PISCES HUNGARICI

honlap/homepage: http://haltanitarsasag.hu

Minősítési index holtágak halakkal történő ökológiai állapotminősítéséhez

A multimetric fishindex for the ecological assessment of oxbow lakes in Hungary

Sály P.[1], Specziár A.[2], Czeglédi I.[2], Maroda Á.[1,3], Preiszner B.[2], Szalóky Z.[1], Erős T.[2]

[1]*ELKH Ökológiai Kutatóközpont, Budapest*
[2]*ELKH Balatoni Limnológiai Kutatóintézet, Tihany*
[3]*Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Állattani és Ökológiai Tanszék, Gödöllő*

Kulcsszavak: antropogén hatások, élőhely minősége, mintavételi módszerek, vízgyűjtőgazdálkodás, Víz Keretirányelv
Keywords: antropogenic effects, habitat quality, sampling methods, river basin management, Water Framework Directive

Abstract

In accordance with the Water Framework Directive, member states of the European Union assess the ecological status of lakes and rivers with five groups of organisms including fishes. Hungary has no method for bioassessment of lakes with fishes yet. Using fish data collected by gillnetting and electrofishing, and environmental data of oxbow lakes along the Danube River and the Tisza River, a new multimetric fish index was compiled to assess the ecological status of Hungarian oxbow lakes (type Lake 5). Ecological quality ratio computed from the index showed statistically significant relationships with pressures of water pollution, land use modification of the catchment, and hydrogeomorhological modification. The paper presents the index, the procedure that was used for development, and discusses the reliability of the new index.

1. Bevezetés

Az EU Víz Keretirányelvből (VKI, Európai Parlament & Európai Unió Tanácsa 2000) adódó kötelezettségekhez igazodva Magyarországnak is törekednie kell az állóvizek ökológiai minősítéséhez szükséges módszerek kidolgozására, azok alkalmazására. Az állóvizek ökológiai állapotának halak alapján történő értékeléséhez, hazánknak jelenleg nincs a VKI előírásainak megfelelő minősítési eszköze.

Szakértői megítélés szerint a hazai állóvizek többségének minősítésére a halak kevésbé alkalmas minőségi elemek, mint például a fitoplankton. Az állóvizeink nagy része nem természetes eredetű, kialakításukat az elsődleges hasznosítási célok határozták meg, és gyakran folyik rajtuk valamilyen halgazdálkodási hasznosítás (pl. rekreációs horgászat). Ezekben a vizekben az egyéni halgazdálkodási tervek (pl. „pontyos tó'') megvalósításával járó rendszeres haltelepítések, és a halkifogások közvetlenül és számottevő mértékben befolyásolják a halállomány összetételét. Ezért a halállomány sokkal inkább a halgazdálkodás jellegét, mintsem a tavat érő egyéb környezeti hatásokat tükrözi. Az ilyen tavakban a halgazdálkodás tulajdonképpen a vízminőséget (pl. halakkal való zsúfoltság, halak etetése) és a partjelleget (természetes növényzet megváltoztatása, beépítettség) befolyásoló környezeti terhelés (ld. Guidance Document No. 3, Table 3.6, p31). Mivel ebben az esetben az emberi módosítás konkrétan az ökológiai indikátor élőlénycsoportra irányul, a halak indikációs funkciója nehezen általánosítható. Mindez alapvető kihívás elé állítja ökológiai állapotértékelés módszerfejlesztőit.

A hazai állóvíz tipológia 5-ös típusába tartozó folyami holtágak természetes eredetű víztestek. Természetközeli állapotukban a halállományukat a folyó főágával való kapcsolat

(állandó vagy időszakos összeköttetés), avagy a kapcsolat hiánya és a szukcessziós öregedési folyamatok alakítják. Az ilyen kiemelt természeti jelentőségű holtágakban rendszerint nincs halgazdálkodás (pl. Grébeci-Holt-Duna). Ugyanakkor más holtágaink halállománya, a mesterséges tavakhoz hasonlóan, horgászati hasznosítás alatt áll (pl. Bogyiszlói-Holt-Duna).

Vizsgálatunk alapvető célja a hazai holtágak halakkal történő ökológiai állapotértékelésére alkalmas minősítési index kifejlesztése volt. Dolgozatunkban röviden kitérünk a holtágak halállományainak kétféle halászati módszerrel történő mintavételezéséből nyert adatok egymásnak való megfeleltethetőségére, és bemutatunk egy újonnan készített multimetrikus minősítési indexet, illetve annak kidolgozási módszerét.

2. Anyag és módszer

2.1. Adatgyűjtés

2.1.1. Haladatok

A haladatok gyűjtését 2019. május 8-a és 28-a között végeztük, 11 dunai és 11 tiszai holtágon. A holtágak vizsgálatra való kiválasztásakor szempont volt, hogy ártéri (hullámtéri) és mentett oldali holtágak, valamint előzetesen kedvező és kedvezőtlen állapotúnak gondolt holtágak is felmérésre kerüljenek, így a környezeti állapotra vonatkozóan a kiválasztott holtágak széles gradienst fedjenek le.

A halak gyűjtése a VKI ajánlásának megfelelően bentikus kopoltyúhálókkal (nyílt vízi régió), illetve elektromos kutató-halászgéppel (parti régió) történt (Erős et al. 2009; Specziár et al. 2009). A kopoltyúhálós mintavételhez kétféle, szemméret-eloszlásukban eltérő, de összfelületükben azonos méretű, bentikus norvég típusú hálót alkalmaztunk (kis szemű háló: teljes hossza 30 m, magassága 1,5 m, paneleinek száma 12 db, panelek hossza 2,5 m, szemméret panelenként 43, 19,5, 6,25, 10, 55, 8, 12,5, 24, 15,5, 5, 35 és 29 mm; nagy szemű háló: teljes hossza 30 m, magassága 1,5 m, paneleinek száma 4 db, panelek hossza 7,5 m, szemméret panelenként 90, 135, 70, 110 mm).

A hálókat nappal, csónakból raktuk le. A holtáganként kihelyezett hálók számát előzetes terepbejárás után, a holtágak felületi kiterjedése, átlagos mélysége, valamint a hálókezelés idő- és munkaigénye figyelembevételével határoztuk meg (*1. táblázat*). A hálókat a holtág mérete és növényesültsége függvényében igyekeztünk úgy kihelyezni, hogy két szomszédos háló a meder keresztmetszeti síkjában ne fedjen át, nagyobb víztereknél a szomszédos hálók között legalább egy hálóhossznyi hely legyen. A hálónkénti expozíciós idő (a háló kirakásától a beszedéséig eltelt idő) átlagosan 117,4 ∓ 95,5 SD (standard deviáció) perc volt. Az expozíciós idő a helyek között számottevően különbözött, mivel a nagy állománysűrűségű, illetve erősen benövényesült holtágakban a hálók felszedéséhez hosszabb kezelési időre volt szükség. A mintavétel során rögzítésre került a fogott halak fajonkénti egyedszáma, illetve össztömege (gramm biomassza), hálónkénti bontásban, valamint a háló expozíciós ideje.

Az elektromos mintavétel nappal, csónakból, a part mentén összesen 2 × 250 = 500 méter hosszon (GPS vevővel mért megtett út), Hans Grassl IG200/2B (PDC) halászgéppel történt. A mintavételkor a fogott halak fajonkénti egyedszáma került rögzítésre.

2.1.2. Környezeti adatok

A környezeti adatsort az Országos Vízügyi Felügyelőség által rendelkezésünkre bocsátott adatokból, a Corine felszínborítási adatbázisból, illetve a projekt keretében elvégzett terepi adatgyűjtések méréseiből állítottunk össze. Előzetes adatszűrést követően összesen 35 db, potenciális stresszorként ható környezeti változót használtunk, melyek öt stresszor-kategóriába sorolhatók: 1) hasznosítási stresszorok, 2) hidrogeomorfológiai stresszorok, 3) vízgyűjtő-módosítottsági stresszorok, 4) partmódosítottsági stresszorok, 5) vízszennyezési stresszorok (*2. táblázat*).

