



Antropogén eredetű környezetterhelés tesztelése és szoftveres módszerek fejlesztése

Egyetemi doktori (PhD) értekezés

a szerző neve: Málík-Roffa Hajnalka
témavezető neve: Dr. Mizser Szabolcs
adjunktus

DEBRECENI EGYETEM
Természettudományi és Informatikai Doktori Tanács
Juhász-Nagy Pál Doktori Iskola
Debrecen, 2023

*Ezen értekezést a Debreceni Egyetem Természettudományi és Informatikai Doktori Tanács **Juhász-Nagy Pál Doktori Iskola Kvantitatív és Teresztis Ökológia** programja keretében készítettem a Debreceni Egyetem természettudományi doktori (PhD) fokozatának elnyerése céljából. Nyilatkozom arról, hogy a tézisekben leírt eredmények nem képzik más PhD disszertáció részét.*

Debrecen, 2023. szeptember 13.

.....

Málik-Roffa Hajnalka

*Tanúsítom, hogy **Málik-Roffa Hajnalka** doktorjelölt 2019-2023 között a fent megnevezett Doktori Iskola **Kvantitatív és Teresztis Ökológia** programja keretében irányításommal végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önállóan alkotó tevékenységével meghatározóan hozzá járult. Nyilatkozom továbbá arról, hogy a tézisekben leírt eredmények nem képzik más PhD disszertáció részé. Az értekezés elfogadását javaslom.*

Debrecen, 2023. szeptember 13.

.....

Dr. Mizser Szabolcs

Antropogén eredetű környezetterhelés tesztelése és szoftveres módszerek fejlesztése

Értekezés a doktori (Ph.D.) fokozat megszerzése érdekében
a Környezettudomány tudományágban

Írta: **Málik-Roffa Hajnalka** mérnökinformatikus és okleveles
környezetkutató

Készült a Debreceni Egyetem **Juhász-Nagy Pál Doktori Iskolája**
(Kvantitatív és Terresztris Ökológia programja) keretében

Témavezető: **Dr. Mizser Szabolcs** adjunktus

Az értekezés bírálói:

Dr.	
Dr.	
Dr.	

A bírálóbizottság:

elnök:	Dr.	
tagok:	Dr.	
	Dr.	
	Dr.	
	Dr.	

Az értekezés védésének időpontja: 2023.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	8
2. Irodalmi áttekintés	10
2.1. Környezetterhelés antropogén környezet stresszfactorok	10
2.2. Bioindikátor szervezetek	11
2.3. Bioakkumulációs faktor (BAF)	12
2.4. Fluktuáló aszimmetria	13
2.5. Ízeltlábúak viselkedése	13
2.6. Környezeti informatika	14
2.7. Mozgást követő és elemző szoftverek	14
2.8. Python programozás	17
3. Célkitűzés	18
3.1. Környezetterhelés hatásainak tesztelése <i>Silpha tristis</i> egyedek mikroelem összetételére és morfológiájára	18
3.2. Földigilisztafajokban felhalmozódó fémek elemek metaanalízise	19
3.3. Ízeltlábúak mozgását nyomon követő szoftver tervezése és megírása	19
4. Anyag és módszer	21
4.1. Terepi mintavétel	21
4.2. A metaanalízishez szükséges szakirodalmi áttekintés és adatgyűjtés	23
4.3. Morfológiai vizsgálati módszerek	23
4.3.1. <i>Silpha tristis</i> egyedek morfológiai vizsgálata	24
4.4. Mikroelem összetétel analízis a <i>Silpha tristis</i> egyedek laboratóriumi vizsgálattal	28
4.5. Alkalmazott statisztikai módszerek	29
4.5.1. A bioakkumulációs faktor (BAF) számítása <i>Silpha tristis</i> egyedeknél	29
4.5.2. Statisztikai értékelés <i>Silpha tristis</i> egyedek mikroelem összetételére	29
4.5.3. A <i>Silpha tristis</i> egyedek morfológiai paraméterei alapján történő Fluktuáló asszimmetria (FA) analízise	30
4.5.4. Statisztikai értékelés a metaanalízisbe vont szakirodalmi adatok alapján	30
4.6. A szoftver	33
4.6.1. A tesztelési terület meghatározása	34
4.6.2. A meghatározott tesztszervezet nyomon követése	38
4.6.3. Példák a szoftver alkalmazásaira	39
5. Eredmények	41
5.1. Az <i>Silpha tristis</i> egyedek esetében végzett mikroelemösszetétel vizsgálati eredményei	41
5.2. A <i>Silpha tristis</i> egyedek esetében végzett morfológiai vizsgálatok eredményei	48
5.4. Fémek felhalmozódása földigiliszta fajokban	51

5.5. A talaj pH-jának hatása a fémek felhalmozódására	55
5.6. Az expozíciós idő hatása a fémek felhalmozódására a földigilisztafajokban ..	56
5.6.1. <i>As</i> felhalmozódás	57
5.6.2. <i>Cd</i> felhalmozódás	57
5.6.3. <i>Cr</i> felhalmozódás	57
5.6.4. <i>Cu</i> felhalmozódás	57
5.6.5. <i>Ni</i> felhalmozódás	58
5.6.6. <i>Pb</i> felhalmozódás	58
5.6.7. <i>Zn</i> felhalmozódás	58
5.7. A szoftver eredményei	58
6. Diszkusszió	62
6.1. Környezetterhelés hatásainak tesztelése <i>Silpha tristis</i> egyedek mikroelem	62
összetételére és morfológiájára	62
6.2. Földigilisztafajokban felhalmozódó fémek metaanalízise	64
6.3. A BugTracker szoftver	67
7. Összegzés	69
8. Summary	71
Köszönetnyilvánítás	74
Irodalomjegyzék	75
Függelék	90

1. Bevezetés

Az ökoszisztémákra gyakorolt antropogén hatások sokrétűek és következményeik nehezen értelmezhetők a biodiverzitásra. Az egyes tényezők hatását stresszfactoron belül lehetetlen elkülöníteni [Hilborn és Stearns, 1982; Underwood, 1997].

A globális antropogén tevékenységek, mint például a mezőgazdaság, az erdőgazdálkodás és az urbanizáció mind jelentős változásokhoz vezetnek a környezetben [Kerr és Currie, 1995]. A környezeti paraméterek megváltozása nyomást gyakorol az ott élő szervezetekre, módosítva viselkedési paramétereiket: aktivitást, felfedezőkészséget, merészséget vagy akár fenológiát, kondíciót, mindemellett a termékenységre is hatással lehet [Wong, 2015; Cote és mtsai., 2010]. Az ökológiai vizsgálatoknál a terepi mintavételezés mellett fontos szerepük van a helyesen megválasztott laboratóriumi vizsgálatok, illetve a statisztikai módszereknek. A jól számszerűsített laboratóriumi vizsgálatok alapvető információt adhatnak az állatok viselkedéséről az ökológiai, etológiai és ökotoxikológiai kutatásokban. Az ilyen típusú vizsgálatok megkövetelik a tanulmányozott állatok ismeretét, megfigyelését és nyomon követését, jól ellenőrzött és meghatározott szintereken [Panadeiro és mtsai., 2021]. Számos tudományágban, mint a viselkedés- és az evolúciós ökológiában, illetve az etológiában kulcskérdés az, hogyan lehet számszerűsíteni a vizsgált organizmusok aktivitását és/vagy mozgását. A mozgás is döntő paraméter, és gyakran használnak proxyt az emberrel összefüggő stresszorok, vegyszerek és gyógyszerek hatásának értékelésére [Seehausen és mtsai., 1997]. Az ízeltlábúak mozgása tanulmányozásának egyik elterjedt módja a mesterséges laboratóriumi vizsgálati arénák, ahol rövid időn át tartó videofelvételeket készítenek az

egyedek mozgásáról, majd a videók segítségével történik a kiértékelés [Zaller és mtsai., 2015]. Ma már több szoftver kínál megoldást az ökológiai problémák és feladatok modellezésére és feldolgozására. Az algoritmusok fejlődésével ezek a szoftverek is fejlődnek és újak jelennek meg [Málík-Roffa és mtsai., 2023].

A technika fejlődésének nemcsak kedvező hatásait érezhetjük, hanem környezeti terheléssel járó folyamatokat is tapasztalhatunk főleg a városi területekre koncentrálódva [Cachada és mtsai., 2013]. A szárazföldi élőlények életkörülményeit súlyosan befolyásolhatják az élőhelyükön bekövetkező legkisebb változások is. Az egyik legelterjedtebb stressztényező a talajban a túlzott toxikus elemkoncentráció [Sharma és mtsai., 2018]. A talajban fellelhető elemek egy csoportja (pl. fémek) potenciális koncentrációfüggő kockázatot jelent a környezetre. A szakirodalom gyakran potenciálisan mérgezőként említi ezeket az elemeket [Antoniadis és mtsai., 2019; Xiao és mtsai., 2022].

A környezeti stressztényezők hatásai az egyedek mikroelem összetételében és koncentrációiban jól láthatóak, valamint a morфомetriai paramétereikben és testi szimmetriájukban a változások vizsgálhatóak [Palmer és Strobeck, 1992; Jones és Hopkin, 1998; Ribera és mtsai., 2001; Witzel, 2000; Weller és Ganzhorn, 2004; Skalski és mtsai., 2010; Godet és mtsai., 2011; Simon és mtsai., 2016]. Ezért nagyon hatékonyak bizonyulnak az emberi tevékenységek hatásainak monitorozására. Nagy denzitása és könnyű gyűjthetősége miatt a csapdázott egyedekből kiválasztott *Silpha tristis* faj alkalmas lehet hasonló vizsgálatokra. Ebben a kérdéskörben még igen kevés irodalmi forrás áll rendelkezésünkre.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. Környezetterhelés antropogén környezet stresszfaktorok

Az emberi tevékenységgel járó emisszió kedvezőtlen mikroelem mennyiségi előfordulást eredményezett a környezetünkbe [Gál és mtsai., 2008]. A talaj nagy mennyiségben képes megkötni, valamint visszatartani a szennyezőanyagokat. A talajjal kapcsolatban élő szervezetek számára nagyon sok mikroelem érhető el olyan formában, amely számukra könnyedén felvehető [Bohn, 1972].

Az 1960-as években világszerte nagy figyelmet kapott a gépjárműforgalom által okozott nehézfém-szennyezés. A közutak környezetében jelentős mértékű nehézfém-dúsulás történt, ami komoly problémát jelentett. Ez a jelenség azóta is folyamatosan foglalkoztatja a szakembereket és a közvéleményt. A bárium (Ba), kadmium (Cd), réz (Cu), ólom (Pb) és cink (Zn) elemek kibocsátása még napjainkban is magas. Az ólom főként az üzemanyagból származik, a réz és a cink elemek a fékbetétek és súrlódó felületek kopásából származnak, míg a bárium és a kadmium a gumiköpenyek kopásából erednek. Az emberi tevékenységből származó nehézfémek mennyisége nagyságrendekkel meghaladja a geokémiai ciklusból természetes úton mobilizálódó mennyiséget. A nehézfém vegyületek aeroszol formájában jutnak a levegőbe a kipufogógázon keresztül. Ezek a vegyületek kiülepedés, kicsapódás és lemosódás útján kerülnek kapcsolatba más biotikus és abiotikus környezeti elemekkel. A nehézfém-tartalmú por- és koromszemcsék gyakran napokig, de akár több héten keresztül is lebegő állapotban maradhatnak a légkörben, és jelentős távolságokba is eljuthatnak a kibocsátás helyétől [Kádár és Koncz 1993; Kádár 1995; Helmers és mtsai., 1995].

Azok a környezeti stressztényezők, amelyek befolyásolják az élőhely minőségét, közvetlenül és közvetetten is okozhatnak károkat az egyedek szintjén. Ez azt jelenti, hogy a nehézfém-szennyezés nem csak a környezetet, hanem az élőlényeket is érinti, és komoly egészségügyi problémákat okozhatnak [Lagisz, 2008].

2.2. Bioindikátor szervezetek

A „bioindikátor” kifejezést összesített kifejezésként használják, amely az ökológiai változásokra adott biotikus és abiotikus reakciók összes forrására utal. Ahelyett, hogy egyszerűen a természetes változás mértékeként működnének, a taxonokat a természetes környezeti változások vagy a környezeti változások hatásainak bemutatására használják. A természeti környezet változásainak észlelésére, valamint a negatív vagy pozitív hatások jelzésére használják. Kimutatják a környezetben bekövetkező változásokat is, amelyek a környezet biológiai sokféleségét befolyásoló szennyező anyagok, valamint a benne jelenlévő fajok jelenléte miatt következnek be [Walsh, 1978; Peterson, 1986; Gerhardt, 2002; Holt és Miller, 2010]. A bioindikátoroknak több altípusa létezik [Trishala és mtsai., 2016]. Az indikátor fajok közé sorolható úgynevezett akkumulációs szervezetek, ezen szervezetek olyan mechanizmussal rendelkeznek, amelyek segítségével „látszólag” károsodás nélkül jelenhetnek meg egy urbanizációs gradiens tetszőleges pontján. Az ilyen szervezetet segíthetnek a mikroelemek káros szintű dúsulás detektálásában és nyomon követésében is egy adott élőhelyen. A túlélés és az alkalmazkodás jelentős energia befektetést igényel, ami az energia allokációs rendszerük megváltozásával járhat. Az energia allokációja más folyamatokra irányul, mint például a potenciálisan mérgező, nem esszenciális mikroelemek eliminációja vagy felhalmozása, ami a túlélési ráta növelését eredményezi a szervezetüket érő stresszfaktorokkal szemben. [Cortet és mtsai., 1999]. A

környezeti monitorozásra ízeltlábú fajok használata egyre szélesebb körben elterjedtek.

Az ízeltlábú szervezetek változatos környezeti feltételek és élőhelyi sajátosságok mellett is nagy számban előfordulnak ezért sok fajuk alkalmas az emberi tevékenységek hatásainak vizsgálatára és élőhelyük állapotának becslésére [Maleque és mtsai., 2009].

2.3. Bioakkumulációs faktor (BAF)

A 392 tudományos irodalom és adatbázis- forrás áttekintése 5317 biokoncentrációs faktor (BCF) és 1656 bioakkumulációs faktor (BAF) értéket tartalmaz 842 szerves vegyi anyagra [Arnot és Gobas, 2006]. A nehézfémek perzisztensek, bioakkumulatívak, átkerülnek a következő trofikus szintre és hatásuk lehet a különböző biológiai folyamatokba, toxicitást okozva [Unlu és Gumgum, 2002; Censi és mtsai., 2006]. Bár a Cu és a Zn számos oxidatív enzim alkotórészei, és természetesen előfordulnak a környezetben, a Cu és Zn megnövekedett koncentráció akut vagy krónikus toxicitást okozhat a vízi növényekben és állatokban. Számos emberi tevékenység, mint például a galvanizálás, a bányászat, a textilgyárak szennyvizei, a peszticid-, a festék- és a pigmentipar felelős a rézkoncentráció növekedéséért a környezetben. A Zn különböző iparágakból szabadul fel, mint például a finomítók, a sárgaréz gyártás, a fémbevonat és a vízvezeték-szerelés [Aluri és mtsai., 2007].

A bioakkumuláció az a folyamat, amikor a mikroelemek felvételre kerülnek a valószínűsíthető expozíciós útvonalakon keresztül. Ezt követően koncentrálnak az élő szervezetben. A felhalmozott mikroelemek arányát és koncentrációját az expozíció körülményei, valamint az organizmus eliminációs és regulációs folyamatai szabályozzák. A testméret, valamint egyes szervek és szövetek növekedésével, a hígulási folyamatok során csökkenhet a viszonylagos koncentrációjuk. A bioakkumuláció mértékét a

szennyezettségi szintjéhez képest BAF számítással fejezhetjük ki [Arnot és Gobas, 2006].

2.4. Fluktuáló aszimmetria

A fluktuáló aszimmetria tanulmányozása régóta elsősorban az élőlények bal és jobb oldalán lévő hosszúságok vagy esetleg szögek mérését alkalmazza [Van Valen, 1962; Palmer és Strobeck, 1986; Møller és mtsai., 1997; Polak, 2003; Graham és mtsai., 2010]. A fluktuáló aszimmetria a fejlődési folyamatok véletlenszerű pontatlanságaiból adódó kis különbségeket jelöli a bal és a jobb oldal között [Klingenberg, 2003].

Egy egyed esetében egy tulajdonságnak a cél fenotípustól való eltérései, amelyek a test két oldalán fordulnak elő, általában eltérőek, és ezért bizonyos fokú aszimmetriát eredményeznek. Az aszimmetriának ez a véletlenszerű vagy reziduális összetevője [Palmer és Strobeck, 1986; Møller és mtsai., 1997].

