

Vízfolyások ökológiai állapotminősítése halakkal: minősítési indexek kidolgozása

Ecological assessment of running waters in Hungary: compilation of biotic indices based on fish

Sály P.^{1,2}, Erős T.¹

¹MTA Ökológiai Kutatóközpont, Balatoni Limnológiai Intézet, Tihany

²Pécsi Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Hidrobiológiai Tanszék, Pécs

Kulcsszavak: Víz Keretirányelv, Vízyűjtő-gazdálkodási Terv, vízfolyások, ökológiai állapot, biotikus index, EFI+

Keywords: Water Framework Directive, river basin management plan, streams and rivers, ecological status, bioassessment, EFI+

Abstract

To fulfil the requirements of the EU Water Framework Directive, we developed a multimetric biotic index family, the Hungarian Multimetric Fish Index (HMMFI), which was compiled to assess the ecological status of surface running waters by fish in Hungary. HMMFI contains six unique indices that correspond to the main hydrogeomorphological types of running waters of Hungary, such as sub-mountain streams, highland streams, highland rivers, lowland streams, lowland rivers, and the Hungarian section of the Danube. With the exception of the Danube, the members of the index family were developed in a type specific way, whereas the index for Danube was combined from the indices of highland and lowland rivers. The type specifically elaborated indices proved to be stressor specific and were associated to different stressors. Altogether 1189 fish surveys and 351 water bodies were assessed by the type specifically elaborated members of the HMMFI family. 2.8% of the assessed water bodies were classified as 'high', 26.5% as 'good', 36.2% as 'moderate', 26.5% as 'poor', and 12% as 'bad', respectively. Using the results of the assessment, HMMFI was compared to the new European Fish Index (EFI+). We found a weak and biased linear association between the two indices in all types, especially between the index of lowland streams and EFI+, in which case there was not a relationship at all. EFI+ showed unexpected relationships with some stressors, which can indicate the unreliability of EFI+ for some hydrogeomorphological types. Validation analysis of the type specifically developed HMMFI indices with independent data revealed a significant association between the ecological assessment conducted by HMMFI and by expert judgement conducted in the field. Results suggest that the regional (national) scaled HMMFI family is more appropriate for the ecological assessment of Hungarian running waters than the continental scaled EFI+ index.

Bevezetés

Az Európai Unió tagállamaként hazánk vízgazdálkodása a EU Víz Keretirányelvé (VKI) követi. A VKI előírja a tagállamoknak a felszíni vizek ökológiai állapotminősítését, melyet öt élőlénycsoport taxonómiai és funkcionális összetétele alapján kell elvégezni (Európai Parlament & Európai Unió Tanácsa 2000). Ezen élőlénycsoportok (biológiai minőségi elemek) a lebegő algák (fitoplankton), bevonatot képező algák (perifiton [kovaalgák]), szabad szemmel látható növények (makrofiton), szabad szemmel látható aljzaton élő gerinctelenek (makrozoobenton), és a halak. A több élőlénycsoporton alapuló értékelő és monitorozó rendszer egyedülálló a vizek környezeti állapotának minősítésében, mellyel az egy élőlénycsoporton alapuló megközelítésekkel szemben megbízhatóbban értékelhető a vízi ökoszisztéma emberi hatásokra adott válasza.

A VKI elvárása szerint a felszíni vízfolyások vízügyi gazdálkodási szempontból egyedi azonosítóval rendelkező szakaszait (ún. víztesteket) öt minőségi osztályba kell sorolni. Az állapotminősítés alapelve, hogy az élőlénycsoportok aktuális taxonómiai és funkcionális összetételét összehasonlíttják egy olyan, ún. referencia állapotra jellemző taxonómiai és

funkcionális összetétellel, amely a víztestet érintő antropogén hatások hiányában lenne jellemző az élőlénycsoportokra. Az eredmények tagállamok közötti összehasonlíthatóságát lehetővé tevő, ún. interkalibrált minősítési módszerek, az élőlénycsoportok állományszerkezetének több összetevőjét együttesen figyelembe vevő multimetrikus indexek használatán alapulnak. Ezek az indexek a minősítés alatt álló víztesteket az aktuális és a referencia állapot közötti eltérés mértéke alapján sorolják az öt minőségi osztály valamelyikébe.

A tagállamoknak a minősítés eredménye alapján az egyes vízgyűjtőkre vízgyűjtő-gazdálkodási terveket (VGT) kell kidolgozni. A vízgyűjtő-gazdálkodási tervek végrehajtásának, illetve a VKI alkalmazásának fő célja, hogy a tagállamok felszíni vizei egy meghatározott határidőre (2021 vagy 2027) jó ökológiai állapotba kerüljenek.

A élőlénycsoportok természetes téridőbeli változatosságát alapvetően a biogeográfiai régió és a vízfolyások hidrogeomorfológiai típusa határozza meg, amit a megbízható állapotértékelési módszereknek figyelembe kell venniük. Ezen kívül a minősítési módszerekkel szemben elvárt további követelmények, hogy a továbbfejleszthetőség érdekében a minősítésre használt index módszertani felépítése átlátható legyen, és az index meghatározott emberi beavatkozásra, illetve a beavatkozás által okozott élőhelyi változásra (ökológiai stresszor) érzékenységet mutasson (ún. stresszor-specifititás). A minősítendő vízfolyások több hidrogeomorfológiai típusát átfogó biogeográfiai régiókban használatos minősítési indexek rendszerint típus-specifikusak, azaz minden hidrogeomorfológiai vízfolyás-típus egyedi felépítésű indexszel minősítendő. Az ilyen több egyedi, típus-specifikus indexet tartalmazó minősítési indexcsalád esetén a stresszor-specifititás típusonként elvárt követelmény.

A halakkal történő megbízható, standardizált értékelési eszközöket alkalmazó, és a VKI előírásaihoz illeszkedő ökológiai állapotértékelés megvalósíthatóságának céljából, 12 EU tagállam közreműködésével elkészítették az Európai Halindexet (EFI [FAME CONSORTIUM 2004]). Az EFI index kidolgozását célzó FAME projekt indulásakor Magyarország még nem volt az EU tagállama, így az index fejlesztésében nem vett részt, az főként nyugat- és észak-európai országok közreműködésével és adataival zajlott.

Később a FAME projekt eredményeit felhasználva, az EU-hoz időközben csatlakozott további tagállamok bevonásával kifejlesztették az új Európai Halindexet (EFI+ [EFI+ CONSORTIUM 2009]), amely jelenleg általánosan elfogadott halas minősítési eszköz az EU-ban. Azonban annak ellenére, hogy magyarországi adatok is szerepeltek a fejlesztésben, az eddigi szakértői tapasztalatok alapján úgy tűnik, hogy ez az index a magyarországi vízfolyásokat nem minősíti megbízhatóan, azonban ez még nincs kellően feltárva.

Hazánkban az EU-hoz történt 2004-es csatlakozásunk után az első Vízgyűjtő-gazdálkodási Terv (VGT1, VKKI 2010) 2009-re készült el. Az ehhez kapcsolódó halak alapján történő ökológiai állapotminősítés és értékelés a Halasi-Kovács és munkatársai által kidolgozott minősítő indexszel (EQI_{HRF}) történt (Halasi-Kovács & Tóthmérész 2007, Halasi-Kovács et al. 2009, Halasi-Kovács & Tóthmérész 2011, részletes értékelése Erős 2009). Ezt az indexet a hazai viszonyokra fejlesztették, azonban stresszor-specifikussága részleteiben nem feltárt. Egy olyan látens antropogén hatásra (antropogén index) érzékeny, mely vízkémiai, hidrogeomorfológiai és a terepen tapasztalt általános környezeti hatásokat integrálja magában (Halasi-Kovács & Tóthmérész 2011). Ismereteink szerint a EQI_{HRF} indexet a későbbiekben nem interkalibrálták.

Az első Vízgyűjtő-gazdálkodási Terv végrehajtási időszakát követően, a VGT1 felülvizsgálatát célzó második Vízgyűjtő-gazdálkodási Terv (VGT2) elfogadásához, valamint a 2014–2020-as EU-s költségvetési ciklus vizeket érintő fejlesztési források EU általi kifizetéséhez is szükségessé vált a felszíni vizekre irányuló vízminőségi monitorozási

rendszer fejlesztése. Ez magába foglalta az adathiány miatti kiegészítő monitorozási feladatokat, a felszíni vizek biológiai minőségi elemek alapján történő ökológiai állapotértékelését, valamint a biológiai vizsgálati módszerek interkalibrálásának 2016. év végéig történő végrehajtását is.

E feladatok halakra vonatkozó végrehajtásakor szem előtt kellett tartani, hogy 1) a VGT2 kidolgozásakor a VGT1 végrehajtása óta számottevően bővült az alapadatok köre, beleértve a halas adatokhoz társítható környezeti adatsor elérhetőségét is; 2) felülvizsgálták és megváltoztatták a víztestek VGT1 során alkalmazott, és a EQI_{HRF} index kidolgozásakor figyelembe vett tipológiai besorolását; 3) az EFI+ indexnek a magyarországi viszonyokra vonatkozó megbízhatatlanságát.

A fenti tények együttes mérlegelésének eredményeként kidolgoztunk egy új, a hazai felszíni vízfolyásaink halak alapján történő, típus-specifikus ökológiai állapotértékelését segítő, stresszor-specifikus indexcsaládot, mely a szakértői döntéseket minimalizálva megfelelhet az EU-s interkalibrációs eljárás kritériumainak.

Dolgozatunk célja, hogy összefoglalja a második Vízyűjtő-gazdálkodási Terv (VGT2) keretében elkészített, a halak élőlénycsoporton alapuló multimetrikus ökológiai állapotminősítési index család (Magyar Multimetrikus Halindex [*Hungarian Multimetric Fish Index*, HMMFI]) létrehozásának lépéseit. Az indexcsalád lehetővé teszi a hazai felszíni vízfolyások halak alapján történő ökológiai állapotértékelését. Az indexcsalád tagjai típus-specifikusak, azaz a fő hidrogeomorfológiai vízfolyástípusokra egyedi értékelési módszert képviselnek. Az indexek kidolgozását követően minősítettük a kidolgozásához felhasznált halas felméréseket és víztesteket. Értékeljük az új indexek stresszor-specifitását, az EFI+ index stresszor-specifitását, valamint az új indexek és az EFI+ index statisztikai kapcsolatát. Az indexcsalád fejlesztésétől független adatok felhasználásával elvégeztük az új indexcsalád statisztikai validációját. A Duna folyam hidrogeomorfológiai egyedülállósága miatt a Duna típusra a dombvidéki és síkvidéki folyókra típus-specifikusan fejlesztett indexekből kombináltunk indexet; és a dunai víztestek új indexszel való minősítési lehetőségét a többi vízfolyástípustól kiemelten vizsgáltuk meg.

Módszerek

1. A víztestek tipológiai besorolása

A VGT1 vízfolyás-tipológiája eredetileg 25 vízfolyástípust különített el a magassági viszonyok, a vízyűjtőméret, a mederesés, és az aljzat minősége alapján (VKKI 2010, 1–18 és 1–19. táblázata), melyek közül utólag a 24-es és a 25-ös típus összevonásra került (Várbíró G. személyes közlés). A VGT2 részeként ennek a tipológiának a részletes revideálása és élőlénycsoportokkal történt validációja eredményeként, további típusok kerültek összevonásra (Semjén 2016). E revideált, a VGT2-ben alkalmazandó tipológiában a halak élőlénycsoport szempontjából hat vízfolyástípus különíthető el (1. táblázat) (vö. Erős 2007, Halasi-Kovács & Tóthmérész 2007). A hat típus a következő hidrogeomorfológiai típusnak feleltethető meg: 1) középhegységi patakok (*sub-mountain streams*, SMS), 2) dombvidéki patakok (*highland streams*, HLS), 3) dombvidéki folyók (*highland rivers*, HLR), 4) síkvidéki kisvízfolyások (*lowland streams*, LLS), 5) síkvidéki folyók (*lowland rivers*, LLR), 6) Duna.

Az Országos Vízügyi Főigazgatóság részéről rendelkezésünkre bocsátott adatok előzetes feltáró elemzése során több felmérés új revideált tipológia szerinti hibás besorolására derült fény. A feltárt tipológiai hibák többsége a 3-as, 5-ös, és 6-os típusba besorolt felmérésekhez kapcsolódott. A feltárt hibákat javítottuk, és az index kidolgozásához a javított tipológiai besorolást használtuk. Megjegyezzük azonban, hogy az új tipológia vélhetően még számos hibás besorolást tartalmazhatott, melyek részletes felderítése időigényes, és nem tartozott a halas index kidolgozásához kapcsolódó feladatok körébe.

1. táblázat. A VGT1 szerinti vízfolyás-típológia és a VGT2 szerinti új vízfolyás-típológia közötti megfeleltethetőségi kapcsolat a biológiai elem élőlénycsoportok szerint. A halak alapján azonosított, második oszlopban levő típuskódokhoz tartozó típusok: 1 SMS, 2 HLS, 3 HLR, 4 LLS, 5 LLR, 6 Danube

VGT1 tipológia	VGT2 tipológia halak	VGT2 tipológia makrozoobenton	VGT2 tipológia kovaalgák	VGT2 tipológia fitoplankton	VGT2 tipológia makrofita
1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	1	1
3	1	1	2	1	1
4	2	2	3	1	2
5	2	2	3	1	2
8	2	2	3	1	2
9	2	2	3	1	2
6	3	3	4	2	2
7	3	3	4	2	2
10	3	3	4	2	2
13	3	3	4	2	3
14	3	3	4	2	3
11	4	2	3	1	2
12	4	2	3	1	2
15	4	4	5	3	4
16	4	4	5	3	4
17	4	4	5	3	4
18	4	4	5	3	4
21	4	4	5	3	4
22	4	4	5	3	4
19	5	5	6	3	3
20	5	5	6	4	3
23	6	5	7	5	3
24	6	5	7	6	3

2. Abiotikus változók

Az index készítéséhez három fő abiotikus változócsoporthatásait vettük alapul, amelyek hazai adatok alapján is igazolhatóan összefüggésben vannak a halegyüttesek taxonómiai és funkcionális összetételével (Sály et al. 2011, Erős et al. 2012), nemzetközileg pedig a legáltalánosabban használt stresszor változócsoporthoz számítanak a biotikus indexek kidolgozásánál (Pont et al. 2007, Roset et al. 2007). E változócsoporthoz tartozó változók a víztest 1) hidrogeomorfológiai állapotáról, 2) a tájhasználaton keresztül ható, vízgyűjtőt érintő beavatkozásokról (felszínborítási változók) és 3) a vízkémiai állapotról nyújtottak információt. A hidrogeomorfológiai állapotot leíró változók országos léptékben igen korlátozott számban álltak rendelkezésre. A vízfolyások hidrogeomorfológiai módosítottságának jellemzésére a vízgyűjtőn levő tavak területe, a vízfolyás szegmens által érintett állóvizek száma és területe állt rendelkezésre. Ezek mellett kiszámítottuk a víztestek kanyarulatfejlettségi indexét (*sinuosity*): $S = l/d$, ahol l a víztest hossza, d a víztest alsó és felső végpontja közti euklideszi távolság.