1. táblázat. A felmért holtágak neve, víztestkódja (WB_code), a holtág szegmensének kódja (WB_segmCode), a felmérési napok, a felmérési helyszínek EOV koordinátái, valamint a kopoltyúhálós mintavételnél alkalmazott hálók száma

Table 1. Name, identifier code for the water body (WB_code) and for the segment of the water body (WB_segmCode) of the surveyed oxbow lakes. Date and EOV_Y, EOV_X are the date of survey and geocoordinates of the survey sites. Last two columns contains the number of the small meshed (Kis szemű hálók száma) and the big meshed gillnets (Nagy szemű hálók száma)

Víztest-kód WB_code	Szegmens-kód WB segmCode	Holtág neve Name	Dátum Date	EOV_Y	EOV_X	Kis szemű hálók száma	Nagy szemű hálók száma
AIH045	ADQ533	Alcsi-Holt-Tisza	2019-05-17	739102	199547	3	2
AOC749	ADQ526	Alpári-Holt-Tisza és Szikra-Holt-Tisza	2019-05-16	722858	164546	3	2
AIH047	ADO730	Atkai-Holt-Tisza	2019-05-15	738589	115944	4	2
ANS483	AIU054	Bátai-Holt-Duna	2019-05-21	630553	90659	3	2
AIH051	ADQ597	Bogyiszlói-Holt-Duna	2019-05-15	632941	116215	5	3
AEQ054	ADP231	Boroszlókerti Holt-Tisza	2019-05-28	900688	310104	3	2
AIH056	ADQ543	Cserőközi Holt-Tisza	2019-05-17	773877	244698	3	0
AOC755	ADQ594	Decsi-Nagy-Holt-Duna	2019-05-09	635604	103943	5	3
AIH066	ADQ598	Faddi-Holt-Duna	2019-05-10	635678	122653	5	3
ANS503	AED413	Grébeci-Holt-Duna	2019-05-08	637296	104153	5	3
AIH081	ADQ600	Kádia-Ó-Duna	2019-05-10	636710	66448	3	2
ANS518	ADO732	Körtvélyesi-Holt-Tisza	2019-05-15	741273	121085	4	2
ANS520	ADQ588	Külső-Béda	2019-05-08	627913	64973	5	3
AEQ058	ADO801	Marótzugi Holt-Tisza	2019-05-22	840667	317862	5	3
AOC755	AIU242	Mocskos-Duna	2019-05-08	628471	69625	3	2
ANS535	ADO792	Nagy-Morotva	2019-05-24	829821	308843	5	3
AIQ011	ADQ603	Nagybaracskai-Holt-Duna	2019-05-10	633824	79502	3	2
AIH108	ADO725	Nagyfai-Holt-Tisza	2019-05-14	743421	106117	4	2
AIH119	AIU376	Riha-tó	2019-05-09	628871	73528	5	2
AIH121	ADO736	Serházzugi-Holt-Tisza	2019-05-16	734143	150999	3	2
AIH130	ADO783	Tiszadobi-Holt-Tisza	2019-05-23	808440	298475	5	3
AIH136	AIU388	Tolnai-Északi-Holt-Duna	2019-05-16	634490	121989	5	3

A hasznosítási stresszorváltozók közül a természetvédelmi területen való elhelyezkedés (NatureConsOVF), és a Natura2000-es területen való elhelyezkedés (Natura2000OVF) hatása pozitív stresszként (ökológiai eustressz) értékelendő. Tehát e változóknál a hatás hiánya ökológiailag semleges, vagy kedvezőtlen, a hatás megléte semleges vagy kedvező. A hidrogeomorfológiai stresszoroknál a holtág mentett ártéri oldalon való elhelyezkedése kedvezőtlen, míg az ártér vízjárta oldalán (hullámtér) való elhelyezkedése kedvező (Category változó); a holtág főággal való kapcsoltságának hiánya kedvezőtlen, míg megléte kedvező (ConnectivitySA változó) állapotot jelent.

A vízgyűjtő-módosítottsági változók képzéséhez a Corine felszínborítási adatbázist használtuk. A három számjeggyel kódolt felszínborítási típusok GIS környezetben a holtágak körüli 500 méteres pufferzónán belül kerültek leválogatásra. A felszínborítási típusok pufferzónán belüli százalékos arányából képeztük a stresszorváltozókat. A LandUse1 index specifikusan a legelő, gabonaföld, és az urbanizált területeket (Böhmer et al. 2004), míg a LandUse2 index általánosan a mezőgazdasági és lakott területeket veszi figyelembe.

2.2. Adatfeldolgozás

2.2.1. A kétféle mintavételi módszer megfeleltethetőségi vizsgálata

A minősítési index kidolgozása előtt, a kopoltyúhálóval (GN) és az elektromos halászattal (EF) gyűjtött minták egymásnak való megfeleltethetőségét abból a célból vizsgáltuk, hogy felmérjük, vajon elegendő-e csupán az egyik mintavételi módszer a halállomány összetételének megismeréséhez, és így a minősítési index fejlesztéséhez. A megfeleltethetőségi vizsgálatot adott holtágon egyik és másik módszerrel fogott fajszám és fajkészlet összehasonlításával végeztük. A fajszám összehasonlításához páros t-próbát, a

fajkészlet összehasonlításához Jaccard-féle hasonlósági indexet használtunk. A két módszer egymásnak való tökéletes megfeleltethetősége esetén az adott holtágból vett páros minták fajszámkülönbsége 0, Jaccard-féle hasonlósága pedig 1 (statisztikai nullhipotézis).

2. táblázat. A halállományra potenciálisan stresszorváltozóként ható környezeti változók
Table 2. Environmental variables supposed to act as pressures on fishes

Hasznosítási stresszorok (5 db)	Stresszor-típus	Leírás
NatureConsOVF	faktor [2 szint]	Természetvédelmi területen van-e
Natura2000OVF	faktor [2 szint]	Natura2000 területen van-e
FisheryOVF	faktor [2 szint]	Halgazdálkodás folyik-e rajta
RecreationOVF	faktor [2 szint]	Rekreációs hasznosításban van-e
WaterStorageOVF	faktor [2 szint]	Víztározásra használt-e
Hidrogeomorfológiai stresszorok (2 db)		
Category	faktor [2 szint]	Ártéri vagy mentett oldali elhelyezkedés
ConnectivitySA	faktor [2 szint]	Legalább részlegesen összeköttetésben van-e a holtággal
Vízgyűjtő-módosítottsági stresszorok (4 db)		
InhabAreasPerc	numerikus [% összeg]	ClC112% + CLC121% + CLC124% + CLC142%
AgricultAreasPerc	numerikus [% összeg]	CLC211% + CLC222% + CLC231% + CLC242% + CLC243%
LandUse1	numerikus [% összeg]	1×CLC231% + 2×CLC211% + 4×(CLC112%, CLC121%, CLC142%)
LandUse2	numerikus [% összeg]	1×AgricultAreasPerc +4×InhabAreasPerc
Partmódosítási stresszorok (4 db)		
NoCover	numerikus [%]	Partszegély feletti falombozati árnyékoltság
SparseCover	numerikus [%]	Partszegély feletti szaggatott (<33%) falombozati árnyékoltság
DenseCover	numerikus [%]	Partszegély feletti egyenletes (>33%) falombozati árnyékoltság
NumVegZones	numerikus [integer]	Partszegélyben levő vegetációs zónák száma (1-től 4-ig)
Vízszennyezési stresszorok (20 db)		
Ammónium	numerikus [mg dm^{-3}]	-
Arzén	numerikus [µg dm^{-3}]	-
BOI5	numerikus [mg dm^{-3}]	-
Cink	numerikus [µg dm^{-3}]	-
Foszfor (összes)	numerikus [mg dm^{-3}]	-
Klorofill-a	numerikus [µg dm^{-3}]	-
KOIkr	numerikus [mg O_2 dm^{-3}]	-
KOIps	numerikus [mg O_2 dm^{-3}]	-
Króm	numerikus [µg dm^{-3}]	-
Mangán	numerikus [µg dm^{-3}]	-
Nikkel	numerikus [µg dm^{-3}]	-
Nitrát	numerikus [mg dm^{-3}]	-
Nitrit	numerikus [mg dm^{-3}]	-
Ortofoszfát	numerikus [mg dm^{-3}]	-
Összes nitrogén	numerikus [mg dm^{-3}]	-
Szerves nitrogén	numerikus [mg dm^{-3}]	-
Szilícium	numerikus [µg dm^{-3}]	-
Szulfát	numerikus [mg dm^{-3}]	-
Vas	numerikus [µg dm^{-3}]	-
Vezetőképesség	numerikus [µS cm^{-1}]	-

Az előzetes vizsgálat eredménye arra utalt, hogy a hazai holtágak ökológiai célú halállomány-felmérésére önmagában sem az elektromos, sem a kopoltyúhálós mintavétel

nem tűnik elegendőnek (*F1 függelék*). Ezért az index fejlesztésekor a potenciális stresszorok és a halegyüttes-szerkezeti jellemzők (*metrics*) közötti kapcsolatok feltárásához mind a GN, mind az EF módszerrel vett mintákat figyelembe kell venni. Számos halegyüttes-szerkezeti mutatót, elsősorban a fajszámokkal kapcsolatosakat, a két módszerrel gyűjtött adatok összevonásával képzett (módszer-kombinált) teljes mintából célravezető kiszámítani.