2.5. Ízeltlábúak viselkedése

Az állatok viselkedésével kapcsolatos tanulmányok alapvetőek az ökológiában, etológiában, ökotoxikológiában és sok más területen is fontosak és kihagyhatatlanok [Dell és mtsai., 2011]. Az urbanizáció a gyors, ember által előidézett környezeti változás kulcseleme [Sih és mtsai., 2011].

Az urbanizációval összefüggő folyamatok nemcsak az élőhelyek szerkezetében és összetételében, hanem környezeti paramétereikben is változásokat okoznak. Ezek különböző stresszhatásokat váltanak ki az élő szervezetekben, így módosítva azok tevékenységi mintázatait, térbeli eloszlását, fenológiáját, állapotát, termelékenységét, viselkedését és biotikus kölcsönhatásait. [McIntyre, 2011; Magura és Lövei, 2021; Eötvös és mtsai., 2018]. A viselkedési jellemzőket (pl. nagy feltáró magatartás és magas

kockázatvállalás) általában szabványos viselkedési mérőszámok segítségével írják le a viselkedési tesztekben, szabványos laboratóriumi körülmények között vagy terepen.

A legtöbb személyiségvizsgálatot gerinceseken végezték. Kevés a gerinctelen állatokon végzett vizsgálat, pedig a gerinctelenek taxonómiai diverzitása sokkal nagyobb, mint a gerinceseké [Sih és mtsai., 2004]. Az urbanizációval összefüggő környezeti változások és zavarok dokumentáltan negatív hatással vannak a rovarokra [Bátori és mtsai., 2022].

2.6. Környezeti informatika

A környezetinformatika nagy, többdimenziós, összetett adatkészleteket használ a környezeti problémák tanulmányozására, amelyek térben vagy időben egyaránt lehetnek diszkrét és folytonosak. Ezeket az adatkészleteket és a hozzájuk szükséges metaadatokat lekérdezhető adatbázisok kezelhetik. A térinformatikai webes alkalmazásprogramozási felületek (API-k, angolul: application programming interface) távoli hozzáférést biztosítanak a környezeti információk dinamikus részhalmozaihoz. Az állandó azonosítók idézhetővé teszik az adatokat. A tárolás és a számítástechnika kompromisszuma most erősen torzult a számítások adatokra való áthelyezése javára. A származási metaadatok segítenek meghatározni az adatobjektum megbízhatóságát [James és Jeff, 2012].

2.7. Mozgást követő és elemző szoftverek

A szabványosított tesztek mérik egy szervezet aktivitását különböző szintereken. Például a nyitott arénák és a plusz labirintusok gyakoriak a szorongás- vagy motivációvizsgálatokban [Carola és mtsai.; 2002], a T-labirintus vagy az Y-labirintus tesztarénákat gyakran használják memória- és

térbeli tanulási vizsgálatokhoz [Olton, 1979] és a háromkamrás arénákat a szociális megközelítés vagy a félelem mérésére [Silverman és mtsai., 2013].

Általánosságban elmondható, hogy ezek a szoftvercsomagok két fő probléma megoldásában segíthetnek: az állatok helyzetének detektálása nyomkövető algoritmusokon keresztül vagy az állatok részeinek helyzetének detektálása („pozícióbecslés”) [Panadeiro és mtsai., 2021]. A szoftverek között találunk ingyenesen elérhető szoftvereket, amely nem feltétlen jelent nyílt hozzáférést a kódhoz, valamint találunk olyanokat, amelyek licenz díj megfizetésével tudunk használni.

1. táblázat. Néhány mozgáskövetésre specializálódott program, megjelölve, hogy milyen környezetet igényelnek egyes programok, valamint, hogy mennyire felhasználóbarátok, igényelnek-e kalibrációt, valamint, hogy milyen élőlényekre lettek optimalizálva [Panadeiro és mtsai., 2021]. A + a legkevésbé felhasználóbarát míg a +++ a lehetőségekhez mérten a leginkább. Az Na. jelölés pedig azt mutatja, hogy az adott programról nem áll rendelkezésünkre ilyen jellegű adat.

Program	Platform	Felhasználó barát	Kalibráció	Speciális
<i>ABC Tracker</i>	Windows	+++	Nem	Bármilyen
<i>Animapp</i>	Android, Windows, Mac, Linux	++	Igen	Bármilyen
<i>anTraX</i>	Mac, Linux (MATLAB CMR igény)	++	Nem	Kis rovarok
<i>Automates Planar Tracking</i>	Windows	+	Nem	Halak
<i>BEMOVI</i>	Windows, Mac, Linux	+	Igen	Mikroorganizmusok
<i>BioSense</i>	Windows, Mac, Linux	Na.	Igen	Bármilyen
<i>BioTrack</i>	Mac, Linux	+	Igen	Bármilyen

<i>BiotTracker</i>	Windows, Mac, Linux	+++	Nem	Bármí
<i>Ctrax</i>	Windows, Mac, Linux	+	Nem	Legyek
<i>EthoWatcher</i>	Windows	+++	Nem	Bármí
<i>FIM Track</i>	Windows, Mac, Linux	Na.	Igen	Bármí
<i>Fish CnnTracker</i>	nincs adat	Na.	Nem	Halak
<i>Idtracker.ai</i>	Windows, Mac (GUI igény)	++	Nem	Bármí
<i>Idtracker</i>	Windows (MATLAB CMR igény)	+++	Nem	Bármí
<i>MARGO</i>	Windows, Linux (MATLAB CMR igény)	+++	Igen	Bármí
<i>Mort</i>	Windows, Linux (MATLAB igény)	+	Nem	Egerek
<i>Mouse Tracking</i>	nincs operációs rendszer igény csak Python és Tensorflow	+	Nem	Egerek
<i>Multi-Animal Tracker</i>	Windows, Linux (MATLAB igény)	+++	Nem	Egerek
<i>Multi-Worms Tracker</i>	Windows, Linux (Anaconda igény)	+	Nem	Bármí
<i>Pathtrackr</i>	Windows, Mac	+	Nem	Bármí
<i>Legyek</i>	Windows, Linux	+	Igen	Legyek
<i>RAT</i>	Beágyazott speciális hardware	+	Nem	Egerek
<i>SpectralTL</i>	Windows (MATLAB igény)	+	Nem	Bármí
<i>SwisTrack</i>	Windows, Mac, Linux	+++	Igen	Bármí
<i>ToxTrac</i>	Windows	+++	Igen	Bármí
<i>Tracktor</i>	Windows, Mac, Linux	+	Nem	Bármí
<i>UMATracker</i>	Windows, Mac	+	Nem	Bármí

2.8. Python programozás

A Python számítástechnikai nyelvet nem kimondottan a tudományos közösség igényeinek kielégítésére tervezték, ennek ellenére gyorsan felkeltette a tudósok és mérnökök érdeklődését. Kifejező szintaxisa és a beépített adattípusok, mint a karakterláncok, listák, szótárok igen gazdag gyűjteménye ellenére világossá vált, hogy a tudományos számításokhoz szükséges keretek biztosításához a Pythonnak egy tömbtípust kell biztosítania a numerikus számításokhoz. 1995-ben a Python közösség megalakította a matrix-sig-et (<http://mail.python.org/pipermail/matrix-sig>), egy speciális érdekcsoportot, amely egy új tömb-adattípus létrehozására összpontosított [Millman és mtsai., 2011].

A Python sok platformon fut, ez azt jelenti, hogy nem kell aggódni a korlátozottság miatt, akár beágyazható egy meglévő alkalmazásba is. A Python használhatóságának egyik jelentős tényezője az egyértelmű szintaxis, amely könnyen érthetővé teszi a kódot. A nyelv a könnyen karbantartható kódok felépítéséhez is hozzájárul azáltal, hogy a kódot logikai csoportokra, például modulokra, osztályokra és függvényekre osztja. Sok pozitív tulajdonságával egyre nagyobb teret nyer magának a kutatók és mérnökök között [Oliphant, 2007].

3. Célkitűzés

A kutatásaim célja megismerni az antropogén eredetű környezetterhelések hatását terepi vizsgálatok és szakirodalmi adatok elemzésével, figyelmet fordítva a morфомetriai változásokra és a mikroelem-összetételre. Emellett kiemelten fontos cél volt egy olyan könnyen kezelhető, operációs rendszertől független mozgásdetektáló program létrehozása, mely a legújabb algoritmusok által alkalmas lehet a viselkedéselemzéseknél használt vizsgálatok számszerűsítésére, és segít csökkenteni az emberi tényezők okozta hibalehetőségeket. Igen fontos, hogy ez a program a gyakorlatban jól használható és bárki számára könnyen hozzáférhető legyen. Céлом volt az is, hogy a program nyílt forráskódú legyen, amely akár nagyfokú átprogramozásra vagy fejlesztésre egyaránt lehetőséget ad külső programozók számára is, megnövelve így a program további fejlesztési lehetőségét.

3.1. Környezetterhelés hatásainak tesztelése *Silpha tristis* egyedek mikroelem-összetételére és morфомetriájára

Környezetterhelés hatásainak vizsgálata volt az egyik kiemelt cél, amelyet mikroelem-összetétel vizsgálattal és testi szimmetria adatokkal elemeztünk és értékeltünk ki. Az alumínium, bór, bárium, kalcium, réz, vas, kálium, magnézium, mangán, nátrium, foszfor, kén, stroncium és cink koncentrációk elemzése egyedenként történt. Ezen kívül FA (fluktuáló aszimmetria) analízist is végeztünk a bilaterális szervek paramétereinek mérésével.

Hipotéziseink a következők voltak: (1) Az általunk vizsgált metrikus paraméterek értékei az szennyezés hatására változhatnak. (2) A hím és nőstény egyedek elkülönülnek egymástól a mért paraméterek alapján. (3) A fluktuáló

aszimmetria a területenként eltérő mértékű. (4) A *S. tristis* a szennyezett területeken jobban akkumulálja a fémeket, mint a kevésbé szennyezett területeken.

3.2. Földigilisztafajokban felhalmozódó fémes elemek metaanalízise

Hiteles áttekintést szerettünk volna nyerni különböző kontroll és szennyezett mintavételi területekről gyűjtött földigiliszta fajok fémakkumulációjáról, mivel a földigiliszták túlzott talajelem-koncentrációra adott válaszai könnyen tanulmányozhatóak. Azonban a publikált eredmények a fémek egyedekben történő felhalmozódásáról ellentmondások. Szerettük volna, ha arzén, kadmium, króm, réz, nikkel, ólom és cink teljes testkoncentrációira vonatkozó publikált adatok, szennyezett és nem szennyezett (kontroll) talajokból gyűjtött egyedekben metaanalízisek segítségével kiértékelésre kerülnek. Ezen kívül felmértük a talaj pH-értékének és az expozíciós időnek, mint a fémfelhalmozódást potenciálisan befolyásoló tényezőnek a szerepét is [Tózsér és mtsai., 2022].

Hipotéziseink a következők voltak: (1) Az egyes fémes elemek (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb és Zn) felhalmozódása szignifikánsan nagyobb a szennyezett talajból származó földigilisztákban, mint a kontrolltalajokban.

(2) A talaj pH-értékei hatással lehetnek az As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb és Zn felhalmozódására.

3.3. Ízeltlábúak mozgását nyomon követő szoftver tervezése és megírása

Az etológiában és az evolúciós ökológiában kulcskérdés az, hogyan lehet számszerűsíteni a vizsgált organizmusok aktivitását/mozgását, melyek fontos

paraméterek. Gyakran használnak proxyt az emberrel összefüggő stresszorok, vegyszerek és gyógyszerek hatásának értékelésére [Seehausen és mtsai., 1997]. Ezért ezek nagyon precíz és pontos módszerek a mozgásmérésre alkalmazott noninvazív technikákkal [Dell és mtsai., 2014]. Az ízeltlábúak mozgása tanulmányozásának egyik elterjedt módja a mesterséges laboratóriumi vizsgálati arénák rövid időn át felvett videofelvételek segítségével [Zaller, 2015].

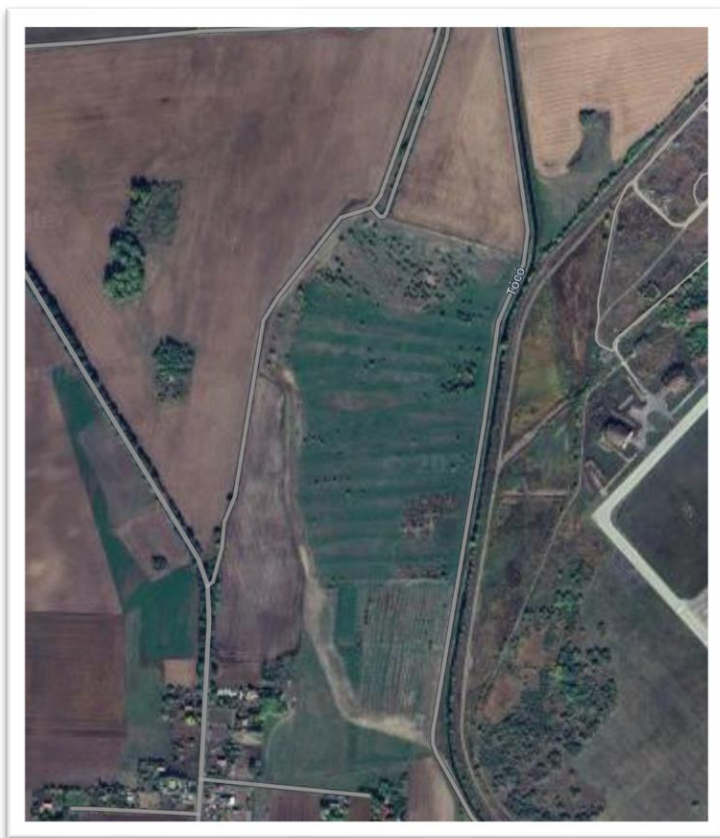
Az összetett, képkockánkénti elemzésekre képes videókészítő termékek és nagy teljesítményű személyi számítógépek elérhetősége egyre inkább megvalósíthatóvá teszi az állatok mozgásának rögzítését és mérését [Richard és Margaret, 1988]. A cél egy olyan szoftver létrehozása volt, amely rendkívül nagy pontosságú, könnyen kezelhető még programozói ismeretek nélkül is, csökkentve ezáltal az emberi erőforrás igényt is. Fontos szempont volt, hogy a videó minősége minél kisebb részben befolyásolja az elemzés kimenetelét, így a felvétel körülményei és eszközei igen változatosak is lehessenek.

Céljaink a következők voltak: Egy működő könnyen használható operációs rendszer független szoftver megírása.

4. Anyag és módszer

4.1. Terepi mintavétel

A minták Debrecen egyik külvárosi részéről, a Lovász-zugi területéről – ahol korábban tavak voltak – származnak. Az 1930-as évektől az 1950-es évekig a vizsgált terület másodlagos biológiai tisztító egységként működött. A tisztítóművek fejlesztése a 2000-es évek elejétől a tórendszer felszámolását eredményezte. Ennek következtében rekultivációs lépések indultak az elemekkel (elsősorban fémmel) szennyezett szennyvizet célzóan. Kezdetben a homokot egy távoli homokbányából szállították. A két (iszap és homok) komponens összekeverése nélkül változó vastagságban terítették a simított iszapfelületre. A terület felszíne enyhén egyenetlen maradt a simítások ellenére is. Ennek következtében az időszakos vízborítás gyakorisága és időtartama eltérő lett a vizsgált terület egyes részein; az északi résztől a déli rész felé csökken. 2013 szeptemberében egy kármentesítési eljárás során a *Salix viminalis* (kosárkötőfűz) 5800 egyedét ültettük el 20 cm-es gyökeres dugványként 5 × 8 m-es eloszlásban, elsősorban az elemek stabilizálása céljából [Tózsér és mtsai., 2018]. A vizsgálatban résztvevő egyedek ezen területről származnak. A terület 3 részre különíthető el. Az 1. terület a szennyezett, a 2. és a 3. számmal jelzett területek pedig mérsékelten és enyhén szennyezettek (1. ábra).



1. ábra. Lovász-zug mintavételi területe.

A *Silpha tristis* egyedeket élvefogó csapdával gyűjtöttük áprilisban és októberben. Az egyedeket a gyűjtést követően zárható polietilén tasakba helyeztük, majd ezt követően fagyasztva, $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on tároltuk a vizsgálatok megkezdéséig. Minden mintavételi helyen 20 db csapdát használtunk, amelyeket minden harmadik napon ürítettünk. A begyűjtött egyedeket *Silpha* nemzetség szinten különítettük el, majd a vizsgálatok megkezdése előtt kerültek faji szintű meghatározásra. A fajokat standard kulcsok segítségével azonosítottuk [Boros és mtsai., 1961].