A víztest vízgyűjtők felszínborítási adatait GIS környezetben a CORINE 2012 (100 000-es felbontású) adatbázisból válogattuk le (Steenmans & Büttner 2006). A változók értékét a vízgyűjtők területének arányában százalékos formában fejeztük ki. A felszínborítási változókon kívül a tájhasználat antropogén átalakítottságát a Böhmer et al. (2004) féle tájhasználati indexel (*land use index*) is jellemeztük (2. táblázat), mely mutató hatékony prediktornak bizonyult makrozoobenton indexek fejlesztésekor (l. még Birk & Hering 2009, Várbíró et al. 2010, 2011).

2. táblázat. A felszínborítási változók és leírásuk. A 'Stresszor' oszlopban 'igen' jelzi azokat a változókat, melyeket az indexek kidolgozásakor stresszor változóként használtunk

Változó	Leírás	Stresszor
artificial_surfaces	A corine fedvényből a 111–142 kódú foltok összevont, egységes területe (%).	igen
agricultural_areas	A corine fedvényből a 211–244 kódú foltok összevont, egységes területe (%).	igen
forests	A corine fedvényből a 311–313 kódú foltok összevont, egységes területe (%).	nem
non_forest_veget	A corine fedvényből a 321, 324 kódú foltok összevont, egységes területe (%).	nem
wetlands	A corine fedvényből a 311–423 kódú foltok összevont, egységes területe (%).	nem
water_bodies	A corine fedvényből a 511–523 kódú foltok összevont, egységes területe (%).	igen
landuse_index	4 × urban land use + 2 × intensive agriculture + 1 × non-intensive agriculture	igen

A rendelkezésre bocsátott nagyszámú vízkémiai változó előzetes vizsgálata számos bizonytalan eredetű hibát, adathiányt tárt fel. Érdemileg 11 változót tudtunk hasznosítani az indexek készítéséhez (3. táblázat).

3. táblázat. Az indexkidolgozáshoz felhasznált vízkémiai változók. Értékeik a víztestek 2009–2012 közötti monitorozási időszakára jellemző átlagos értékeket jelentik. A 'Stresszor' oszlopban 'az igen' arra utal, hogy az adott változót az index kidolgozásakor stresszor változóként használtunk

Változó	Leírás	Stresszor
NH4_N	ammónium nitrogén (mg l ⁻¹)	igen
BOI5	5 napos biológiai oxigénigény (mg l ⁻¹)	igen
Chl_a	klorofill-a (µg l ⁻¹)	igen
NO3_N	nitrát nitrogén (mg l ⁻¹)	igen
NO2_N	nitrit nitrogén (mg l ⁻¹)	igen
PO4	Ortofoszfát (µg l ⁻¹)	igen
KOI _d	kálium-bikromátos oxigénigény (mg l ⁻¹)	igen
total_P	összes oldott foszfor (µg l ⁻¹)	igen
total_N	összes oldott nitrogén (µg l ⁻¹)	igen
TDS	összes oldott anyag (mg l ⁻¹)	igen
pH	hidrogénion-koncentráció 10-es alapú logaritmus	igen

Az élőhelyek környezeti állapotának kvantitatív jellemzéséhez használt változók a legtöbb esetben egymással szorosabb-lazább statisztikai kapcsolatban állnak. Ezért a köztük levő összefüggések szorosságától függően az élőhelyek közti környezeti változatosságot kisebb-nagyobb mértékű redundanciával jellemzik. A főkomponens elemzés (*Principal Component Analysis*, PCA) olyan többváltozós matematikai eljárás, amely egy objektumcsoport (pl. élőhelyek) egyszerre több változóval leírt változatosságából feltárja az objektumok közti különbségekért leginkább felelős változókat. Mindeközben a változatosságért felelős, egymással redundáns változókból egy absztrakt kvantitatív mennyiséget, ún. főkomponens képez, és ezáltal csökkenti az objektumok közti változatosságot leíró változók számát. Például, a vízfolyások mintavételi szakaszainak a terepen közvetlenül megmért mederszélessége és vízmélysége egy főkomponens elemzés eredményeként egyetlen közös főkomponens kialakításában vehet részt, amely új, származtatott változó a mintavételi szakaszok általános méretét jellemzi, magába foglalva mindkét eredeti változó hatását.

Hogy a víztestek felszínborítási és vízkémiai állapotát kevesebb számú változóval, átfogó módon kvantitatívan jellemezhesük, minden vízfolyástípuson belül elkészítettük a felszínborítási és a vízkémiai stresszorként használt abiotikus változók (1. 2. és 3. táblázat) standardizált főkomponens elemzését (1. Hering et al. 2006).

Mivel a hidrogeomorfológiai állapotot jellemző változókból csak egyet használtunk az indexek kidolgozása folyamán, ennél a stresszortípusnál főkomponens elemzés nem történt.

2.1. Az index kidolgozásához használt stresszor változók

A rendelkezésünkre bocsátott abiotikus változók előzetes feltáró adatelemzése során jelentős adathiány, alacsony variancia, bizonytalan eredetű szélsőséges adatértékek, valamint szakmai megfontolások miatt nem minden változót használtunk fel az index kidolgozásához. Így a hidrogeomorfológiát jellemző abiotikus változók közül csak a kanyarulatfejlettségi indexet, a felszínborítási változók közül az emberi tájhasználati hatásokat közvetlenül jellemző négy változót (2. táblázat), és a 3. táblázatban felsorolt vízkémiai változókat használtuk stresszor változóként.

Ezen változók körében is voltak ugyan adathiányos felmérések, de általánosságban elmondható, hogy e változók minden vízfolyás-típusban rendelkezésre álltak az index kidolgozáshoz.

A PCA elemzések eredményéből csak azokat a főkomponenseket tartottuk meg további felhasználásra, melyek sajátértéke nagyobb volt, mint az összes főkomponens sajátértékeinek átlaga. Ezeket a továbbiakban származtatott stresszor változókként kezeltük (4. táblázat).

4. táblázat. A főkomponens elemzések eredményeiből származtatott és stresszor változóként alkalmazott főkomponensek hidrogeomorfológiai típusonként. Az 'Abiotikus összetevők' oszlopban azok az abiotikus változók olvashatók, melyek leginkább hozzájárultak az adott főkomponens kialakításához. Ez a hozzájárulás a főkomponens és az abiotikus változó közötti korrelációval mérhető. Az abiotikus változók neve előtt a (+), illetve (-) a főkomponens és az abiotikus változók közti összefüggés jellegét jelöli

Típus	Főkomponens (magyarázott variancia %)	Abiotikus összetevők	Reprezentált stresszor grádiens	Értelmezési magyarázat
1 SMS	landuse.PC1 (60.13%)	(-) landuse_index, agricultural_areas, artificial_surfaces	felszín-módosítottsági grádiens	Minél negatívabb annál nagyobb emberi hatásra utal, nagyobb a mg-i területek és a mesterséges területek aránya.
	landuse.PC2 (25.97%)	(+) water_bodies	felszín-módosítottsági grádiens	Minél pozitívabb, annál nagyobb arányú a vízgyűjtőn levő víztestek területe.
	wchem.PC1 (44.56%)	(-) total_P, NO2_N, total_N, PO4	tápanyag-terhelési grádiens	Minél negatívabb, annál erősebb foszfor és nitrogén terhelésre utal.
	wchem.PC2 (23.88%)	(+) BO15, KO1d (-) pH	szervesanyag-terhelési grádiens	Minél pozitívabb, annál magasabb szervesanyag-tartalomra, és savasabb pH-ra utal.
	wchem.PC3 (13.74%)	(-) Chl_a, NH4_N	algásodási grádiens	Minél negatívabb, annál algásabb és nagyobb ammónium tartalmú a víz.
2 HLS	landuse.PC1 (49.93%)	(+) landuse_index, agricultural_areas, artificial_surfaces	felszín-módosítottsági grádiens	Minél pozitívabb annál nagyobb emberi hatásra utal, nagyobb a mg-i területek és a mesterséges területek aránya.
	landuse.PC2 (25.80%)	(+) artificial_surfaces (-) water_bodies	felszín-módosítottsági grádiens	Minél pozitívabb annál nagyobb a mesterséges területek aránya. Minél negatívabb, annál nagyobb arányú a vízgyűjtőn levő víztestek területe.
	wchem.PC1 (45.98%)	(+) total_P, NO2_N, PO4, total_N	tápanyag-terhelési grádiens	Minél negatívabb, annál erősebb foszfor és nitrogén terhelésre utal.

Típus	Főkomponens (magyarázott variancia %)	Abiotikus összetevők	Reprezentált stresszor grádiens	Értelmezési magyarázat
	wchem.PC2 (13.60%)	(+) total_N, NO3_N (-) pH, BOI5	szervesanyag- és nitrogén-terhelési grádiens	Minél pozitívabb annál több nitrogén tartalomra utal. Minél negatívabb annál több szervesanyag tartalomra utal.
	wchem.PC3 (10.62%)	(-) NO3_N	nitrát terhelési grádiens	Minél negatívabb, annál nitrátosabb vízre utal.
3 HLR	landuse.PC1 (65.70%)	(+) landuse_index, agricultural_areas, artificial_surfaces	felszín-módosítottsági grádiens	Minél pozitívabb, annál erősebb felszín-módosítottságra utal.
	landuse.PC2 (21.71%)	(+) water_bodies	felszín-módosítottsági grádiens	Minél pozitívabb, annál nagyobb arányú a vízgújton levő víztestek területe.
	wchem.PC1 (41.76%)	(+) PO4, NO3_N, total_P, NH4_N, total_P	tápanyag-terhelési grádiens	Minél pozitívabb, annál erősebb foszfor és nitrogén terhelésre utal.
	wchem.PC2 (17.34%)	(+) total_N, Chl_a	Nitrogén-terhelési és algásodási grádiens	Minél pozitívabb, annál erősebb nitrogén terhelésre és algásabb vízre utal.
	wchem.PC3 (11.86%)	(-) KOId	szervesanyag-terhelési grádiens	Minél negatívabb, annál nagyobb szervesanyag tartalomra utal.
	wchem.PC4 (9.98%)	(+) pH	pH grádiens	Minél pozitívabb, annál lúgosabb víz.
4 LLS	landuse.PC1 (44.56%)	(+) landuse_index, agricultural_areas	felszín-módosítottsági grádiens	Minél pozitívabb, annál erősebb mg-i területaránya utal.
	landuse.PC2 (29.92%)	(-) artificial_surfaces	felszín-módosítottsági grádiens	Minél negatívabb, annál nagyobb arányú mesterséges felszínre utal.
	wchem.PC1 (45.96%)	(+) NO2_N, total_P, total_N, PO4	tápanyag-terhelési grádiens	Minél pozitívabb, annál erősebb nitrogén és foszfor terhelésre utal.
	wchem.PC2 (14.53%)	(-) Chl_a	algásodási grádiens	Minél negatívabb, annál algásabb vízre utal.
	wchem.PC3 (13.15%)	(+) KOId, (-) pH	szervesanyag-terhelési és savasodási grádiens	Minél pozitívabb, annál több szervesanyag tartalomra és savasabb a vízre utal.
5 LLR	landuse.PC1 (49.18%)	(+) water_bodies (-) landused_index	felszín-módosítottsági grádiens	Minél pozitívabb, annál nagyobb arányú a vízgújton levő víztestek területe. Minél negatívabb annál erősebb felszín- módosítottságra utal.
	landuse.PC2 (30.09%)	(+) agricultural_areas (-) artificial_surfaces	felszín-módosítottsági grádiens	Minél pozitívabb, annál nagyobb arányú mg-i területre utal. Minél negatívabb annál nagyobb arányú mesterséges felszínre utal.
	wchem.PC1 (46.86%)	(+) total_P, PO4, NO2_N, BOI5	tápanyag-terhelési grádiens	Minél pozitívabb, annál erősebb foszfor, nitrit és szervesanyag terhelésre utal.
	wchem.PC2 (28.73%)	(+) total_N, NO3_N	nitrogén-terhelési grádiens	Minél pozitívabb, annál nagyobb nitrogén, elsősorban nitrát tartalomra utal.

3. A halegyüttesek szerkezetét jellemző változók

A halegyüttesek szerkezetének kvantifikálásához kiindulásként a halfajokat összesen 31 ismérvvel (*biological traits*) jellemeztük (*F1 függelék*), melyek a következő trait-csoportokhoz tartoztak: táplálkozási jellemzők, táplálkozási habitat típusa, reprodukciós guild, vízáramlási preferencia, habitat specializáció, perturbációval szembeni tolerancia, biogeográfiai státusz, karakterfaj-készlet (<http://www.biodiversa.org/database>). Karakterfajoknak azokat a fajokat tekinthetjük, melyek jól behatárolható élőhelyi feltételek mellett képesek állománynövekedésre, így előfordulásuk rendszerint jellegzetes életterekhez kapcsolódik és más, számukra kevésbé kedvező életterekben való felbukkanásuk esetleges. Az ilyen fajok gyakori előfordulása egyben a számukra kedvező élőhelyi feltételek ökológiai indikátorának tekinthető. A vízfolyás-típusokra jellemző karakterfajokat indikátorfaj elemzéssel azonosítottuk (Dufrene & Legendre 1997). Egy adott vízfolyás-típus indikátor fajának azokat a fajokat fogadtuk el, melyeknek, az adott típusra vonatkozó indikátor értéke (IndVal) $\alpha = 0.05$ szignifikancia szinten statisztikailag szignifikáns volt (*F1 függelék*, 'CSpecpool' változók).

3.1. Halegyüttes-szerkezeti metrikák

A halfelmérési minták halegyüttes-szerkezetét a fenti trait-ekbe tartozó halfajok mintán belüli 1) közvetlen számával, 2) relatív fajszámával (azaz az adott minta összes faja közül hányad rész képvisel egy bizonyos trait-et), és 3) relatív egyedszámával kvantifikáltuk, úgy, hogy csak a természetesen honos (biogeográfiai státusz) halfajokat vettük figyelembe. Minden mintát jellemeztünk az idegen halfajok (biogeográfiai státusz) mintán belüli relatív egyedszámával, és a mintában előfordult karakterfajoknak a típus karakterfajaként azonosított halfajok összes számához viszonyított fajszámával (karakterfaj-készlethez való hasonlóság). E halegyüttes szerkezetet jellemző változókat a továbbiakban a kidolgozandó index állományszerkezeti metrikáinak tekintettük.

Az egyes típusokon belül, az egymással szoros statisztikai összefüggést mutató metrikák számát csökkentettük abból a célból, hogy ne legyenek a közösségszerkezet variabilitásának nagyrészt ugyanazon részét jellemző metrikák az indexben. A metrikák kizárásáról a variancia inflációs faktor (VIF) értékük (Reiczigel et al. 2007), és szakmai megfontolások (pl. a származtatott főkomponensekkel szemben az eredeti stresszorokat részesítettük előnybe) alapján döntöttünk. A további munkafázisokhoz megtartott metrikák VIF értéke 5 alatt maradt.

4. Mintanagyság

Az indexkészítéshez használt halfelmérések adatait tartalmazó adattáblázat a kiinduláskor összesen 1544 halas felmérést tartalmazott. Az adattábla az MTA Ökológiai Kutatóközpont saját és szakirodalmi adatokon alapuló, standardizált felmérések adataiból állt össze (lásd Dolezsai et al. 2015). A felmérések különböző mintavételi helyek, esetenként egyazon mintavételi hely időben ismételt felméréseinek adatait tartalmazták. 23 felmérés esetén a víztest nem volt típusba sorolva, illetve 12 felmérés esetén az adott mintavételi helyen nem sikerült halat kimutatni. A nem tipizált és halakat nem tartalmazó felméréseket a további elemzésből kizártuk. Továbbá, mivel a Duna főágához tartozó víztestek száma csupán hét volt (köztük utólagosan feltárt, hibás vízgyűjtőkóddal rendelkező dunai felmérések is voltak), a Duna típust (310 felmérés) kizártuk a típusspecifikus indexfejlesztésből és később egy kombinált indexet alkottunk a dunai felmérések minősítéséhez (l. 2.12. *A Duna hidrogeomorfológiai típus indexének összeállítása*). Így az indexcsalád típusspecifikus fejlesztésű tagjainak kidolgozásához összesen 1199 db halas felmérést használtunk (5. táblázat).

