

Doktori (Ph.D.) értekezés tézisei

**Nehézfémek felhalmozódásának modellezése vízi  
ökológiai rendszerekben, szelektív szorbensek  
fejlesztése fémionok megkötésére**

Herman Petra

Témavezető: Dr. Fábián István egyetemi tanár



DEBRECENI EGYETEM

Kémia Doktori Iskola

Debrecen, 2021



## Az értekezésben előforduló rövidítések magyarázata

ANOVA	variancia-analízis
<i>BCF</i>	biokoncentrációs faktor
EDTA	etilén-diamin-tetraecetsav
ICP-OES	induktív csatolású plazma optikai emissziós spektrometria
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>
LDLS	lézerdiffrakciós fényszórás mérés
MP-AES	mikrohullámú plazma atomemissziós spektrometria
RDA	redundancia analízis
SD	szórás
SE	hiba
SEM	pásztázó elektronmikroszkópia
<i>TTF</i>	trofikus átadási tényező

## I. Bevezetés

Az ipari termelés során felszíni vizekbe kerülő szennyezőanyagok közül a nehézfémvegyületek különösen nagy egészségügyi kockázatot jelentenek. A felszíni vizek minőségének vizsgálatára számos, különböző teljesítőképességű módszer áll rendelkezésre. A vizek fizikai és kémiai jellemzői önmagukban csak korlátozott információt szolgáltatnak a közeg éppen aktuális állapotáról. A víz minőségének bioindikátorokkal való vizsgálata ezen felül lehetőséget ad a közegben uralkodó körülmények, illetve több, egyidejűleg jelenlévő szennyező komplex, élő szervezetekre gyakorolt hatásának megismerésére. Továbbá több, a tápláléklánc különböző szintjén álló szervezet bevonásával a szennyezőanyagok táplálékláncon keresztüli terjedését, és az egyes szinteken történő akkumulálódását is nyomon követhetjük. A vas és a mangán vízi szervezetekre kifejtett hatásáról, tápláléklánc menti terjedéséről kevesebb adat áll rendelkezésünkre, mint a tipikus toxikus nehézfémekről, így ez a két fémion került a kutatásaink fókuszába.

A felszíni vizekben jelenlévő fémvegyületek eltávolítása, illetve toxikológiai vizsgálata egyaránt összetett feladat, ugyanis az eltávolítandó komponens mellett számos más szervetlen és szerves vegyület van jelen, nagy koncentrációban. Sok technológia létezik fémvegyületek vízből történő kinyerésére. Ezek közül a szorpciós eljárások egyszerűségüknek és sokoldalúságuknak köszönhetően költséghatékony megoldások. A legígéretesebb szorbensek nagy felületű, porózus, szilárd anyagok, melyek hatékonysága és szelektivitása különböző funkciós csoportok beépítésével rendkívül nagymértékűre növelhető. Az aerogélek a fent említett kritériumoknak eleget tesznek, ezen túl biokompatibilisek, sokoldalúan funkcionálizálhatóak, így környezeti remediációs célra nagyon ígéretesek. Ezen okok miatt munkánk során aerogél alapú szorbensek fejlesztését végeztük nehézfémvegyületek vizes közegből történő eltávolítására.

## II. Célkitűzések

Munkám során az alábbi célokat tűztem ki:

- Vas- és mangánvegyületek biológiai terjedésének, illetve vízi táplálékláncon keresztüli felhalmozódásának vizsgálata (zooplankton szervezetektől a nyíltvízi békés halakig).
- Az expozíciós útvonalak (vízből történő; táplálék útján történő felvétel) hozzájárulásának vizsgálata a vízi szervezetekben kialakult nehézfém koncentrációkhoz.
- Vízen oldott nehézfémvegyületek eltávolítására használható szelektív szorbensek fejlesztése.
- A fémion szorpció mennyiségi viszonyainak leírása, optimális körülmények keresése.
- Vízi élőlényeket tartalmazó toxikológiai teszrendszer kifejlesztése, amely képes gyorsan, egyszerűen, kis mennyiségű mintából információt szolgáltatni remediációs célra fejlesztett szorbensek hatékonyságáról.

## III. Módszerek

Munkánk során a zooplankton szervezetek és halak laboratóriumi körülmények közötti tartásához, szaporításához és kezeléséhez **többfajú laboratóriumi modellrendszert** dolgoztunk ki, a természetes körülmények reprezentálását és az élő szervezetek szükségleteit szem előtt tartva. A biológiai indikátorszervezetek analitikai vizsgálatát célzó módszerek kiválasztásához fekete tőkehal izomból (*Pollachius virens*) készült **referenciaanyagot (ERM<sup>®</sup>-BB422)** alkalmaztunk. Az ennek vizsgálata során kapott eredmények alapján a szervezetek és szervek minta-előkészítését **atmoszférikus nedves roncsolással**, elemanalitikai vizsgálatát pedig **mikrohullámú plazma atomemissziós spektrometriával (MP-AES)** végeztük. A vas- és mangánvegyületek élő szervezetekben való felhalmozódásának vizsgálatára ötféle kezelést alkalmaztunk, melyekben különböző

vas(III)- és mangán(II)-koncentrációkat kombináltunk egymással (1. táblázat).