4.2. A metaanalízishez szükséges szakirodalmi áttekintés és adatgyűjtés

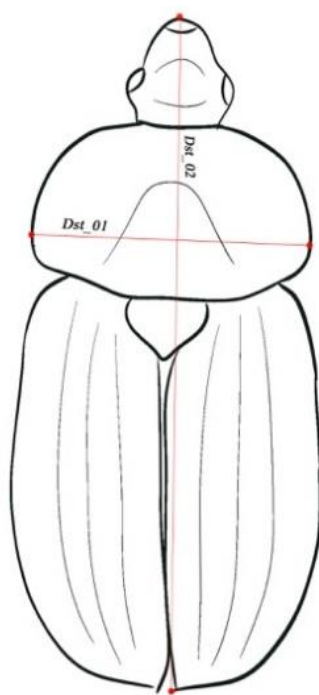
A metaanalízishez a Web of Science 1975 és 2022 közötti időszakra vonatkozó adatbázisaiban végzett szakirodalmi kereséssel gyűjtöttük össze a szükséges adatokat. A keresés során a következő kifejezéseket használtuk: TOPIC = (earthworm) AND TOPIC = (metal) AND TOPIC = (accumulation). Az összes érintett publikáció megtalálásához áttekintettük az eredményül kapott közlemények irodalomjegyzéke is. A publikációkat megfelelőnek ítéltük a metaanalízishez abban az esetben, ha azok tartalmazták az átlagos koncentrációkat (mg/kg^{-1} , szárazanyag) szórásaikkal és mintanagyságukkal egy vagy több releváns fémelemre (arén, kadmium, króm, réz, nikkel, ólom, cink) földigilisztafajok egész testében, szennyezett és a kontroll területről gyűjtve, ez utóbbit nem tekintettünk szennyezettnek [Tőzsér és mtsai., 2022].

4.3. Morfometriai vizsgálati módszerek

A morfometriai vizsgálatok érdekében szükség volt az egyed részeinek digitalizálására. Első lépésként fényképeket készítettünk, erre Olympus C-7070 digitális kamerát használtunk, Olympus SZX7 sztereomikroszkópra szerelve. A fotódokumentáció során kalibrációs tárgylemezt használtunk. A boncolás során a fém eszközöket mellőztük a későbbi toxikus elem vizsgálatok miatt. A műveletek során az egyedeket nedvesen tartottuk, hogy a száradás miatt ne változzanak az eredeti testi paraméterei. A metrikus bélyegek fotódokumentációja az egyedek testéről leválasztva történt, hogy növeljük a mérési pontosságot. A méréseket háromszoros ismétléssel végeztük a Winimag 1.0 program alkalmazásával.

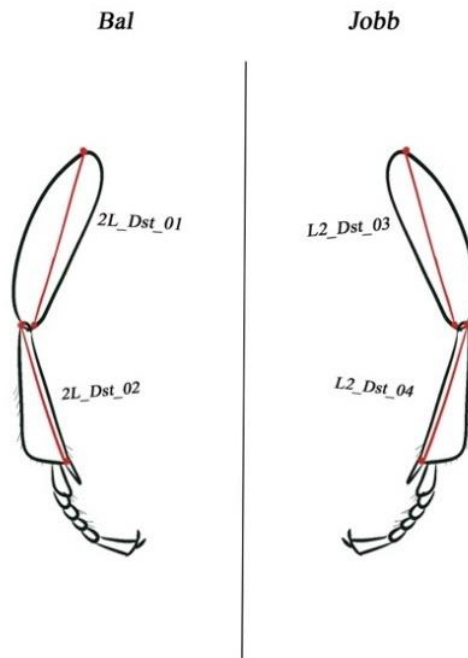
4.3.1. *Silpha tristis* egyedek morfometriai vizsgálata

A következő. metrikus paraméterek mérését végeztük el még a mikroelem összetétel meghatározása előtt a *Silpha tristis* egyedek esetében: a pronotum szélességét (Dst_01) és testhosszúságát (Dst_2) mértük első mérésként (2. ábra) Az egyedek stabilitását üveggyöngyökkel értük el, hogy megakadályozzuk a test elmozdulását, a torzulások érdekében.



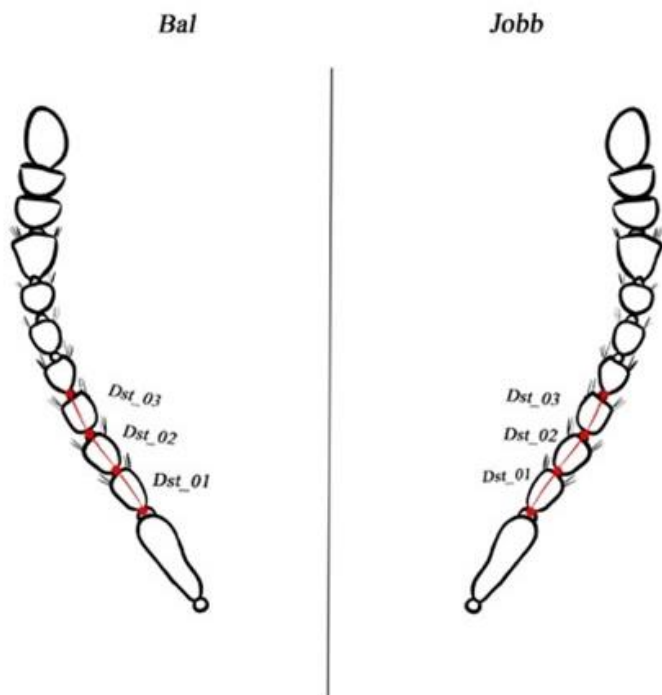
1. ábra. *Silpha tristis* pronotum (Dst_01) és testhossz mérése (Dst_2.).

A testhossz és a pronotum mérése után a lábak eltávolításra kerültek a pontosabb mérés érdekében. A lábakon minden esetben a femur (2_LDst_1 és L2_Dst_03) és a tibia (2L_Dst_02 és L2_dst_04) került mérésre. (3. ábra)



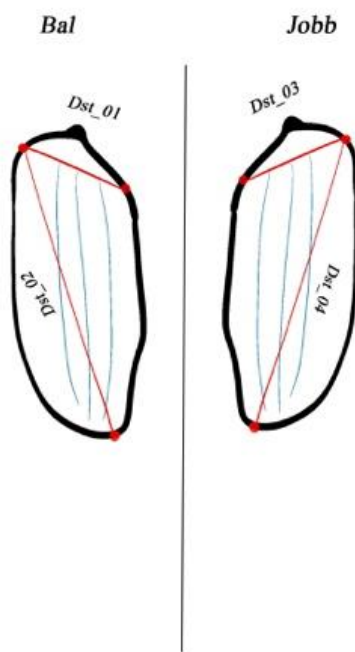
2. ábra. A femur (2_LDst_1 és L2_Dst_03) és a tibia (2L_Dst_02 és L2_dst_04) mérése bal és jobb oldalon.

A lábak eltávolítása után az antennák is eltávolításra kerültek. Jobb és bal oldali antennákon kerültek mérésre az antennomerek bal oldalon Dst_03, Dst_02, Dst_01 és jobb oldalon Dst_03, Dst_02, Dst_01 (4. ábra).



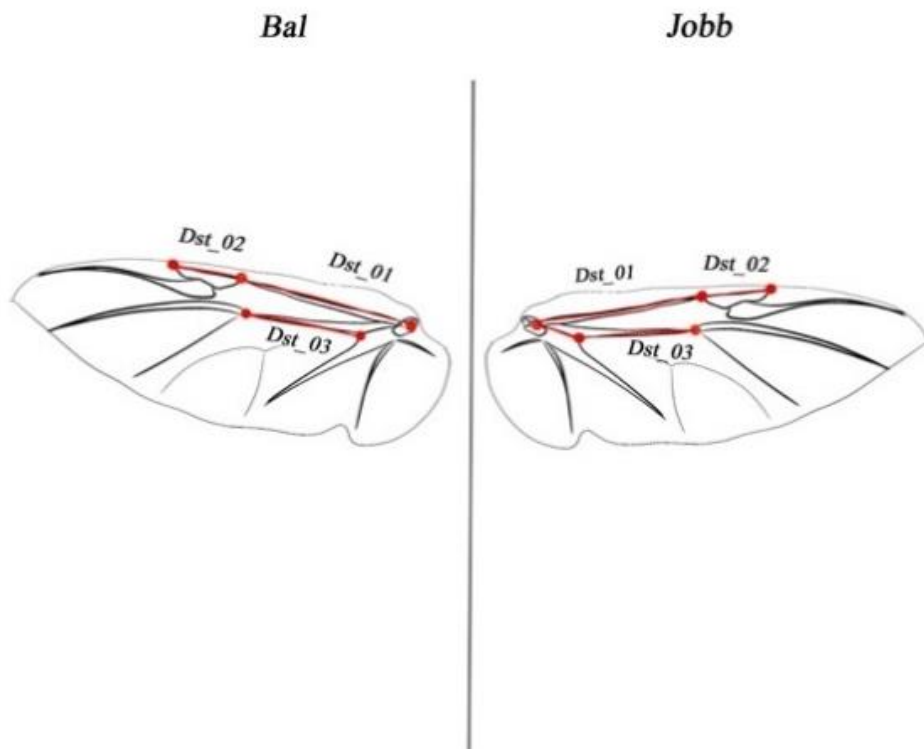
4. ábra. Az antennákon kerültek mérésre az antennomerek. Bal oldalon Dst_03, Dst_02, Dst_01 és jobb oldalon Dst_03, Dst_02, Dst_01.

Az elytrumon kerültek mérésre a kijelölt pontok szintén jobb és bal oldalon (5. ábra).



3. ábra. Mérési pontok az elytrum jobb Dst_01 és Dst_02, valamint bal elytrum Dst_01 és Dst_02.

Végül a hártyás szárny került elválasztásra, a szárnyakat kalibrációs tárgylemezre helyeztük és egy csepp desztilláltvíz segítségével szétterítettük a fotó elkészítéséhez, majd mértük a radiuson Dst_01 és Dst_02 és a subcostán Dst_03 felvett mérési pontokat (6.ábra).



6. ábra. A hártyás szárny jobb és bal oldalán a radiuson Dst_01 és Dst_02 és a subcostán Dst_03 felvett mérési pontok

4.4. Mikroelem összetétel analízis a *Silpha tristis* egyedek laboratóriumi vizsgálattal

A feltárását a mintáknak Braun és mtsai. [2009, 2012], Simon és mtsai. [2011, 2017] és Papp és mtsai. [2019] korábbi publikációi nyomán végeztük. A *Silpha tristis* egyedeket szárítószekrénybe helyezést követően szárítottuk 105 °C-on, 24 órán keresztül, amíg a tömegük állandó nem maradt.

Ezután atmoszférikus nyomáson történő roncsolást alkalmaztunk 2 ml 65 % (m/m) –os salétromsav és 0,5 ml hidrogén-peroxid hozzáadásával 100 °C-on. Az egyedek esetében egyedenkénti roncsolás történt, míg a ledarált, homogenizált avarmintákból és talajmintákból 0,2 g mennyiséget használtunk

fel. A mikroelem koncentrációk meghatározását ICP-OES Agilent 5110 készülékkel végeztük el.

4.5. Alkalmazott statisztikai módszerek

4.5.1. A bioakkumulációs faktor (BAF) számítása *Silpha tristis* egyedeknél

A BAF értékek meghatározásának számításának menete a következő:

$$BAF = \frac{C_{egyed}}{C_{talaj}}$$

ahol C_{egyed} rész a *S. tristis*-ben kimutatott fémkoncentráció (mg/kg^{-1} , szárazanyag), C_{talaj} pedig a talajból kimutatott fémkoncentráció (mg/kg^{-1} , szárazanyag) [Arnot és Gobas, 2006; Avgin, 2010].

A számítás eredményeként kapott érték nagyobb, mint 1, akkor az élő szervezet adott környezeti elemből akkor akkumuláció történt, ha pedig az az érték kisebb mint 1 akkor nem beszélhetünk akkumulációról.

4.5.2. Statisztikai értékelés *Silpha tristis* egyedek mikroelem összetételére

A statisztikai értékelést R 4.2.1 [R Development Core and Teams, 2023] segítségével végeztük el. A mikroelem összetétel vizsgálatának adatainak feldolgozása során a szóráshomogenitás megállapításához Levene-tesztet alkalmaztunk. A mintavételi területek, valamint a hím és nőstény egyedek közötti különbségek feltárásához varianciaanalízist (GLM) alkalmaztunk a mikroelem koncentrációk alapján.

4.5.3. A *Silpha tristis* egyedek morfometriai paramétereit alapján történő Fluktuáló asszimmetria (FA) analízise

Az asszimmetria irányítottságát vizsgáltuk, amelyben az egyes bélyegekre számított asszimmetria értékek (J-B) átlagának a nullától való eltérésevel határozható meg. A morfometriai változók különbségében nincs jelen a direkcionális asszimmetria, az értékek normál eloszlást követnek ($p < 0,05$). A FA analízist Palmer [1994] munkája alapján végeztük. A Palmer-féle index értékét a jobb és bal oldali bélyegek mintacsoportonkénti (mintavételi területek és ivar) átlagértékeivel számítjuk ki $FA2 = ([J-B]) / ((J+B) / 2)$. A mintavételi területek és a hímek és nőstények közötti különbségeket a FA mértéke alapján varianciaanalízissel (GLM) teszteltük.

4.5.4. Statisztikai értékelés a metaanalízisbe vont szakirodalmi adatok alapján

A metaanalízishez a torzítatlan standardizált átlagkülönbséget (Hedges' g) számítottuk a szennyezett-nem szennyezett összehasonlítások közös hatásméreteként.

$$g = J \frac{\bar{x}_U - \bar{x}_C}{S_{within}}$$

$$S_{within} = \sqrt{\frac{(n_U - 1)S_U^2 + (n_C - 1)S_C^2}{n_U + n_C - 2}}$$

$$J = 1 - \frac{3}{4(n_U + n_C - 2) - 1}$$

$\bar{x}_U$ és $\bar{x}_C$ -ről gyűjtött földigiliszták átlagos fémkoncentrációja (mg kg^{-1}). Szennyezetlen (U) és szennyezett (C) talajok, $\bar{n}_U$ és $\bar{n}_C$ nem szennyezett (U) és szennyezett (C) talajból gyűjtött földigiliszták mintanagysága, $\bar{S}_U$ és $\bar{S}_C$ nem szennyezett (U) és szennyezett (C) talajból gyűjtött földigiliszták fémkoncentrációjának szórása. A g értékek negatívak voltak abban az esetben, ha a fém koncentráció magasabb volt a szennyezett talajból származó földigilisztákban, mint a nem szennyezett talajokból származókban. Alcsoport metaanalízis segítségével értékeltük a hasonlóságokat a szennyezett talajok fémfelvételében a különböző földigilisztafajok között; az alcsoportok azok a fajok voltak, amelyek mintanagysága (n) ≥ 4 az egyes fémek esetében [Tózsér és mtsai., 2022].

A földigiliszta fajok hatásának becslésére a véletlenszerű hatások modelljét használtuk, amely kiküszöböli a közös hatás méretének korlátait a kísérleti körülmények, a tervezés és az egyedi vizsgálatok során alkalmazott módszerek nagy eltérései alapján [Borenstein és mtsai., 2009]. A véletlen hatású modellek fő előnye, hogy valószínűbb, mint a fix hatású modelleké; a hatásméret eloszlását a tanulmányok közötti valós különbségeknek mutatják, ahelyett, hogy a mintavételi hibát feltételeznék a hatásméret-változások egyetlen okaként [Borenstein és mtsai., 2009]. Az egyes vizsgálatokhoz több hatásméretet is számoltunk, ezért a véletlen-hatás modellekben egy véletlenszerű hatást alkalmaztunk beágyazó tényezőként. Az átlagos hatásméretet statisztikailag szignifikánsnak tekintettük abban az

esetben, ha a 95 %-os bootstrap konfidenciaintervallum (CI; 999 iteráció) nem tartalmazott nullát.

Az eredmények értelmezése eltérő lenne, ha a hatásméreték tanulmányonként eltérőek (vagyis, ha heterogenitásról van szó), vagy homogének, ezért megvizsgáltuk a hatásméret heterogenitását az egyes vizsgálatokban. A vizsgálatok közötti hatások heterogenitásának leírására komplementer heterogenitás méréseket végeztünk (Q, T² és I²) [Borenstein és mtsai., 2009]. Q-teszt segítségével a teljes variancia (Q teljes) csoporton belüli (Q belül) és csoport közötti (Q között) varianciaanalízisen alapuló variancia; ezeket a varianciakomponenseket statisztikai szignifikancia szempontjából teszteltük [Borenstein és mtsai., 2009]. A csoportok közötti szignifikáns eltérések (Q között) azt jelentik, hogy a földigiliszták fémfelhalmozódása szignifikánsan eltérő volt a fajok között. Ezenkívül az R² kiszámításával felmértük a kovariánsokkal magyarázott valódi variancia arányát [Borenstein és mtsai., 2009]. Általános kritériumként a négynél kevesebb összehasonlítást tartalmazó alcsoportokat kizártuk az elemzésekből. A hiányzó tanulmányokból eredő publikációs torzítás és a hatás méretének torzítása szintén meglehetősen általános a metaanalízis esetében. A publikációs torzítás értékeléséhez tölcserdiagramokat használtunk és Egger-tesztet hajtottunk végre [Borenstein és mtsai., 2009]. Továbbá jelentős aszimmetria esetén a trim and fill módszert alkalmaztuk, amely kiszámolja a hiányzó vizsgálatok számát, egyidejűleg számítva azok hatásméretét és standard hibáját [Duval és Tweedie, 2000]. A metaanalízis adatsorát a talált hiányzó tanulmányokkal egészítettük ki, amit az összesített hatásméret újraszámítása követett. Ezzel a módszerrel elfogulatlan becslést lehetett adni az összesített hatás méretére [Borenstein és mtsai., 2009].