5. táblázat. Az indexcsalád típus-specifikus fejlesztésű tagjainak kidolgozásához használt 1199 db halas felmérés első öt vízfolyástípus közötti eloszlása

Típus (type)	1 SMS	2 HLS	3 HLR	4 LLS	5 LLR
Felmérések száma (# of surveys)	74	440	78	436	171

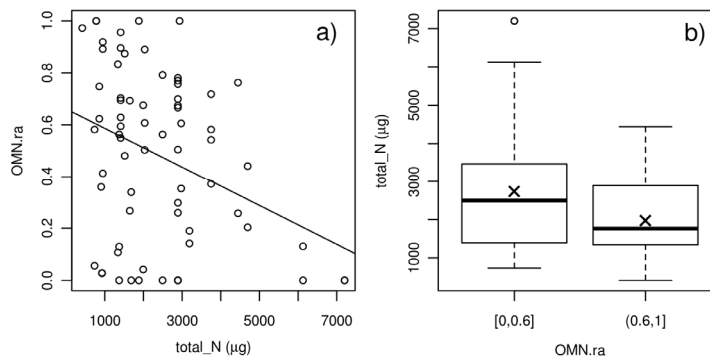
5. A típus-specifikus fejlesztésű indexek összeállítása

5.1. Metrika–stresszor kapcsolatok vizsgálata: releváns metrikák szelektálása

A metrikák és a stresszorok közötti statisztikai kapcsolatot a típuson belül minden metrika és minden stresszor között, páronként Pearson-féle korrelációs koefficienssel valamint a párok szórásdiagramjának vizuális értékelésével vizsgáltuk. Az összes metrika–stresszor pár kombinációból azokat tekintettük statisztikailag összefüggőnek, melyeknél a korrelációs koefficiens szignifikanciaértéke kisebb volt, mint 0.05. Azon metrikákat, melyek valamilyen stresszorral szignifikáns korrelációt mutattak, releváns metrikáknak tekintettük.

5.2. Metrika–stresszor kapcsolatok vizsgálata: szelektált metrikák értékkészletének felosztása

A szelektált releváns metrikák értékkészletét a velük szignifikánsan korreláló stresszor kapcsolatának függvényében két vagy három részre (csoportra) tagoltuk (metrika értékkészlet-csoportok, MÉKCs). A felosztás során arra törekedtünk, hogy a felosztási határok a metrika eloszlásának olyan percentilisei legyenek, amelyek alkalmazásával a létrehozott metrika értékkészlet-csoportokban a stresszor eloszlásai a lehető legjobban különböznek egymástól. Például, az 1 SMS típusban az omnivor fajok relatív abundanciája metrika (OMN.ra) szignifikánsan korrelált a teljes nitrogén koncentráció stresszorról (total_N) ($r = -0.34$, $p = 0.004$; 1.a. ábra). A metrika értékkészletének a 56.8-dik percentilisének való tagolásával a stresszor eloszlásának átlaga szignifikánsan különbözött a metrika értékkészletében levő [0,0.6] és (0.6,1] intervallumok által definiált csoportokban (csoportátlagok: 2733.181 $\mu\text{g/l}$ és 1967.569 $\mu\text{g/l}$, $t = 2.3361$, $df = 64.255$, $p = 0.023$; 1.b. ábra).



1. ábra. Példa a metrikák értékkészlet-csoportokra való felosztására. a) Az SMS típusban az omnivor fajok relatív abundanciája metrika (OMN.ra) és a teljes nitrogén koncentráció (total_N) stresszor kapcsolata. A ferde folytonos vonal az illesztett regressziós egyenes. b) A teljes nitrogénkoncentráció stresszor eloszlása az omnivor fajok relatív abundanciája metrika értékkészletének [0,0.6] és (0.6,1] intervallumok által definiált csoportjaiban. A dobozokban levő vastag vízszintes vonal a mediánt, az 'x' az átlagot jelzi

5.3. Metrika–stresszor kapcsolatok vizsgálata: pontozás (scoring)

A releváns metrikák meghatározott stresszor függvényében való felosztásával kapott értékkészlet-csoportokhoz (MÉKCs), azok intervallumainak határait pontozási kritériumnak (scoring criteria) tekintve, a MÉKCs-okhoz pontszámokat rendeltünk. A pontszámok egytől a MÉKCs-ok darabszámáig terjedő egész számok voltak. A metrika–stresszor kapcsolat pozitív, illetve negatív jellegétől függően a pontszámok hozzárendelése úgy történt, hogy a

legnagyobb stresszor értékekhez (legnagyobb terhelés) kapcsolódó MÉKCs-hoz a legkisebb pontszámot, azaz 1-et társítottunk, míg a legkisebb stresszor értékekhez (legenyhébb terhelés) kapcsolódó MÉKCs-hoz a legmagasabb pontszámot társítottuk. Például, az SMS típusban az omnivor fajok relatív abundanciája metrika (OMN.ra) negatív kapcsolatban volt a teljes nitrogénkoncentráció stresszorral. Ez azt jelenti, hogy a stresszor átlagos értéke nagyobb volt a metrika [0,0.6] értékkészlet-csoportjában, mint a (0.6,1] értékkészlet-csoportjában. Így egy adott minta esetén a pontozási kritérium és a pontozás a következő: ha a mintában az omnivor fajok relatív abundanciája a [0,0.6] intervallumba esik, a metrika pontszáma 1, ha a (0.6,1] intervallumba esik, akkor a metrika pontszáma 2. Ennek a ponttársítási algoritmusnak az az eredménye, hogy a metrika–stresszor kapcsolat pozitív, illetve negatív jellegétől függetlenül, a magasabb pontszám minden esetben kedvezőbb (alacsonyabb stresszor érték) állapotra utal.

5.4. Metrika–stresszor kapcsolatok vizsgálata: metrikák súlyozása

Az indexbe bekerült metrikák értékkészlet-csoportjaihoz rendelt pontszámokat a következő szempontok szerint súlyoztuk. 1) A mind az öt típus indexébe beépített idegen halfajok relatív abundanciája metrikát a típusok közt egységesen 3-as súllyal vettük figyelembe. 2) A mind az öt típus indexébe beépített karakterfaj-készlethez való hasonlóság metrikát a típusok közt egységesen 4-as súllyal vettük figyelembe. 3) Az egyéb metrikák súlyát ahhoz igazítottuk, hogy a szóban forgó metrika az adott értékkészlet-csoport felosztás mellett hány darab, egymással statisztikailag szorosan nem összefüggő stresszorral mutat összefüggést. Például, az LLS típusban a metafitikus élőhelyen táplálkozó fajok száma metrika (MET.sn), a [0,3] és [3,8] MÉKCs-ok esetén három stresszorral mutatott szignifikáns kapcsolatot: *landuse_index*, *landuse.PC1* és *wchem.PC1*. Azonban e három stresszor közül a *landuse_index* és a *landuse.PC1* egymással szorosan összefüggött, ezért a metrika az indexben nem 3-as, hanem 2-es súlyt kapott. E súlyozási szempontokból eredően az indexek mind a halegyüttes összetételének természetességére, mind jól meghatározott stresszorhatásokra is érzékenyek.

5.5. Az index pontszámának számítása

Egy adott vízfolyás-típusba tartozó halas minta HMMFI index szerinti pontszáma ($HMMFI_{sample}$) a típusba tartozó metrikák súlyozott pontszámainak összege. Az index pontszáma kvantitatívan jellemzi az ökológiai állapotot, azonban a HMMFI pontszám lehetséges minimum és maximum értékei típusonként eltérőek, ezért az index mintából számított pontszáma csupán a minták típuson belüli összehasonlítására alkalmas.

6. A referenciaállapot és az ökológiai minőségi hányados (EQR) számítása

Adott vízfolyás-típus esetén a halegyüttes-szerkezet típusra jellemző referenciaállapotát a típus indexében szereplő metrikák legmagasabb pontszámú értékkészlet-csoportjainak intervallumhatárai jelölik ki. Azaz, a referenciaállapotnak megfelelő halegyüttesek esetén a szóban forgó metrikák mintából becsült értékei a legmagasabb pontszámú értékkészlet-csoportokba tartoznak. Felhívjuk a figyelmet arra, hogy ez a fajta referencia csupán a halas felmérések gyűjtési időszakára aktuálisan jellemző, statisztikai alapon nyugvó, viszonyítási alapnak (*benchmark*) tekinthető, és nem azonosítható a halegyüttesek emberi hatásoktól mentes feltételezett állapotával (vö. Kopf et al. 2015).

Az ökológiai minőségi hányados (*Ecological Quality Ratio*, EQR) a kvantitatívan kifejezett aktuális ökológiai állapot referencia állapothoz viszonyított normalizált formája:

$$EQR_{sample} = \frac{HMMFI_{sample} - HMMFI_{min}}{HMMFI_{max} - HMMFI_{min}}$$

ahol EQR_{sample} a minta EQR értéke; $HMMFI_{sample}$ a minta vízfolyás-típusának megfelelő HMMFI

indexszel kiszámított pontszáma; $HMMFI_{min}$ a minta vízfolyás-típusának megfelelő index leggyengébb ökológiai állapot mellett számítható pontszáma; $HMMFI_{max}$ a minta vízfolyás-típusának megfelelő index legjobb ökológiai állapot (referencia) mellett számítható pontszáma. Az EQR érték tehát szintén kvantitatívan jellemzi az ökológiai állapotot, de a normalizálás eredményeként a minták EQR értéke $[0,1]$ intervallumba esik, ahol a 0 rossz, az 1 kiváló ökológiai állapot jelöl. Ezáltal az EQR érték alkalmazásával lehetővé válik a különböző vízfolyás-típusba tartozó, vagy akár más normalizált értéket adó biotikus indexszel minősített minták ökológiai állapotának közvetlen összehasonlítása is.

Az EQR értékeket az index kidolgozásához felhasznált összes halas felmérésre (1199 db) kiszámítottuk.

7. Ökológiai minőségi osztályba (EQC) való sorolás – ökológiai állapotminősítés

A ökológiai állapotot a VKI előírásainak megfelelően ötosztályos ordinális skálán jellemeztük. A minőségi osztályok EQR érték függvényében való megállapításához a 6. táblázatban levő konvertálási sémát alkalmaztuk.

6. táblázat. A minőségi osztály EQR érték alapján történő megállapításához alkalmazott EQR intervallumok

EQR értékintervallum	Minőségi osztály (Ecological Quality Class)
(0.80,1.0]	kiváló (<i>high</i>)
(0.60,0.80]	jó (<i>good</i>)
(0.40,0.60]	mérsékelt (<i>moderate</i>)
(0.20,0.40]	gyenge (<i>poor</i>)
[0,0.20]	rossz (<i>bad</i>)

A ökológiai állapotminősítést elvégeztük 1) az index kidolgozásához felhasznált 1199 db egyedi halas felmérésre (mintára), másrészt 2) azokra a víztestekre, melyekhez az index kidolgozásához használt halas felmérések tartoztak. Utóbbi esetben a minőségi osztályba sorolás előtt a víztesteken belül átlagoltuk a több helyről származó, illetve időben ismételt halas felmérések EQR értékeit, és a víztest minőségi osztályát az átlagos EQR érték alapján állapítottuk meg.

8. Az új indexek (HMMFI) stresszor-specifitásának vizsgálata

Az új típusspecifikusan kidolgozott indexek stresszor-specifitását típusonként, a felmérésekre kiszámított EQR értékek és a stresszorok közötti korreláció-elemzésekkel, valamint lineáris regressziós modellel vizsgáltuk. A lineáris regressziós modellben az EQR értéket tekintettük függő változónak. A modell készítésének kiindulásakor az EQR értékekkel szignifikánsan korreláló stresszorokat használtuk független változóknak. A kiindulási modelleken kétirányú lépésenkénti modellszelekción végítettük, hogy kiszűrjük a gyenge magyarázó erejű redundáns stresszorokat. Így a modellszelekción eredményeként előállt ún. minimálisan adekvát modell (Crawley 2005), az adott vízfolyás-típus minősítő indexének változatosságát leginkább magyarázó stresszorokat tartalmazta csupán.

9. Az EFI+ index stresszor-specifitásának vizsgálata

Az EFI+ index stresszor-specifitásának vizsgálati módszerei megegyeztek az új index stresszor-specifitás vizsgálatánál használt és fent leírt módszerekkel.

10. Az új index (HMMFI) és az EFI+ index kapcsolatának vizsgálata

Az új indexcsalád típusspecifikusan kifejlesztett tagjai és az EFI+ index közti kapcsolatot az indexek kidolgozásához használt halas felmérések minősítési eredményeit felhasználva típusonként, lineáris regressziós modellel, és tévesztési mátrixszal vizsgáltuk. A lineáris regressziós modellben a felmérések új indexszel kiszámított EQR értéke szerepelt függő változóként, a vízfolyás-típus kategóriás magyarázó változóként, az EFI+ index pontértéke (EFI *value*) pedig folytonos magyarázó változóként.

A tévesztési mátrix a felmérések két index szerinti ökológiai minőségi osztályokba való besorolásának együttes eloszlását tartalmazta. A mátrix főátlójában azon felmérések száma volt, melyeket mindkét index azonos minőségi osztályba sorolt. A mátrix főátlón kívüli elemei a két index által eltérő minőségi osztályba sorolt felmérések gyakoriságát tartalmazták. A két index közötti osztályozási megfeleltethetőséget a helyes osztályozások arányával (*proportion correctly classified*, PCC), illetve a Cohen-féle kappá mutatóval kvantifikáltuk (Agresti 2002, Kateri 2014). A PCC mutató a két index által ugyanazon osztályba sorolt felmérések számának összes felméréshez viszonyított aránya (osztályozási megbízhatóság). A Cohen-féle kappá mutató a helyes osztályozások arányának a véletlenből adódó azonos osztályozás valószínűségével korrigált formája, ezért a helyes osztályozások egyszerű arányához képest realisabb alapot nyújt a két index egymásnak való megfeleltethetőségének értékeléséhez.

11. Az új index validálása

Az indexcsalád validálásához 2015. június 4-e és 2015. augusztus 14-e között, országos lefedettségben, összesen 429 helyről, egységes módszertannal (*F2 függelék*) gyűjtött felmérések adatait használtuk (teszt adatsor). Kiemeljük, hogy ezek az adatok az új index kifejlesztéséhez használt adatoktól teljesen függetlenek.

A teszt adatsor terepi gyűjtése folyamán a felmérést végző szakértők a terepi megítélésük alapján a felmért élőhelyeket természetességi állapotuk szerint értékelték. E szakértői természetességi állapot megítélésekor a szakemberek alapvetően a víz emberi érzékszervekkel való vizsgálata alapján kialakul benyomást (pl. habzik-e, kellemetlen szag tapasztalható-e), a meder hidromeomorfológiai állapotát (pl. szabályozott, kotort), és a mintázott vízfolyásszakasz parti övének (kb. néhányszor tíz méter) felszínborítását (pl. mezőgazdasági, település belterület) tartották szem előtt. A természetközeli állapotú élőhelyeket 1-es, a gyengén módosított állapotú élőhelyeket 2-es, az erősen módosított állapotú élőhelyeket 3-as természetességi állapotú osztályba sorolták.