**1. táblázat:** A *Daphnia pulex* szervezetek dúsítására alkalmazott kezelések

Sorszám	Kód	Fe(III) kiegészítés (mg/l)	Mn(II) kiegészítés (mg/l)
1.	Fe(-)/Mn(-)	5,70	2,90
2.	Fe(-)/Mn(+)	5,70	6,25
3.	Fe(+)/Mn(-)	15,0	2,90
4.	Fe(+)/Mn(+)	15,0	6,25
5.	K (kontroll)	–	–

A fémvegyületek zooplankton szervezetekben (*Daphnia pulex*) való dúsulásának vizsgálatára 24 órán át hagytuk őket a különböző koncentrációban fémvegyületeket tartalmazó vizekben. A többfajú tesztek megvalósítása során zebrahalakat (*Danio rerio*) naponta ettük kezelt *Daphnia pulex* egyedekkel egy 14 napos kísérlet során. Többfajú tesztek végeztünk pontyvadékokkal (*Cyprinus caprio*) is a zebrahalak esetében alkalmazott eljárással megegyezően. Ezek a halak nagyobb méretük miatt már szervenként preparálhatók, így az egyes elemek dúsulása szervenként analizálható.

A kísérleti adatok statisztikai értékelését az **SpSS® Statistics v.22.0** szoftver segítségével végeztük. Az alkalmazott kezelésekre eltérésének szignifikancia szintjét ANOVA módszer alapján számoltuk. A variancia homogenitását Levene teszttel ellenőriztük, az adatok közötti szignifikáns különbségek megállapítására pedig Tukey tesztet használtunk. A vizsgált fajok és a környezeti háttérük közötti kölcsönhatások tanulmányozásához redundancia analízist (RDA) végeztünk a Canoco for Windows 4.5 programban.

Az aerogél szorbensek előállítására **szol-gél eljárással**, valamint szuperkritikus CO<sub>2</sub>-ban való szárítással történt a kutatócsoportban korábban kifejlesztett receptek alapján. Az aerogélek karakterizálására különböző szerkezetvizsgáló módszerekkel végeztük. **Pásztázó elektronmikroszkópiával** (SEM) vizsgáltuk az aerogéleket felépítő

primer részecskék méretét, alakját. Az aerogél minták fajlagos felületének, pórusméret eloszlásának és pórustérfogatának meghatározásához **N<sub>2</sub> adszorpciós/deszorpciós porozimetriát** (Quantachrome Nova 2200e) alkalmaztunk az IUPAC ajánlások szerint. Hidratált részecskék méreteloszlásának meghatározását **fénymikroszkóppal**, illetve **lézerdiffrakciós fényszórással (LDLS)** végeztük. A szuszpendált részecskék zéta potenciáljának meghatározásához **MALVERN Zetasizer Nano ZS** készüléket alkalmaztunk.

Az aerogélek különböző fémionok iránti affinitását, a fémionok szorpciós egyensúlyát **kevert reaktoros kísérletekben** vizsgáltuk. Ehhez olyan mintákat állítottunk össze, melyek az aerogél szuszpenzióját és a fémionok oldatát együttesen tartalmazták. A kísérletek során a mintákat állandó pH értéken tartottuk és mágneses keverő segítségével kevertettük. Adott kontaktidő letelte után a mintákat centrifugáltunk (VWR MEGASTAR 1.6R), végül a felülúszó oldatokat eltávolítottuk a kémcsövek alján összegyűjt aerogél pelletokról. Mindkét fázis (aerogél pellet, felülúszó oldat) fémion tartalmát **induktív csatolású plazma optikai emissziós spektrometriával (ICP-OES)** határoztuk meg. Az aerogél szorbensek különböző fémionok iránti affinitását a különböző ionokat egyesével és egymás mellett alkalmazva is vizsgáltuk. A kapott izotermákon görbealak-analízist végeztünk. A kevert reaktoros kísérletek alkalmazásával vizsgáltuk a szorpciós folyamat időfüggését is. Különböző mosófolyadékok (desztillált víz, 0,50 M NaCl, 0,25 mM EDTA, 2,5 mM EDTA) alkalmazásával teszteltük a szorbens regenerálhatóságát. Továbbá vizsgáltuk a szorbens hatékonyságát valós körülmények között.

Az aerogélek remediációs hatékonyságának tesztelésére papucsállatkákat (*Paramecium caudatum*) tartalmazó toxikológiai modellrendszert fejlesztettünk. A kísérletek során a sejtek életképességével arányos mozgékonyaságukat **videómikroszkópia** (zenCell Owl inkubátor mikroszkóp) segítségével követtük. Az

életképességük számszerű kifejezéséhez az egymás követő felvételeket ImageJ képszerkesztő szoftverrel értékeltük. A kapott mozgékonyági görbékből lineáris trendvonalal történő illesztéssel számoltuk ki a papucsállatka kultúrák túlélési idejét.