A metaanalíziseket, a heterogenitási méréseket és a publikációs torzítások értékelését az MAd és a metafor csomagok [Viechtbauer, 2010; Del

Re és Hoyt, 2014] segítségével végezték el az R programozási környezetben (4.1.2-es verzió) [R Core Team, 2018]. A talaj pH-val és expozíciós idővel összefüggő felhalmozódásának felmérésére földigilisztákban vizsgáltuk a Hedges' g -je (standardizált átlagkülönbség) és a talaj pH-értéke, illetve a Hedges' g-értéke és az expozíciós idő közötti összefüggést. Az összefüggéseket lineáris modellekkel értékeltük az R-ben végrehajtott lm módszerrel.

4.6. A szoftver

A BugTracker azért hoztuk létre, hogy a létező megoldásoknál újabb nyomkövetési algoritmust használva, egy meghatározott viselkedési paraméter tesztelésére legyen optimalizálva, ezzel megkönnyíteni a mérési és kiértékelési folyamatot, illetve megnövelni az ismételhetőséget. A CSRT (diszkriminatív korrelációs szűrő csatornával és térbeli megbízhatósággal) algoritmust használja a program, amit így kevésbé befolyásolja a fényerő és a fényviszonyok közötti különbségek a vizsgálni kívánt területen [Málik-Roffa és mtsai., 2023].

A BugTracker egy Python-alapú saját fejlesztésű program, amely a nyílt forráskódú OpenCV szoftverkönyvtárat (<https://opencv.org> , elérve 2020. április 11-én) használja számítógépes látási algoritmusokhoz az alakzatok azonosítására és az objektumok nyomon követésére. A Python egy egyszerű és könnyen érthető programozási nyelv nem műszaki felhasználók számára, és nagyon népszerű a tudományban [Vineesh és Nehemiah, 2021; Málik-Roffa, 2021].

Az OpenCV szoftverkönyvtár célja, hogy eszközöket biztosítson a számítógépes látásproblémák megoldásához. Ez magában foglalja az algoritmusok széles skáláját mind az alacsony szintű képfeldolgozáshoz, mint például az objektumfelismerési és -követési funkciókhoz, mind a magas szintű

algoritmusok, mint például az arcfelismerés vagy gyalogos észlelés [Pulli és mtsai., 2012].

A szoftvert több példány egyidejű futtatására terveztük, de a konfigurációhoz egyelőre még nem érhető el grafikus felhasználói felület. Ennek ellenére könnyen telepíthető és konfigurálható, még a nem műszaki felhasználók számára is. Használata nem igényel programozási ismereteket. A BugTracker a GNU General Public License v3.0 alatt érhető el, a GitHubon telepítési és használati útmutatóval: <https://github.com/Roffagalaxis/Bugtracker> (2023. március 29-én érhető el).

A GitHubra esett a választásunk, mert népszerű az egyetemeken kívül is, ezáltal növeli annak valószínűségét, hogy programozási ismeretekkel rendelkező emberek felfedezzék. Az ily mód nyilvánosan hozzáférhetővé tett kutatás magasabb hivatkozási számot és hatást eredményez [Piwowar és mtsai., 2007].

Ha a teljes kutatási projektet egy ingyenesen használható webhelyen, például GitHubon tárolják, az könnyebben reprodukálhatóvá és átláthatóbbá válik, mivel áttekinthető, hogyan változott a kód és az adatok, az ötlettől a publikálásig vezető út során. Nyilvános adattárral bárki bármikor visszakeresheti a kutatás korábbi állapotát [Jones, 2013].

4.6.1. A tesztelési terület meghatározása

A BugTracker szoftver használatának első lépése az elemzett terület azonosítása. Meghatározhatunk egy négyzet alakú területet manuálisan, vagy használhatunk automatikus érzékelést, itt ránk van bízva a választás lehetősége a felhasználóélmény és a komfortérzet növelése végett. Az automatikus mód bármilyen alakzattal működik amennyiben jól kivehető szélei vannak.

A kézi beállítás a következő kódokat használja:

- `initarea = cv2.selectROI(keretnev, kep, fromCenter = False, showCrosshair = True)`
- `for i in range (0, terület [2], step_ver):`
- `cv2.line(image, (terület [0] + i, terület [1]), (terület [0] + i, terület [3] + terület [1]), (0, 255, 0), 1)`
- `for i in range (0, terület [3], step_hor):`
- `cv2.line(image, (terület [0], terület [1] + i), (terület [2] + terület [0], terület [1] + i), (0, 255, 0), 1)`

Algoritmus a kézi beállításhoz:

1. A videó megállítása után, az egér segítségével, a felhasználó kiválasztja a vizsgálandó területet.
2. A program kirajzolja a négyzetek függőleges vonalait.
3. Majd a négyzetek vízszintes vonalait.
4. A felhasználó a videó futtatása közben bármikor módosíthatja ezeket a vonalakat a billentyűzet **W**, **A**, **S** és **D** gombjaival [Málik-Roffa és mtsai., 2023].

Az automatikus mód a szegélykövető algoritmusok alapján keresi az objektum kontúrjait [Suzuki és Be, 1985]. A határvetítő algoritmus a digitális képek feldolgozásának alapvető technikája. Koordinátasorozatot származtat az I-pixel és az O-pixel összekapcsolt komponense (azaz a háttér) közötti határvonalból. Ezeket a technikákat alaposan tanulmányozták, mivel rendkívül nagyszámú felhasználási területük van a számítógépes látásban [Rosenfeld és Kak, 1982; Rosenfeld, 1970; Yokoi és mtsai., 1975; Li és mtsai., 1982; Pavlidis, 1982; Morrin, 1976; Pavlidis, 1977].

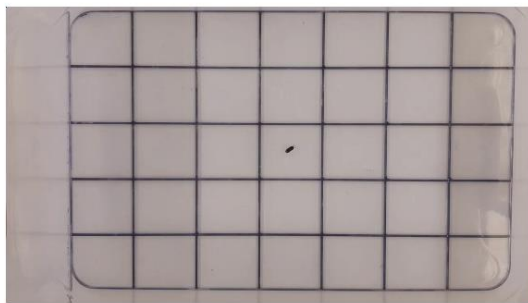
Az automatikus területérzékelő módszer a következő kódokat használja a tesztaréna és a négyzetek észlelésére:

- *szurke* = *cv2.cvtColor (kep, cv2.COLOR_BGR2GRAY)*
- *gaus_szurke* = *cv2.GaussianBlur (szurke, (5, 5), 0)*
- *elek* = *cv2.Canny (gaus_szurke, 50, 150)*
- *konturok, hierarchia* = *cv2.findContours (elek, cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.CHAIN_A-PROX_NONE)*

Automatikus területérzékelés algoritmus:

1. Kép konvertálása szürkeárnyaltos formátumba.
2. Bináris küszöbérték alkalmazása.
3. A kontúrok megkeresése a szegélykövető algoritmusok alapján.

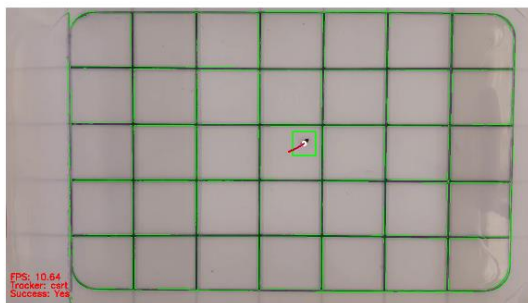
Különböző videók segítségével megvizsgáltuk a fényviszonyok hatását az automatikus területérzékelés hatékonyságára nyílt terepi teszteknel. Arra a következtetésre jutottunk, hogy a videó rögzítésének ideális feltételei a függőleges 90°-os szögből érkező hideg fény vagy lightbox használata, annak érdekében, hogy a lehető legkevesebb árnyék képződjön a vizsgált egyed körül (7. ábra).



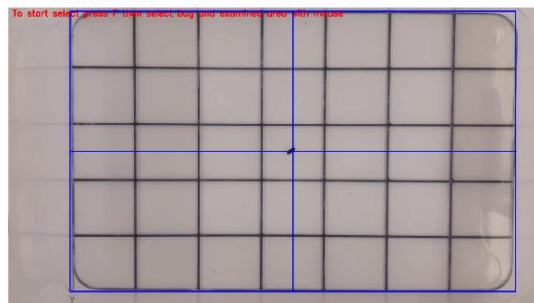
Kezdeti állapot a Petri-csésze eltávolítása után



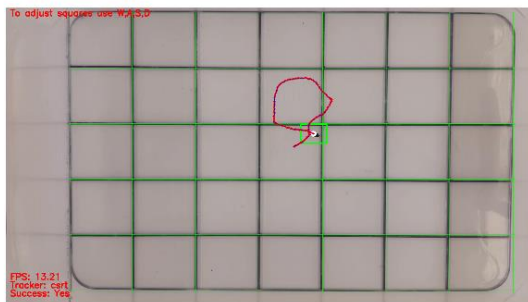
A bogár körvonalának beállítása



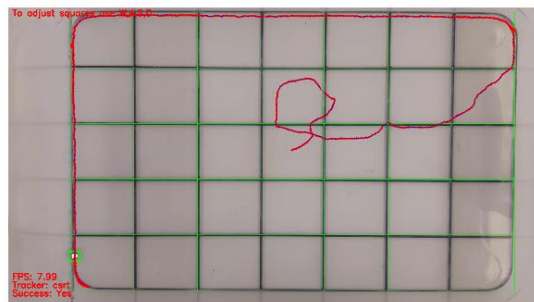
Automatikus módszer a vonal észlelésére



A vizsgált területek kézi beállítása



A mozgás követése



Végző állapot

4. ábra. Az ízeltlábú követés folyamatának lépései [Málik-Roffa és mtsai., 2023].

4.6.2. A meghatározott tesztszervezet nyomon követése

A tesztterület meghatározása után a rövid távú és modellmentes objektumkövetésre kell koncentrálnunk, ami nyitott és aktívan tanulmányozott probléma [Wu és mtsai., 2013; Kristan és mtsai., 2013; Kristan és mtsai., 2015].

Egy tárgy vagy egyed követése egy folyamatosan mozgó videóban jelentős számítógépes erőforrásokat igényel. Az eredmények különböző tényezőktől is függenek, mint például a háttértől való megkülönböztethetőség, fényviszonyok, árnyékok jelenléte, eltűnések vagy deformációk [Kristan és Matas és mtsai., 2015; Liang és mtsai., 2015; Smeulders és mtsai., 2014; Mueller és mtsai., 2016].

A jelenleg elérhető szoftvermegoldások többnyire kétféle észlelési technikát alkalmaznak: statikus és dinamikus háttérkivonást. A statikus háttérkivonás egy referenciaképet vagy videót használ, ahol csak a háttér látható, állatok nélkül. A dinamikus technika mozgó átlagmodellekkel működik, ahol a detektálás a megvilágítással vagy a képkocka fokozatos változásával számol [Panadeiro és mtsai., 2021].

Az OpenCV a következő beépített nyomkövetési algoritmusokat tartalmazza:

- `cv2.TrackerCSRT_create;`
- `cv2.TrackerKCF_create;`
- `cv2.TrackerMIL_create;`
- `cv2.legacy.TrackerBoosting_create;`
- `cv2.legacy.TrackerTLD_create;`
- `cv2.legacy.TrackerMedianFlow_create;`
- `cv2.legacy.TrackerMOSSE_create.`

Az előzetes tesztek alapján a beépített CSRT (diszkriminatív korrelációs szűrő csatornával és térbeli megbízhatósággal) nyomkövető működik a legjobb

pontossággal. A CSRT algoritmus egy térbeli megbízhatósági térkép segítségével keresi meg a nyomon követésre legalkalmasabb vizsgált objektumot. A térbeli megbízhatósági térkép becslése egy gráfcímkező algoritmus segítségével történik. Ez lényegesen szélesebb keresési régiót biztosít és lehetőséget az összetett hátterek használatára, valamint a nem téglalap alakú objektumok követését [Lukezic és mtsai., 2017; Farkhodov és mtsai., 2020]. Speciális eseteket, például tárgykeresztezéseket vagy eltűnéseket is kezel, és nincs korlátozva a vizsgált egyed mérete, így kis- és nagyállatok mozgásának követésére egyaránt alkalmas.

A fenti nyomkövetők fő funkciói a következők:

- *initTracker = cv2.selectROI (megjelenített_kep, kep, fromCenter = False, showCrosshair = True)*
- *tracker.init (forraskep, initTracker)*
- *(siker, doboz) = tracker.update (forraskep)*

A híváskövetés algoritmus:

1. A videó megállítása után, az egér segítségével, a felhasználó kiválasztja a követni kívánt objektum körvonalait.
2. Ezen körvonalak alapján elindul a követés.
3. Minden egyes képkockában megpróbálja megkeresni az objektumot, és visszajelzi, hogy megtalálta-e, illetve, hogy hol.

A követés addig folytatódik, ameddig a bemeneti videó tart [Málik-Roffa és mtsai., 2023].

4.6.3. Példák a szoftver alkalmazásaira

A BugTracker a Magura és kollégái által készített videókra lett optimalizálva [Málik-Roffa és mtsai., 2023]. Vidéki-városi gradiens mentén gyűjtötték az egyedeket Debrecenben (Kelet-Magyarország) és annak közvetlen közelében. Nyolc erdőállomány lett kiválasztva a gradiens mentén:

négy vidéki és négy városi területen. A vidéki lelőhelyek egy 1082 hektáros, idős (több mint 130 éves) erdőben helyezkedtek el, ahol az kocsányos tölgy (*Quercus robur*) volt a domináns faj. Valamennyi városi gyűjtőterület egy egykor egybefüggő öreg erdő (több mint 130 éves) elszigetelt töredéke volt. A rovarokból, a fő tevékenységi időszakuk alatt, élő csapdák segítségével vettek mintát. A csapdákat hetente kétszer ellenőrizték, április elejétől június végéig. Az összegyűjtött bogarak a laboratóriumba kerültek, ahol a standard körülmények (24 °C, 40 % relatív páratartalom, természetes napfény ciklus) biztosítva voltak. A laboratóriumban az egyedeket pihenni hagyták, ahol vízhez hozzáfértek, de élelemhez nem [Magura és mtsai., 2022]. A pihenőidő után, a bogarak aktivitását egyedileg tesztelték egy újszerű környezetben, amelyet nyílt aréna tesztnek is neveznek [Réale és mtsai., 2007; Kortet és.; Hedrick, 2007]. A tesztarénában minden bogarat letakartak egy Petri-csészével, majd, amikor az egyed megállt, a Petri-csészét felemelték és egy GoPro HERO6 kamerával (CHDHX-601-FW) rögzítették a bogár mozgását a következő 90 másodpercben [Magura és mtsai., 2022].

5. Eredmények

5.1. Az *Silpha tristis* egyedek esetében végzett mikroelemelem összetétel vizsgálati eredményei

Az eredmények alapján elmondható, hogy a mintavételi területek szignifikánsan elkülönülnek egymástól ($p < 0,001$). A K elemet kivéve a három terület közül a mikroelem tartalom, az 1. területen volt a legjelentősebb. A 2. és 3. területen mért elem koncentráció az eredmények alapján rendkívül nagy hasonlóságot mutatott (2. táblázat).

Jelentősebb eltérést tapasztaltunk az 1. területről származó hím egyedek B ($t = 16,44$; $p = 8,02e-05$); Ca ($t = 16,89$; $p = 7,2e-05$); és Sr ($t = 21,51$; $p = 2,77e-05$) mikroelemeinek esetében.

A Cu elemnél a 2. területről származó hím egyedeknél ($t = 31,78$; $p = 5,84e-06$) található szignifikáns különbségek.

A K, S és P elemek vizsgálata esetén a 3. terület hím egyedeit kivéve minden mintavételi terület mindkét ivaranál rendkívüli eltéréseket tapasztaltunk.

A Mn és Zn elemek esetén az 1. terület hím (Mn: $t = 29,39$; $p = 7,98e-06$; Zn: $t = 15,65$; $p = 9,74e-05$) és a 3. terület nőstény (Mn: $t = 19,83$; $p = 6,03e-06$; Zn: $t = 34,15$; $p = 4,05e-07$) példányainál tapasztaltuk hasonlót.