A teszt adatsorból kizárásra kerültek: 1) a folyóvízi hidromeomorfológiai típusba nem besorolt víztesteken végzett felmérések (állóvizek, 16 db); 2) a terepen szakértői természetességi állapot értékelést nem kapott víztesteken végzett felmérések (9 db); 3) a Duna típusba tartozó felmérések (22 db). A dunai felmérések kizárásának oka az volt, hogy a HMMFI indexcsalád mostani formájában a Duna típust minősítő index nem típusspecifikus fejlesztésű (l. alább a 2.12. *A Duna hidromeomorfológiai típus indexének összeállítása* fejezetet). Így az 1–5 vízfolyás-típusra kifejlesztett indexek validációjához összesen 382 db felmérés adata állt rendelkezésre (7. táblázat).

7. táblázat. A teszt adatsor HMMFI index validálásához felhasznált 382 db felmérésnek vízfolyástípusok közötti gyakorisági eloszlása

Típus (<i>type</i>)	1 SMS	2 HLS	3 HLR	4 LLS	5 LLR
Felmérések száma (<i># of surveys</i>)	19	105	26	167	65

A teszt adatsor felméréseit az új indexszel minősítettük. A HMMFI index alapján végzett ökológiai állapotminősítés eredményének a terepi szakértői természetességi állapot értékelés eredményével való összefüggését khi-négyzet próbával teszteltük (Reiczigel et al. 2007, Kateri 2014). Mivel a khi-négyzet próba a kétféle értékelési módszer közötti kapcsolatban levő trendet figyelmen kívül hagyta, a HMMFI indexszel meghatározott minőségi osztályok és a szakértők által megítélt minőségi osztályok közötti viszonyt lineáris trend elemzéssel (Agresti 2002, Kateri 2014) is teszteltük.

12. A Duna hidromeomorfológiai típus indexének összeállítása

A Duna folyam hazai szakaszának többi felszíni vízfolyásainkhoz viszonyított unikális jellege, és részben ebből eredően az indexcsalád kidolgozásához rendelkezésünkre álló dunai adatok térbeli eloszlása nem tette lehetővé, hogy a Duna típus indexét is típusspecifikusan, azaz csak a dunai felmérésekhez tartozó halegyüttes-metrikák és

stresszorok közötti kapcsolatokra fókuszálva fejlesszük ki. Azonban a Duna ökológiai állapotának értékelése alapvető elvárás a VKI által előírt vízgyűjtő-gazdálkodási tervekben. Ezért a Duna típus minősítéséhez a dombvidéki (HLR) és síkvidéki folyókra (LLR) típus-specifikusan elkészített indexek kombinálásával készítettünk indexet, mivel a hazai Duna szakasz gyorsabb sodrású, durvább aljzatú, és lassabb áramlású, finomabb aljzatú szakaszokat egyaránt tartalmaz, valamint a hossz-szelvény mentén a lokális fajkészletben levő különbségek általában kisebbek, mint egy dombvidéki és síkvidéki folyó fajkészlete közti különbségek.

A kombinált dunai index összeállításának lépései a következők voltak. 1) A dombvidéki folyók (HLR) és a síkvidéki folyók (LLR) indexében szereplő metrikákat egy közös metrikacsoportba rendeztük. Ebben a közös metrikacsoportban az idegen halfajok relatív abundanciája és a karakterfaj-készlethez való hasonlóság metrikákon kívüli nem volt duplum, így ezen egyedi metrikák megtartották az eredeti metrika értékkészlet-csoportjaikat (MÉKCs). 2) Az idegen halfajok relatív abundanciája és a karakterfaj-készlethez való hasonlóság metrika MÉKCs beosztása is mind az öt Dunán kívüli típusban egységes (típusfüggetlen), így e két metrikai is megtartotta ugyan ezt az egységes MÉKCs beosztást, azonban a karakterfaj-készlethez való hasonlóság metrikához a Dunára meghatározott karakterfaj-készletet társítottuk. 3) Végül a karakterfaj-készlethez való hasonlóság metrika súlyát 10-re emeltük. Ezt az értéket arra alapoztuk, hogy a HLR és LLR típusok kombinálásával a Duna típus indexébe került metrikák száma a HLR és LLR típusokban levő metrikák számához képest durván megkétszereződött, így a szóban forgó metrika többi típusban szereplő 4-es súlyértékét 2.5-szeresére növeltük.

13. A Duna típus HMMFI indexének teljesítménye és a mintavételi ráfordítás kapcsolata

A teszt adatsorban szereplő dunai felmérések egy-egy 500 m-es szakasról, csónakból aggregátoros elektromos eszközzel (Hans Grassl EL 64II) a part közelében éjszaka vett minta adatait tartalmazták. A 22 db 500 méteres mintavételi szakaszból egyet kizárva, a fennmaradó 21 szakaszt elemeztük, melyek a hazai Duna mentén Rajka és Mohács között összesen hét helyszínen helyezkedtek el, és az egyes helyszíneken három-három darab 500 méteres egység volt.

A Duna típus HMMFI indexe és a dunai mintavételi ráfordítás közti kapcsolatot rarefaction elemzéssel vizsgáltuk. A mintavételi egységek számának függvényében Monte Carlo randomizációs eljárással (500 iteráció) becsültük a kumulatív összevonással készített adatok EQR értékének várható értékét és szórását.

Eredmények

1. Magyar Multimetrikus Halindex (HMMFI) család

Az HMMFI családot képező új indexek általános formulája:

$$HMMFI_{sample} = \sum_{i=1}^m w_i \times s(M_i)$$

melyben $HMMFI_{sample}$ a mintának megfelelő vízfolyás-típushoz tartozó HMMFI index mintára kiszámított pontszáma; m az adott típus indexében szereplő metrikák száma; w_i az i -dik metrika súlya; $s(M_i)$ az i metrika mintabeli értéktől függő pontszáma (*score*); M_i az i metrika mintabeli értéke. Ha a minősítendő élőhelyről halakat nem sikerült kimutatni, akkor a HMMFI index értéke nem számítható. Ez esetben a minta nulla EQR-t és 'rossz' minőségi osztályba való besorolást kap.

A HMMFI indexekkel történő elfogadható ökológiai állapotminősítés az *F2 függelékben* megadott mintavételi módszertannal végzett felméréseket feltételezi.

A indexekben szereplő metrikák, azok MÉKCs intervallumai, a MÉKCs-okhoz tartozó pontszámok, és a metrikák súlyai a *8. táblázatban* vannak összefoglalva. A típusok indexeinek minimális és maximális értékeit a *9. táblázat* tartalmazza.

8. táblázat. A Magyar Multimetrikus Halindex (HMMFI) család típusspecifikusan kidolgozott indexeiben és a kombinált dunai indexében szereplő metrikák, metrika értékkészlet-csoportok (MÉKCs), a MÉKCs-ok pontszámai és a metrikák súlyai a víztest-hidrogeomorfológiai típusok szerint. A MÉKCs intervallumok jelölésében a szögletes zárójel zárt, a kerek zárójel nyitott intervallumhatárt jelöl. A metrikák főbb csoportjainak rövidítései: 'ra' relatív abundancia; 'sn' fajszám; 'rsn' relatív fajszám

Típus (type)	Metrikák (metrics)	MÉKCs intervallumok (scoring criteria)	Pontszámok (score, s)	Súly (weight, w)
1 SMS	OMN.ra	[0,0.60]	1	1
		(0.60,1]	2	
	BEN.ra	[0,0.15]	2	2
		(0.15,1]	1	
	OMN.sn	[0,2]	2	1
		(2,∞]	1	
	PEL.sn	[0,]	1	1
		(1,∞]	2	
	PEL.rsn	[0,0.30]	1	1
		(0.30,1]	2	
	BEN.rsn	[0,0.50]	2	1
		(0.50,1]	1	
	LIT.rsn	[0,0.75]	1	3
		(0.75,1]	2	
	NN.ra	[0,0.05]	3	3
		(0.05,0.50]	2	
(0.50,1]		1		
[0,0.25]		1		
CSpecpool	[0,0.25]	1	4	
	(0.25,0.50]	2		
	(0.50,0.75]	3		
	(0.75,1]	4		
2 HLS	RHE.ra	[0,0.60]	1	1
		(0.60,1]	2	
	EU.ra	[0,0.17]	2	1
		(0.17,1]	1	
	SPEC.ra	[0,0.50]	1	2
		(0.50,1]	2	
	MET.sn	[0,2]	2	1
		(2,∞]	1	
	PHY_LIT.sn	[0,2]	2	1
		(2,∞]	1	
	RHE.sn	[0,3]	1	1
		(3,∞]	2	
	LIT.rsn	[0,0.50]	1	1
		(0.50,1]	2	
	SPEC.rsn	[0,0.60]	1	1
		(0.60,1]	2	
NN.rsn	[0,0.20]	2	2	
	(0.20,1]	1		
NN.ra	[0,0.05]	3	3	
	(0.05,0.50]	2		
	(0.50,1]	1		
	[0,0.25]	1		
CSpecpool	[0,0.25]	1	4	
	(0.25,0.50]	2		
	(0.50,0.75]	3		
	(0.75,1]	4		
3 HLR	LIT.ra	[0,0.20]	1	1
		(0.20,1]	2	
	TOL.ra	[0,0.11]	2	1
		(0.11,1]	1	

Típus (type)	Metrikák (metrics)	MÉKCs intervallumok (scoring criteria)	Pontszámok (score, s)	Súly (weight, w)
	RHE.sn	[0,6]	1	1
		[6,∞]	2	
	GEN.sn	[0,3]	2	1
		[3,∞]	1	
	TOL.sn	[0,3]	2	1
		[3,∞]	1	
	NN.sn	[0,1]	2	2
		[1,∞]	1	
	INV_BEN.rsn	[0,0.33]	1	1
		[0.33,1]	2	
	MET.rsn	[0,0.16]	2	1
		[0.16,1]	1	
	NN.ra	[0,0.05]	3	3
		[0.05,0.50]	2	
		[0.50,1]	1	
	CSpecpool	[0,0.25]	1	4
		[0.25,0.50]	2	
		[0.50,0.75]	3	
		[0.75,1]	4	
4 LLS	MET.ra	[0,0.35]	1	1
		[0.35,1]	2	
	PHY.ra	[0,0.40]	2	1
		[0.40,1]	1	
	RHE.ra	[0,0.20]	1	1
		[0.20,1]	2	
	OMN.sn	[0,2]	1	1
		[2,∞]	2	
	MET.sn	[0,3]	1	2
		[3,∞]	2	
	PHY.rsn	[0,0.60]	2	1
		[0.60,1]	1	
	TOL.rsn	[0,0.50]	2	2
		[0.50,1]	1	
	NN.rsn	[0,0.25]	2	2
		[0.25,1]	1	
	NN.ra	[0,0.05]	3	3
		[0.05,0.50]	2	
		[0.50,1]	1	
	CSpecpool	[0,0.25]	1	4
		[0.25,0.50]	2	
		[0.50,0.75]	3	
		[0.75,1]	4	
5 LLR	PEL.ra	[0,0.22]	1	2
		[0.22,0.80]	2	
		[0.80,1]	3	
	PEL.sn	[0,4]	1	1
		[4,∞]	2	
	BEN.sn	[0,7]	1	1
		[7,∞]	2	
	OMN.rsn	[0,0.44]	3	2
		[0.44,0.78]	2	
		[0.78,1]	1	
	PIS.rsn	[0,0.065]	1	1
		[0.065,0.25]	2	
		[0.25,1]	3	

Típus (type)	Metrikák (metrics)	MÉKCs intervallumok (scoring criteria)	Pontszámok (score, s)	Súly (weight, w)
	BEN.rsn	[0,0.43]	1	1
		(0.43,1]	2	
	PHY_LIT.rsn	[0,0.36]	2	1
		(0.36,1]	1	
	RHE.rsn	[0,0.25]	1	1
		(0.25,0.44]	2	
		(0.44,1]	3	
	SPEC.rsn	[0,0.25]	1	1
		(0.25,0.50]	2	
		(0.50,1]	3	
	NN.ra	[0,0.05]	3	3
		(0.05,0.50]	2	
		(0.50,1]	1	
	CSpecpool	[0,0.25]	1	4
		(0.25,0.50]	2	
		(0.50,0.75]	3	
		(0.75,1]	4	
6 Danube	LIT.ra	[0,0.20]	1	1
		(0.20,1]	2	
	TOL.ra	[0,0.11]	2	1
		(0.11,1]	1	
	RHE.sn	[0,6]	1	1
		(6,∞]	2	
	GEN.sn	[0,3]	2	1
		(3,∞]	1	
	TOL.sn	[0,3]	2	1
		(3,∞]	1	
	NN.sn	[0,1]	2	2
		(1,∞]	1	
	INV_BEN.rsn	[0,0.33]	1	1
		(0.33,1]	2	
	MET.rsn	[0,0.16]	2	1
		(0.16,1]	1	
	PEL.ra	[0,0.22]	1	2
		(0.22,0.80]	2	
		(0.80,1]	3	
	PEL.sn	[0,4]	1	1
		(4,∞]	2	
	BEN.sn	[0,7]	1	1
		(7,∞]	2	
	OMN.rsn	[0,0.44]	3	2
		(0.44,0.78]	2	
		(0.78,1]	1	
	PIS.rsn	[0,0.065]	1	1
		(0.065,0.25]	2	
		(0.25,1]	3	
	BEN.rsn	[0,0.43]	1	1
		(0.43,1]	2	
	PHY_LIT.rsn	[0,0.36]	2	1
		(0.36,1]	1	
	RHE.rsn	[0,0.25]	1	1
		(0.25,0.44]	2	
		(0.44,1]	3	

Típus (type)	Metrikák (metrics)	MÉKCs intervallumok (scoring criteria)	Pontszámok (score, s)	Súly (weight, w)
SPEC.rsn		[0,0.25]	1	1
		(0.25,0.50]	2	
		(0.50,1]	3	
NN.ra		[0,0.05]	3	3
		(0.05,0.50]	2	
		(0.50,1]	1	
CSpecpool		[0,0.25]	1	10
		(0.25,0.50]	2	
		(0.50,0.75]	3	
		(0.75,1]	4	

9. táblázat. A Magyar Multimetrikus Halindex (HMMFI) család vízfolyás-típusoknak megfelelő típusspecifikusan kidolgozott indexeinek és a kombinált dunai indexének a lehetséges minimális és maximális pontszámai. A lehetséges maximális pontszám a legjobb ökológiai állapotba levő referencia halegyüttesekre jellemző

Típus (type)	HMMFI _{min}	HMMFI _{max} (referencia)
1 SMS	17	45
2 HLS	18	47
3 HLR	16	43
4 LLS	18	47
5 LLR	18	54
6 Danube	33	96

2. Víztestek ökológiai állapotminősítése

Az index kidolgozásához felhasznált halas felmérések összesen 351 db egyedi azonosítóval rendelkező víztesthez tartoztak. E víztesteknek az új indexszel való minősítése eredményeként a 351 víztestből 10 db (2.8%) 'kiváló', 86 db (26.5%) 'jó', 127 db (36.2%) 'mérsékelt', 86 db (26.5%) 'gyenge' és 42 db (12%) 'rossz' minőségi osztályba való besorolást kapott (10. táblázat; F3 függelék).