## IV. Új tudományos eredmények

**1. Kifejlesztettünk egy nehézfémetvegyületek felhalmozódásának vizsgálatára alkalmas többfajú ökológiai tesztrendszert és optimalizáltuk a tesztrendszerből származó biológiai minták reprezentatív elemanalitikai méréséhez szükséges minta-előkészítési és mérési módszereket.**

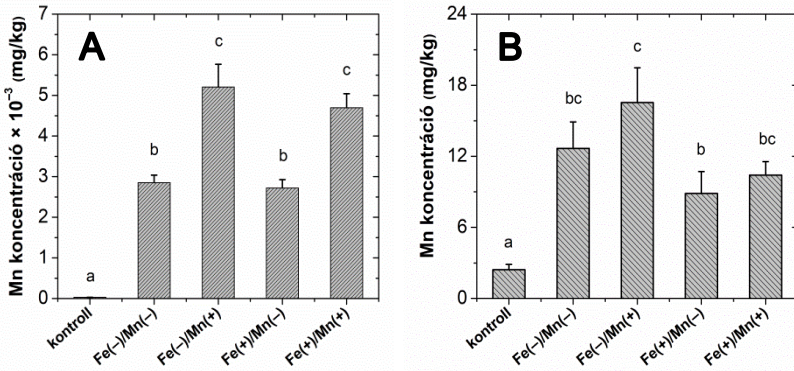
1.1) Zooplankton szervezetek és halak laboratóriumi körülmények közötti tartásához, szaporításához és kezeléséhez modellrendszert dolgoztunk ki, a természetes körülmények reprezentálását és az élő szervezetek szükségleteit szem előtt tartva. A kifejlesztett modellrendszerrel információt nyerhetünk több együttesen jelenlévő szennyező komplex, élő szervezetekre gyakorolt hatásáról, a szennyezők élő szervezetekben történő felhalmozódásának mértékéről. Több, a tápláléklánc különböző szintjén álló szervezet bevonásával a szennyezőanyagok tápláléklánc menti terjedését, és az egyes szinteken történő akkumulálódását is nyomon követhetjük.

1.2) Az ERM<sup>®</sup>-BB422 referenciaanyag segítségével megállapítottuk, hogy a költségkímélőbb MP-AES technika alkalmas élőlényekből nyert szöveti minták elemkoncentrációjának analitikailag pontos meghatározására hagyományos, atmoszférikus nyomáson végrehajtott roncsolással történő előkészítés mellett.

**2. Bizonyítottuk, hogy a zebrahalak szervezetében szignifikáns vas- és mangán-felhalmozódást okoz, ha ezeket vas- és mangánvegyületekkel kezelt zooplankton szervezetekkel tápláljuk. A zebrahalakra jellemző fémkoncentráció statisztikailag szignifikáns kapcsolatban áll a táplálékra jellemző fémkoncentrációkkal.**

2.1) A vas- és mangánvegyületek felhalmozódását elsőként zooplankton szervezetekben (*Daphnia pulex*) vizsgáltuk. Eredményeink egyértelműen azt mutatják, hogy az oldott Mn(II)-koncentráció növekedésével arányosan nő a tápláléklánc alacsony szintjén álló *Daphniák* által felvett mangán mennyisége. A *Daphniák* szervezetében a mangánhoz viszonyítva egy nagyságrenddel nagyobb mennyiségű vas halmozódott fel. A vaskoncentráció növekedése a zooplankton szervezetekben azonban nem az alkalmazott koncentrációkkal arányosan történt.

2.2) Általánosan elmondható, hogy a *Daphnia* szervezetekben a különböző kezelések következtében kialakult vas- és mangán-dúsulás, valamint az ezekben észlelt tendenciák megőrződnek a zebrahalak esetén (1. ábra).



**1. ábra:** A *Daphnia pulex* szervezetekben felhalmozódott mangán (A), valamint a zebrahalakban akkumulálódott mangán mennyisége (B). Átlag ± standard hiba (SE), szárazanyag tartalomra vonatkoztatva; N = 3. Az oszlopok fölött szereplő betűk a statisztikai szignifikancia alapján történő csoportosítást jelölik.

2.3) A redundancia analízis eredménye, valamint az általunk kiszámolt biokoncentrációs faktorok (*BCF*) és trofikus átadási tényező (*TTF*) értékei alátámasztják a *Daphniák*, valamint zebrahalak szervezetében kialakult koncentrációk közötti összefüggést. Így igazoltuk, hogy egy vízi ökoszisztémát érintő Fe(III) és Mn(II) szennyezés esetén az élőlényekre kifejtett hatásuk értékeléséhez mindenképpen szükséges a tápláléklánc útján történő dúsulásukat is figyelembe venni.