A Mg-nál az 1. terület mindkét ivarhoz (Hím: $t = 28,42$; $p = 9,12e-06$; Nőstény: $t = 17,61$; $p = 6,11e-05$) tartozó, illetve a 3. terület nőstény ($t = 25,85$; $p = 1,62e-06$) egyedeinél található szignifikáns különbségek.

Szignifikáns különbség tapasztalható Na elem esetén a 2. területhez tartozó hím egyedeknél ($t = 18,62$; $p = 4,90e-05$) és 3. terület nőstény példányainál ($t = 21,80$; $p = 3,77e-06$).

Az Al, Ba és Fe elemek tekintetében nem találtunk jelentősebb eltérést az egyedek közt egyik területen sem (3. táblázat).

2. táblázat. Az *S. tristis* egyedek esetében végzett mikroelemelem összetétel analízis összesített eredményei, ahol a hím és nőstény egyedek egyben tekintendők.

	Minimum	1. Kvartilis	Medián	Átlag	3. Kvartilis	Maximum	sd	se
Fe								
1	89,38	218,13	319,25	284,90	347,00	447,87	118,46	37,46
2	86,68	120,42	167,40	214,14	325,87	386,72	116,00	36,68
3	45193,00	123,70	168,30	164,70	201,20	264,70	71,70	22,67
AL								
1	38,95	100,05	144,24	139,56	172,69	237,21	65,30	20,65
2	30,86	52,81	75,67	112,79	186,39	239,59	78,16	24,72
3	28,40	54,79	68,50	27030,00	93,41	123,45	30,63	9,69
Cu								
1	8,71	14,38	15,46	15,99	18,19	22,48	3,68	1,16
2	5,49	6,04	7,16	8,54	11,83	13,51	3,37	1,07
3	1,08	6,01	7,30	6,67	8,10	9,82	2,51	0,79
Mg								
1	795,20	855,70	928,00	934,00	987,70	1118,40	97,03	30,68
2	613,10	821,00	833,30	901,80	1059,80	1153,50	175,29	55,43
3	99,87	708,64	793,80	738,75	865,61	956,81	241,56	76,39
K								
1	6815,00	7241,00	7590,00	7827,00	8299,00	9461,00	825,68	261,10
2	7412,00	7892,00	8013,00	8094,00	8425,00	8758,00	418,97	132,49
3	1037,00	7721,00	8455,00	7629,00	8699,00	9019,00	2374,47	750,87
B								
1	8,71	14,38	15,46	15,99	18,19	22,48	3,68	1,16
2	5,49	6,04	7,16	8,54	11,83	13,51	3,37	1,07
3	1,08	6,01	7,30	6,67	8,10	9,82	2,51	0,79
Ba								
1	1,19	2,46	3,75	3,64	5,01	5,81	1,62	0,51
2	0,72	0,80	1,23	1,41	1,76	2,99	0,74	0,23
3	0,13	0,72	0,95	0,98	1,38	1,45	0,43	0,14
Ca								
1	714,50	1087,60	1451,80	1384,40	1647,00	8218,00	417,71	132,09
2	636,90	693,10	844,50	937,90	1149,60	1500,50	298,63	94,43
3	153,80	617,70	776,10	728,70	868,90	1105,30	257,86	81,54
Mn								

1	17,28	21,15	45102,00	45255,00	28,46	34,88	5,32	1,68
2	15,96	18,96	21,87	44979,00	23,81	29,87	4,42	1,40
3	45020,00	16,91	19,48	45003,00	21,17	23,70	5,53	1,75
Na								
1	2365,00	2725,00	2854,00	3109,00	3598,00	3986,00	556,27	175,91
2	1548,00	2024,00	2261,00	2293,00	2594,00	3241,00	487,13	154,04
3	361,10	112862,00	149902,00	111552,00	198815,00	328445,00	685,53	216,78
P								
1	5988,00	6631,00	6815,00	6934,00	6955,00	8985,00	829,35	262,26
2	6052,00	6476,00	6863,00	7276,00	8203,00	8771,00	982,11	310,57
3	863,70	1715667,00	1809169,00	1651323,00	7138,00	2276802,00	2033,48	643,04
S								
1	4121,00	4474,00	4498,00	4703,00	5005,00	5417,00	403,84	127,71
2	4339,00	4667,00	4801,00	4807,00	4878,00	5495,00	312,06	98,68
3	692,90	866143,00	1002774,00	870253,00	1091894,00	1257045,00	1315,71	416,07
Sr								
1	2,64	4,61	5,33	5,30	6,17	7,95	1,48	0,47
2	2,43	2,79	3,94	4,16	5,40	6,26	1,52	0,48
3	0,67	2,36	2,91	2,85	3,63	4,18	1,02	0,32
Zn								
1	152,10	169,90	189,00	192,70	206,60	258,30	33,95	10,74
2	112,80	149,20	156,60	163,10	183,70	211,70	29,72	9,40
3	11567,00	156,60	167,60	154,30	179,30	195,80	47,31	14,96

3. táblázat. Az jelentősebb eltérés a Ba, Ca, Cu, K, Mg, Mn, Na, P, S, Sr, Zn esetében területenként, illetve nemenként felosztva. (medián $\pm$ SE, *t*-érték, *p*-érték).

Al				
	IVAR	MEDIÁN $\pm$ SE	T	P
1. terület	♂	158 $\pm$ 14,65	11,49	3,28e-04
	♀	88,33 $\pm$ 35,97	3,08	3,68e-02
2. terület	♂	86,59 $\pm$ 28,57	3,83	1,86e-02
	♀	64,75 $\pm$ 43,9	2,65	5,73e-02
3. terület	♂	80,92 $\pm$ 20,55	3,82	3,17e-02
	♀	68,5 $\pm$ 10,4	6,83	1,03e-03
B				

	IVAR	MEDIÁN ± SE	T	P
1. terület	♂	14,55 ± 0,97	16,44	8,02e-05
	♀	16,36 ± 2,27	7,07	2,11e-03
2. terület	♂	7,24 ± 1,65	5,57	5,10e-03
	♀	7,07 ± 1,48	5,34	5,91e-03
3. terület	♂	6,79 ± 1,84	3,33	4,48e-02
	♀	7,4 ± 0,68	10,27	1,50e-04
Ba				
	IVAR	MEDIÁN ± SE	T	P
1. terület	♂	4,6 ± 0,33	13,50	1,74e-04
	♀	2,12 ± 0,85	3,30	3,00e-02
2. terület	♂	1,39 ± 0,23	6,10	3,65e-03
	♀	0,8 ± 0,44	3,20	3,28e-02
3. terület	♂	1,06 ± 0,3	3,03	5,65e-02
	♀	0,95 ± 0,13	7,62	6,18e-04
Ca				
	IVAR	MEDIÁN ± SE	T	P
1. terület	♂	1591 ± 94,22	16,89	7,20e-05
	♀	1012,58 ± 219,54	5,36	5,84e-03
2. terület	♂	832,05 ± 109	8,03	1,31e-03
	♀	856,91 ± 162,04	6,18	3,49e-03
3. terület	♂	754,54 ± 182,34	3,58	3,72e-02
	♀	776,07 ± 73,46	10,60	1,29e-04
Cu				
	IVAR	MEDIÁN ± SE	T	P
1. terület	♂	37,27 ± 3,56	10,71	4,31e-04
	♀	24,65 ± 4,25	6,40	3,07e-03
2. terület	♂	30,05 ± 0,96	31,78	5,84e-06
	♀	20,95 ± 3,37	6,53	2,84e-03
3. terület	♂	26,34 ± 6,2	3,67	3,51e-02
	♀	21,48 ± 2,46	9,33	2,39e-04
Fe				
	IVAR	MEDIÁN ± SE	T	P
1. terület	♂	324 ± 22,35	14,76	1,23e-04
	♀	201,97 ± 69,3	3,46	2,58e-02
2. terület	♂	197,38 ± 42,32	5,15	6,74e-03
	♀	119,42 ± 65,24	3,22	3,22e-02

3. terület	♂	174,72 ± 50,11	3,15	5,12e-02
	♀	168,26 ± 22,98	7,36	7,27e-04
K				
	IVAR	MEDIÁN ± SE	T	P
1. terület	♂	7211,11 ± 472,27	16,33	8,23e-05
	♀	7622,8 ± 277,82	28,59	8,91e-06
2. terület	♂	7885,67 ± 114,84	67,96	2,81e-07
	♀	8534,82 ± 155,33	53,96	7,06e-07
3. terület	♂	7998,71 ± 1844,15	3,52	3,89e-02
	♀	8467,55 ± 207,01	40,52	1,73e-07
Mg				
	IVAR	MEDIÁN ± SE	T	P
1. terület	♂	918,83 ± 32,06	28,42	9,12e-06
	♀	977,94 ± 54,34	17,61	6,11e-05
2. terület	♂	820,22 ± 75,48	10,84	4,11e-04
	♀	1008,96 ± 68,07	14,48	1,32e-04
3. terület	♂	687,84 ± 160,73	3,57	3,77e-02
	♀	862,19 ± 32,85	25,85	1,62e-06
Mn				
	IVAR	MEDIÁN ± SE	T	P
1. terület	♂	28,24 ± 0,93	29,39	7,98e-06
	♀	20,59 ± 3,1	7,41	1,77e-03
2. terület	♂	19,43 ± 1,38	14,53	1,30e-04
	♀	23,31 ± 2,22	10,81	4,15e-04
3. terület	♂	17,34 ± 4,15	3,76	3,29e-02
	♀	20,42 ± 0,99	19,83	6,03e-06
Na				
	IVAR	MEDIÁN ± SE	T	P
1. terület	♂	2746,29 ± 238,81	12,97	2,04e-04
	♀	2865,17 ± 286,6	10,89	4,04e-04
2. terület	♂	2054,71 ± 114,74	18,62	4,90e-05
	♀	2654,02 ± 285,16	8,59	1,01e-03
3. terület	♂	2293,74 ± 500,59	3,69	3,44e-02
	♀	2310,59 ± 112,08	21,80	3,77e-06
P				
	IVAR	MEDIÁN ± SE	T	P
1. terület	♂	6749,75 ± 259,55	25,50	1,41e-05

	♀	6869,85 ± 438,54	16,53	7,84e-05
2. terület	♂	6374,15 ± 144,45	44,87	1,48e-06
	♀	8225,29 ± 312,82	25,80	1,34e-05
3. terület	♂	6589,07 ± 1478,78	3,56	3,77e-02
	♀	6982,19 ± 267,52	26,87	1,34e-06
S				
	IVAR	MEDIÁN ± SE	T	P
1. terület	♂	4935,27 ± 186,92	26,16	1,27e-05
	♀	4476,35 ± 145,45	31,06	6,41e-06
2. terület	♂	4886,17 ± 185,76	26,47	1,21e-05
	♀	4700,14 ± 57,96	81,06	1,39e-07
3. terület	♂	4807,88 ± 1058,96	3,64	3,57e-02
	♀	4460,75 ± 174,13	26,23	1,51e-06
Sr				
	IVAR	MEDIÁN ± SE	T	P
1. terület	♂	5,36 ± 0,27	21,51	2,77e-05
	♀	4,39 ± 0,9	5,38	5,75e-03
2. terület	♂	2,71 ± 0,74	5,06	7,20e-03
	♀	4,87 ± 0,64	7,17	2,00e-03
3. terület	♂	2,97 ± 0,71	3,62	3,62e-02
	♀	2,91 ± 0,3	10,10	1,63e-04
Zn				
	IVAR	MEDIÁN ± SE	T	P
1. terület	♂	184,48 ± 11,38	15,65	9,74e-05
	♀	191,29 ± 16,82	12,33	2,49e-04
2. terület	♂	161,33 ± 15,3	10,71	4,30e-04
	♀	156,34 ± 12,76	12,72	2,20e-04
3. terület	♂	143,76 ± 35,4	3,64	3,58e-02
	♀	172,5 ± 5,02	34,15	4,05e-07

A BAF értékek mind a hím, mind a nőstény *S. tristis* esetében átlag ± SE formájában kerülnek bemutatásra. A táblázatban szereplő elemek az Al, Ba, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Na, Sr és Zn. A táblázatban szereplő BAF értékek az adott elem koncentrációjának arányát jelentik az élőlényben a talajban lévő

koncentrációjához képest. A magasabb BAF érték azt jelzi, hogy az adott elem nagyobb mértékben halmozódik fel az élőlényben a talajban lévő koncentrációjához képest. A Na BAF értékein, láthatjuk, hogy azok sokkal magasabbak, mint a többi elem értékei, ami azt jelzi, hogy a *S. tristis* nagyobb mértékben halmozza fel a nátriumot a talajban lévő koncentrációjához képest, mint a többi elemet. Továbbá láthatjuk, hogy különbségek vannak a BAF értékek között a hímek és nőstények esetében, valamint a különböző területek között.

Az 4. táblázatban szereplő elemek közül a Na BAF értékei nagyobbak, mint 1. A Na BAF értékei a 3 területen a következők: 1. területen a hímeknél $12,244 \pm 0,944$, a nőstényeknél $12,34 \pm 1,133$; a 2. területen a hímeknél $7,172 \pm 0,385$, a nőstényeknél $8,225 \pm 0,957$; és a 3. területen a hímeknél $5,32 \pm 1,44$, a nőstényeknél $7,027 \pm 0,322$.

A K BAF értékei a három területen a következők: az 1. területen a hímeknél $2,524 \pm 0,155$, a nőstényeknél $2,599 \pm 0,091$; a 2. területen a hímeknél $4,034 \pm 0,059$, a nőstényeknél $4,332 \pm 0,08$; és a 3. területen a hímeknél $3,093 \pm 0,879$, a nőstényeknél $3,998 \pm 0,099$.

A Zn BAF értékei a 2. területen a hímeknél $3,414 \pm 0,319$, a nőstényeknél $3,38 \pm 0,266$ itt mutat nagyobb értéket, mint 1. A cink felszívódását három tényező határozza meg: az egyed szervezetében jelen lévő cink mennyisége, az étrend teljes cinktartalma és a táplálékban található oldható cink hozzáférhetősége [Lonnerdal, 2000]. Ezért feltételezhetően, mivel dögevő bogarokról beszélünk a szervezetükbe a táplálék útján kerülhetett be a cink többlet.

A Cu BAF értéke a 2. területen a hímeknél valóban nagyobb, mint 1, és $1,306 \pm 0,041$ itt ebben az egy esetben mutat 1-nél nagyobb értéket.

4. táblázat. A *S. tristis* és a talaj koncentrációja alapján számolt BAF érték (átlag $\pm$ SE).

	BAF					
	1. terület		2. terület		3. terület	
	♂	♀	♂	♀	♂	♀
Al	0,019 $\pm$ 0,002	0,012 $\pm$ 0,004	0,012 $\pm$ 0,003	0,013 $\pm$ 0,005	0,01 $\pm$ 0,003	0,009 $\pm$ 0,001
Ba	0,036 $\pm$ 0,003	0,022 $\pm$ 0,007	0,034 $\pm$ 0,006	0,034 $\pm$ 0,011	0,006 $\pm$ 0,002	0,007 $\pm$ 0,001
Ca	0,072 $\pm$ 0,004	0,053 $\pm$ 0,01	0,044 $\pm$ 0,006	0,051 $\pm$ 0,008	0,021 $\pm$ 0,006	0,025 $\pm$ 0,002
Cu	0,669 $\pm$ 0,062	0,477 $\pm$ 0,075	1,306 $\pm$ 0,041	0,944 $\pm$ 0,145	0,382 $\pm$ 0,104	0,386 $\pm$ 0,041
Fe	0,024 $\pm$ 0,002	0,017 $\pm$ 0,005	0,016 $\pm$ 0,003	0,015 $\pm$ 0,005	0,012 $\pm$ 0,004	0,012 $\pm$ 0,002
K	2,524 $\pm$ 0,155	2,599 $\pm$ 0,091	4,034 $\pm$ 0,059	4,332 $\pm$ 0,08	3,093 $\pm$ 0,879	3,998 $\pm$ 0,099
Mg	0,164 $\pm$ 0,006	0,172 $\pm$ 0,01	0,154 $\pm$ 0,014	0,185 $\pm$ 0,013	0,106 $\pm$ 0,03	0,157 $\pm$ 0,006
Na	12,244 $\pm$ 0,944	12,34 $\pm$ 1,133	7,172 $\pm$ 0,385	8,225 $\pm$ 0,957	5,32 $\pm$ 1,44	7,027 $\pm$ 0,322
Sr	0,069 $\pm$ 0,003	0,058 $\pm$ 0,011	0,076 $\pm$ 0,015	0,094 $\pm$ 0,013	0,028 $\pm$ 0,008	0,033 $\pm$ 0,003
Zn	0,824 $\pm$ 0,053	0,959 $\pm$ 0,078	3,414 $\pm$ 0,319	3,38 $\pm$ 0,266	0,596 $\pm$ 0,164	0,793 $\pm$ 0,023

5.2. A *Silpha tristis* egyedek esetében végzett morfometriai vizsgálatok eredményei

Az FA vizsgálatban vont bélyegek (Dst_01, Dst_02 és Dst_03) szimmetria-viszonyában szignifikáns különbségek figyelhetők az antennomerek (csápízek) tekintetében a nőstény egyedeknél (a1: $t = 7,1282$; $p = 5,495e-05$; a2: $t = 3,6887$, $p = 0,005008$; a3: $t = 3,3705$, $p = 0,008251$) az első mintavételi területen a többihez képest (7. táblázat).