10. táblázat. A Magyar Multimetrikus Halindex (HMMFI) családdal minősített 351 db víztest ökológiai minőségi osztályok közötti eloszlása a víztestek hidrogeomorfológiai típusa szerinti bontásban. A cellákban levő számok a víztestek darabszámát jelölik; a mögöttük zárójelben levő százalékos értékek az adott típusba tartozó víztestek közül az adott vízminőségi osztályba sorolt víztestek arányát fejezik ki. Az utolsó oszlopban az adott típusba tartozó víztestek összegzett száma található (sorösszeg). Az utolsó sorban az azonos ökológiai minőségi osztályba sorolt víztestek típusok között összegzett száma olvasható (oszlopösszeg)

Típus (type)	Rossz (bad)	Gyenge (poor)	Mérsékelt (moderate)	Jó (good)	Kiváló (high)	Sum
1 SMS	0 (0%)	5 (17.86%)	10 (35.71%)	11 (39.29%)	2 (7.14%)	28 (100%)
2 HLS	18 (13.53%)	37 (27.82%)	42 (31.58%)	35 (26.32%)	1 (0.75%)	133 (100%)
3 HLR	0 (0%)	3 (15.79%)	7 (36.84%)	4 (21.05%)	5 (26.32%)	19 (100%)
4 LLS	23 (17.16%)	36 (26.87%)	49 (36.57%)	25 (18.66%)	1 (0.75%)	134 (100%)
5 LLR	1 (2.7%)	5 (13.51%)	19 (51.35%)	11 (29.73%)	1 (2.7%)	37 (100%)
Sum	42 (11.97%)	86 (24.50%)	127 (36.18%)	86 (24.50%)	10 (2.85%)	351 (100%)

3. A Magyar Multimetrikus Halindex család stresszor-specifitása

Az új indexszel a felmérésekre kiszámított EQR értékek minden vízfolyás-típusban több stresszorról is szignifikáns korrelációt mutattak (11. táblázat).

11. táblázat. A halas felmérésekre a Magyar Multimetrikus Halindex (HMMFI) családdal kiszámított EQR értékekkel szignifikánsan ($\alpha = 0.05$) korreláló stresszorok. 't' próbatatistika; 'df' szabadsági fokok száma; 'p' a korrelációs koefficiens értéke egyenlő nulla nullhipotézis tesztjének p értéke normál alakban; 'r' korrelációs koefficiens; '95%Clow' és '95%Clup' a korrelációs koefficiens 95%-os konfidencia intervallumának határai

Típus	Stresszor	t	df	p	r	95%Clow	95%Clup
1 SMS	sinuosity	2.01	52	5.0e-02	0.27	0.0006	0.50
	landused_index	-2.98	72	3.9e-03	-0.33	-0.52	-0.11
	artificial_surfaces	-2.33	72	2.2e-02	-0.27	-0.47	-0.04
	agricultural_areas	-2.27	72	2.6e-02	-0.26	-0.46	-0.03
	landuse.PC1	2.72	72	8.2e-03	0.31	0.08	0.50
	NO3_N	-3.11	68	2.8e-03	-0.35	-0.54	-0.13
	NO2_N	-3.21	68	2.0e-03	-0.36	-0.55	-0.14
	total_N	-2.73	68	8.1e-03	-0.31	-0.51	-0.08
	TDS	-4.40	56	5.0e-05	-0.51	-0.68	-0.29
	wchem.PC1	2.81	56	6.9e-03	0.35	0.10	0.56
	wchem.PC2	2.37	56	2.1e-02	0.30	0.05	0.52
2 HLS	agricultural_areas	-2.27	438	2.4e-02	-0.11	-0.20	-0.01
	water_bodies	-5.74	438	1.8e-08	-0.26	-0.35	-0.18
	landuse.PC2	5.02	438	7.5e-07	0.23	0.14	0.32
	NH4_N	-3.95	426	9.2e-05	-0.19	-0.28	-0.09
	Chl_a	-7.06	426	7.0e-12	-0.32	-0.41	-0.24
	NO2_N	-3.80	426	1.6e-04	-0.18	-0.27	-0.09
	PO4	-3.62	426	3.3e-04	-0.17	-0.26	-0.08
	KOId	-4.08	426	5.3e-05	-0.19	-0.28	-0.10
	total_P	-3.29	426	1.1e-03	-0.16	-0.25	-0.06
	TDS	-10.49	269	8.3e-22	-0.54	-0.62	-0.45
	pH	-8.43	426	5.3e-16	-0.38	-0.46	-0.29
	wchem.PC1	-7.35	269	2.3e-12	-0.41	-0.50	-0.30
wchem.PC2	5.82	269	1.7e-08	0.33	0.22	0.44	
wchem.PC3	2.17	269	3.1e-02	0.13	0.01	0.24	
3 HLR	sinuosity	2.66	76	1.0e-02	0.29	0.07	0.48
	landused_index	-3.03	76	3.3e-03	-0.33	-0.51	-0.11
	artificial_surfaces	-3.34	76	1.2e-03	-0.36	-0.54	-0.15
	mean_TDS	-2.13	76	3.7e-02	-0.24	-0.44	-0.02
	pH	2.96	76	4.0e-03	0.32	0.11	0.51
	wchem.PC3	2.19	76	3.2e-02	0.24	0.02	0.44
	wchem.PC4	2.03	76	4.5e-02	0.23	0.005	0.43
4 LLS	landused_index	-3.05	434	2.4e-03	-0.15	-0.24	-0.05
	artificial_surfaces	-3.66	434	2.8e-04	-0.17	-0.26	-0.08
	water_bodies	-2.00	434	4.5e-02	-0.10	-0.19	-0.002
	landuse.PC1	-2.66	434	8.1e-03	-0.13	-0.22	-0.03
	NH4_N	-3.56	429	4.1e-04	-0.17	-0.26	-0.08
	BOI5	-6.59	429	1.3e-10	-0.30	-0.39	-0.22
	Chl_a	-2.28	429	2.3e-02	-0.11	-0.20	-0.01
	NO2_N	-2.06	429	4.0e-02	-0.10	-0.19	-0.005
	PO4	-4.75	429	2.8e-06	-0.22	-0.31	-0.13
	KOId	-5.92	429	6.7e-09	-0.27	-0.36	-0.18
	total_P	-5.15	429	4.0e-07	-0.24	-0.33	-0.15
	TDS	-3.03	227	2.7e-03	-0.20	-0.32	-0.07
	pH	2.57	429	1.0e-02	0.12	0.03	0.22
	wchem.PC1	-3.89	226	1.3e-04	-0.25	-0.37	-0.12
wchem.PC3	-2.63	226	9.3e-03	-0.17	-0.30	-0.04	

Típus	Stresszor	t	df	p	r	95%Clow	95%Clup
5 LLR	artificial_surfaces	-2.70	169	7.7e-03	-0.20	-0.34	-0.05
	water_bodies	2.09	169	3.8e-02	0.16	0.009	0.30
	landuse.PC2	3.66	168	3.4e-04	0.27	0.13	0.41
	NH4_N	-4.94	167	1.9e-06	-0.36	-0.48	-0.22
	BO15	-6.21	167	4.1e-09	-0.43	-0.55	-0.30
	Chl_a	-4.03	167	8.5e-05	-0.30	-0.43	-0.15
	NO3_N	-2.54	167	1.2e-02	-0.19	-0.33	-0.04
	NO2_N	-6.57	167	6.2e-10	-0.45	-0.57	-0.32
	PO4	-4.49	167	1.3e-05	-0.33	-0.46	-0.19
	KOId	-3.10	167	2.3e-03	-0.23	-0.37	-0.09
	total_P	-4.93	167	2.0e-06	-0.36	-0.48	-0.22
TDS	-2.51	162	1.3e-02	-0.19	-0.34	-0.04	
wchem.PC1	-5.99	162	1.3e-08	-0.43	-0.54	-0.29	

12. táblázat. A halas felmérésekre a Magyar Multimetrikus Halindex (HMMFI) családdal kiszámított EQR értékek minimálisan adekvát lineáris regressziós modelleji típusonként. A 'Típus' oszlopban a zárójelben a regressziós modellek korrigált determinációs koefficiensei (R^2) olvashatók. A 'Stresszor' oszlopban az '(Intercept)' a tengelymetszeti paraméterre utal. A 'paraméter becslése' a regressziós meredekség, 'SE' a meredekség becslésének standard hibája. 't' próbat statisztika. 'p' a meredekség egyenlő nulla nullhipotézis tesztnek a p értéke normál alakban

Típus (type) (R^2)	Stresszor	Paraméter becslése	SE	t	p
1 SMS (28.3%)	(Intercept)	0.562	0.061	9.28	3.4e-12
	sinuosity	0.084	0.026	3.25	2.1e-03
	total_N	-4.5e-05	1.3e-05	-3.01	4.2e-03
2 HLS (41.2%)	(Intercept)	1.192	0.097	12.32	2.0e-16
	water_bodies	-0.188	0.040	-4.67	4.8e-06
	NH4_N	-0.056	0.019	-2.90	4.1e-03
	NO2_N	-0.807	0.335	-2.41	1.7e-02
	PO4	-1.3e-04	3.3e-05	-3.86	1.5e-04
	KOId	-0.006	0.002	-3.47	6.1e-04
	TDS	-0.001	0.000	-8.71	3.5e-16
	wchem.PC1	0.756	0.159	4.75	3.4e-06
3 HLR (16.7%)	(Intercept)	0.513	0.078	6.56	6.1e-09
	sinuosity	0.113	0.048	2.37	2.0e-02
	artificial_surfaces	-0.008	0.003	-3.10	2.8e-03
4 LLS (12.6%)	(Intercept)	0.604	0.019	31.64	2.0e-16
	artificial_surfaces	-0.004	0.001	-3.41	7.0e-04
	BO15	-0.013	0.004	-3.07	2.2e-03
	KOId	-0.002	0.001	-3.48	5.5e-04
5 LLR (18.3%)	(Intercept)	0.723	0.039	18.62	2.0e-16
	BO15	-0.061	0.010	-6.21	4.1e-09
5 LLR (20.1%)	(Intercept)	0.578	0.017	33.84	2.0e-16
	NO2_N	-1.944	0.296	-6.57	6.2e-10

A regressziós modellek alapján az index viselkedését az SMS típusban a vízfolyások kanyarulatfejlettségével (*sinuosity*) és az összes nitrogén mennyiségével; a HLS típusban a szervesanyag, az ortofoszfát, az ammónium és a nitrit mennyiségével; a HLR típusban a vízfolyások kanyarulatfejlettségével és a vízgyűjtőn levő mesterséges felszín területi arányával; az LLS típusban a szervesanyag mennyiségével és a vízgyűjtőn levő mesterséges felszín területi arányával; az LLR típusban a szervesanyag mennyiségével, illetve a nitrit mennyiségével lehetett leginkább magyarázni (12. táblázat). Az LLR típus esetén a szervesanyag mennyisége (BO15) és a nitrit mennyisége (NO2_N) egymással erősen

redundáns stresszornak bizonyult, vagyis az EQR értékek variabilitásának lényegében ugyanazt a részét magyarázták, ezért az EQR értékre gyakorolt hatásuk statisztikailag nem volt szétválasztható. Ennek a regressziós modellezés szempontjából az a következménye, hogy e két változó egyetlen modellben nem szerepelhetett, viszont külön-külön két azonos minőségű alternatív regressziós modellt lehetett velük készíteni.

13. táblázat. A halas felmérésekre az EFI+ indexszel kiszámított EFI értékkel (EFI value) szignifikánsan ($\alpha = 0.05$) korreláló stresszorok. 't' próbastatisztika; 'df' szabadsági fokok száma; 'p' a korrelációs koefficiens értéke egyenlő nulla nullhipotézis tesztjének p értéke normál alakban; 'r' korrelációs koefficiens; '95%Clow' és '95%Clup' a korrelációs koefficiens 95%-os konfidencia intervallumának alsó és felső határa

Típus (type)	Stresszor	t	df	p	r	95%Clow	95%Clup
1 SMS	TDS	2.30	56	2.5e-02	-0.29	-0.51	-0.04
	pH	-2.00	68	5.0e-02	-0.24	-0.45	0.00
2 HLS	artificial_surfaces	3.89	438	1.2e-04	0.18	0.09	0.27
	agricultural_areas	-2.94	438	3.5e-03	-0.14	-0.23	-0.05
	water_bodies	-6.20	438	1.3e-09	-0.28	-0.37	-0.20
	landuse.PC2	7.98	438	1.3e-14	0.36	0.27	0.44
	Chl_a	-5.85	426	9.7e-09	-0.27	-0.36	-0.18
	KOId	-2.12	426	3.5e-02	-0.10	-0.20	-0.01
	TDS	-7.18	269	6.8e-12	-0.40	-0.50	-0.30
	pH	-3.61	426	3.5e-04	-0.17	-0.26	-0.08
	wchem.PC1	-3.10	269	2.1e-03	-0.19	-0.30	-0.07
	wchem.PC2	4.76	269	3.1e-06	0.28	0.17	0.39
wchem.PC3	4.08	269	6.0e-05	0.24	0.13	0.35	
3 HLR	landused_index	-2.79	76	6.7e-03	-0.30	-0.49	-0.09
	artificial_surfaces	-4.12	76	9.5e-05	-0.43	-0.59	-0.23
	PO4	-3.10	76	2.7e-03	-0.34	-0.52	-0.12
	TDS	-4.34	76	4.3e-05	-0.45	-0.61	-0.25
4 LLS	landused_index	2.30	434	2.2e-02	0.11	0.02	0.20
	artificial_surfaces	4.62	434	5.1e-06	0.22	0.13	0.30
	water_bodies	-2.75	434	6.2e-03	-0.13	-0.22	-0.04
	landuse.PC1	2.19	434	2.9e-02	0.10	0.01	0.20
	landuse.PC2	-4.80	434	2.2e-06	-0.22	-0.31	-0.13
	BOI5	-2.98	429	3.0e-03	-0.14	-0.23	-0.05
	Chl_a	-4.80	429	2.2e-06	-0.23	-0.31	-0.13
	NO3_N	4.17	429	3.7e-05	0.20	0.10	0.29
	KOId	-4.46	429	1.0e-05	-0.21	-0.30	-0.12
	total_N	2.70	429	7.3e-03	0.13	0.04	0.22
wchem.PC2	3.08	226	2.4e-03	0.20	0.07	0.32	
5 LLR	sinuosity	2.29	168	2.3e-02	0.17	0.02	0.32
	agricultural_areas	2.01	169	4.6e-02	0.15	0.00	0.30
	landuse.PC2	2.89	168	4.4e-03	0.22	0.07	0.36
	BOI5	-2.05	167	4.2e-02	-0.16	-0.30	-0.01
	NO3_N	-2.39	167	1.8e-02	-0.18	-0.32	-0.03
	NO2_N	-2.31	167	2.2e-02	-0.18	-0.32	-0.03
	PO4	-3.43	167	7.6e-04	-0.26	-0.39	-0.11
	mean_total_P	-2.51	167	1.3e-02	-0.19	-0.33	-0.04
	mean_total_N	-3.20	167	1.6e-03	-0.24	-0.38	-0.09
	mean_TDS	-2.66	162	8.5e-03	-0.20	-0.35	-0.05
	wchem.PC1	-2.39	162	1.8e-02	-0.18	-0.33	-0.03

4. Az Európai Halindex (EFI+) stresszor-specifitása

Az index kidolgozásához felhasznált halas felmérések EFI értéke (EFI value) minden vízfolyás-típusban több stresszorral is szignifikáns ($\alpha = 0.05$) korrelációt mutatott (13. táblázat). Voltak olyan stresszorok, melyek EFI+ indexszel való korrelációja az index stresszorra adott elvart választától eltérő irányú volt. Például, a korreláció előjele a HLS típusban az artificial_surfaces változóval, az LLS típusban a landused_index, artificial_surfaces, NO3_N és total_N változókkal pozitív volt, ami arra utal, hogy az EFI+ index értéke e változók értékének növekedésével növekszik. Ez viszont ellentétes az index elvart viselkedésétől, miszerint a stresszor értékének növekedésekor az index értékének csökkennie kell (az index kisebb értéke gyengébb ökológiai állapotot jelez).