2.4) Az általunk meghatározott *TTF* értékek kisebb különbséget mutatnak az egyes kezelések között, mint a biokoncentrációs faktorok. Értékük 5-6 nagyságrenddel kisebb a *BCF*-hez viszonyítva. Ezek alapján biomagnifikáció nem valósult meg a kísérleteinkben a *Daphnia pulex* és *Danio rerio* táplálkozási útvonalon.

2.5) Megállapítottuk, hogy a kísérletben alkalmazott táplálék útján történő nagyobb mennyiségű mangán- és vasbevitel csekély, de statisztikailag kimutatható mértékben negatív hatással van a zebrahalak növekedésére.

**3. Nagyobb méretű halak (pontyok) esetén a vas- és mangánvegyületek táplálék útján történő felhalmozódása eltérést mutatott mind a szervek mind a fémvegyületek esetében. A legjelentősebb dúsulást mangán esetén a májban mutattuk ki.**

3.1) A különböző kezelések nem eredményeztek statisztikailag igazolható különbséget egyik szervben sem a kontroll és a kezelt csoportok vas koncentrációja között.

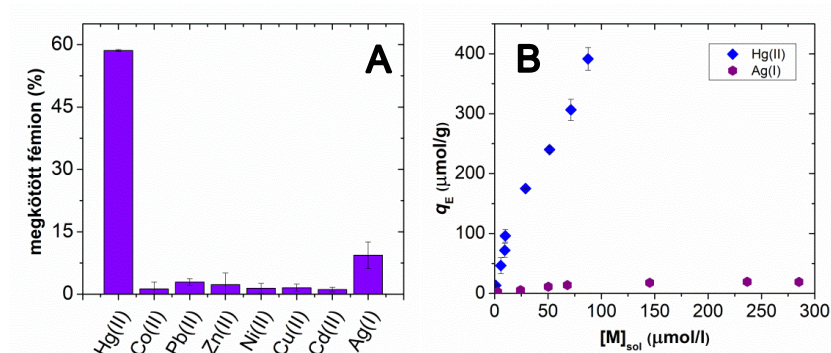
3.2) A mangán esetén ezzel szemben több szervben is szignifikánsan nagyobb koncentráció alakult ki a kontroll egyedekhez viszonyítva mangánnal kezelt *Daphniákkal* történő táplálás hatására. A legnagyobb mangánkoncentrációkat a halak májában mértük. A máj után a halak kopolyájában mértük a legnagyobb mértékű mangándúsulást. A szem esetében is szignifikánsan nagyobb a legtöbb kezelt csoport mangánkoncentrációja, az előző két szervhez képest viszont kisebb mértékű az akkumuláció. Az alkalmazott kezelések nem okoztak szignifikánsan nagyobb mangánkoncentrációt az agyban és az izmokban.

3.3) Megállapítottuk, hogy a zebrahalakhoz képest jelentősen nagyobb testtömegű pontyok esetében nem okozott csökkent növekedési teljesítményt azok etetése azonos vas- és mangán-koncentrációkkal kezelt *Daphniákkal*.

**4. Részletes egyensúlyi és kinetikai kísérletekkel igazoltuk, hogy a szilika-zselatin hibrid aerogélek oldott Hg(II) szelektív szorpciójára képesek.**

4.1) A Hg(II), Cu(II), Cd(II), Co(II), Pb(II), Ni(II), Ag(I) és Zn(II) fémionok szorpcióját egyesével, illetve egy oldatban, egymás mellett több fémion jelenlétében vizsgálva is igazoltuk, hogy a szilika-zselatin hibrid aerogélek rendkívül Hg(II)-szelektívek. A Hg(II)-n kívül az Ag(I) az egyetlen fémion, amely kimutatható mértékben kötődik a hibrid aerogélekhez a vizsgált pH tartományban. Kompetitív szorpció

kísérletek Ag(I) jelenlétében igazolják a hibrid aerogélek Hg(II)-ionok iránti szelektivitását (2. ábra).



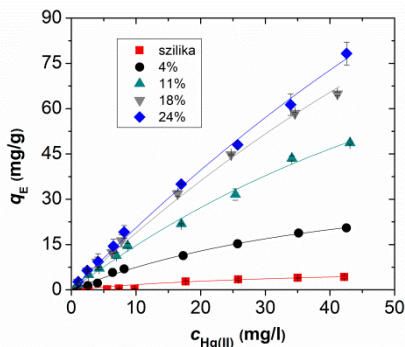
**2. ábra:** A: A 24 m/m% zselatint tartalmazó szilika-zselatin hibrid aerogél által szorbeált fémionok mennyisége egyensúlyban, több fémion egyidejű jelenlétében. pH = 6,0;  $c_M = 10$  mg/l; 320 mg/l aerogél. B: Jelölők: A Hg(II) és Ag(I) ionok egyidejű szorpciója során mért szorpciós izotermák. pH = 6,0; 320 mg/l aerogél.