2.2.2. Minősítési index összeállítása

2.2.2.1. Metrikák

Az elektromos és kopoltyúhálós mintavételek előzetes megfeleltethetőségi vizsgálatának eredményéhez igazodva, az index összeállításhoz a fogási adatokat négy csoportba rendeztük: 1) elektromos halászati adatok, EF [inds × 500 m^{-1}], 2) kopoltyúhálós adatok, GN [inds × net^{-1} × $hour^{-1}$], 3) elektromoshalászati és kopoltyúhálós összevont adatok, EFandGN [ind × (500 m^{-1}) + (net^{-1} × $hour^{-1}$)], 4) kopoltyúhálós biomassza adatok, GNbiomass [g × net^{-1} × $hour^{-1}$]. Ez csoportonként négy táblázatot jelentett, melyeknek soraiban a holtágak, oszlopaikban a fajok szerepeltek.

A metrikák készítéséhez a fajok biológiai jellemzői (*traits*) közül 34 darabot vettünk figyelembe. Ezek közül 30 db a vízfolyások minősítésére kidolgozott HMMFI index-család készítésénél is használva volt (Sály & Erős 2016), további négy pedig az EFI+ indexből (EFI+ Consortium 2009, 4. függelék) lett átvéve. A biológiai jellemzőkre vonatkozóan kiszámítottuk a fajszám (sn), a relatív fajszám (rsn), és a relatív abundancia (ra) metrikákat (3 × 34 = 102 db metrika). Ezek mellett további 13 olyan metrikát is képeztünk, melyek a holtágak karakterfajaival, a természetesen honos és idegenhonos fajok arányaival, valamint a halállomány taxon-, táplálkozási-, és szaporodási diverzitásával kapcsolatosak (*F2 függelék*, *F2.1. táblázat*). Mindezen metrikákat külön-külön összeállítottuk az EF, a GN, és az EFandGN adatokból is (3 × 115 = 345 db metrika), amihez – leszámítva az idegen halfajokkal kapcsolatos metrikákat –, csak a természetesen honos fajokat használtuk fel. Végül a GNbiomass adatokból nyolc darab biomassza-metrikát képeztünk. A teljes folyamat összesen 3 × 115 + 8 = 353 darab metrikát eredményezett (index-metrika jelöltek).

A holtágak karakterfaj-készletét Pehlivanov és munkatársai (2017) közleményéből, módosítva vettük át. Elhagytuk a nálunk idegenhonos és inváziós ezüstkárászt (*Carassius gibelio*), valamint a kiemelt halgazdálkodási jelentőségű pontyot (*Cyprinus carpio*). Bár a pontyot természetesen honos fajnak tekintjük, az általános telepítések miatt az állományokról nehezen eldönthető, hogy azok hányad része származik természetes szaporulatból, és mennyi a telepítésekből. Ugyanakkor beemeltük a szivárványos öklét (*Rhodeus amarus*), amely állóvizeinkben általános elterjedésű, természetesen honos faj. Ennek eredményeként összesen 14 fajt soroltunk a hazai holtágakra nézve jellegzetes, karakterfaj kategóriába: dévérkeszeg (*Abramis brama*), szélhajtó küsz (*Alburnus alburnus*), karikakeszeg (*Blicca bjoerkna*), széleskárász (*Carassius carassius*), csuka (*Esox lucius*), vágódurbincs (*Gymnocephalus cernua*), réticsík (*Misgurnus fossilis*), csapósügér (*Perca fluviatilis*), szivárványos ökle (*Rhodeus amarus*), bodorka (*Rutilus rutilus*), süllő (*Sander lucioperca*), vörösszárnyú keszeg (*Scardinius erythrophthalmus*), lesőharcsa (*Silurus glanis*), compó (*Tinca tinca*).

2.2.2.2. Metrikák szűrése

Az index-metrika jelöltek indikációs jelentőségét a metrikák adatértékeinek eloszlása (terjedelem-vizsgálat, *range test*) és a stresszor-változókkal való statisztikai kapcsolatuk (válaszkészség-vizsgálat, *responsiveness test*) alapján értékeltük (Hering et al. 2006; Whittier et al. 2007), hogy szűkítsük a halindexhez potenciálisan felhasználható metrikák körét. Az index-metrika jelöltek nagy száma miatt a metrikák számának csökkentése önkényesen választott adatminőségi szempontok szerinti zajlott.

A terjedelem-vizsgálatban kis diszkriminációs erejű (stresszor-változókra vonatkozóan nem releváns), illetve számítási nehézségeket jelentő metrikának tekintettük azokat, melyek

- egyedi adatértékeinek száma kevesebb volt, mint öt (a holtágak durván 25%-a);

- leggyakoribb egyedi adatértéke 15 vagy több volt (a holtágak durván 70%-ára azonos érték);
- kiugró adatértékeinek száma 11 vagy több volt (a holtágak 50%-a);
- ∞ vagy −∞ adatértékeinek száma (0-val való osztás a számítógépen) több, mint 1 volt (a holtágak durván 5%-a).

E kritériumok alapján 179 metrikát tartottunk meg a további vizsgálatokhoz.

A válaszkészség-vizsgálat faktor stresszor esetén variancia-elemzéssel (ANOVA) és Kruskal–Wallis teszttel történt. Az összehasonlított metrika–faktor stresszor párok (összesen 1790 db) közül további elemzésre alkalmas, statisztikailag szignifikáns kapcsolatoknak azokat tekintettük, melyekre az alábbi két feltétel együtt teljesült:

- ANOVA p-értéke ≤ 0,05 volt;
- Kruskal–Wallis teszt p-értéke ≤ 0,01 volt.

E szűrési feltétel alapján 43 db metrika–faktor stresszor kapcsolatot azonosítottunk. Numerikus stresszorok esetén a válaszkészség-vizsgálathoz egyszerű lineáris regressziót és Spearman-féle rangkorrelációt alkalmaztunk. Az összehasonlított metrika–numerikus stresszor párok (összesen 4833 db) közül további elemzésre alkalmas statisztikailag szignifikáns kapcsolatoknak azokat tekintettük, melyekre az alábbi három feltétel együtt teljesült:

- a lineáris regresszió meredekségi együtthatójának t-tesztjében a p-érték ≤ 0,05 volt;
- a rang korrelációs együttható p-értéke ≤ 0,01 volt;
- a rangkorrelációs együttható abszolút értéke $\rho_S \geq 0{,}6$ volt.

Ez a kritérium 23 db érdemi metrika–numerikus stresszor kapcsolatot azonosított. A válaszkészség-vizsgálat tehát összességében 43 + 23 = 66 db potenciális indikációs jelentőségű metrika–stresszor kapcsolatot tárt fel, melyekben 21 db metrika szerepelt.

2.2.2.3. Metrika–stresszor kapcsolatok validálása

A metrikák szűrésével azonosított potenciális indikációs jelentőségű metrika–stresszor kapcsolatok (66 db) felülvizsgálata három szempontot követett: 1) az adott kapcsolat szakmailag értelmezhető (stresszor hatására a metrika változása környezeti, illetve hidrobiológiai ismeretekkel magyarázható); 2) a szakmailag értelmezhető kapcsolatok statisztikailag jelentősek (metrika stresszor-specificitásának igazolása); és 3) a metrika értékkészlete a stresszorhatásra vonatkozó elkülönítő hatékonysággal rendelkezik (metrika stresszor-érzékenységének igazolása). A felülvizsgálat célja, az ökológiailag értelmezhető metrika–stresszor kapcsolatok statisztikai validálása, ezáltal az index összeállításához felhasználható kulcsponti metrikák (*core metrics*) kiválogatása volt.

A metrika–stresszor kapcsolatok szakmai értelmezhetőségéről az adatok eloszlásának vizuális vizsgálata alapján döntöttünk. Az értelmezhető kapcsolatok statisztikai jelentőségét a faktor stresszorokkal kapcsolatban levő metrikák esetén ANOVA-val, a numerikus stresszorokkal kapcsolatban levő metrikáknál egyszerű lineáris regresszióval ellenőriztük.