A regressziós modellek alapján az EFI+ index viselkedését az SMS típusban az összes oldott anyag mennyiségével; a HLS típusban a mezőgazdasági területek és a víztestek (tavak) vízgyűjtőn levő területi arányával; a HLR típusban a mesterséges felszín vízgyűjtőn levő területi arányával és az ortofoszfát mennyiségével; a LLS típusban az algák mennyiségével (klorofill-a koncentráció); az LLR típusban az ortofoszfát és az összes nitrogén mennyiségével lehetett leginkább magyarázni (14. táblázat).

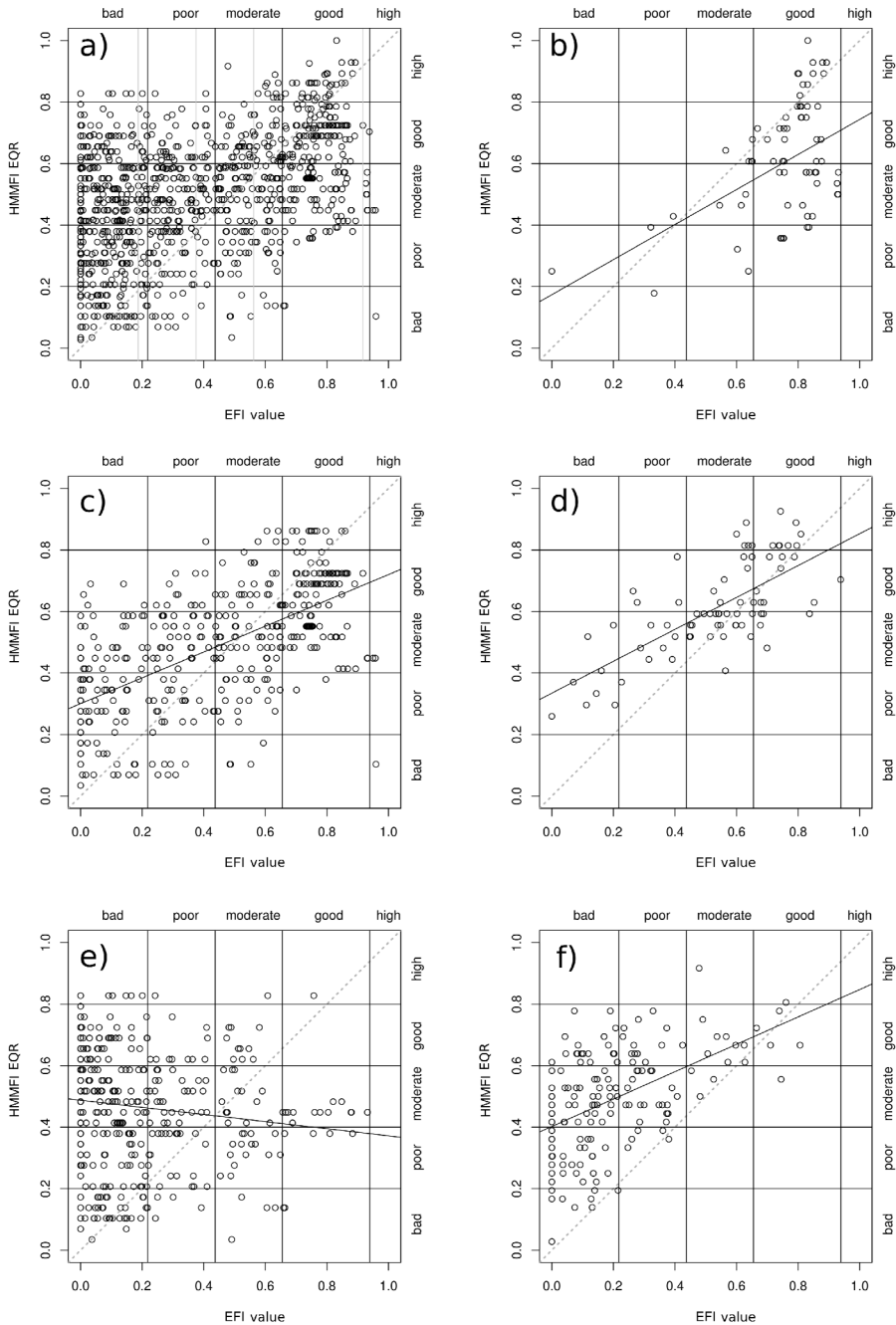
14. táblázat. A halas felmérésekre kiszámított EFI+ index értékek (EFI value) minimálisan adekvát lineáris regressziós modelljei típusonként. A 'Típus' oszlopban a zárójelben a regressziós modellek korrigált determinációs koefficiensei (R^2) olvashatók. A 'Stresszor' oszlopban az '(Intercept)' a tengelymetszeti paraméterre utal. A 'paraméter becslése' a regressziós meredekség. 'SE' a meredekség becslésének standard hibája. 't' próbatesztstatistika. 'p' a meredekség egyenlő nulla nullhipotézis tesztnek a p értéke normál alakban

Típus (R^2) (type)	Stresszor	Paraméter becslése	SE	t	p
1 SMS (7.0%)	(Intercept)	0.850	0.041	20.70	2.0e-16
	TDS	-2.3e-04	1.0e-04	-2.30	2.5e-02
2 HLS (24.1%)	(Intercept)	0.866	0.058	14.99	2.0e-16
	agricultural_areas	-0.006	0.001	-6.01	6.1e-09
	water_bodies	-0.340	0.057	-5.95	8.3e-09
	wchem.PC2	0.275	0.093	2.94	3.5e-03
3 HLR (30.3%)	(Intercept)	0.846	0.058	14.55	2.0e-16
	artificial_surfaces	-0.016	0.003	-4.80	7.8e-06
	PO4	-0.001	1.7e-04	-3.91	2.0e-04
4 LLS (4.8%)	(Intercept)	0.211	0.012	17.91	2.0e-16
	Chl_a	-0.001	3.0e-04	-4.80	2.2e-06
5 LLR (10.3%)	(Intercept)	0.331	0.033	10.06	2.0e-16
	PO4	-8.0e-05	2.5e-05	-3.22	1.5e-03
	total_N	-2.4e-05	7.9e-06	-2.98	3.3e-03

5. A Magyar Multimetrikus Halindex család (HMMFI) és az EFI+ index kapcsolata

A két index között a lineáris modell eredménye szerint gyenge volt az összefüggés. A típusok hatását figyelmen kívül hagyva, az új indexszel kiszámított EQR értékek variabilitásának csupán 14.6%-a volt magyarázható az EFI+ index értékekkel. A típusok közti különbségek (interakció) figyelembevételével ez a mennyiség ugyan növekedett ($R^2 = 26.6\%$), de még így is alacsony maradt ($F = 49.11$, $df = 9$ és 1189 , $p < 0.0001$).

Az indexek közötti kapcsolat az LLS típus kivételével pozitív volt, ám a regressziós meredekségek jóval a tökéletes megfeleltethetőség esetén fennálló 1-es érték alatt voltak (regressziós meredekségi paraméterek: 0.420–0.570). Az LLS típus esetén a két index között nem mutatkozott összefüggés (regressziós meredekség: -0.116) (2. ábra; 15. és 16. táblázat).



2. ábra. A halas felmérések EFI+ indexszel (EFI value) és a HMMFI indexszel (EQR) történt minősítési eredményeinek szórásdiagramja. a) Összes típus; b) SMS típus; c) HLS típus; d) HLR típus; e) LLS típus; f) LLR típus. A függőleges és vízszintes vonalak az ökológiai minőségi osztályok (EQC) határait jelölik. Az EFI+ index esetén a fekete vonalak a gázolva történt felmérésekhez tartozó EQC határait (b–f ábrák), míg a szürke vonalak (a ábra) a csónakból történt felmérésekhez tartozó EQC határait jelölik (l. EFI+ CONSORTIUM 2009, Table 11). A HMMFI index esetén az EQC határok a mintavételi módszertől függetlenül egységesek (l. 7. táblázat). A ferde szürke pontozott vonal a két index egymáshoz való tökéletes megfeleltethetősége esetén várt regressziós egyenes. A ferde fekete folytonos vonal a regressziós modellből becsült regressziós egyenes

15. táblázat. A halas felmérések Magyar Multimetrikus Halindexszel (HMMFI) kiszámított EQR értéke (függő változó), valamint a vízfolyás-típusok (független változó) és az EFI+ index értéke (független változó) közötti regressziós hatásmodell ($R^2 = 26.55\%$). Az '(Intercept)' paraméter az SMS típusbeli tengelymetszeti paramétert jelenti. A 'tipus_2_HLS', 'tipus_3_HLR' stb. paraméterek, a HLS, HLR stb. típusban a tengelymetszeti paraméter SMS típus tengelymetszetétől való eltéréseit jelentik. Az 'EFI_value' paraméter az 1_SMS típusbeli meredekség paramétere. Az 'EFI_value:tipus_2_HLS', 'EFI_value:tipus_3_HLR', stb paraméter a HLS, HLR stb. típusban a meredekségi paraméter SMS típus meredekségétől való eltéréseit jelentik

Paraméter	Paraméter becslése	SE	t	p
(Intercept)	0.174	0.097	1.80	7.3e-02
tipus_2_HLS	0.127	0.098	1.30	2.0e-01
tipus_3_HLR	0.161	0.110	1.46	1.4e-01
tipus_4_LLS	0.314	0.097	3.22	1.3e-03
tipus_5_LLR	0.228	0.099	2.32	2.1e-02
EFI_value	0.570	0.125	4.55	5.9e-06
EFI_value:tipus_2_HLS	-0.150	0.128	-1.17	2.4e-01
EFI_value:tipus_3_HLR	-0.051	0.155	-0.33	7.4e-01
EFI_value:tipus_4_LLS	-0.685	0.131	-5.25	1.8e-07
EFI_value:tipus_5_LLR	-0.124	0.143	-0.87	3.8e-01

16. táblázat. A halas felmérések Magyar Multimetrikus Halindexszel (HMMFI) kiszámított EQR értéke (függő változó), valamint a vízfolyás-típusok (független változó) és az EFI+ index értéke (független változó) közötti regressziós hatásmodell ($R^2 = 26.55\%$) típusok szerinti modell formulája

Típus	Regressziós modell
1 SMS	$EQR = 0.174 + 0.570 \times EFI_{value}$
2 HLS	$EQR = 0.301 + 0.420 \times EFI_{value}$
3 HLR	$EQR = 0.335 + 0.519 \times EFI_{value}$
4 LLS	$EQR = 0.487 - 0.116 \times EFI_{value}$
5 LLR	$EQR = 0.402 + 0.445 \times EFI_{value}$

A két index az indexkészítéséhez felhasznált összes 1199 db halas felmérés mintegy egynegyedét (26.6%) sorolta ugyanazon ökológiai minőségi osztályba (EQC). Típusokon belül ez az érték 14.4% (LLR típus) és 39.7% (HLR típus) között változott. Azonban a két index által közösen osztályozott felmérések aránya – mind az összes felmérés tekintetében, mind a felmérések típuson belüli vonatkozásában is – jellemzően nem, vagy csak elhanyagolható mértékben volt magasabb a véletlenből adódó közös osztályozások arányától (Kappa mutatók: összes felmérésre 0.089; a típusokon belül 0.005–0.184; 17. és 18. táblázat).

17. táblázat. A halas felmérések EFI+ indexszel (sorokban) és a HMMFI indexszel (oszlopokban) történt minősítési eredményének tévesztési mátrixai

Összes típus	Rossz	Gyenge	Mérsékelt	Jó	Kiváló	Sum
Rossz	76	152	202	110	7	547
Gyenge	12	50	93	43	2	200
Mérsékelt	8	40	87	57	11	203
Jó	2	12	92	106	34	246
Kiváló	1	0	2	0	0	3
Sum	99	254	476	316	54	1199

1 SMS	Rossz	Gyenge	Mérsékelt	Jó	Kiváló	Sum
Rossz	0	1	0	0	0	1
Gyenge	1	1	1	0	0	3
Mérsékelt	0	3	3	5	0	11
Jó	0	6	20	22	11	59
Kiváló	0	0	0	0	0	0
Sum	1	11	24	27	11	74

2 HLS		Rossz	Gyenge	Mérsékelt	Jó	Kiváló	Sum
	Rossz	28	57	36	5	0	126
	Gyenge	7	22	36	11	1	77
	Mérsékelt	4	22	45	26	4	101
	Jó	0	2	49	69	13	133
	Kiváló	1	0	2	0	0	3
	Sum	40	103	168	111	18	440
3 HLR		Rossz	Gyenge	Mérsékelt	Jó	Kiváló	Sum
	Rossz	0	5	3	0	0	8
	Gyenge	0	1	7	4	0	12
	Mérsékelt	0	0	19	6	5	30
	Jó	0	0	9	11	8	28
	Kiváló	0	0	0	0	0	0
	Sum	0	6	38	21	13	78
4 LLS		Rossz	Gyenge	Mérsékelt	Jó	Kiváló	Sum
	Rossz	38	57	118	85	7	305
	Gyenge	4	21	28	11	1	65
	Mérsékelt	4	15	14	12	1	46
	Jó	2	4	13	0	1	20
	Kiváló	0	0	0	0	0	0
	Sum	48	97	173	108	10	436
5 LLR		Rossz	Gyenge	Mérsékelt	Jó	Kiváló	Sum
	Rossz	10	32	45	20	0	107
	Gyenge	0	5	21	17	0	43
	Mérsékelt	0	0	6	8	1	15
	Jó	0	0	1	4	1	6
	Kiváló	0	0	0	0	0	0
	Sum	10	37	73	49	2	171

18. táblázat. A halas felmérések EFI+ index és a HMMFI index alapú minősítési eredményeinek tévesztési mátrixaiból (17. táblázat) számított osztályozás-megfeleltethetőségi mutatók és azok 95%-os konfidencia intervallumai. 'PCC' a két index szerint azonosan minősített felmérések aránya (percent correctly classified); 'Kappa' Cohen-féle kappa mutató. '95%Clow' és '95%Clup' a 95%-os konfidencia intervallum alsó és felső határa

			95%Clow	95%Clup
Összes típus	PCC	0.266	0.241	0.292
	Kappa	0.089	0.061	0.117
1 SMS	PCC	0.351	0.244	0.471
	Kappa	0.009	-0.106	0.124
2 HLS	PCC	0.373	0.327	0.420
	Kappa	0.184	0.128	0.240
3 HLR	PCC	0.397	0.288	0.515
	Kappa	0.144	0.018	0.271
4 LLS	PCC	0.167	0.134	0.206
	Kappa	0.005	-0.028	0.037
5 LLR	PCC	0.146	0.097	0.208
	Kappa	0.009	-0.037	0.055

6. Validálási eredmények

A teszt adatsor felméréseinek a szakértői természetességi osztályban való besorolása és a HMMFI indexszel megállapított ökológiai minőségi osztályokba való besorolása (19. táblázat) nem volt független egymástól (khi-négyzet = 48.518, $df = 8$, $p < 0.001$).