## 5. Megállapítottuk a szorpcióhoz optimális körülményeket, javaslatot tettünk a Hg(II) megkötés kémiai jellegére.

Független kísérletekben vizsgáltuk a pH, a szorbens zselatintartalma és a kiindulási Hg(II)-koncentráció hatását.

5.1) A legnagyobb szorpciós kapacitást a legnagyobb alkalmazható pH értéken, vagyis pH = 6,0-on mértük. Igazoltuk, hogy a hibrid aerogélek szorpciós kapacitása nő a zselatintartalom növelésével (3. ábra). Ebből arra következtethetünk, hogy a zselatin az aktív hely a Hg(II) megkötésére. Ezt alátámasztja az is, hogy a SiO<sub>2</sub> aerogél csak elhanyagolható mértékben köt meg hidratált Hg(II)-ionokat. A kísérletileg mért szorpciós izotermából az aerogél kapacitását az egymással ekvivalens kötőhelyeket feltételező egyensúlyi modellel,

azaz a „Langmuir-modell”-lel számítottuk. A „Langmuir” modell alkalmazásával  $S = 209 \pm 60$  mg/g szorpciós kapacitás becsülhető a 24 m/m% zselatint tartalmazó hibrid esetén;  $K_L = 0,032 \pm 0,013$  l/mg egyensúlyi állandó mellett, pH = 6,0 értéken.



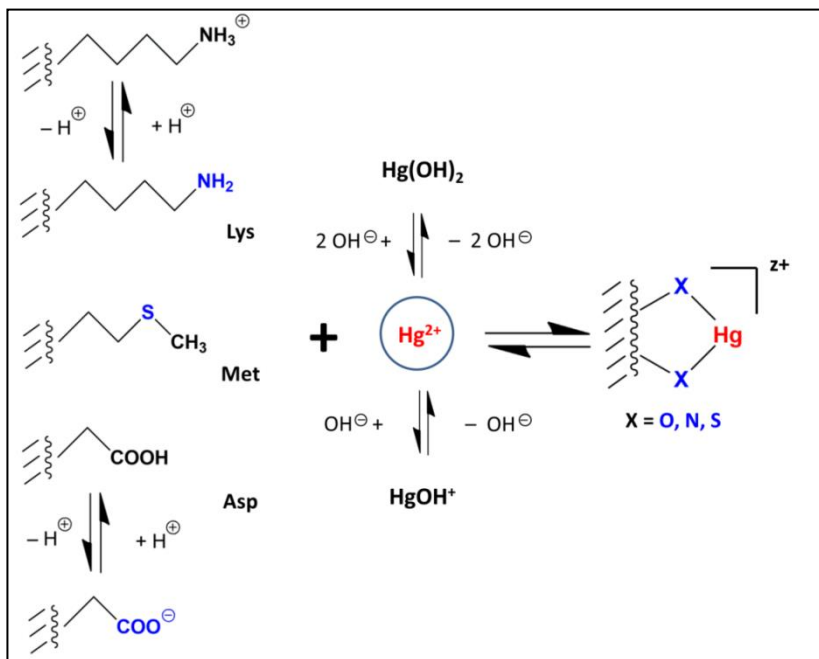
**3. ábra:** A Hg(II)-ionok szilika és szilika-zselatin aerogéleken való szorpciójának izotermái. pH = 6,0; 320 mg/l aerogél. Jelölők: kísérleti adatpontok. Görbék: Nem lineáris illesztés „Langmuir” modellel.

5.2) Megállapítottuk, hogy a szorpciós egyensúly már 5 perc kevertetési idő (és 10 perc centrifugálás) után beállt. A szorpciós egyensúly beállításához szükséges idő gyakorlatilag független a kiindulási Hg(II)-koncentrációtól és az aerogél zselatintartalmától.

5.3) A szorbens regenerálhatóságának különböző mosóoldatokkal (desztillált víz, NaCl oldat, 0,25 mM EDTA oldat, 2,5 mM EDTA oldat) történő vizsgálatával megállapítottuk, hogy a Hg(II)-ionok teljes visszanyerésére a 2,5 mM EDTA oldat alkalmas (33-szoros EDTA felesleg). Ennek alkalmazásával öt szorpció-regenerálás ciklus elvégzését követően 9%-os csökkenést mértünk a szorpciós kapacitásban az első használathoz viszonyítva.

5.4) A javasolt megkötődési séma, amely mind a Hg(II) oldatbeli speciációját, mind pedig az aerogélen lévő, a megkötés szempontjából jelentős funkciós csoportok protonáltságát figyelembe veszi, a 4. ábrán látható. Ez a megközelítés az irodalomban felületen történő

komplekképződés „surface complexation” néven terjedt el. (Az általunk alkalmazott pH-n (pH = 6) a  $\text{Hg}(\text{OH})_2$  speciesz a domináns. Ennek oldhatósága nagyobb ( $3,2 \times 10^{-4}$  M), mint a kísérletünk során vizsgált legnagyobb  $\text{Hg}(\text{II})$  koncentráció). A 24 m/m%-os hibrid aerogél izoelektromos pontja kb. pH = 4, így a gyakorlati alkalmazás szempontjából hasznos pH tartományban (pH = 4 – 6) a hibrid aerogél felülete negatív töltésű.)