A statisztikailag is érvényes metrika–stresszor kapcsolatokban szereplő metrikák értékkészletét tartományokra osztottuk (metrika értékkészlet-csoportok, MÉKCs). Ha egy metrika több stresszorral is kapcsolatban volt, akkor az értékkészlet-csoportok kialakításához a metrikával statisztikailag legszorosabb kapcsolatot mutató stresszort alkalmaztuk. A MÉKCs-ok határait vizuális eloszlásvizsgálattal úgy állapítottuk meg, hogy a stresszor-változó értékei a MÉKCs-ok között minél inkább különbözzenek. A MÉKCs-ok stresszor-érzékenységét faktor stresszoroknál kontingencia-tábla elemzéssel (függetlenségvizsgálat chi-négyzet teszttel, 2000 ismétléses szimulált p-értékkel), numerikus stresszoroknál kétmintás t-teszttel (Welch-próba) igazoltuk (Reiczigel et al. 2007). Az értékkészlet-csoportok kialakítása iteratívan zajlott; azt az értékkészlet-csoport felosztást véglegesítettük, melynél a validációs tesztek a legerősebb különbséget mutatták

az értékkészlet-csoportok között, törekedve arra, hogy az értékkészlet-csoportokba eső holtágak száma (mintanagyság) ne különbözzön túlságosan (kiegyensúlyozottság).

A metrika–stresszor kapcsolatok felülvizsgálata összesen 13 db szakmailag és statisztikailag érvényesnek tartott kapcsolatot igazolt (*3. táblázat*), melyekben tíz egyedi metrika szerepelt. Ezen felül egy további metrikát, a nem természetesen honos fajok elektromos halászati adatokban levő relatív abundanciáját (EF NN.ra) szintén releváns metrikának tekintettünk, mivel az idegenhonos, illetve inváziós fajokkal erősen terhelt holtágak nem tekinthetők ökológiailag érintetlennek. Az idegen halfajok relatív tömegességének figyelembevételéhez azért az elektromos halászati adatokat tartottuk célravezetőbbnek a GN, illetve az EFandGN adatokkal szemben, mert a parti régióban a bentikus idegenhonos fajok (pl. törpeharcsa, gébek) jobban foghatók, mint a nyílt víztérben, és a relatív mennyiségük várhatóan kevésbé hígul fel a tömeges természetesen honos fajok (pl. küsz, keszegfajok) fogása miatt. Mindezek eredményeként 11 egyedi metrikát azonosítottunk az indexbe történő beépítésre alkalmas kulcsponti metrikaként.

3. táblázat. Szakmailag és statisztikailag érvényesnek elfogadott metrika–stresszor kapcsolatok. Az F tesztek numerikus stresszor esetén lineáris regresszióból, faktor stresszor esetén ANOVA-ból származnak. A lefelé és felfelé mutató nyilak a stresszorra adott csökkenő, illetve növekvő választ jelzik

Table 3. Ecologically sense and statistically significant metric—pressure relationships (results form general linear models). Arrows pointing upwards and downwards denote expected change of the metric under pressure

Metrika	Stresszor	Stresszor-típus	Stresszor-válasz	F stat	Df	p	R^2
EF INV_PIS.rsn	Foszfor (összes)	numerikus	↓	8,78	1, 20	0,007	0,31
GN BEN.rsn	Vezetőképesség	numerikus	↑	10,92	1, 20	0,004	0,35
GN N.sn	AgricultAreasPerc	numerikus	↓	11,86	1, 20	0,003	0,37
GN OMN.sn	LandUse1	numerikus	↓	10,93	1, 20	0,004	0,35
GN SPEC.sn	AgricultAreasPerc	numerikus	↓	21,54	1, 20	<0,001	0,52
EFandGN INTOLhabdeg.rsn	Szilícium	numerikus	↓	15,00	1, 20	<0,001	0,43
EFandGN INTOLhabdeg.rsn	ConnectivitySA	faktor	↑	16,88	1, 20	<0,001	0,46
EFandGN INTOLtoTOL	AgricultAreasPerc	numerikus	↓	12,79	1, 20	0,002	0,39
EFandGN INV_PIS.ra	Foszfor (összes)	numerikus	↓	4,38	1, 20	0,049	0,18
EFandGN PHY.ra	Klorofill-a	numerikus	↑	5,89	1, 20	0,025	0,23
EFandGN SPEC.sn	Category	faktor	↓	9,19	1, 20	0,007	0,31
EFandGN SPEC.sn	Natura2000OVF	faktor	↑	15,01	1, 20	<0,001	0,43
EFandGN SPEC.sn	ConnectivitySA	faktor	↑	15,41	1, 20	<0,001	0,44

EF: elektromos mintavételi adatokból, GN: kopoltyúhálós mintavételi adatokból, EFandGN: elektromos halászati és kopoltyúhálós összevont adatokból számolt metrika. INV_PIS.rsn: apróállat- és halevők relatív fajszáma; BEN.rsn: bentikus fajok relatív fajszáma; N.sn: természetesen honos fajok száma; OMN.sn: omnivor fajok száma; SPEC.sn: specialista fajok száma; INTOLhabdeg.rsn: élőhelyromlásra érzékeny fajok relatív fajszáma; INTOLtoTOL: intoleráns fajok toleráns fajokhoz viszonyított aránya; INV_PIS.ra: apróállat- és halevők relatív abundanciája; PHY.ra: növényzetre ívó (fitofil) fajok relatív abundanciája.

EF: metric computed from electrofishin data, GN: metric computed from gillnetting data, EFandGN: metric computed from electrofishing and gillnetting data pooled. INV_PIS.rsn: relative species number of invertivore—piscivore species; BEN.rsn: relative species number of benthic species; N.sn: species number of native species; OMN.sn: species number of omnivor species; SPEC.sn: species number of specialist species; INTOLhabdeg.rsn: relative species number of speicies intolerant to habitat degradation; INTOLtoTOL: ratio of intolerant to tolerant species; INV_PIS.ra: relative abundance of invertivore—piscivore species; PHY.ra: relative abundance of phytophil species

2.2.2.4. Metrika értékkészlet-csoportok pontozása

A MÉKCs-hoz történő pontszám-rendelés (*scoring*) alapelve az volt, hogy az a MÉKCs, melyben a metrikával statisztikai kapcsolatban levő stresszor-változó értéke kedvezőtlen, kapjon alacsony pontszámot, melyben pedig kedvező, kapjon magasabb pontszámot. Mivel minden kulcsponti metrika csak kettő MÉKCs-ra lett felosztva, így a kedvezőtlenebb stresszorállapot MÉKCs-ja 1, a kedvezőbbé 2 pontot kapott (*4. táblázat*).

2.2.2.5. Metrikák súlyozása

A metrikák súlyozásának (*weighting*) célja a velük kapcsolatban álló stresszor-változók hatásának ökológiai minőségi állapotban való jelentőségének beállítása volt. A súlyok

beállítása iteratív folyamatban zajlott, mely a kulcsponti metrikák, a stresszorok közti viszonyok, és az aktuális súlyozással kiszámított ökológiai minőségi hányados (EQR érték) és a stresszorok viszonyának vizsgálatát tartalmazta. A súlyozási rendszer kialakításánál szem előtt tartottuk: a kulcsponti metrikákkal kapcsolatban levő stresszorok milyen stresszor-típust képviselnek, mennyire szoros a metrikával való kapcsolatuk, adott stresszor hány kulcsponti metrikával függ össze, és azt is, hogy a metrika adott MÉKCs felosztása hány stresszorral függ össze. Összességében, olyan súlyozási rendszer kialakítására törekedtünk (*4. táblázat*), mely több stresszor-típus stresszor-változóival is összefüggő EQR-t adott.

4. táblázat. A multimetrikus indexet alkotó kulcsponti metrikák (core metrics), értékkészlet-csoportjai (MÉKCs), az értékkészlet-csoportok pontszámai (scores), és a metrikákhoz rendelt súlyok (weights). Az első oszlop (i) a metrikák sorszámát jelzi

Table 4. Core metrics of the new index, bins of the metric values with the associated score, and the weight of the metric

i	Metrika	MÉKCs (*bin*)	Pontszám (*score*)	Súly (*weight*)
1	EF INV_PIS.rsn	[0.00, 0.05]	1	1
		(0.05, 1.00]	2	
2	GN BEN. rsn	[0.00, 0.42]	2	2
		(0.42, 1.00]	1	
3	GN N.sn	[0, 8]	1	1
		(8, ∞]	2	
4	GN OMN.sn	[0, 4]	1	1
		(4, ∞]	2	
5	GN SPEC.sn	[0, 2]	1	1
		(2, ∞]	2	
6	EFandGN INTOLhabdeg.rsn	[0.00, 0.07]	1	1
		(0.07, 1.00]	2	
7	EFandGN INTOLtoTOL	[0.000, 0.227]	1	1
		(0.227, 1.000]	2	
8	EFandGN INV_PIS.ra	[0.00, 0.02]	1	2
		(0.02, 1.00]	2	
9	EFandGN PHY.ra	[0.00, 0.07]	2	2
		(0.07, 1.00]	1	
10	EFandGN SPEC.sn	[0, 2]	1	2
		(2, ∞]	2	
11	EF NN.ra	[0.00, 0.15]	2	2
		(0.15, 1.00]	1	

EF: elektromos mintavételi adatokból, GN: kopoltyúhálós mintavételi adatokból, EFandGN: elektromos halászati és kopoltyúhálós összevont adatokból számolt metrika. INV_PIS.rsn: apróállat- és halevők relatív fajszáma; BEN.rsn: bentikus fajok relatív fajszáma; N.sn: természetesen honos fajok száma; OMN.sn: omnivor fajok száma; SPEC.sn: specialista fajok száma; INTOLhabdeg.rsn: élőhelyromlásra érzékeny fajok relatív fajszáma; INTOLtoTOL: intoleráns fajok toleráns fajokhoz viszonyított aránya; INV_PIS.ra: apróállat- és halevők relatív abundanciája; PHY.ra: növényzetre ívó (fitofil) fajok relatív abundanciája; NN.ra: idegenhonos fajok relatív abundanciája.

