elő, ami rövid időn belül az állapot 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 makrofiton 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 makrofiton 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.

Válaszom: Egyetértek a bírálóval abban, hogy a dolgozatban feltárt ökológiai kölcsönhatások hozzájárulhatnak a Víz Keretirányelv szerinti állapotértékelés jobb értelmezéséhez, és ezek részletesebb tárgyalása tovább erősíthette volna a dolgozat gyakorlati alkalmazhatóságát. Ugyanakkor a dolgozat célja nem a Víz Keretirányelv szerinti ökológiai állapotértékelés fejlesztése volt, hanem azoknak az ökológiai mechanizmusoknak a feltárása, amelyek az egyes makrofitoncsoportok dominanciájának kialakulását és ezek alternatív stabil állapotainak fenntartását szabályozzák. Egyetértek abban, hogy e gyakorlati kérdések részletesebb tárgyalása növelte volna a dolgozat alkalmazási lehetőségeit. Ezeknek a mechanizmusoknak a VKI szerinti ökológiai állapotértékelésben betöltött szerepe kétségtelenül fontos kérdés, azonban ennek elemzése már túlmutatna a dolgozat célkitűzésein.

Kérdések

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?

Válaszom: Köszönöm a bíráló értékes kérdését, amely kutatócsoportunkat is régóta foglalkoztatja. Véleményem szerint féltermészetes, kontrollálható vízáramlással kialakított mezokozmosz-rendszerekre lenne szükség annak igazolására, hogy akváiumi kísérletekben meghatározott küszöbértékek mennyire általánosíthatók terepi viszonyok között. Erre kiváló lehetőséget nyújtanának a Wageningen University & Research Sinderhoeven kutatóállomásához hasonló kísérleti csatornák vagy nagyméretű, talajba süllyesztett mezokozmoszok. Ezekben a rendszerekben a magyarországi domináns alámerült és szabadon úszó makrofitonfajokat (4-4 faj) azonos kiindulási biomasszával telepíteném, majd 6 különböző tápanyagterhelési grádiens mellett követném a növényzet (szubmerz és szabadon úszó), az algák és a vízkémiai összetevők változását. A vizsgálat során így meg tudjuk állapítani a stabil állapotok kialakulásához tartozó küszöbértékeket, majd a rákövetkező évben a tápanyagterhelés fokozatos csökkentésével tudnánk ellenőrizni a rendszer hiszterézisének meglétét. A több vegetációs perióduson át tartó féltermészetes kísérletek alkalmasak lennének annak eldöntésére, hogy az akváiumi kísérletekben feltárt kompetíciós mechanizmusok és rendszerátalakulási küszöbértékek milyen mértékben általánosíthatók természetközeli körülmények között.

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 következmény a biológiai folyamatoknak?

Válaszom: Köszönöm bírálóm megjegyzését és kérdését. A pH-val kapcsolatosan valóban nem emeltem ki és nem került egyértelműen megfogalmazásra a pH visszacsatoláson alapuló szabályozó szerepe. Véleményem szerint a dolgozatban bemutatott kísérletekben a magas pH másodlagos biológiai eredetű tényezőnek tekinthető. Kialakulását az intenzív fotoszintézis okozza, a hidrogén-karbonátot hasznosító alámerült makrofitonok és algák szénfelvétele révén.

A kialakuló magas pH ugyanakkor önálló szabályozó tényezővé válik, mivel befolyásolja a tápanyagok (pl. nitrát, foszfát) és mikroelemek felvehetőségét, és ezáltal az alámerült növény- és algafajok úszó növényekkel szembeni kompetíciós viszonyait. A kialakult pH értéke a növények mikrokörnyezetében számos tényezőtől függ, így az alámerült makrofitonok denzitásától, a szabadon úszó növények borításától és árnyékoló hatásától (32. ábra A, C), továbbá a napszaktól, a felhőzet árnyékolásától, a vízhőmérséklettől, a vízáramlások mértékétől és a vízmélységtől is (43. és 45. ábra).

3. A dolgozat eredményei egyértelműen rámutatnak arra, hogy a tápanyagok biológiai megkötése és visszaforgása, valamint a makrofiton 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 érdekes lenne annak megítélése, hogy: indokolt-e a mintavételek időbeli sűrítése vagy szezonális kiterjesztése, illetve milyen módon lehetne ezáltal csökkenteni a minősítési bizonytalanságot.

Válaszom:

Köszönöm a bíráló nagyon fontos kérdését. Vizsgálataim nem irányultak a Víz Keretirányelv szerinti mintavételi stratégia optimalizálására, ezért részemről nem tartanám megalapozottnak bármilyen módszertani ajánlás megadását. Az eredményeim valóban azt sugallják, hogy a mikroalga közösségek összetétele, és dominancia-viszonyai is jelentős mértékben átrendeződhetnek egy adott éven belül. Ez növelheti az ökológiai állapotértékelés bizonytalanságát. Ennek mérséklésére elméletileg a mintavételi gyakoriság növelése jelenthetne megoldást, ennek azonban jelentős költség- és erőforrásigénye van. A mintavételek kiterjesztését más évszakokra azért nem találom jó irányynak, mert a mikroalga közösségek alapján számított indexértékek alapvetően a trofitás becslésére szolgálnak és minden olyan időszakban, amikor a mikroalgák növekedése egyéb okok miatt gátolt (rossz fényviszonyok, alacsony vízhőmérséklet) a mikroalga közösségek nem a tápanyagokra hanem az egyéb limitáló tényezőkre reflektálnak.

A mintavételi protokollok módosításának ugyanakkor adminisztratív és jogi korlátai is vannak. A jelenlegi módszerek uniós interkalibráción estek át. Ennek pozitív szakmai bírálatát követően, az EU Bizottsága hivatalosan elismerte, hogy a nemzeti módszerek immár alkalmasak a felszíni vizek ökológiai állapotértékelésére. Ezt a tényt hivatalos Bizottsági döntés ismerte el (EC 2018. Commission Decision (EU) 2018/229. Official Journal L 47, 21 February 2018.). A létrejött jogi dokumentum növeli a módszerek elfogadottságát, de ugyanakkor kötöttség is, mert a módszereket érintő minden olyan változtatás, ami hatással van a végső indexértékek alakulására csak akkor történhet meg, ha a módosított módszer átmegy az interkalibráció rögzített folyamatán.

Úgy gondolom, hogy a dolgozat legfontosabb hozzájárulása inkább a biológiai minősítések ökológiai értelmezésének pontosításában rejlik. Eredményeim alapján a fitoplankton- és fitobentosz-közösségek változásainak értelmezésekor figyelembe kell venni, hogy azok nem kizárólag a külső tápanyagterhelést tükrözik, hanem érzékenyen reagálnak a makrofitonok árnyékoló hatására és gyors tápanyagfelvétele következtében kialakuló átmeneti tápelem-csökkenésre is.

Nyíregyháza, 2026. július 14.

Dr. Szabó Sándor