4. ábra: A  $\text{Hg}(\text{II})$  megkötésének feltételezett mechanizmusa és az ezt meghatározó egyensúlyi folyamatok sémája

**6. Egy bioindikátor szervezet (*Parmecium caudatum*) bevonásával dózis-hatás összefüggést állítottuk fel Hg(II) toxicitására, és megmutattuk, hogy az aerogél szorbens hozzáadása hatékonyan növeli a szervezetek túlélését.**

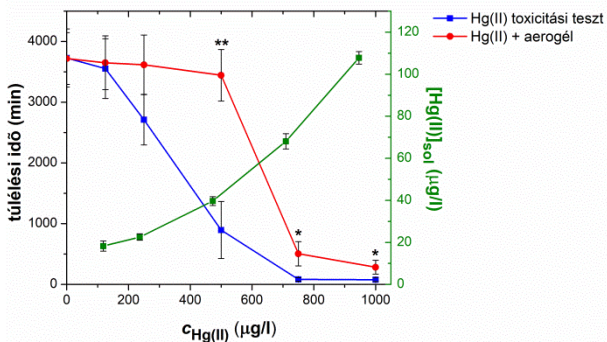
6.1) Igazoltuk, hogy a Hg(II) ionok szorpciója a szilika-zselatin hibrid aerogélen valós körülmények között (kicsi Hg(II) koncentráció, természetes tóból származó víz) is változatlanul végbemegy.

6.2) Kifejlesztettünk egy alacsonyrendű élő szervezetet (*Paramecium caudatum*) tartalmazó toxikológiai modellrendszert a szilika-zselatin aerogél valós környezeti körülmények közötti remediációs hatékonyságának tesztelésére. A kifejlesztett modellrendszer segítségével valós időben nyomon követhető a sejtek (életképességével arányos) mozgékonyasága. A készített felvételekből képelemző szoftver segítségével számszerűsíthető az életképes sejtek száma az idő függvényében.

6.3) A kifejlesztett modellrendszer segítségével egyértelmű dózis-hatás összefüggést mutattunk ki a papucsállatkák túlélési ideje és az alkalmazott Hg(II) koncentrációk között. 125 µg/l Hg(II) koncentráció fölött a sejtek túlélési ideje meredek csökkenést mutat. Az általunk becsült LC50 értékek jó egyezést mutatnak a korábban publikált adatokkal.

6.4) Igazoltuk továbbá az aerogél biokompatibilitását a modellrendszer segítségével. Az alkalmazott aerogél koncentrációk egyike sem csökkentette a papucsállatkák túlélési idejét.

6.5) Egyértelműen igazoltuk, hogy az aerogél szorbens alkalmazása szignifikánsan növeli a Hg(II)-al kezelt papucsállatka kultúrák túlélési idejét. Az aerogél alkalmazásával a túlélési idők meredek csökkenésének kezdőpontja  $c_{\text{Hg(II)}} = 125 \mu\text{g/l}$ -ről 500 µg/l-re tolódik (5. ábra).



**5. ábra:** A papucsállatkák túlélési ideje a kiindulási Hg(II)-koncentráció függvényében. A kék jelölők az aerogél hozzáadása nélkül végrehajtott Hg(II) toxicitási tesztek adatpontjai, a piros jelölők a 100 mg/l aerogél szorbens hozzáadásával kivitelezett remediációs tesztek adatpontjai. A zöld jelölők a kiindulási Hg(II)-koncentráció függvényében ábrázolt oldatban lévő egyensúlyi Hg(II)-koncentrációk, 100 mg/l aerogél szorbens alkalmazásával.

## V. Az eredmények hasznosítási lehetőségei

Munkánk során vizsgáltuk a vas(III)- és mangán(II)-vegyületek vízi élőlényekben történő felhalmozódását. A kapott eredmények megmutatják, hogy egy felszíni vizet érő szennyezés esetén a vas(III) és mangán(II) milyen mértékben halmozódhat fel a vízi tápláléklánc különböző szintjein lévő szervezetekben, valamint a magasabb rendű élőlények szerveiben. A vizsgálatok elvégzéséhez kifejlesztett többfajú modellrendszer kiválóan alkalmas egyéb, a felszíni vizeket érő szennyezések tápláléklánc menti terjedésének laboratóriumi körülmények közötti vizsgálatához is.

Igazoltuk, hogy a szilika-zselatin hibrid aerogél szelektíven köti a Hg(II)-t, illetve megállapítottuk a szorpcióhoz optimális körülményeket. Eredményeink alapján a szorbens a gyakorlati alkalmazás szempontjából is rendkívül előnyös tulajdonságokat mutat. Nagy szorpciós kapacitása van, a szorpciós egyensúly gyorsan beáll, könnyen regenerálható, így akár egy ipari fejlesztés alapjául is szolgálhat.