EF: metric computed from electrofishin data, GN: metric computed from gillnetting data, EFandGN: metric computed from electrofishing and gillnetting data pooled. INV_PIS.rsn: relative species number of invertivore–piscivore species; BEN.rsn: relative species number of benthic species; N.sn: species number of native species; OMN.sn: species number of omnivore species; SPEC.sn: species number of specialist species; INTOLhabdeg.rsn: relative species number of speicies intolerant to habitat degradation; INTOLtoTOL: ratio of intolerant to tolerant species; INV_PIS.ra: relative abundance of invertivore–piscivore species; PHY.ra: relative abundance of phytophil species; NN.ra: relative abundance of non-native species.

2.2.3. Minősítési index verifikálása

Azt ellenőrizendő, hogy az összeállított index a megalkotása okán elvárt viselkedést (kedvezőtlen stresszorhatás növekedésével a minősítés eredménye gyengül) mutatja-e, megvizsgáltuk, hogy a fejlesztési adatsorban levő holtágak minősítésével kapott EQR értéknek milyen a statisztikai kapcsolata a kulcsponti metrikákkal összefüggésben levő stresszorokkal. Az összefüggés-vizsgálathoz numerikus stresszorok esetén Pearson-féle

korrelációt, faktor stresszorok esetén kétmintás t-tesztet (Welch-próba) használtunk. Minden adatelemzés R környezetben készült (R Core Team 2021).

3. Eredmények

3.1. Multimetrikus halindex

A holtágak ökológiai állapotának halak alapján történő minősítésére készített új multimetrikus halindex (*Hungarian Multimetric Fish Index for Oxbow-lakes*, HMMFIfO, „háemifo") a minősítendő minta adatai alapján egy pontszámot ad eredményül ($HMMFIfO_{sampleScore}$). Ez a pontszám a kulcsponti metrikák súlyozott összege (*Eq 1*). A pontszám minimum értéke ($HMMFIfO_{min}$) 16, maximum értéke ($HMMFIfO_{max}$) 32. Bár a $HMMFIfO_{sampleScore}$ érték kvantitatívan jellemzi az ökológiai állapotot, más módszerekkel végzett minősítés eredményével való közvetlen összehasonlítására nem alkalmas. Az összehasonlíthatóságot a $HMMFIfO_{sampleScore}$ értékkészletének terjedelemmel (maximum és minimum közötti különbség) való skálázása (standardizálás) biztosíthatja, ami a minta pontszámát [0, 1] intervallumba eső ökológiai minőségi hányadossá (EQR) alakítja (*Eq 2*). Az EQR 0 értéke rossz halegyüttes-szerkezetet, 1 értéke a referencia állapotra jellemző halegyüttes-szerkezetet jelez. Az EQR értékre vonatkozó határérték-rendszer alapján a minta minősége ökológiai minőségi osztályba (*Ecological Quality Class*, EQC) sorolható, amely kvalitatív formában jellemzi a holtág ökológiai állapotát (*5. táblázat*).

A HMMFIfO index pontszámának számítási formulája:

$$\mathrm{HMMFIfO}_{sampleScore} = \sum_{i=1}^{m} w_i \times s(M_i) \qquad \text{(Eq 1)}$$

melyben $HMMFIfO_{sampleScore}$ a mintára kiszámított HMMFIfO index pontszáma; m az indexben szereplő metrikák száma ($m = 11$); w_i az i metrika súlya; $s(M_i)$ az i metrika mintabeli értéktől függő pontszáma; M_i az i metrika mintabeli értéke (pl. a specialista fajok száma a GN adatsorban).

Az EQR érték számítási formulája:

$$EQR_{sample} = \frac{\mathrm{HMMFIfO}_{sampleScore} - \mathrm{HMMFIfO}_{min}}{\mathrm{HMMFIfO}_{max} - \mathrm{HMMFIfO}_{min}} \qquad \text{(Eq 2)}$$

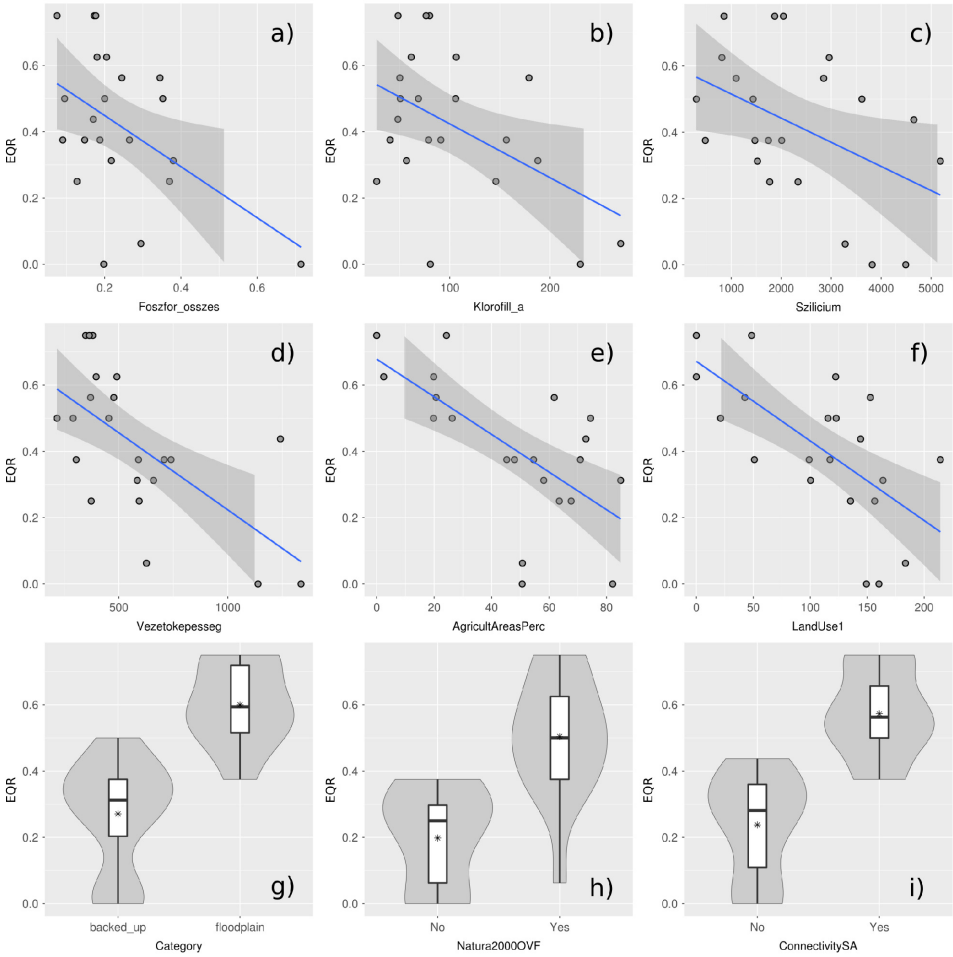
ahol EQR_{sample} a minta EQR értéke; $HMMFIfO_{sample}$ a mintára kiszámított HMMFIfO index pontszáma; $HMMFIfO_{min}$ a HMMFIfO index értékkészletének minimuma: 16; $HMMFIfO_{max}$ a HMMFIfO index értékkészletének maximuma: 32.