Az első és harmadik lábszár tibia jelölésű paramétereinél hasonló szignifikáns eltérések tapasztalhatóak a nőstény egyedek között az első terület tekintetében (1.: $t = 6,8584$; $p = 7,403e-05$; 3.: $t = 8,8971$; $p = 9,379e-06$) (5. táblázat).

A többi paraméternél nem tapasztaltunk szignifikáns változást (5., 6. táblázat).

5. táblázat: A *S. tristis* hímek és nőtények bilaterális jellegeinek (lábak, szárnyfedők) jobb és bal oldala közötti eltérések, FA analízis alapján (átlag $\pm$ SE, *t*-érték, *p*-érték, mm).

ELSŐ LÁBSZÁR							
	IVAR	Femur	Tibia	Femur <i>t</i>	Tibia <i>t</i>	Femur <i>p</i>	Tibia <i>p</i>
1. terület	♂	0,037 $\pm$ 0,01	0,045 $\pm$ 0,014	3,901	3,163	2,95e-03	1,01e-02
	♀	0,031 $\pm$ 0,011	0,027 $\pm$ 0,004	2,810	6,858	2,04e-02	7,40e-05
2. terület	♂	0,056 $\pm$ 0,048	0,021 $\pm$ 0,009	1,187	2,247	3,57e-01	1,54e-01
	♀	0,034 $\pm$ 0,017	0,045 $\pm$ 0,019	2,009	2,357	1,38e-01	9,97e-02
3. terület	♂	0,034 $\pm$ 0,009	0,048 $\pm$ 0,016	3,779	3,057	4,35e-03	1,36e-02
	♀	0,073 $\pm$ 0,017	0,047 $\pm$ 0,013	4,199	3,600	2,31e-03	5,75e-03
MÁSODIK LÁBSZÁR							
	IVAR	Femur	Tibia	Femur <i>t</i>	Tibia <i>t</i>	Femur <i>p</i>	Tibia <i>p</i>
1. terület	♂	0,045 $\pm$ 0,013	0,151 $\pm$ 0,124	3,567	1,214	5,12e-03	2,53e-01
	♀	0,047 $\pm$ 0,009	0,028 $\pm$ 0,007	5,065	3,816	6,76e-04	4,11e-03
2. terület	♂	0,047 $\pm$ 0,025	0,026 $\pm$ 0,016	1,842	1,601	2,07e-01	2,51e-01
	♀	0,065 $\pm$ 0,023	0,025 $\pm$ 0,004	2,768	5,647	6,97e-02	1,10e-02
3. terület	♂	0,035 $\pm$ 0,008	0,024 $\pm$ 0,004	4,322	5,698	1,93e-03	2,95e-04
	♀	0,045 $\pm$ 0,01	0,041 $\pm$ 0,018	4,643	2,274	1,21e-03	4,91e-02
HARMADIK LÁBSZÁR							
	IVAR	Femur	Tibia	Femur <i>t</i>	Tibia <i>t</i>	Femur <i>p</i>	Tibia <i>p</i>
1. terület	♂	0,024 $\pm$ 0,007	0,027 $\pm$ 0,009	3,598	3,041	4,86e-03	1,24e-02
	♀	0,028 $\pm$ 0,009	0,035 $\pm$ 0,004	3,062	8,897	1,35e-02	9,38e-06
2. terület	♂	0,024 $\pm$ 0,01	0,039 $\pm$ 0,012	2,302	3,214	1,48e-01	8,47e-02
	♀	0,018 $\pm$ 0,007	0,015 $\pm$ 0,006	2,603	2,363	8,02e-02	9,91e-02
3. terület	♂	0,167 $\pm$ 0,134	0,035 $\pm$ 0,009	1,242	3,873	2,46e-01	3,77e-03
	♀	0,026 $\pm$ 0,005	0,017 $\pm$ 0,004	4,900	3,912	8,48e-04	3,55e-03
SZÁRNYFEDŐK							
	IVAR	Dst_01	Dst_02	Dst_01 <i>t</i>	Dst_02 <i>t</i>	Dst_01 <i>p</i>	Dst_02 <i>p</i>
1. terület	♂	0,012 $\pm$ 0,003	0,007 $\pm$ 0,001	3,951	6,018	2,72e-03	1,29e-04
	♀	0,024 $\pm$ 0,009	0,016 $\pm$ 0,004	2,556	4,013	3,09e-02	3,05e-03
2. terület	♂	0,017 $\pm$ 0,005	0,008 $\pm$ 0,003	3,624	2,769	1,10e-02	3,25e-02
	♀	0,026 $\pm$ 0,005	0,007 $\pm$ 0,001	4,917	4,971	8,29e-04	7,69e-04
3. terület	♂	0,028 $\pm$ 0,007	0,018 $\pm$ 0,004	4,224	4,727	2,23e-03	1,08e-03
	♀	0,03 $\pm$ 0,006	0,007 $\pm$ 0,002	4,771	3,065	1,01e-03	1,35e-02

6. Táblázat: A *S. tristis* hímek és nőstények bilaterális jellegeinek (hártýásszárnyak), jobb és bal oldala közötti eltérések, FA analízis alapján (átlag±SE, *t*-érték, *p*-érték, mm).

HÁRTYÁS SZÁRNYAK										
	IVAR	Dst_01	Dst_02	Dst_03	Dst_01 <i>t</i>	Dst_02 <i>t</i>	Dst_03 <i>t</i>	Dst_01 <i>p</i>	Dst_02 <i>p</i>	Dst_03 <i>p</i>
1. terület	♂	0,115 ± 0,028	0,106 ± 0,023	0,11 ± 0,019	4,044	4,602	5,753	2,35E- 03	9,77E- 04	1,85E- 04
	♀	0,132 ± 0,038	0,113 ± 0,031	0,122 ± 0,039	3,532	3,626	3,100	6,40E- 03	5,52E- 03	1,27E- 02
2. terület	♂	0,124 ± 0,071	0,114 ± 0,084	0,129 ± 0,081	1,746	1,363	1,587	2,23E- 01	3,06E- 01	2,54E- 01
	♀	0,155 ± 0,048	0,175 ± 0,062	0,162 ± 0,052	3,225	2,840	3,105	4,84E- 02	6,56E- 02	5,31E- 02
3. terület	♂	0,082 ± 0,023	0,087 ± 0,019	0,076 ± 0,02	3,565	4,611	3,903	6,08E- 03	1,27E- 03	3,61E- 03
	♀	0,045 ± 0,015	0,054 ± 0,016	0,058 ± 0,007	3,039	3,425	7,991	1,40E- 02	7,57E- 03	2,23E- 05

7. táblázat: A *S. tristis* hímek és nőstények bilaterális jellegeinek (csápízek), jobb és bal oldala közötti eltérések, FA analízis alapján (átlag±SE, *t*-érték, *p*-érték, mm).

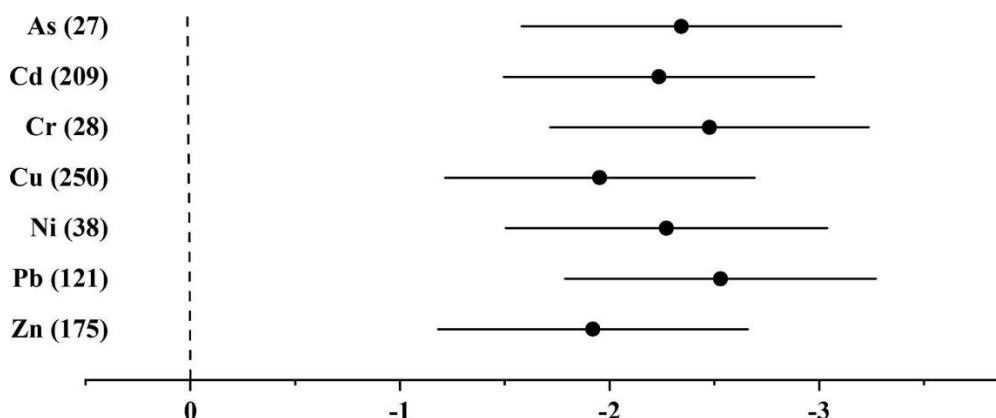
CSÁPÍZEK										
	IVAR	Dst_01	Dst_02	Dst_03	Dst_01 <i>t</i>	Dst_02 <i>t</i>	Dst_03 <i>t</i>	Dst_01 <i>p</i>	Dst_02 <i>p</i>	Dst_03 <i>p</i>
1. terület	♂	0,239 ± 0,177	0,238 ± 0,177	0,098 ± 0,055	1,352	1,343	1,791	2,06E- 01	2,09E- 01	1,04E- 01
	♀	0,057 ± 0,008	0,076 ± 0,021	0,046 ± 0,014	7,128	3,689	3,371	5,50E- 05	5,01E- 03	8,25E- 03
2. terület	♂	0,039 ± 0,014	0,017 ± 0,008	0,064 ± 0,023	2,707	2,063	2,830	1,14E- 01	1,75E- 01	1,06E- 01
	♀	0,048 ± 0,032	0,018 ± 0,013	0,034 ± 0,011	1,488	1,377	3,042	2,34E- 01	2,62E- 01	5,58E- 02
3. terület	♂	0,064 ± 0,021	0,051 ± 0,011	0,073 ± 0,019	3,074	4,462	3,885	1,53E- 02	2,11E- 03	4,64E- 03
	♀	0,05 ± 0,019	0,069 ± 0,028	0,038 ± 0,006	2,704	2,464	6,126	2,42E- 02	3,59E- 02	1,74E- 04

5.3. A metaanalízishez szükséges szakirodalmi áttekintés és adatgyűjtés eredményei

Az irodalomkutatás 616 publikációt eredményezett, kiegészítve 186 egyéb forrásból származó publikációval; ezek közül 42 dokumentum teljesítette a korábban meghatározott bevonási kritériumokat. A fémek jelentett koncentrációja a szennyezett talajokban nagymértékben változott a vizsgálatok során (1,02-195 mg kg⁻¹ az As-: 0,1-350 mg kg⁻¹ a Cd: 5,11-527 mg kg⁻¹ a krómnál, 6,5-15 300 mg kg⁻¹ Cu: 4,42-13 926 mg kg⁻¹ Ni: 5,5-72 074 mg kg⁻¹ Pb: és 25,2-96 800 mg kg⁻¹ Zn számára. Az érintett dokumentumokban 12 földigilisztafajt tanulmányoztak [Tózsér és mtsai., 2022] (1. függelék).

5.4. Fémelemek felhalmozódása földigiliszta fajokban

Az egyes fémek (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb és Zn) felhalmozódása szignifikánsan magasabb volt a szennyezett talajból származó földigilisztafajokban, mint a kontrolltalajokban. A vizsgált fémek akkumulációs intenzitása hasonlóan magas volt, azonban a következő akkumulációs intenzitási sorrendet lehetett felállítani: Pb > Cr > As > Ni > Cd > Cu > Zn [Tózsér és mtsai., 2022].

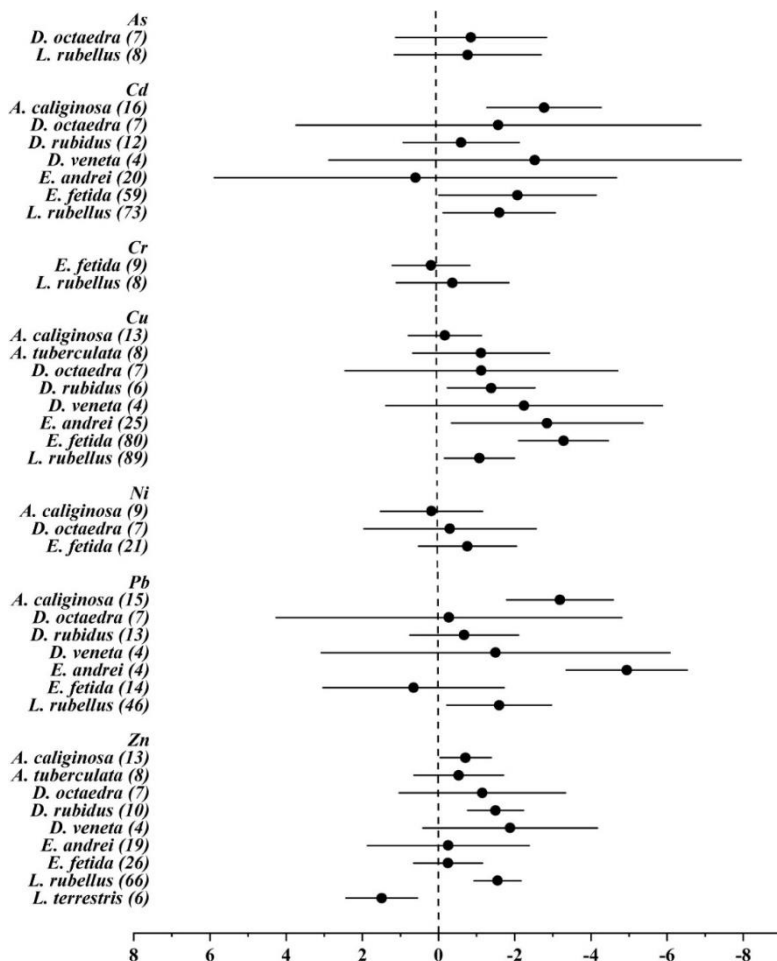


5. ábra. Átlagos hatásnagyság m (Hedges' g-féle) Véletlenszerű hatású modellek átlagos hatásméretei (átlag Hedges' g $\pm$ 95 % CI) az As, Cd, Cr, Cu,

Ni, Pb és Zn földigilisztákban történő felhalmozódására (az összes fajt együtt kezelve). A negatív g értékek magasabb elemkoncentrációt jelentenek a szennyezett talajból gyűjtött földigilisztatestekben, mint a nem szennyezett talajokból származó egyedekben. Az átlagos hatásméretet statisztikailag szignifikánsnak tekintettük, ha a 95 %-os bootstrap konfidencia intervallum (CI) nem tartalmazott nullát (az átlagos Hedges' $g \pm 95$ %-os CI teljes mértékben negatív vagy pozitív tartományban van).

Az As felhalmozódását *Dendrobaena octaedra* és *Lumbricus rubellus* esetében tanulmányozták, és mindkét faj esetében (9. ábra) nagyobbak találták a szennyezett talajból származó egyedeknél, mint a nem szennyezettekénél. Hét fajt vizsgáltunk Cd-felhalmozódásuk szempontjából; ezek közül az *Aporrectodea caliginosa* volt a legjobb akkumulátor, majd az *Eisenia fetida* és a *Lumbricus rubellus* következett, szintén jelentős felvételi intenzitással a kontroll egyedekhez képest (9. ábra). Két fajt Cr-akkumulációjuk alapján értékeltünk. A *L. rubellus* nagyobb akkumulációs intenzitást mutatott, mint az *E. fetida* szennyezett talajokban, mint a szennyezetlenekben (9. ábra). A réz felhalmozódását nyolc fajban vizsgálták, amelyek közül a *Dendrodrilus rubidus*, az *Eisenia andrei*, az *E. fetida* és a *L. rubellus* volt jelentős akkumulációs intenzitású; azonban az *A. caliginosa*, az *Aporrectodea tuberculata*, a *Dendrobaena octaedra* és a *Dendrobaena veneta* esetében jelentéktelen volt. A Ni-akkumuláció szempontjából vizsgált három faj közül a *D. octaedra* és az *E. fetida* nagyobb felhalmozódási intenzitást mutatott, mint az *A. caliginosa*, azonban mindezek a különbségek jelentéktelenek voltak (9. ábra). A Pb esetében a hét vizsgált faj közül kettő (*A. caliginosa* és *E. andrei*) mutatott jelentős felhalmozódást. Ezenkívül az *E. fetida* volt a legkisebb felhalmozódási potenciállal rendelkező faj (9. ábra). Ami a Zn-t illeti, három faj (*A. caliginosa*, *D. rubidus* és *L. rubellus*) koncentrációja szignifikánsan nagyobb volt a szennyezett talajokban, mint a

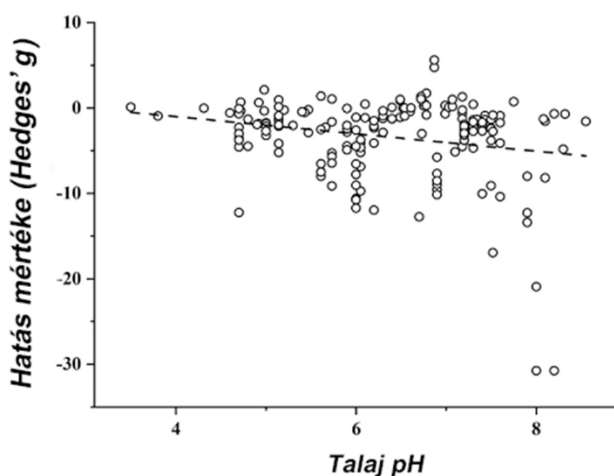
szennyezetlenekben. Érdekes módon a *Lumbricus terrestris* faj esetében a felhalmozódás szignifikánsan kisebb volt a szennyezett talajokból származó egyedekben, mint a kontroll területekről származókban (9. ábra) [Tózsér és mtsai., 2022].