Egy élőlényeket is tartalmazó, *time lapse* videómikroszkópos megfigyelésen alapuló modellrendszer segítségével igazoltuk a szorbens remediációs hatékonyságát és biokompatibilitását. Az ilyen módon meghatározott LC50 értékek jó egyezést mutatnak korábban publikált eredményekkel. Az általunk kifejlesztett modellrendszer alkalmazásával automatizált módon, jelentősen nagyobb egyedszám megfigyelésével nyerhetünk információt különböző anyagok toxicitásáról, továbbá szorbensek környezetbeli alkalmazhatóságáról, ami csupán kémiai laboratóriumi vizsgálatok segítségével nem megállapítható.

*Az értekezés alapját képező közlemények*

**Nemzetközi referált tudományos folyóiratokban megjelent közlemények**

1. P. Herman, A. Kiss, I. Fábián, J. Kalmár, G. Nagy:

In situ remediation of the model aquatic culture of unicellular *Paramecium caudatum* exposed to Hg(II) using advanced aerogel adsorbent.

*Chemosphere* 275, 1-8 (2021)

DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130019

**IF (2020): 7,086; D1**

2. P. Herman; M. Fehér; Á. Molnár; S. Harangi; L. Stündl; I. Fábián; E. Baranyai:

Iron and manganese retention of juvenile zebrafish (*Danio rerio*) exposed to contaminated dietary zooplankton (*Daphnia Pulex*) – a Model Experiment.

*Biological Trace Element Research* 199 (2), 732-743 (2020)

DOI: 10.1007/s12011-020-02190-z

**IF (2020): 3,738; Q2**

3. P. Herman, I. Fábián, J. Kalmár:

Mesoporous Silica–Gelatin Aerogels for the Selective Adsorption of Aqueous Hg(II).

*ACS Applied Nano Materials* 3 (1), 195-206 (2020)

DOI: 10.1021/acsanm.9b01903

**IF (2020): 5,097; Q1**

4. P. Herman, S. Harangi, M. Fehér, E. Baranyai:

The development of analytical methods for the elemental determination of biotic indicators present in aquatic ecosystems.

*Studia Universitatis Babes-Bolyai Chemia* 62 (2), 213-222 (2017)

DOI:10.24193/subbchem.2017.2.16

**IF (2017): 0,305; Q4**

*Az értekezés anyagához szorosan nem kapcsolódó közlemények*

**Nemzetközi tudományos folyóirat közlemények**

1. L. Juhász; K. Moldován; P. Herman; Z. Erdélyi; I. Fábíán; J. Kalmár; Cs. Cserhádi: Synthesis and Stabilization of Support-Free Mesoporous Gold Nanoparticles.

*Nanomaterials* 10 (6), 1-11 (2020)

DOI: 10.3390/nano10061107

**IF (2020): 5,076; Q1**

2. Zs. Szabó; B. Buró; J. Szabó; Cs. A. Tóth; E. Baranyai; P. Herman; J. Prokisch; T. Tomor; Sz. Szabó: Geomorphology as a Driver of Heavy Metal Accumulation Patterns in a Floodplain.

*Water* 12 (2), 1-16 (2020)

DOI: 10.3390/w12020563

**IF (2020): 3,103; Q1**

3. Zs. Sajtos; P. Herman; S. Harangi; E. Baranyai: Elemental analysis of Hungarian honey samples and bee products by MP-AES method. *Microchemical Journal* 149, 1-8 (2019)

DOI:10.1016/j.microc.2019.103968

**IF (2019): 3,594; Q2**

4. A. Forgács; K. Moldován; P. Herman; E. Baranyai; I. Fábíán; G. Lente; J. Kalmár:

Kinetic Model for Hydrolytic Nucleation and Growth of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles.

*Journal of Physical Chemistry C* 122 (33), 19161-19170 (2018)

DOI 10.1021/acs.jpcc.8b04227

**IF (2018): 4,309; D1**

5. S. Harangi, E. Baranyai, M. Fehér, Cs. N. Tóth, P. Herman, L. Stündl, I. Fábrián, B. Tóthmérész, E. Simon:

Accumulation of metals in juvenile carp (*Cyprinus carpio*) exposed to sublethal levels of iron and manganese: survival, body weight and tissue.

*Biological Trace Element Research* 177 (1), 187-195 (2017)

DOI 10.1007/s12011-016-0854-5

**IF (2017): 2,399; Q2**

### **Hazai referált tudományos folyóiratokban megjelent közlemények**

1. Herman P.: Zooplankton szervezetek vas és mangán terhelésének vizsgálata atomspektroszkópiai módszerekkel.

*Hidrológiai Közöny* 96/különszám 40-43. (2016)

2. Herman P., Harangi S., Simon E., Baranyai E.:

Zooplankton szervezetek nehézfémet terhelésének vizsgálata atomspektroszkópiai módszerekkel.