Az összefüggés leginkább a természetességi állapot szakértői megítélésének a két szélső

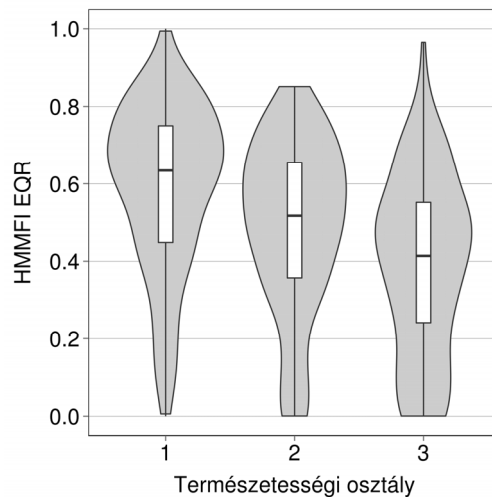
minőségi osztálybeli eloszlásából származott: a közel természetesnek (1-es) minősített felmérések között, a HMMFI szerint 'rossz' és 'gyenge' minősítést kapott felmérések száma kevesebb, a 'jó' és 'kiváló' minősítést kapott felmérések száma pedig több volt, mint amennyi a szakértői és az index alapján történt értékelés között fennálló függetlenség esetén várható. Hasonlóképpen, az erősen módosítottak (3-as) minősített felmérések között, a HMMFI szerint 'rossz' minősítést kapott felmérések száma több, a 'jó' és 'kiváló' minősítést kapott felmérések száma pedig kevesebb volt, mint ami a kétféle osztályozási rendszer között fennálló függetlenség esetén várható (20. táblázat). Ez az eredmény a kétféle osztályozási rendszer közötti lineáris trendre utalt, amit a lineáris trend teszt is megerősített ($r = -0.41$, $M^2 = 63.873$, $p < 0.001$; 3. ábra).

19. táblázat. A HMMFI indexcsalád típus-specifikusan fejlesztett tagjainak validálására felhasznált 382 db felmérés eloszlása a szakértői természetességi osztályok (sorokban) és a HMMFI indexszel megállapított minőségi osztályok (oszlopokban) között

Természetességi osztály (<i>naturalistic state</i>)	Rossz (<i>bad</i>)	Gyenge (<i>poor</i>)	Mérsékelt (<i>moderate</i>)	Jó (<i>good</i>)	Kiváló (<i>high</i>)	Sum
1	6	8	21	35	14	84
2	21	31	60	57	7	176
3	29	28	42	20	3	122
Sum	56	67	123	112	24	382

20. táblázat. A 19. táblázatban levő adatok khi-négyzet tesztjéből származó standardizált reziduálisok táblázata. Amennyiben egy cella abszolút értéke nagyobb, mint 1.96, az adott cella adatainak megfigyelt gyakorisága a függetlenség esetén várt gyakoriságtól szignifikánsan eltér. Ha a cella értékének előjele negatív, akkor a szóban forgó megfigyelt gyakoriság a függetlenség esetén várthoz képest kisebb, ha pozitív, akkor pedig nagyobb

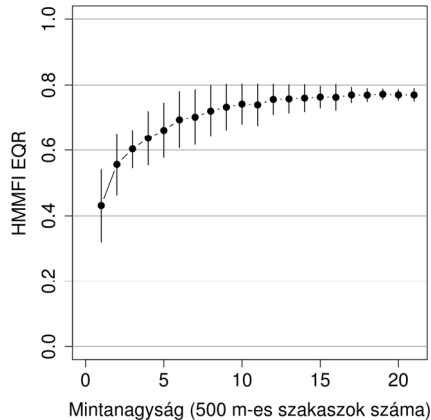
Természetességi osztály (<i>naturalistic state</i>)	Rossz (<i>bad</i>)	Gyenge (<i>poor</i>)	Mérsékelt (<i>moderate</i>)	Jó (<i>good</i>)	Kiváló (<i>high</i>)
1	-2.21	-2.19	-1.60	2.81	4.44
2	-1.39	0.04	0.73	1.22	-1.72
3	3.45	0.04	0.64	-3.80	-2.11



3. ábra. A HMMFI indexszel meghatározott EQR értékek eloszlása a teszt adatsor különböző természetességi osztályba sorolt felmérései ($n = 382$) között. Középen a függőleges világos téglalapok és fekete vonalak az eloszlásból készült doboz diagramok. A dobozokban levő vízszintes vonalak a mediánt jelzik. A dobozdiagramokat két oldalról határoló szürke területek az eloszlásokra illesztett sűrűségfüggvények grafikonjai

7. A Duna típus HMMFI indexének teljesítménye és a mintavételi ráfordítás kapcsolata

Az 500 méteres mintavételi egységek kumulatív összevonásával a kombinált dunai HMMFI indexszel meghatározott EQR értékek várható értéke gyorsan növekedett kb. hat egység (3 km) összevonásáig. A további mintavételi egységek hozzáadása egyre kisebb mértékben növelte a várható EQR-t, és kb. 10 mintavételi egység összevonása felett a várható EQR már csak elhanyagolható mértékben növekedett. (4. ábra).



4. ábra. A dunai mintavételi ráfordítás és a kombinált dunai HMMFI indexszel meghatározott EQR érték kapcsolata. A sötét körök a várható értéket, a függőleges vonalak az egyszerűes szórást jelölik

Értékelés

1. A Magyar Multimetrikus Halindex (HMMFI) család és fejlesztésének lehetőségei

A bemutatott Magyar Multimetrikus Halindex (HMMFI) család típusspecifikus indexeket tartalmaz, azaz az egyes indexek típusonként változó metrikaegyüttest tartalmaznak és eltérő stresszorokra érzékenyek. A regressziós modellek alapján elmondható, hogy az új indexcsalád általánosságban a vízfolyások kanyarulatfejlettségével, a mesterséges felszínnek területi arányával, a nitrogénvegyületek – különösen a nitrit –, valamint a szervesanyag mennyiségével van összefüggésben. Az indexek tehát a víztestben mutatkozó lokális változásokat és a táji hatásokat egyaránt integrálják. Az indexek mindegyike figyelembe veszi a természetesen honos karakterfajok jelenlétét, amely pozitívan, és az idegen halfajok mennyiségi viszonyait ami pedig negatívan befolyásolja az index értékét. A HMMFI indexekkel történő ökológiai állapotminősítésben így a halállomány fajkészletének típusspecifikus természetessége és annak emberi beavatkozásokból eredeztethető nem kívánatos halakkal való terheltsége is szerepet kap.

Az indexcsalád kifejlesztésétől független teszt adatsorral elvégzett validációs vizsgálatok szerint az új index minősítési eredménye jól tükrözi a halas szakértők élőhelyi természetességi állapotra vonatkozó terepi megítélését. A kétféle értékelési rendszer közötti lineáris trendet tartalmazó összefüggés statisztikailag nagyon jelentősnek bizonyult, annak ellenére, hogy a szakértői becslésen alapuló kategorizálás a részletesebb ismeretek hiánya miatt számos hibalehetőséget rejthet magában. Erre utal a szakértők szerint azonos természetességi osztályba tartozó felmérések EQR értékének magas szórása, aminek hátterében három fő ok állhat: 1) a felmérést végző szakértők módosított állapokra vonatkozó szubjektivitása; 2) a természetességi állapotnak vannak stresszorai, melyekre a HMMFI index nem vagy csak gyengén reagál; 3) a halállomány stresszorra egyáltalán nem adott, avagy időben megkésve adott válasza.

Például a kisvízfolyások esetén a hosszirányú átjárhatóság jelentősen befolyásolhatja a felmérési helyszíneken a lokális fajkészletet. A helyszín általános állapotát becslő szakértőknek azonban nem biztos, hogy tudomásuk volt a mintavételi helytől távolabbi,

alvízi szakaszon levő műtárgyakról, melyek akadályozzák a halak diszperzióját. Erre konkrét példát is észleltünk az index viselkedésének terepi tapasztalatokkal való összevetésekor: a helyszínen a szakértők szerint természetközeli állapotúnak ítélt vízfolyásszakasz a halegyüttes összetétele alapján alacsony EQR értéket kapott, mert egy utólag felfedezett átjárhatósági akadály miatt hiányoztak a karakterfajai. Ezért lehet például az, hogy az 1-es természetességi állapot kategóriában az EQR eloszlás alsó kvartilise nagy részben átfed a 2-es kategória alsó kvartilisével, holott ideális esetben az 1-es kategóriában az EQR minimum nagyobb kellene legyen, mint a 2-es-ben vagy a 3-as-ban (3. ábra). Hasonlóképpen a terepen erősen módosított természetességi állapot kategóriába (3-as) sorolt felmérések EQR eloszlásának felső kvartilise egészen magasra nyúlik: a maximum közel van 1-hez. Ez nagymértékben átfed a természetközeli kategóriába (1-es) sorolt felmérések EQR eloszlásának felső kvartilisével (3. ábra). Ennek lehetséges oka, hogy egy gyenge természetességi állapotú élőhelyen a halállomány nem vagy csak megkésve reagál az élőhelyi degradációra.

A vízfolyások hossz-szelvénye mentén kialakuló természetes hidrogeomorfológiai grádiens alapvetően a vízgyűjtőméret, mederesés, vízhozam, mederméret és az aljzat szemcseösszetétele változókkal jellemezhető. A víztestek e változók szerinti diszkrét csoportosításában („tipizálás”), az egymástól kontrasztosan különböző típusok e folytonosság mentén egymástól távol helyezkednek el. A hossz-szelvény mentén szomszédos típusokba tartozó víztestek között azonban előfordulnak atipikus, azaz a két szomszédos típus hidrogeomorfológiai jellegét keverten tartalmazó, átmeneti jellegű víztestek is (Vannote et al. 1980). E típushatáron levő víztestek átmeneti jellege a lokális halállományban is tükröződhet, például egy helyen fordulnak elő áramláskedvelő dombvidéki, és az áramlással szemben közömbös avagy lassú áramlást kedvelő síkvidéki halfajok. Ebből következően az átmeneti tipológiai jellegzetességgel rendelkező víztestek az index kidolgozása folyamán, gyengíthették a metrikák és a stresszorok közötti statisztikai kapcsolatot. Azonban az egyes típusokba sorolt felmérések megfelelő számban reprezentáltak típusos jellegű víztesteket is, ezért úgy véljük a létrehozott indexcsalád tagjai kellően robusztusak a víztestek tipológiai hovatartozásával szemben.

A halállomány-felmérésekből származó minták időbeli változatossága alapvetően a halegyüttes-szerkezet természetes fenológiai változásaiból, emberi hatásokból (pl. víztározók leeresztése) és a véletlen mintavételi hibából eredeztethető. A minták időbeli változatossága a HMMFI indexszel való minősítés eredményét is befolyásolhatja (pl. a Marót-völgyi-csatorna Kisvidnél 2007–2013 közötti végzett 10 darab felméréséből származó minták EQR értéke 0.31–0.62 között, ökológiai minőségi osztálya pedig a 'gyenge' és a 'jó' osztályok között változott). Az azonos víztesthez tartozó különböző felmérési helyszínek közötti térbeli változatosság szintén hatással lehet a minősítés eredményére (pl. a Bózsva vízgyűjtőjéhez tartozó Kemence-patak [Zempléni-hegység] hét mintavételi helyszínén, azonos időpontban végzett felméréseinek EQR értéke 0.43–0.79 között, a minőségi osztálya pedig a 'mérsékelt' és 'jó' osztályok között variált). Ezért az index esetleges jövőbeni továbbfejlesztéséhez, illetve halak élőlénycsoporttal történő minél megbízhatóbb ökológiai állapotminősítéshez különösen fontos, hogy a minősítendő víztestek méretének megfelelő számú helyszínen, és rendszeres időszakokban, egységesített módszerrel történjen a halállomány felmérése.

Több szakértő együttműködésével, különböző forrásokból összeállított nagyméretű adattáblázatok összeállításakor elkerülhetetlen, hogy az adatsorba ne kerüljön véletlen hiba. Az adatok felhasználása előtt fontos lépés e véletlen hibák kiszűrése, ami sok esetben időigényes folyamat. A rendelkezésünkre bocsátott adatsorban az index kidolgozásának megkezdése előtt alapvető adatellenőrzéseket végeztünk, melyekkel azonosítottuk az extrém abiotikus adatokat. A feltárt hibákat az index kidolgozása előtt javítottuk, azonban részletes és célzott adatellenőrzésre részben szakmai (vízügyi) ismeretek hiánya, részben a megbízási feladatok elvégzésére rendelkezésre álló idő korlátossága miatt nem volt lehetőségünk. Ezért az index kidolgozásához felhasznált javított adatsor feltételezhetően

még számos fel nem fedezett hibát tartalmazott. A rendelkezésünkre bocsátott abiotikus adatsorban sok fontos változó volt nagymértékben adathiányos, ami nem tette lehetővé az ilyen változók statisztikai adatelemzésekben való felhasználását, és egyben korlátozta az index kidolgozásához potenciálisan használható stresszorok halmazát. A kidolgozott index esetleges jövőbeni fejlesztése szempontjából ezért alapvető fontosságú lenne, hogy egységes formába szervezett, aktuális és ellenőrzött abiotikus adatok álljanak rendelkezésünkre a víztestekről, melynek szükségességét már Halasi-Kovács & Tóthmérész (2011) is jelezte.

2. A HMMFI index és az EFI+ index kapcsolata

Az EFI+ index és az új HMMFI index közötti összefüggést leíró regressziós modell alapján látható, hogy a két index között általánosságban véve gyenge és torzított összefüggés van. Például, az index kidolgozásához felhasznált 1199 felmérés közül a 0–0.2 közötti EFI értéket kapott felmérések HMMFI EQR értéke durván 0–0.8 között variált. A regressziós meredekségek becslése minden esetben 1 alatti volt, ami azt tükrözi, hogy a HMMFI index az EFI+ által alacsony értékkel (cc. 0–0.4) minősített felméréseket jellemzően magasabb EQR értékkel minősíti (különösen a HLS és az LLR típusokban), illetve elsősorban az SMS típus esetén az EFI+ által magas értékkel (cc. 0.6–0.9) minősített felméréseket jellemzően enyhén alacsonyabb EQR értékkel minősíti. Kivételt jelent ez alól a LLS típus, ahol a két index között nem volt összefüggés. Az EFI+ index síkvidéki folyóvizek, elsősorban síkvidéki kisvízfolyások, halállományának minősítésére vonatkozó megbízhatatlansága vélhetően kapcsolatban van a mesterséges és különböző intenzitású vízügyi kezelések alatt álló csatornák hazai síkvidéki vízfolyások közötti nagyfokú gyakoriságával. Az EFI+ index ugyanis jelenlegi formájában nem kezeli megfelelően a szerves anyag dominanciájú aljzattal rendelkező folyóvizeket (EFI+ CONSORTIUM 2009), holott hazai síkvidéki kisvízfolyásaink javarészt ilyenek.