6. ábra. Véletlenszerű hatású modellek átlagos hatásmeretei (átlag Hedges' $g \pm 95\%$ CI) az As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb és Zn akkumulációira a vizsgált földigilisztafajokban. A negatív g értékek magasabb elemkoncentrációt jelentenek a szennyezett talajból gyűjtött földigilisztatestekben, mint a szennyezetlen talajokból. Az átlagos hatásmeretet statisztikailag szignifikánsnak tekintettük, ha a 95 %-os bootstrap konfidencia intervallum (CI) nem tartalmazott nullát (az átlagos Hedges' $g \pm 95\%$ -os CI teljes mértékben negatív vagy pozitív tartományban van).

5.5. A talaj pH-jának hatása a fémek felhalmozódására

A talaj pH-értékének hatásait vizsgálni lehetett az összes fajba tartozó földigiliszták egyedeinek As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb és Zn felhalmozódására. Az egyes fémek felhalmozódását értékelve a talaj pH-jának szignifikáns hatását csak egy esetben tapasztaltuk. A talaj pH-ának növekedésével, elhanyagolható mértékben nőtt a felhalmozódás mértéke a As, Cd, Ni elemeknél, illetve csökkent a felhalmozódás mértéke a Cr, Pb, Zn elemeknél. Az elemzések eredményei azt mutatták, hogy a réz akkumulációs intenzitása jelentősen nőtt a talaj pH-értékeinek növekedésével (10. ábra) [Tózsér és mtsai., 2022].



7. ábra. Összefüggés a szennyezett és nem szennyezett talajokból gyűjtött giliszták Cu-koncentrációjára számított standardizált átlagos különbség (Hedges' g) és a talaj pH-értéke között. A negatívabb g értékek nagyobb Cu-koncentráció-különbséget (nagyobb felhalmozódási intenzitást) jeleznek földigilisztákban a szennyezett és a nem szennyezett talajból ($F = 8,8$, $n = 177$, $p = 0,003$, $R = -0,22$).

5.6. Az expozíciós idő hatása a fémek felhalmozódására a földigilisztafajokban

Az expozíciós idő (teszt időtartama) hatásait a Cd, Cr, Cu, Ni, Pb és Zn koncentrációra vizsgáltuk valamennyi vizsgált faj együttes kezelésében lévő földigiliszták egyedeiben. Az elemzések egyetlen szignifikáns összefüggést eredményeztek a felhalmozódási sebesség és az expozíciós idő között. Az expozíciós idő növekedésével, elhanyagolható mértékben nőtt a felhalmozódás mértéke az Ni elemnél, illetve csökkent a felhalmozódás mértéke a Cd, Cr, Cu, Zn elemeknél. A földigiliszták Pb-felhalmozódási sebessége az idő előrehaladtával jelentősen csökkent, szignifikánsan alacsonyabb testkoncentrációt mutatva az expozíció időtartamával (2. táblázat) [Tózsér és mtsai., 2022].

8. táblázat. Összefüggés a szennyezett és nem szennyezett talajokból gyűjtött földigiliszták Pb-koncentrációira számított standardizált átlagos különbség (Hedges' g) és az expozíciós idő (n = 40) között.

Variancia komponens	df	Eltérés négyzetösszeg	Átlagos eltérés négyzetösszeg	F	p
Modell	1	98,776	98,776	4,566	0,039
Hiba	38	822,087	21,634		
Teljes	39	920,863			

5.6.1. *As felhalmozódás*

Az As felhalmozódása jelentős volt a földigiliszta fajokban. Két fajt megfelelő minta nagysággal vizsgálva azonban mind a *D. octaedra*, mind a *L. rubellus* esetében nagyobb, de elenyésző akkumulációs potenciált tapasztaltunk, nagyobb különbségek nélkül. A talaj pH-ja és az expozíciós idő nem befolyásolta szignifikánsan az As felhalmozódást [Tózsér és mtsai., 2022].

5.6.2. *Cd felhalmozódás*

A szennyezett talajból származó földigilisztafajok jelentősen több Cd-t halmoztak fel, mint a nem szennyezett talajból származó egyedek. Hét vizsgált fajnál is jelentős különbségek voltak. A talaj pH-értéke és az expozíciós idő nem volt jelentős hatással a Cd-felhalmozódásra [Tózsér és mtsai., 2022].

5.6.3. *Cr felhalmozódás*

A Cr felhalmozódása szignifikánsan nagyobb volt a szennyezett talajból származó földigilisztafajokban, mint a kontroll körülmények között. Nem volt szignifikáns különbség az *E. fetida* és a *L. rubellus* kis akkumulációs rátájában, míg a pH és az expozíciós idő hatása igen kis jelentőséggel bírt a földigiliszták Cr-akkumulációja szempontjából.

5.6.4. *Cu felhalmozódás*

A vizsgált fémek közül a rézfelvétel szignifikánsan intenzív volt földigilisztafajokban. A nyolc vizsgált alá vett faj között is szignifikáns különbségeket találtunk. Itt a talaj pH-ja szignifikánsan befolyásolta a

földigiliszták Cu felhalmozódását, míg az expozíciós időnek nem volt jelentős hatása a mintázatra [Tőzsér és mtsai., 2022].

5.6.5. *Ni felhalmozódás*

A Ni felhalmozódása szignifikánsan magasabb volt a szennyezett talajból származó földigilisztafajokban, mint a nem szennyezett talajokból származó egyedekben. Ezenkívül jelentős különbségek is voltak a három vizsgált faj között. A talaj pH-ja és az expozíciós idő nem befolyásolta a földigilisztaszövetek Ni-koncentrációját [Tőzsér és mtsai., 2022].

5.6.6. *Pb felhalmozódás*

A földigilisztaszövetek Pb-ben való feldúsulása és a kapcsolódó különbségek a felhalmozódásban a hét faj között szignifikánsnak bizonyultak. Továbbá a testkoncentrációk függetlenek voltak a talaj pH-jától, míg az expozíciós idő szignifikánsan befolyásolta a felvétel intenzitását azokban az egyedekben, akiknél az idő múlásával a belső koncentráció csökken [Tőzsér és mtsai., 2022].

5.6.7. *Zn felhalmozódás*

A Zn szignifikáns akkumulációja volt kimutatható a földigilisztafajok testszöveiben, miközben a kilenc vizsgált faj között is szignifikáns volt a különbség. A talaj pH-jának és az expozíciós időnek nem volt jelentős hatása a vizsgált akkumulációs mintázatokra [Tőzsér és mtsai., 2022].

5.7. A szoftver eredményei

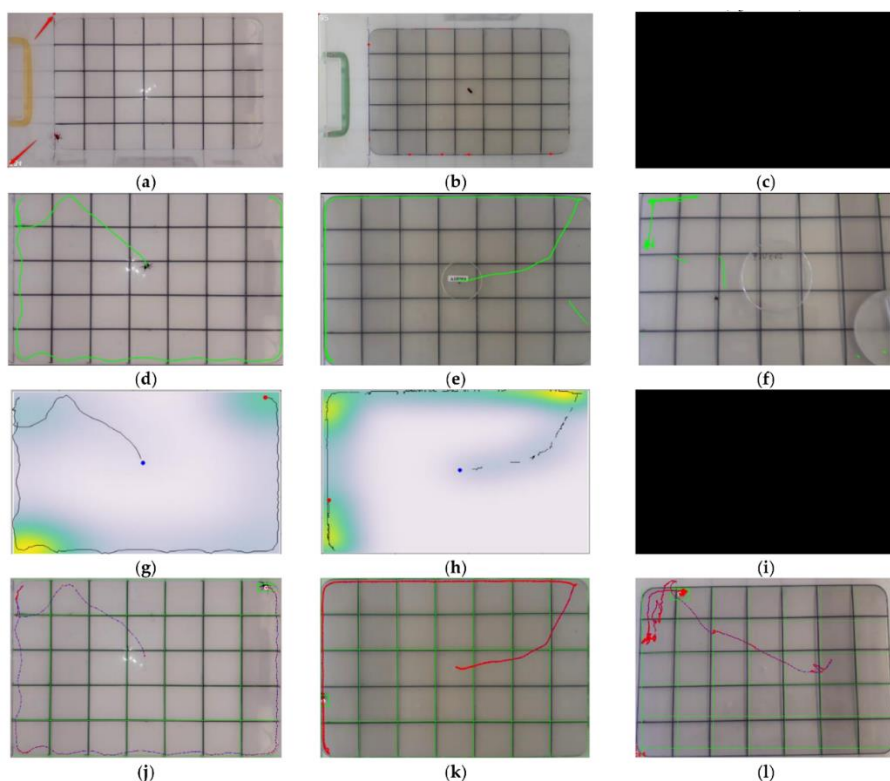
A szoftver jelenlegi verziója olyan alapvető információkat nyújt a felhasználó számára, mint az egyed mozgásának pályája és az általa

meglátogatott celláinak száma. Ezt a videó lejátszása után jeleníti meg a szoftver. A meglátogatott cellák száma létfontosságú paraméter egyes ökológiai vizsgálatok során [Magura és mtsai., 2022].

A BugTracker szoftver jelenlegi verziója úgy készült, hogy a lehető legjobban automatizálja a nyílt aréna tesztnak a feldolgozását, mivel ezt a gyakran használják a feltáró viselkedés értékelésére [Schuett és mtsai., 2018; Jones és Godin, 2018; Labaude és mtsai., 2018]. A példavideókban a szoftver egy előre beállított tesztkörnyezetben dolgozott, ami egy nyitott műanyag dobozból (364×230 mm) állt, melynek alja 35 egyenlő méretű négyzetre volt osztva [Magura és mtsai., 2022]. A szoftvert úgy hoztuk létre, hogy az automatikusan felismerje a rácsvonalakat a doboz alján, de arra is alkalmas, hogy a felhasználó utólag szoftveresen alakítsa ki ezeket a vonalakat [Málík-Roffa és mtsai., 2023].

Összehasonlítottuk szoftverünk teljesítményét a jelenleg elérhető alternatívákkal, ugyanazokat a videókat használva, különböző megvilágítási és kamerastabilitási feltételek mellett. Tesztelésünk alapján a példa videofelvételek egyike sem volt jól kalibrálható Tractor segítségével, így a szoftver nem produkált pontos követési eredményeket a videókhoz. Megfelelő kalibrálás után a ToxTrac precízen dolgozott a videofelvételeken az ideális és mérsékelt megvilágítás mellett, ahol fix a kamera, de a kézi videofelvétel esetén nem tudta követni az egyedet. Pathtracker fix kamerával, ideális fényviszonyok mellett tudta követni az állatot, de ugyanezt mérsékelt megvilágítás mellett már nem tudta folyamatosan. Ráadásul a kézi kamerával készült videofelvételt ez a program egyáltalán nem tudta feldolgozni. Szoftverünk, a BugTracker a videofelvételek teljes időtartama alatt precízen követni tudta a célállatokat a különböző megvilágítási és kamerastabilitási feltételek mellett (11. ábra). A meglátogatott négyzetek száma, az aktivitás

elismert mérőszáma ízeltlábúakban [Magura és mtsai., 2022], a négy bogárkövető szoftver eredményei alapján jelentősen eltértek (9. táblázat).



8. ábra. Négy nyomkövető program teljesítménye ugyanazon videofelvételek felhasználásával, eltérő megvilágítási és kamerastabilitási feltételek mellett. Rögzített mozgási utak: Tracktor (a – c); ToxTrac (d – f); Pathtrackr (g – i); BugTracker (j – l).

9. táblázat. A meglátogatott négyzetek száma manuálisan és a négy állatkövető szoftver felhasználásával, különböző megvilágítási és kamerastabilitási feltételek mellett. A pirossal kiemelt értékek azt jelzik, hogy az alkalmazás nem tudta követni az ízeltlábúak mozgását. A narancssárgával

jelölt értékek hibás eredményeket, míg a zölddel jelölt értékek a meglátogatott négyzetek helyes számát jelzik.

Szoftver	Videó ideális fényviszonyokkal és rögzített kamerával. <i>Pardosa alacris</i> (Lycosidae) mozgását rögzítve	Videó külső fényforrás nélkül, de rögzített kamerával. <i>Armadillidium</i> <i>vulgare</i> (Armadillidiidae) mozgását rögzítve	Videó külső fényforrás nélkül, nem rögzített, mozgó kamerával. <i>Pardosa alacris</i> (Lycosidae) mozgását rögzítve
Manuális	21	16	12
<i>Tracktor</i> [10]	0	0	0
<i>ToxTrac</i> [11]	21	17	7
<i>Pathtrackr</i> [13]	21	14	0
<i>BugTracker</i>	21	16	12

6. Diskusszió

6.1. Környezetterhelés hatásainak tesztelése *Silpha tristis* egyedek mikroelem összetételére és morfológiájára

Az élő szervezetekben a Mg, Fe, Zn, ezen kívül Cu szöveti koncentrációi olyan kifinomult biokémiai folyamatok eredményei, melyeket az evolúció alakított ki azzal a céllal, hogy megbirkózzanak a specifikus fiziológiai, ezen kívül anyagcsere sajátosságokkal, valamint a változó környezettel. Másrészt a nem toxikus Cd, továbbá Pb elemek szöveti koncentrációja egy életen át tartó felhalmozódás eredménye, valamint az esetleg előforduló környezetszennyezés eredményeként szokták említeni [Andreani és mtsai., 2021].

Egy adott fém biológiai hozzáférhetőségét nagymértékben meghatározzák a talaj fizikai és kémiai tulajdonságai (pl. talaj szerkezete, pH, CEC, szervesanyag-tartalom), ami rendkívül nehézé teszi ezen mérgező anyagok mennyiségének előrejelzését [Frederik, 2004]. Az egyedekben talált fémkoncentráció nagyon összetett ökológiai összefüggések (pl. élettörténet) és élettani folyamatok (pl. alapvető fémszükséglet, toxikus fémkinetika) eredménye. Sok változó befolyásolja a fémkoncentráció háttérszintjét, általában markánsak az egyedek közötti különbségek a természetes populációkban [Zödl és Wittmann, 2003].

Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a mintavételi területek szignifikánsan elkülönülnek egymástól. Az általunk vizsgált metrikus paraméterek a szennyezés hatására változtak, azonban nem volt szignifikáns ez a változás. A hím és nőstény egyedek elkülöníthetőek a mért paraméterek alapján egymástól. Ahogy a hipotéziseinkben is feltételeztük a FA területenként mutat eltéréseket, de ezen eltérések nem szignifikánsak minden

esetben. Az egyedekben történt elem felhalmozás a szennyezettség mértékével összefüggésbe hozható ám nem minden esetben szignifikáns a különbség.

A 2. terület esetében megfigyelhető meg, hogy a Cu koncentrációja emelkedett értéket mutat. Az átlag testméret itt a nagyobb. Több tanulmány is leírja, hogy az adagolt réz stimulálja a növekedést, ezt főleg szárnyas állatoknál (*Gallus gallus domesticus*) mutatták ki [Harms és Buresh, 1987; Pesti és Bakllai, 1996].

Egyéb fajok esetében is kimutatták, hogy a hím egyedekben a Cu nagyobb koncentrációban halmozódhat fel a másik nemhez képest. Purchart és Kula [2007] szerint a koncentrációbeli eltérések a hímek és nőstények között lokális szinten jelentkeznek kismértékű szennyezettség esetén. Ez azt jelenti, hogy a hímek és nőstények közötti koncentrációkülönbségek csak bizonyos helyeken észlelhetők, ha a szennyezettség kisebb mértékű [Purchart és Kula, 2007].

A szennyezőanyagok által okozott stresszre adott sejtes válaszok ivarfüggőek. Az antioxidáns válaszok fajspecifikusak. A nőstények esetében, és elsősorban a magas peroxidáz aktivitásától és a stresszfehérje szintjétől függenek. A nőstények antioxidáns válasza az adott fajra jellemző, és az a peroxidáz enzim aktivitásának és a stresszfehérje szintjének mértékétől függ [Wilczek és mtsai., 2008]. Az étrend alapvető szerepet játszik a rovarok általános teljesítményében, mivel jelentősen befolyásolhatja biológiájukat (pl. méretüket, fejlődésüket és növekedési ütemüket), valamint túlélésüket és szaporodásukat [Nation, J. L., 2015].