*Economica* 8 128–136. (2015)



Nyilvántartási szám: DEENK/409/2021.PL  
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Herman Petra  
Doktori Iskola: Kémiai Tudományok Doktori Iskola  
MTMT azonosító: 10057682

### A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idégen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (4)

- Herman, P.**, Kiss, A., Fábán, I., Kalmár, J., Szemán-Nagy, G.: In situ Remediation Efficacy of Hybrid Aerogel Adsorbent in Model Aquatic Culture of *Paramecium caudatum* Exposed to Hg(II).  
*Chemosphere*. 275, 1-8, 2021. ISSN: 0045-6535.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130019>  
IF: 7.086 (2020)
- Herman, P.**, Fehér, M., Molnár, Á., Harangi, S., Sajtos, Z., Stündl, L., Fábán, I., Baranyai, E.: Iron and Manganese Retention of Juvenile Zebrafish (*Danio rerio*) Exposed to Contaminated Dietary Zooplankton (*Daphnia pulex*)-a Model Experiment.  
*Biol. Trace Elem. Res.* 199 (2), 732-743, 2021. ISSN: 0163-4984.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12011-020-02190-z>  
IF: 3.738 (2020)
- Herman, P.**, Fábán, I., Kalmár, J.: Mesoporous Silica-Gelatin Aerogels for the Selective Adsorption of Aqueous Hg(II).  
*ACS Appl. Nano Mater.* 3 (1), 195-206, 2020. ISSN: 2574-0970.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/acsanm.9b01903>  
IF: 5.097
- Herman, P.**, Harangi, S., Fehér, M., Fábán, I., Baranyai, E.: The Development of Analytical Methods for the Elemental Determination of Biotic Indicators Present in Aquatic Ecosystems.  
*Stud. Univ. Babeş-Bolyai Chem.* 62 (2), 213-222, 2017. ISSN: 1224-7154.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.24193/subbchem.2017.2.16>  
IF: 0.305





## További közlemények

### Magyar nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (2)

5. **Herman, P.**: Zooplankton szervezetek vas és mangán terhelésének vizsgálata atomspektroszkópiai módszerekkel.  
*Hidrol. Közöny.* 96 (Kisz.), 40-43, 2016. ISSN: 0018-1323.
6. **Herman, P.**, Harangi, S., Simon, E., Baranyai, E.: Zooplankton szervezetek nehézfém terhelésének vizsgálata atomspektroszkópiai módszerekkel.  
*Economica.* 8 (3), 128-136, 2015. ISSN: 1585-6216.

### Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (5)

7. Szabó, Z., Buró, B., Szabó, J., Tóth, C. A., Baranyai, E., **Herman, P.**, Prokisch, J., Tomor, T., Szabó, S.: Geomorphology as a Driver of Heavy Metal Accumulation Patterns in a Floodplain.  
*Water.* 12 (2), 1-16, 2020. EISSN: 2073-4441.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/w12020563>  
IF: 3.103
8. Juhász, L., Moldován, K., **Herman, P.**, Erdélyi, Z., Fábán, I., Kalmár, J., Cserháti, C.: Synthesis and Stabilization of Support-Free Mesoporous Gold Nanoparticles.  
*Nanomaterials.* 10 (6), 1-11, 2020. EISSN: 2079-4991.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/nano10061107>  
IF: 5.076
9. Sajtos, Z., **Herman, P.**, Harangi, S., Baranyai, E.: Elemental analysis of Hungarian honey samples and bee products by MP-AES method.  
*Microchem J.* 149, 1-8, 2019. ISSN: 0026-265X.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.microc.2019.103968>  
IF: 3.594
10. Forgács, A., Moldován, K., **Herman, P.**, Baranyai, E., Fábán, I., Lente, G., Kalmár, J.: Kinetic Model for Hydrolytic Nucleation and Growth of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles.  
*J. Phys. Chem. C.* 122 (33), 19161-19170, 2018. ISSN: 1932-7447.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b04227>  
IF: 4.309





**DEBRECENI  
EGYETEM**

**DEBRECENI EGYETEM  
EGYETEMI ÉS NEMZETI KÖNYVTÁR**

H-4002 Debrecen, Egyetem tér 1, Pf.: 400

Tel.: 52/410-443, e-mail: publikaciok@lib.unideb.hu

11. Harangi, S., Baranyai, E., Fehér, M., Tóth, C. N., **Herman, P.**, Stündl, L., Fábán, I., Tóthmérész, B., Simon, E.: Accumulation of Metals in Juvenile Carp (*Cyprinus carpio*) Exposed to Sublethal Levels of Iron and Manganese: Survival, Body Weight and Tissue.  
*Biol. Trace Elem. Res.* 177 (1), 187-195, 2016. ISSN: 0163-4984.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12011-016-0854-5>  
IF: 2.399

**A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 34,707**

**A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre):  
16,226**

A DEENK a Jelölt által az IDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudománymetriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2021.08.19.