A tévesztési mátrixok alátámasztották a regressziós modell eredményeit. A két index által azonos vízminőségi osztályba való besorolás esélye nagyjából a véletlen által történő azonos osztályba sorolás esélyével egyenlő. Ennek oka elsősorban a két index közötti gyenge és torzított kapcsolat, másrészt a két index ökológiai minőségi osztályba soroláshoz használt kritériumrendszere közötti különbségek (az EFI+ osztályhatárok a gázolva, illetve csónakból történt mintavételi módszer szerint is különböznek). Egy szélsőséges példa a két index minősítésére: a Magyarórsdi-patakon Hegyhátszentjakabnál 2009.04.19-én végzett felmérés során mindösszesen két példány szivárványos pisztráng került elő, mely idegen halfaj hazánkban. Ezt a mintát az EFI+ a 'kiváló', míg a HMMFI index a 'rossz' minőségi osztályba sorolta.

Ezek az eredmények megerősítik azt a korábbi tapasztalatot, mely szerint a főleg észak- és nyugat-európai vízfolyások adatai alapján készült Európai Halindex (EFI [FAME CONSORTIUM 2004]), a magyarországi viszonyokhoz kifejlesztett halas minősítési módszerhez képest kevésbé alkalmas, a jelentős részben alföldi, síkvidéki vízfolyásokat tartalmazó hazai vízfolyások megbízható ökológiai minősítésére (Halasi-Kovács & Tóthmérész 2011)

3. A Duna HMMFI indexszel való ökológiai állapotminősítése

A dombvidéki folyókra (HLR) és a síkvidéki folyókra (LLR) kifejlesztett típuspecifikus indexekből kombinált dunai index nem *sensu stricto* típuspecifikus fejlesztésű és nem validált, amit a dunai felmérések HMMFI indexszel való értékelésénél szem előtt kell tartani. Azonban tekintettel a hazai Duna szakasz módosíthatósági szintjére (átvágott ágak, szabályozott vízhozam stb.), az eddigi elemzések eredményeinek szakértői megítélése szerint a kombinált index kellő mintavételi ráfordítás esetén hozzávetőlegesen reális képet ad a minősítendő Duna-szakasz halállomány-alapú ökológiai állapotáról. A rarefaction görbe lefutása szerint ehhez ideálisan legalább 10 db 500 méteres mintavételi szakasz felmérése szükséges. A mintavételi egységek 10 feletti növelésével az EQR érték várható értékének növekedése aránytalanul elmarad a befektetett plusz mintavételi erőfeszítéstől.

4. Konklúziók és javaslatok

Eredményeink egyértelműen felhívják és egyben megerősítik a figyelmet arra vonatkozóan, hogy az Európai Unióban elfogadott minősítési módszerek (pl. EFI+ index) nem minden esetben alkalmazhatók közvetlenül hazánk biogeográfiai régiójára, és az ökológiai állapotminősítési módszerek kidolgozásakor nagyobb hangsúlyt kell fektetni a regionális biogeográfiai és táji sajátosságokra. A HMMFI indexcsalád típus-specifikus, a Duna típusra kidolgozott tagját leszámítva igazoltan stresszor-specifikus, és emellett a látens antropogén hatásokra (PCA főkomponensnek) is igazoltan reagál. Fontos azonban hangsúlyozni, hogy a HMMFI indexeket a rendelkezésre álló abiotikus adatok alapján tudtuk elkészíteni, melyek sok esetben nem voltak közvetlenül társíthatók a halállomány felmérések helyszíneivel. Fontos lenne a jövőben az abiotikus változók és különösen a vízfolyásokat jellemző fizikai (mederaljzat) és további hidromeomorfológiai változók integrálása a stresszor változók közé, ehhez azonban előfeltétel egy részletes hidromeomorfológiai monitorozó rendszer kialakítása a hazai vízfolyásokra. Számos víztestet azért nem tudunk felhasználni az elemzésekhez, mert vagy a megfelelő abiotikus változók hiányoztak onnan ahol jó minőségű halállomány- adatokkal rendelkezünk vagy éppen halas felmérés nem történt a legalább vízkémiai felméréseket tartalmazó víztesten. Ez felhívja a figyelmet egy egységes, az abiotikus változók mérését (hidromeomorfológia és vízkémia) és az élőlénycsoportokat is egységesen magába foglaló monitorozó rendszer kialakítására.

A Duna halállomány-szerkezete eltér egyéb nagy folyóink halállományától (Erős 2007). A Dunát minősítő típus-specifikus fejlesztésű, igazolt stresszor-halállomány kapcsolatokon alapuló és a szakértői becslést nélkülöző index megvalósítása jelenleg még számos akadályba ütközik. A Duna főágához csupán 7 db vízgazdálkodási víztest tartozik. A víztesteknek ez a típuson belüli alacsony mintanagysága nem teszi lehetővé a stresszor-halállomány-összetétel kapcsolatok hatékony detektálását, annál is inkább, mert a magyarországi Duna szakaszt is több típusra lehet bontani a hidromeomorfológiai sajátosságai alapján (VGT2), és emellett a dunai víztestek között nincsenek igazán kontrasztos különbségek a vízkémiai és egyéb stresszor változókban. Ezért a jövőben a Dunára egy nemzetközi kutatási adatok eredményein alapuló index elkészítését tartanánk fontosnak.

Összefoglalva megállapítható, hogy a HMMFI indexcsalád robusztus indexeket tartalmaz. Azonban egyéb abiotikus változók (pl. több, illetve pontosabb hidromeomorfológiai változó) bevonásával a jövőben érdemes lehet az indexek finomítása, fejlesztése.

Köszönetnyilvánítás

A munka a VGT2 projektből (*A Kvassay Jenő Terv elkészítése, valamint a Vízgyűjtő-gazdálkodási terv felülvizsgálata, azonosító: KEOP-7.9.0/12-2013-0007*) valósult meg. Köszönjük az Országos Vízügyi Főigazgatóság számos munkatársának segítségét az abiotikus adatok összeállításában. A landuse_index adatok kiszámításáért Várbíró Gábornak, az EFI+ indexszel való minősítésért György Irma Ágnesnek tartozunk köszönettel. Czeglédi Istvánnak és Szalóky Zoltánnak köszönjük a kézirat egy korábbi formájának a véleményezését. Gutti Gábornak és Halasi-Kovács Bélának köszönjük a szakmai lektorálás során adott javaslataikat és észrevételeiket, melyek segítették a kézirat végleges formába öntését.

Irodalom

- Agresti, A. (2002): *Categorical Data Analysis*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons.
- Birk, S., Hering, D. (2009): A new procedure for comparing class boundaries of biological assessment methods: a case study from the Danube Basin. *Ecological Indicators* 9/3: 528–539.
- Böhmer, J., Rawer-Jost, C., Zenker, A., Meier, C., Feld, C. K., Biss, R., Hering, D. (2004): Assessing streams in Germany with benthic invertebrates: Development of a multimetric invertebrate based assessment system. *Limnologica - Ecology and Management of Inland Waters* 34/4: 416–432.
- Crawley, M. J. (2005): *Statistics: An Introduction Using R*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Dolezsai A., Sály P., Takács P., Hermoso, V., Erős T. (2015): Restricted by borders: trade-offs in transboundary conservation planning for large river systems. *Biodiversity & Conservation* 24/6: 1403–1421.
- Dufrene, M., Legendre, P. (1997): Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs* 67/3: 345–366.

- 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/doc/EFI+Manual.pdf> hozzáférés: 2016.01.25.
- Erős T. (2007): Partitioning the diversity of riverine fish: the roles of habitat types and non-native species. *Freshwater Biology* 52/7: 1400–1415.
- Erős T. (2009): Az ökológiai minősítési rendszer fejlesztése 5. – minősítési rendszerek és a halak stresszorspecifitása. Szakértői jelentés a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium részére, pp. 105.
- Erős T., Sály P., Takács P., Specziár A., Bíró P. (2012): Temporal variability in the spatial and environmental determinants of functional metacommunity organization – stream fish in a human-modified landscape. *Freshwater Biology* 57/9: 1914–1928.
- 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. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32000L0060> hozzáférés: 2016.01.27.
- FAME CONSORTIUM (2004): Manual for the application of the European Fish Index – EFI. A fish-based method to assess the ecological status of European rivers in support of the Water Framework Directive. Version 1.1, January 2005. https://fame.boku.ac.at/downloads/manual_Version_Februar2005.pdf hozzáférés: 2016.07.14.
- Halasi-Kovács B., Erős T., Harka Á., Nagy S. A., Sallai Z., Tóthmérész B. (2009): A magyarországi folyóvíztestek halközösség alapú minősítése. *Pisces Hungarici* 3: 47–58.
- Halasi-Kovács B., Tóthmérész B. (2007): Az EU Víz Keretirányelv előírásainak megfelelő minősítési eljárás a hazai vízfolyások halai alapján. *Hidrológiai Közlöny* 87/6: 179–182.
- Halasi-Kovács B., Tóthmérész B. (2011): A hazai vízfolyások halegyütteseken alapuló és a víz keretirányelv előírásainak megfelelő ökológiai minősítési rendszere. *Acta Biologica Debrecina, Supplementum Oecologica Hungarica* 25: 77–100.
- Hering, D., Feld, C. K., 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.
- Kateri, M. (2014): *Contingency table analysis. Methods and Implementation using R*. New York, USA: Birkhäuser/Springer.
- Kopf, R. K., Finlayson, C. M., Humphries, P., Sims, N. C., Hladysz, S. (2015): Anthropocene baselines: Assessing change and managing biodiversity in human-dominated aquatic ecosystems. *BioScience* 65/8: 798–811.
- Pont, D., Hugueny, B., Rogers, C. (2007): Development of a fish-based index for the assessment of river health in Europe: the European Fish Index. *Fisheries Management and Ecology* 14/6: 427–439.
- Reiczigel J., Harnos A., Solymosi N. (2007): *Biostatistika nem statisztikusoknak*. Nagykovácsi: Pars Kft.
- Roset, N., Grenouillet, G., Goffaux, D., Kestemont, P. (2007): A review of existing fish assemblage indicators and methodologies. *Fisheries Management and Ecology* 14/6: 393–405.
- 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: 251–252.
- Semjén Zs. (2016): A Kormány 1155/2016. (III. 31.) Korm. határozata Magyarország felülvizsgált, 2015. évi vízgyűjtő-gazdálkodási tervéről. *Magyar Közönlöny* 44:4144.
- Steenmans, C., Büttner, G. (2006): Mapping land cover of Europe for 2006 under GMES. In: Proceedings of the 2nd workshop of the EARSeL SIG on land use and land cover, Bonn, Germany, 28–30 September 2006: 202–207. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/clc-2006-vector-data-version-2> hozzáférés: 2015.01.25.
- Vannote, R. L., Minshall, G. W., Cummins, K. W., Sedell, J. R., Cushing, C. E. (1980): The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 37/1: 130–137.
- Várbíró G., Deák Cs., Borics G., Krasznai E. (2010): Current issues in ecological water qualification: Developing multimetric macroinvertebrate index on lowland, small and medium sized watercourses – a case study. *Acta Biologica Debrecina, Supplementum Oecologica Hungarica* 21: 247–254.
- Várbíró G., Fekete O., Ortmann-Ajkai A., Ficsor M., Cser B., Kovács K., Kiss G., Czirok A., Horvai V., Deák Cs. (2011): Developing a multimetric macroinvertebrate index on mountainous, small and medium sized water bodies. *Acta Biologica Debrecina, Supplementum Oecologica Hungarica* 26: 211–220.
- VKKI (2010): A Duna-vízgyűjtő magyarországi része Vízgyűjtő-gazdálkodási Terv. Vízügyi és Környezetvédelmi Központi Igazgatóság. pp428. <http://www2.vizeink.hu/?module=ovgt100505> hozzáférés: 2016.02.09.

Authors:

Péter SÁLY (psaly@gamma.ttk.pte.hu), saly.peter@okologia.mta.hu), Tibor ERŐS (eros.tibor@okologia.mta.hu)

Függelék

F1

A HMMFI indexcsalád kidolgozásához használt trait adattábla. Elektronikus formában elérhető a *Pisces Hungarici X* honlapján:

http://haltanitorsasag.hu/ph10/Saly_&_Eros_okologiai_vizminosites_F1.pdf

F2

A teszt adatsor összeállításához a terepi gyűjtések során a vízfolyások hidrogeomorfológiai típusaitól függően alkalmazott mintavételi módszertan. Ez a módszertan egyben a HMMFI indexcsaláddal történő ökológiai állapotminősítéshez is javasolt, azzal a módosítással, hogy a Duna esetében legalább 10 db 500 méteres mintavételi egység felmérése az ideális.

- 1 SMS: 150 méter; gázolva; nappal; háton hordozható, akkumulátorról üzemelő, pulzáló egyenáramú elektromos eszközzel (Hans Grassl IG2B)
- 2 HLS: 150 méter; gázolva; nappal; háton hordozható, akkumulátorról üzemelő, pulzáló egyenáramú elektromos eszközzel (Hans Grassl IG2B)
- 3 HLR: 500 méter; csónakból, parttal párhuzamosan; nappal; aggregátorról üzemelő, sima egyenáramú elektromos eszközzel (Hans Grassl EL 64II)
- 4 LLS: 150 méter; gázolva; nappal; háton hordozható, akkumulátorról üzemelő, pulzáló egyenáramú elektromos eszközzel (Hans Grassl IG2B)
- 5 LLR: 500 méter; csónakból, parttal párhuzamosan; nappal; aggregátorról üzemelő, sima egyenáramú elektromos eszközzel (Hans Grassl EL 64II)
- 6 Duna: 3×500 méter; csónakból, parttal párhuzamosan; éjszaka; aggregátorról üzemelő, sima egyenáramú elektromos eszközzel (Hans Grassl EL 64II)

F3

A Magyar Multimetrikus Halindex (HMMFI) családdal minősített 310 db víztest térbeli elhelyezkedése és színekkel kódolt ökológiai minőségi osztálya (EQC). Elektronikus formában elérhető a *Pisces Hungarici X* honlapján:

http://haltanitorsasag.hu/ph10/Saly_&_Eros_okologiai_vizminosites_F3.pdf

F4

Összefoglaló diagram a vizsgálat módszertani lépéseiről. Elektronikus formában elérhető a *Pisces Hungarici X* honlapján:

http://haltanitorsasag.hu/ph10/Saly_&_Eros_okologiai_vizminosites_F4.pdf

F5

R környezetben futó számítógépes program (*HMMFI Calculator v1.0*) a HMMFI indexcsalád alkalmazásához. A program .zip csomag formájában a *Pisces Hungarici X* honlapjáról érhető el: http://haltanitorsasag.hu/ph10/HMMFI_Calculator.zip. Továbbá, a HMMFI Calculator aktuális, legfrissebb verziója a Magyar Haltani Társaság honlapjának Ajánló menüjéből tölthető le (http://haltanitorsasag.hu/ajanlo_hu.php).

A program felhasználói ismeretei a .zip fájl kicsomagolása után a README_hun.txt fájlban olvashatók. A HMMFI Calculator ingyenesen letölthető és e jelen dolgozatra való hivatkozás feltüntetése esetén kutatási célokra ingyenesen használható. A program módosításához azonban a szerző hozzájárulása szükséges.