5. táblázat A minősítendő holtágak ökológiai minőségi osztályba (EQC) történő besorolása az ökológiai minőségi hányados (EQR) értékének ismeretében
Table 5 Boundaries of the EQR values to convert the ratio-scaled ecological status to semi-quantitatve-scaled Ecological Quality Classes (EQC)

EQR értékintervallum	Minőségi osztály (Ecological Quality Class)
(0,8, 1,0]	kiváló (high)
(0,6, 0,8]	jó (good)
(0,4, 0,6]	mérsékelt (moderate)
(0,2, 0,4]	gyenge (poor)
[0,0, 0,2]	rossz (bad)

A fejlesztési adatsorban levő holtágak minősítésének EQR értéke (*F2 Függelék*, *F2.2. táblázat*) a kulcsponti metrikákkal összefüggő mind a hat numerikus stresszorral szignifikáns negatív korrelációt mutatott. Az EQR az összes foszfor, a klorofill-a és a Szilícium stresszorokkal gyengébben ($r = -0{,}48 - [-0{,}45]$), a Vezetőképesség, az a mezőgazdasági területek aránya (AgricultAreasPerc) és az 1-es felszínhasználati index (LandUse1) stresszorokkal erősebben ($r = -0{,}64 - [-0{,}69]$) függött össze (*6. táblázat*, *1.*

ábra). Hasonlóképpen, az EQR átlaga (becsült várható értéke) mindhárom faktor stresszornál szignifikánsan különbözött a faktor szintjei között. A szintek közötti hatásnagyság (csoportátlagok különbségének abszolút értéke, $\bar{x}_{diff}$) mind a három faktor esetén közel azonos mértékű, 0,31 – 0,34 volt (*7. táblázat*, *1. ábra*).



1. ábra. A fejlesztési adatsorban levő holtágminősítések EQR eredményének kapcsolata a kulcsponti metrikákkal összefüggésben levő stresszorokkal. Numerikus stresszorok esetén a vastag folytonos vonal a várható értéket, a szürke sáv a várható értékre vonatkozó 95%-os konfidenciasávot jelzi. Faktor stresszoroknál a hegedűábrákon levő csillag (*) az átlagot, a dobozdiagramokban levő vízszintes vastag vonal a mediánt jelöli. A stresszor változók leírása a 2. táblázatban található

Fig. 1. Relationships between the EQR and the pressures associated with the core metrics. Thick solid lines denotes the expected value, the grey error band is the 95% confidence interval of the mean. On the violin plots, the asterisk (*) denotes the mean, the horizontal thick solid line the median. Description of the pressures can be found in Table 2

6. táblázat. A fejlesztési adatsorban levő holtágminősítések EQR eredménye és a kulcsponti metrikákkal összefüggő numerikus stresszorok közötti korrelációk. Az utolsó két oszlopban a korrelációs együttható (r) becslésére vonatkozó 95%-os konfidencia intervallum alsó és felső határa található

Table 6. Pearson correlations between the EQRs and numeric pressure variables associated with the core metrics of the index

Stresszor	*t*	df	*p*	*r*	95%CI$_{low}$	95%CI$_{up}$
Foszfor (összes)	–2,459	20	0,023	–0,48	–0,75	–0,08
Klorofill-a	–2,439	20	0,024	–0,48	–0,75	–0,07
Szilícium	–2,.278	20	0,034	–0,45	–0,73	–0,04
Vezetőképesség	–3,707	20	0,001	–0,64	–0,84	–0,30
AgricultAreasPerc	–4,235	20	<0,001	–0,69	–0,86	–0,37
LandUse1	–4,223	20	<0,001	–0,69	–0,86	–0,37

7. táblázat. A fejlesztési adatsorban levő holtágminősítések EQR eredményének a kulcsponti metrikákkal összefüggő faktor stresszorok szintjei közötti különbségei

Table 7. Effect sizes ($\bar{x}_{diff}$) in the EQR of the two-level factor pressures associated with the core metrics of the index

Stresszor	*t*	df	*p*	$\bar{x}_{diff}$	95%CI$_{low}$	95%CI$_{up}$
Category	–5,266	19,833	<0,001	–0,33	–0,46	–0,20
Natura2000OVF	–3,833	10,287	0,003	–0,31	–0,48	–0,13
ConnectivitySA	–5,266	17,508	<0,001	–0,34	–0,47	–0,20

Az ötödik oszlopban az EQR-nak a faktorok első szintjében levő átlaga és a második szintjében lévő átlaga közötti különbség ($\bar{x}_{diff}$) szerepel. A Category esetén az első szint a 'mentett oldali elhelyezkedés', a második az 'ártéri (hullámtéri) elhelyezkedés'; Natura2000OVF esetén az első szint a 'nem Natura2000-es terület', a második szint a 'Natura2000-es terület'; a ConnectivitySA esetén az első szint a 'nincs konnektivitás' a második 'van konnektivitás'. Az utolsó két oszlopban a faktor stresszor két szintjére becsült EQR várható értékek különbségére vonatkozó 95%-os konfidenciaintervallum alsó és felső határa található.

$\bar{x}_{diff}$ is the difference between the means of the first and the second level of the factor stressor. In case of Category, the first level is the location on the protected side of the dyke. the second level is the location on the flooded side of the dyke. In case of Natura2000OVF, the first level is the location on non-Nature2000 area, whereas the second level is the location on Nature2000 area. As for ConnectivitySA, the first level means no connectivity, the second levels means there is connectivity. 95%CI$_{low}$ and 95%CI$_{up}$ are the lower and upper endpoint of the 95% confidence interval of the $\bar{x}_{diff}$.

3.2. Sajátos minősítési esetek

Sajátos esetként jelentkezik az olyan holtágak minősítése, melyekből nem sikerül halakat kimutatni, vagy amelyekből csak idegenhonos halfajok kerülnek elő. Az index alapfeltételezése, hogy a minősítendő holtágakban élnek halak. Ezért ha halat nem sikerül kimutatni, akkor az index félrevezetően viselkedik: a metrikák pontozási rendszere alapján kiszámított HMMFIfO$_{sampleScore}$ pontszám értéke 22, az EQR 0,375, a EQC 'gyenge'. Ez értelemszerűen megtévesztő eredmény, ezért amennyiben a halak hiányának okaként jogosan feltételezhető a környezeti leromlás, akkor az ökológiai állapotot célszerű 'rossz' minőségi osztályként megjelölni. Ha a halak hiányának oka bizonytalan, akkor az indexszel történő minősítés értelmetlen.

Kizárólag idegenhonos halfajokat tartalmazó felmérés előállhat olyan formában, hogy csak a kopoltyúhálós, csak az elektromos, avagy mindkét módszerrel fogtak idegen halakat. Ha az idegenhonos fajok csak a GN adatsorban szerepelnek akkor a hatásuk a metrikák pontozási rendszerében nem jelentkezik, így ekkor a HMMFIfO$_{sampleScore}$ pontszám, az EQR, és a EQC azonos a halat nem tartalmazó speciális esettel. Ellenben, ha az idegen halfajokat csak az EF, avagy az EF és GN módszerrel is fogták, akkor a HMMFIfO$_{sampleScore}$ pontszám értéke 20, az EQR 0,25, a EQC pedig 'gyenge'. Előállhat olyan helyzet, amikor ezekhez az értékekhez képest egy csak természetesen honos fajokból álló mintának kisebb HMMFIfO$_{sampleScore}$ pontszáma adódik. Ez szintén félrevezető, mert egy olyan holtág, amiben csak természetesen honos fajok vannak kedvezőbb ökológiai állapotú, és így magasabb minőségi pontszámot érdemel, mint egy olyan holtág, amelyben csak idegenhonos halak vannak. Ezért az olyan sajátos esetekben, ahol a mintavétel kizárólag idegenhonos fajokat eredményezett tekintet nélkül arra, hogy melyik módszerrel lettek azok begyűjtve,

automatikusan a HMMFIfO lehetséges minimum pontszámát (16) célszerű hozzárendelni a minősítendő holtághoz. Így a minősítés EQR értéke 0, EQC osztálya 'rossz'.

3.3. Legkevésbé módosított (referencia) holtágak

A vizsgálat során referencia állapotú holtágakat az adatfeldolgozást megelőzően nem azonosítottunk. Ezért a legkevésbé módosított, vagyis leginkább természetes ökológiai állapotú holtágakat nem a fejlesztési adatsorban szereplő valós holtágak egy csoportja alapján, hanem az index szempontjából jellemezük. Az index alapján kiváló állapotúnak ítélt holtágak:

- Natura2000-es területnek megfelelő kezelésben állnak;
- a folyó árterének vízjárta oldalán (hullámtér) helyezkednek el;
- a folyó főágával legalább részleges összeköttetésben vannak;
- közvetlen vízgyűjtőjükön alacsony a mezőgazdasági és mesterséges felületű területek aránya;
- alacsony a vízoszlopban mért szilícium koncentráció (jellemzően kevesebb, mint kb. 3500 μg dm^{-3});
- alacsony az összes foszfor koncentráció (jellemzően kevesebb, mint kb. 0,2 mg dm^{-3});
- alacsony a klorofill-a koncentráció (jellemzően kevesebb, mint kb. 100 μg dm^{-3});
- fajlagos elektromos vezetőképesség nem tér el jelentősen a folyó főágának vezetőképességétől (jellemzően alacsonyabb, mint kb. 750 μS cm^{-1}).

Az ilyen holtágak halegyüttesei fajgazdagok, a fajkészletükben több specialista és élőhely-degradációra érzékeny faj található, alacsony a bentikus fajok fajszámaránya, alacsony a növényzetre ívó halak tömegességi aránya, nincsenek vagy alacsony az idegen halak tömegességi aránya. Az index metrikáinak értékeivel jellemezve:

- az EF adatokban az apróállat- és halevő (invertivor–piscivor) fajok fajszámaránya > 5%;
- a GN adatokban az aljzatlakó (bentikus) fajok fajszámaránya < 42%;
- a GN adatokban a természetesen honos fajok száma > 8;
- a GN adatokban a mindenevő fajok (omnivor) száma > 4;
- a GN adatokban a specialista fajok száma > 2;
- az EFandGN adatokban az élőhelyromlásra érzékeny fajok számának aránya > 7%;
- az EFandGN adatokban az apróállat- és halevő fajok tömegességi aránya > 2%;
- az EFandGN adatokban a növényzetre ívó (fitofil) fajok tömegességi aránya legfeljebb 7%;
- az EFandGN adatokban a specialista fajok száma > 2;
- az EF adatokban az idegenhonos (non-natív) fajok tömegességi aránya legfeljebb 15%.

4. Értékelés

4.1. Adatgyűjtési módszertan

Huszonkét holtág halállományának kétféle módszerrel végezett felmérési adatainak, valamint az elérhető környezeti adatoknak a felhasználásával holtágak ökológiai állapotminősítésére használatos halindexet alkottunk. Az elkészítéshez a vízfolyások minősítésére kidolgozott, és az eddigi tapasztalatok szerint elfogadhatóan használható indexcsalád (Sály & Erős 2016) elkészítéséhez is alkalmazott, adatorientált összeállítási stratégiát követtük.

Egy új index megbízhatóságát alapvetően a kidolgozáshoz rendelkezésre álló adatok mennyisége (mintanagyság) és reprezentativitása határozza meg. Tekintettel az ökológiai adatok általános nagyfokú változékonyságára, statisztikai szempontból a 22 elemű minta

alapján nehéz megbízhatóan feltárni a környezet és halállomány közti kapcsolatokat (ld. Blabolil et al. 2017, p2). Tovább nehezíti ezt az, hogy a halállomány felmérése csupán egyetlen alkalommal történt, és a felmérési időszakban (2018. késő tavasz) az időjárás lényegesen csapadékosabb volt, mint az év azon szakaszában általában lenni szokott. Nincsenek kvantitatív ismereteink arról, hogy a holtágak ismételt halászati felmérései mennyire adnának a mostanihoz hasonló eredményt. Ugyanakkor a vizsgálatba vont holtágak kiválasztásának fő szempontja az volt, hogy a felmérendő holtágak széles környezeti gradienst fedjenek le, azaz legyenek benne intuitíve rossznak, és kiválónak gondolt holtágak is. Hogy a kis mintanagyság mellett is sikerült statisztikailag egyértelmű metrika–stresszor kapcsolatokat azonosítanunk, azt jelzi, hogy a széles környezeti gradiens felölelése mérsékelhette az adatsor méretéből származó statisztikai gyengeséget.

4.2. Halállomány korszerkezete

Az elkészített index kulcsponti metrikái között nem szerepel a VKI V. függelékében javasolt korszerkezet. Korszerkezeti metrika összeállításához a halak egyedi testméretének (testhossz, vagy testtömeg) mérése szükséges, azonban ezek a fejlesztési adatsorban nem álltak rendelkezésre. Ugyanakkor, a korszerkezeti metrikáknak egy multimetrikus indexbe történő beépítése csupán a VKI javaslatának való megfelelés okán, nem nyújt garanciát arra, hogy a korszerkezet tényleges összefüggést mutat valamilyen stresszorral, és így indikációs jelentőséggel bír.

Jövőbeni módszertani fejlesztés keretében igény esetén a korszerkezet indikációs jelentősége megvizsgálható néhány kiemelt faj (pl. specialista, csúcsragadozó) egyedi testhossz, testtömeg adata (pl. Pehlivanov et al. 2017), avagy 0+ korcsoportjának jelenlét–hiány adata (ld. Blabolil et al. 2017) és a holtágak környezeti változói (potenciális stresszorok) közötti összefüggés-vizsgálattal. Emellett a testméret adatok HMMFIfO index metrikákkal és EQR-al végzett összefüggés-vizsgálata az index jelenlegi formájának korszerkezetre vonatkozó reprezentativitását is feltárhatja.

4.3. Karakterfajok

Egy jó ökológiai állapotban levő holtággal szemben jogosan felmerülő elvárás, hogy tartalmazza a víztípus jellemző halfajait. Ugyanakkor ezeknek a karakterfajoknak a mennyisége és jelenléte a természetes állapotú holtágak öregedésével (főággal való kapcsolat jellege, feltöltődés és növényesedés) is változik. Így két eltérő korú és fejlődéstörténetű (pl. áradások gyakorisága) holtágban a karakterfaj-készlet kedvezőtlen emberi hatások hiányában is különbözhet egymástól. Állapotértékelési szempontból tehát nem feltétlenül egyértelmű annak megítélése, hogy két holtág karakterfaj-készletének különbségét milyen mértékben okozta emberi közreműködés, és milyen mértékben a holtágak fejlődéstörténeti eseményei. Következésképpen, a jogos természetvédelmi elvárás ellenére a karakterfajkészlet metrika indikációs megbízhatósága vitatható.

Bár esetünkben a CSpecpool metrika a szűrési kritériumokkal szembeni elégtelenség miatt nem került be az indexbe, felhívjuk a figyelmet arra, hogy a karakterfajok számának várható értéke (átlaga) a Natura2000-es kezelésben levő holtágakban szignifikánsan magasabb volt, mint a nem Natura2000-es kezelésű holtágakban (Kruskal–Wallis teszt, Chi^2=4,942, df=1, p=0,026). Mivel az index érzékeny a Natura2000-es hasznosításra, a magasabb EQR értékű holtágakban várhatóan a karakterfajok száma is magasabb. Ennek hátterében részben az áll, hogy a karakterfajok között több specialista faj is van, és az index a benne szereplő EFandGN SPEC.sn metrika révén függ össze a Natura2000-es hasznosítással.

4.4. Verifikáció és a stresszor-specificitás megbízhatósága

A kis mintanagyságú fejlesztési adatsor ellenére az új index a minősítési indexektől elvárt összefüggést mutatja négy stresszortípus (hasznosítási, hidrogeomorfológiai, vízgyűjtő-módosítottsági, vízszennyezési) változóival is: a nagyobb stresszorhatásokhoz alacsonyabb EQR értékek társulnak.

Az index az érintett stresszorok közül a holtágak körüli táj (*riverscape*) kontextusában értelmezett stresszorokkal erősebb, a közvetlen víztulajdonsági stresszorokkal, leszámítva a

vezetőképességet, valamivel gyengébb kapcsolatban van. Úgy gondoljuk, hogy az index vízgyűjtőt érintő táji változókkal (numerikus és faktor egyaránt) szembeni érzékenysége megbízható jellemzője lehet az indexnek, mert több (nyolc a tizenegyből) kulcsponti metrika is kapcsolatot mutatott valamilyen tájhoz kötődő stresszorral. Ez alatt azt értjük, hogy a fejlesztési adatsortól független, további adatok minősítési eredménye és a minősített holtágak táji változói között is a most megismert kapcsolatok várhatóak. A halindex táji stresszorokra való érzékenysége azért is figyelemre érdemes, mert a többi VKI biológiai minőségi elemmel (kovaalga, fitoplankton, makrofita, és makrozoo-bentosz) végzett minősítések eredménye (EQR) a táji stresszorokkal nem mutatott összefüggést (nem publikált saját eredmények).

Ezzel szemben, az index vízminőségi tulajdonságok közé tartozó összes foszforral, és klorofill-a koncentrációval való összefüggését, az index kevésbé megbízható tulajdonságának tartjuk. Ezen stresszorok kulcsponti metrikákkal való összefüggései gyengébbek ($R^2 \leq 0{,}31$), mint a táji kontextusú stresszorok kulcsponti metrika-összefüggései ($R^2 \geq 0{,}31$) (ld. *3. táblázat*). Így egyaránt lehetséges az, hogy újabb adatsorral végzett minősítés eredménye e vízkémiai stresszorokkal vagy nem mutatna összefüggést, vagy a most tapasztaltaknak megfelelő erősségű összefüggéseket találnánk. E bizonytalanság csökkentése további adatokkal történő vizsgálattól várható. Megjegyezzük, hogy a fejlesztési adatsorban levő holtágak kovaalgákkal végzett minősítése (EQR) viszont egyértelmű negatív összefüggést mutatott a vízben levő összes foszfor koncentrációjával (nem publikált saját eredmények).

A holtágak elektromos vezetőképességét a természetes hatások (pl. geológiai környezet) mellett szennyező hatások (szervetlen szennyezőanyagok, pl. tisztítószer maradványok) is befolyásolják. Ezért a vezetőképességet a szervetlen szennyezők helyettesítő változójának is tekintik (Morgan et al. 2012; Vieira & Tejerina-Garro 2020). Így az index vezetőképességgel mutatott negatív kapcsolata a halak szervetlen szennyezőkre mutatott érzékenységére utal.

A halegyüttes-szerkezeti metrikák partmódosítottsági stresszorokkal való kapcsolatának hiánya talán a stresszorok (botanikai változók) becslési bizonytalanságából ered. Ugyanakkor valószínűbb, hogy önmagában ezen a térléptéken (néhány méter) történt növényzeti változások a holtágakban élő halak szempontjából indifferensek. Ezt a feltevést támogatja a Balaton vízgyűjtő vízfolyásain végzett korábbi kutatás is (Sály et al. 2011), melyben a közvetlen vízfolyásbeli élőhelyi-, és a vízgyűjtő kiterjedésű táji változókhoz képest, a vízfolyások parti sávjának (1–10 m) növényzeti tulajdonságai (lágyszárúak és fásszárúak borítási aránya) nem függtek össze a halegyüttes-szerkezettel.

Mindezek azt sejtetik, hogy az indexfejlesztéshez használt adatsorban levő vízkémiai változók értékterjedelmén belül, a halak elsősorban a holtágak táji szintű diszturbanciájára érzékenyek, és más biológiai elemekhez (kovaalgák) képest kevésbé reagálnak a növényi tápanyagterheléssel járó eutrofizálódásra. Ugyanakkor fejlesztési adatsor értéktartományának felső határát meghaladó, és időben tartósan fennálló foszforkoncentráció, a halállomány összetételben is okozhat érzékelhető változásokat.

4.5. Konklúziók

A hazai holtágak (Lake 5 típus) halak alapján történő VKI szempontú ökológiai állapotminősítéséhez összeállított multimetrikus index a minősítési indexekkel szemben elvárt módon és statisztikailag igazoltan reagál több emberi hatásoktól befolyásolt környezeti tényezőre. Ezek közül különösen a vízgyűjtő-módosítottsági (tájhasználat) és hidrogeomorfológiai hatásokra, másodsorban pedig vízszennyezésre utaló változókra tűnik érzékenynek. A vízgyűjtő felszínborításának emberi módosítottságára a többi VKI biológiai minőségi elemmel végzett minősítés a halakhoz képest kevésbé érzékeny, ami arra utal, hogy az új halindex megfelelően kiegészíti és támogatja a hazai holtágak ökológiai állapotának öt élőlény-együttes minősítése alapján történő megállapítását.

Függelékek

F1 Függelék: A *Pisces Hungarici* honlapján online elérhető függelék az elektromos és kopoltyúhálós mintavételi adatsorok egymásnak való megfeleltethetőségi vizsgálatának eredményeiről.

F2 Függelék: A *Pisces Hungarici* honlapján online elérhető függelék, amely tartalmazza 1) a halindex fejlesztéséhez használt olyan trait-ek, illetve metrikák jegyzékét, melyek a hazai vízfolyások minősítésére készített index-család (HMMFI, Sály & Erős 2016) összeállításakor nem voltak alkalmazva, és a 2) a fejlesztési adatsorban levő holtágak minősítési eredményeit.

Köszönetnyilvánítás

A partmódosítottsági változók összeállításához nyújtott segítségéért dr. Lukács Balázs Andrásnak, a felszínborítási adatok leválogatásáért és a VKI biológiai minőségi elemekkel végzett minősítések rendelkezésre bocsátásért dr. Várbíró Gábornak mondunk köszönetet.

Irodalom

Blabolil, P., Říha, M., Ricard, D., Peterka, J., Prchalová, M., Vašek, M., Čech, M., Frouzová, J., Jůza, T., Muška, M., Tušer, M., Draštík, V., Sajdlová, Z., Šmejkal, M., Vejřík, L., Matěna, J., S. Boukal, D., Ritterbusch, D., Kubečka J. (2017): A simple fish-based approach to assess the ecological quality of freshwater reservoirs in Central Europe. *Knowl. Manag. Aquat. Ecosyst.* 418/53.

Böhmer et al. (2004): Assessing streams in Germany with benthic invertebrates: Development of a multimetric invertebrate based assessment system. *Limnologica* 34/4: 416–432.

CIS Guidance Document No. 10: Rivers and Lakes – Typology, Reference Conditions and Classification Systems. https://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/facts_figures/guidance_docs_en.htm Hozzáférés: 2021-05-06

EFI+ Consortium (2009): Manual for the application of the new European Fish Index – EFI+. A fish-based method to assess the ecological status of European running waters in support of the Water Framework Directive. June 2009. http://efi-plus.boku.ac.at/software/documentation.php Hozzáférés: 2020-05-06

Erős, T., Specziár, A., Bíró, P. (2009): Assessing fish assemblages in reed habitats of a large shallow lake – a comparison between gillnet sampling and electric fishing. *Fisheries Research* 96/1: 70–76.

Európai Parlament, Európai Unió Tanácsa (2000): Az Európai Parlament és a Tanács 2000/60/EK irányelve (2000. október 23.) a vízpolitika terén a közösségi fellépés kereteinek meghatározásáról. Az Európai Unió Hivatalos Lapja 15/5: 275–346. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=CELEX%3A32000L0060&qid=1619169130723 Hozzáférés: 2021-04-23

Guidance Document No. 3. Analysis of Pressures and Impacts. Common Implementation Strategy For The Water Framework Directive (2000/60/EC). 2003. https://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/facts_figures/guidance_docs_en.htm Hozzáférés: 2021-04-23

Hering, D., Feld, K.C., Moog, O., Ofenböck, T. (2006): Cook book for the development of a Multimetric Index for biological condition of aquatic ecosystems: Experiences from the European AQEM and STAR projects and related initiatives. *Hydrobiologia* 566/1: 311–324.

Morgan, P.R. II, Kline, K.M., Kline, M.J., Cushman, S.F., Sell, M.T., Weitzell, R.E. Jr., Churchill, J.B. (2012): Stream conductivity: Relationships to land use, chloride, and fishes in Maryland streams. *North American Journal of Fisheries Management* 32/5: 941–952.

Pehlivanov, L.Z., Apostolou, A., Wolfram, G. (2017): Development of Bulgarian fish index for ecological classification and monitoring of natural riparian lakes (type L5/L-EC- 1). *Acta Zoologiga Bulgarica Suppl.* 8: 153–162.

R Core Team (2021): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/.

Reiczigel, J., Harnos, A., Solymosi, N. (2007): *Biostatisztika nem statisztikusoknak*. Nagykovácsi: Pars Kft.

Sály, P., Erős, T. (2016): Vízfolyások ökológiai állapotminősítése halakkal: minősítési indexek kidolgozása. *Pisces Hungarici* 10: 15–45.

Sály, P., Takács, P., Kiss, I., Bíró, P., Erős, T. (2011): The relative influence of spatial context and catchment- and site-scale environmental factors on stream fish assemblages in a human-modified landscape. *Ecology of Freshwater Fish* 20/2: 251–262.

Specziár A., Erős T., György Á.I., Tátrai I., Bíró P. (2009): A comparison between the benthic NORDIC gillnets and whole water column gillnets for characterizing fish assemblages in the shallow Lake Balaton. *Annales de Limnologie Int. J. Limn.* 45/3: 171–180.

Vieira, T.B., Tejerina-Garro, F.L. (2020): Relationships between environmental conditions and fish assemblages in tropical savanna headwater streams. *Scientific Reports* 10/1: 2174.

Whittier, T.R., Hughes, R.M., Stoddard, J.L., Lomnicky, G.A., Herlihy, A.T. (2007): A structured approach for developing indices of biotic integrity: Three examples from streams and rivers in the Western USA. *Transactions of the American Fisheries Society* 136/3: 718–735.

Authors:

Péter SÁLY (saly.peter@ecolres.hu), András SPECZIÁR (specziar.andras@blki.hu), István CZEGLÉDI (czegledi.istvan@blki.hu), Ágnes MARODA (maroda.agnes@gmail.com), Bálint PREISZNER (preiszner.balint@blki.hu), Zoltán SZALÓKY (szaloky.zoltan@ecolres.hu), Tibor ERŐS (eros.tibor@blki.hu)