Qubaiová és mtsai. [2021] a Silphidae fajokat étrendjének hatását vizsgálták, eredményeink alapján azt állíthatjuk, hogy a rossz táplálkozási minőség összefüggésbe hozható a fejlődést korlátozó és a mortalitást növelő specifikus tápanyagok hiányával, amint azt a csirkekezelés is kimutatta [Qubaiová és mtsai., 2021]. Feltételezhető, hogy a mikroelemek feldúsulása az

egyedekben a táplálék milyensége befolyásolhatja inkább, nem feltétlenül a talaj szennyezettsége.

Számos dögbogárfaj (Coleoptera: Silphidae) kulcsszerepet játszik az orvosi-jogi vizsgálatokban, főként a korai vagy késői bomlási stádiumban a post mortem intervallum (PMI) becslésében, vagy esetleg a post mortem testmanipuláció kimutatásában [Byrd és Castner, 2009; Charabidze és mtsai. 2017]. Ezért az ebbe a csoportba tartozó különböző fajok élettörténetének, kolonizációs folyamatainak és ökológiájának tanulmányozása fontos és értékes lehet a törvényszéki tudományok számára. [Qubaiová és mtsai., 2021]

6.2. Földigilisztafajokban felhalmozódó fémek metaanalízise

A földigilisztafajok fémek-akkumulációs potenciáljának ez a metaanalízisen alapuló értékelése jelentős mértékű elem- és fajspecifikus mintázatot mutatott. Az összes vizsgált fémek (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb és Zn) jelentősen felhalmozódott a vizsgált egyedek testében. Az egyes fajok szignifikánsan magas akkumulációs potenciállal rendelkezett. Fajok közötti akkumulációs különbségek is megjelentek [Tózsér és mtsai., 2022].

Korábban már kimutatták, hogy a talaj pH-értékének csökkenése növelheti a fémek mozgékony frakcióját a talajban, ezáltal biológiailag jobban hozzáférhetővé válik a földigiliszta számára [Spurgeon és mtsai., 2006]. Megfigyeléseinkkel összhangban van, bár gyenge korrelációt találtunk az As-felvétel és a talaj pH-ja között.

Richardson és mtsai. [2020] kiemelték, hogy a Cd az egyik legintenzívebben felhalmozott fém a földigilisztafajok által. A földigilisztafajokban a Cd méregtelenítése nagy hatékonysággal megy végbe, a szövetekben lerakódik és semlegesül, így magas testkoncentráció érhető el az egyed elhullása nélkül [Hussain és mtsai., 2020]. Általánosságban elmondható,

hogy a földigiliszták Cd felvétele fajspecifikus mintát mutat. Eredményeinknek megfelelően Latif és mtsai. [2013] nagyon intenzív Cd-felvételt találtak az *A. caliginosa*-ban, amely ebben a tanulmányban a legjobb Cd-akkumulációs potenciállal rendelkező faj. Jelentős Cd-felhalmozódást azonosítottak az *E. fetida* esetében [Łapiński és Rosciszewska, 2008], amit elemzésünk is alátámasztott.

Az összes földigilisztafajon elért eredményeinkhez képest a korábbi eredmények meglehetősen ellentmondásosak, azonban fajspecifikus akkumulációs mintázatok fedezhetők fel. A felhalmozás sikerességét támogató tényezőként [Hartenstein és mtsai., 1981] megfigyelték, hogy az *E. fetida* növekedését és túlélését még a rendkívül magas talajszennyezettség ($46\,000\text{ mg kg}^{-1}$) sem befolyásolta. A lassú felhalmozódás és a hatékony kiválasztási sebesség miatt az *E. fetida*-t kisebb belső Cr-koncentráció jellemezte [Di Carlo és mtsai., 2020]. Más szerzők is kimutattak, a talaj többszörös szennyeződését és a fémkölcsonhatásokat potenciális korlátozó tényezőként említve a fém felhalmozódása miatt [Aleagha és Ebadi, 2011; Bożym, 2017]. Arról is beszámoltak, hogy az életciklus-károsodásban szenvedő *E. fetida* képes volt ellenállni a magas Cr-expozíciónak, miközben szervezetében a Cr-koncentráció nőtt [Nirola és mtsai., 2018].

Az irodalomban nagyobb [Delgado Arroyo és mtsai., 2014] és kisebb [Bamidele és mtsai., 2015] Cu felhalmozódási arányokról is beszámoltak földigilisztafajok esetében. Korai megfigyelésként megjegyezték, hogy a földigiliszták általában elkerülik a rézzel szennyezett talajokat [Rhee, 1969]. Tanulmányunktól eltérően a legtöbb szerző a test Cu-koncentrációjának (sok esetben szignifikáns) növekedését mutatta be a talaj pH-jának csökkenésével, ami a fém savas körülmények között megnövekedett biohasznosulásával magyarázható [Vijver et al., 2007].

A tanulmányban részt vevő dokumentumokon kívül a földigilisztákban történő nikkel-felhalmozódásáról más fémekhez képest kevés információ áll rendelkezésre. Eredményeinkhez hasonlóan Podolak és mtsai. [2011] nagyobb felhalmozódási potenciált figyeltek meg a szennyezett helyekről származó földigilisztákban, ami elsősorban a Ni-szabályozás nem hatékony mechanizmusával magyarázható. Továbbá, a nagyobb Ni-koncentráció csak csekély hatást gyakorolt a felnőtt földigiliszták mortalitási arányára, így a felhalmozódás lehetősége magas maradt [Lock és Janssen, 2002]. A Pb felvételét a földigilisztákban találták a legkevésbé intenzívnek a Cd, Cu és Zn felhalmozódásához képest. Emiatt erőfeszítéseket tettek olyan szerek megtalálására, amelyek elősegítik a Pb tartós felhalmozódását a földigilisztákban [Zhang és mtsai., 2014]. Korábban az is bebizonyosodott, hogy a fémek közötti kölcsönhatások nagymértékben befolyásolták a Pb biohasznosulási/akkumulációs útvonalait, ami növények jelenlétében a fém korlátozott felhalmozódását eredményezheti a földigilisztákban [Weltje, 1998].

A földigiliszták koncentrációfüggő Zn-szabályozása és a fém formája elsődleges és fajfüggő hajtóerők, amelyek befolyásolják a földigiliszták testkoncentrációját [Laycock és mtsai., 2016].

Eredményeinkhez hasonlóan Xiao és mtsai. [2020] szintén erős interspecifikus különbségekről számoltak be a földigiliszták Zn-felhalmozódásában. Az *A. caliginosa* és a *L. rubellus* nagyon magas Zn-felvételű faj. Hasonlóan, Hashemi és mtsai. [2018] különösen jó Zn-felhalmozódást jeleztek az *E. fetida* testében, ami ellentmond eredményeinknek. A szerzők azonban rámutattak a többszörösen szennyezett talajban élő földigilisztákban erősen módosult elemi felhalmozódási minták kialakulására.

Az elemzés eredményei jelentős különbségeket mutattak ki a fémek felhalmozódásában, ami a különböző fém- és fajspecifikus

akkumulációs és kiválasztási jellemzőken alapult. Ezen paraméterek hatásait, kiegészítve más külső tényezők bevonásával (pl. talajtípus, szervesanyag-tartalom, éghajlati viszonyok), a jövőbeni akkumulációs elemzéseknél is figyelembe kell venni [Tózsér és mtsai., 2022].

6.3. A BugTracker szoftver

A BugTracker a GNU General Public License v3.0 alatt érhető el, a GitHubon telepítési, valamint használati útmutatóval angol nyelven: <https://github.com/Roffagalaxis/Bugtracker> (2023. március 29-től érhető el). A nyílt forráskódú szoftver lehetővé teszi a felhasználók és a fejlesztők számára, hogy a szoftver tudását személyre szabják és saját kísérleteikhez használják fel [Málik-Roffa és mtsai., 2023].

A BugTracker szoftver használatával az emberi erőforrások optimalizálhatók a kísérletek során. Csökkentheti az emberi tényezők okozta számítási és feldolgozási hibákat, illetve elősegítheti a feladatok párhuzamosítását. A vizsgálatok során az ízeltlábúakat sem faj, sem forma, sem méret nem korlátozza, az *Acinophus ammophilus* (Coleoptera: Carabidae) mozgása, amely egy nagy (20-28 mm) bogár, vagy akár kicsik, mint például az *Armadillidium vulgare* (Isopoda: Oniscidea) 0,7-18 mm hosszúsággal is hatékonyan ellenőrizhető. A szoftver a legújabb nyomkövető algoritmusokkal került megírásra, amely kedvezőtlen körülmények között is jobb eredményt ad, mint a meglévő megoldások, és egy előre meghatározott viselkedési paraméter tesztelésére optimalizált, ami megkönnyítheti a kiértékelést.

A BugTracker szoftver felhasználása a Python programozási nyelv használata miatt meglehetősen széleskörű, hiszen a kezdő programozók számára is egyszerű és érthető, később pedig R-programozási környezetbe is

megfelelően integrálható, így még szélesebb körben elérhetővé válik a felhasználók számára [Málik-Roffa, 2021].

Új tudományos eredményként elmondható, hogy egy olyan új szoftver jött létre mely pontosan és egyszerűen működik, programozási ismeretek nélkül is használható. Nyomon követési pontossága az összehasonlítások alapján kiemelkedően teljesített (9. táblázat). Fejlesztési lehetősége rendkívül sokrétű, így még több területen van lehetőség a program felhasználására.

7. Összegzés

Az Európában és Észak-Ázsiában (Kína kivételével) és Észak-Amerikában élő *Silpha tristis*, a Silphidae családba tartozó dögbogár fémakkumulációs potenciálját mutattuk ki közepesen és erősen fémszennyezett területeken. A vizsgált fémfelhalmozódást az egyedek teljes testére vizsgáltuk. Kiszámoltuk a bioindikációs faktor (BAF) értékét. Az egyedeket morfológiai vizsgálatnak is alávetettük annak vizsgálatára, hogy a fémmel szennyezett talaj, mint környezeti stressztényező hogyan befolyásolja a dögbogár morfológiai fejlődését. Szignifikáns különbségek voltak a hímek esetében a B és Ca és Sr mikroelemeiben. A 2. mintaterületről származó hímek esetében is szignifikáns volt a Cu koncentráció. Kimutattuk, hogy az erősen szennyezett területen a nőstényeknél az antenomerek, az első és a harmadik lábszár szignifikáns eltérést mutat. A hímeknél jelentős eltérések figyelhetők meg a hártvás szárny esetében.

A földigiliszták túlzott talajelem-koncentrációra adott válaszaik jól tanulmányozhatóak. A fémek egyénekben történő felhalmozódásáról szóló közzétett információk azonban ellentmondásosak. A földigiliszta As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb és Zn teljes testkoncentrációira vonatkozó publikált adatokat szennyezett és nem szennyezett (kontroll) talajokból gyűjtött egyedekben metaanalízisek segítségével értékeltük ki. Felmértük a talaj pH-értékének és az expozíciós időnek, mint a fémfelhalmozódást potenciálisan befolyásoló tényezőnek a szerepét is. A kiértékelések alapján az egyes fémek akkumulációja szignifikánsan ($p < 0,05$) intenzívebb volt a szennyezett talajokból gyűjtött egyedekben, mint a kontrolltalajokban, a felhalmozódási intenzitás sorrendjében kisebb eltérések mutatkoztak a vizsgált fémek között. Továbbá jelentős interspecifikus különbségek mutatkoztak az akkumulációban, ahol a különböző fajok a legintenzívebb akkumuláltak az

egyes fémekhez. A vizsgált fémek közül a földigilisztatestekben a rézkoncentráció szignifikánsan megemelkedett a talaj pH-jának emelkedésével. Ami az expozíciós időtől függő felhalmozódást illeti, a Pb-koncentráció idővel szignifikánsan csökken a földigiliszta teljes testszövetében. Ezek az eredmények arra utalnak, hogy a giliszta fém- és fajspecifikus felhalmozódási-kiválasztási mintái nagymértékben változnak, amit egyéb külső tényezők is befolyásolnak.

Egy kísérleti organizmus tevékenységének/mozgásának automatizált videókövetése elengedhetetlen a megbízható, megismételhető kvantitatív elemzésekhez a viselkedésközpontú és más tudományágakban is. Csak néhány nyílt hozzáférésű, automatizált nyomkövető szoftver van, amely képes nyomon követni a jelöletlen szervezeteket. Ezen szoftveralkalmazások közül néhányat jelentősen befolyásol a videófelvétel megvilágítási körülményeinek különbsége. Python-alapú szoftverünk, a BugTracker a számítógépes látástechnológiák legújabb innovációit használja ezen problémák megoldására. A jelentősen eltérő fényviszonyokkal rendelkező videók a BugTracker és más elérhető szoftverek elemzésével bebizonyítjuk, hogy szoftverünk bármilyen méretű és sebességű vizsgált organizmusokat megbízhatóan képes követni. Ezenkívül pontos eredményeket adnak a szervezet mozgásáról. A BugTracker a jelenleg elérhető legmegbízhatóbb, könnyen használható és automatizált nyomkövető szoftver, amely kompatibilis a Windows, Linux és MacOS operációs rendszerekkel.

8. Summary

*Microelement composition and morphometric differences of *Silpha tristis* individuals based on area pollution*

We demonstrated the metal accumulation potential of *Silpha tristis*, a carrion beetle belonging to the Silphidae family living in Europe and North Asia (except China) and North America, in moderately and heavily metal-contaminated areas. The investigated metal accumulation was examined for the entire body of the individuals. We calculated the value of the bioindication factor (BAF). We also subjected the individuals to a morphometric examination in order to study how a metal-contaminated soil as an environmental stress factor affects the morphometric development of a carrion beetle. More significant differences were observed in the case of males in the microelements of B and Ca and Sr. Also, in the case of males from sample area 2, the Cu concentration was significant. We showed that in the case of the highly polluted area, the antennomeres, the first and third tibia in the female beetles show significant differences. In the case of males, significant differences can be observed in the case of the membranous wing.

Meta-analysis of metallic elements accumulating in earthworm species

The responses of earthworms to excess soil element concentrations are well studied. However, published information on the metallic element accumulation in individuals is controversial. In this paper, the published data on earthworm As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn whole body concentrations were evaluated in individuals collected from contaminated and uncontaminated (control) soils, using *meta*-analyses. The role of soil pH and exposure time as potential influencing factors on metal accumulation was also assessed. Based on the evaluations, the accumulation of each metallic element was significantly

($p < 0.05$) more intensive in individuals collected from contaminated soils than in ones from control soils, with minor differences in the order of accumulation intensity among the studied metallic elements. Further, major interspecific differences were indicated in the accumulation, with different species being the most intensive accumulators for individual metallic elements. Among the studied metals, Cu concentration in earthworm bodies increased significantly with increasing soil pH. As for the exposure time-dependent accumulation, Pb concentration was found to decrease significantly with time in whole body tissues of earthworms. These results suggested a high variability in metal- and species-specific accumulation-excretion patterns of earthworms, influenced also by other external factors. Based on the results highlighted in this *meta-analysis*, accumulation schemes raise the need for further analyses involving other additional variables (e.g., soil type, organic matter content, climatic condition) to get a better understanding of element cycle-earthworm relations.

BugTracker: Software for Tracking and Measuring Arthropod Activity

The automated video tracking of the activity/movement of an experimental organism is essential for reliable, repeatable quantitative analyses in behavioral ecology and also in other disciplines. There are only some open-access, open-source automated tracking software applications that can track unmarked organisms. Moreover, several of these software applications are substantially affected by brightness and differences in the lighting conditions of the video recording. Our Python-based software, called BugTracker, uses the latest innovations in computer vision technologies to solve these problems. By analyzing videos with considerably different lighting conditions with BugTracker and other available software, we demonstrate that our software could reliably track the studied organisms of any size and speed. Additionally, the results provide accurate measures of the organism's

movements. BugTracker is the most reliable currently available, easy-to-use, and automated tracking software compatible with the Windows, Linux, and MacOS operating systems.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet nyilvánítani Prof. Dr. Tóthmérész Bélának, hogy lehetőséget biztosított a MTA-DE Biodiverzitás Kutatócsoportban való munkához és végig hatalmas segítséget nyújtott a disszertációm elkészülésében. Illetve köszönettel tartozom Prof. Dr. Magura Tibor Györgynek és Dr. Tózsér Dávidnak a segítségért, valamint témavezetőmnek Dr. Mizser Szabolcsnak.

Végül de nem utolsó sorban Málík Tamásnak, aki mind szakmailag mind férjként támogatott.

Irodalomjegyzék

- Aleagha and Ebadi, M.M. Aleagha, A.G. Ebadi Study of heavy metals bioaccumulation in the process of vermicomposting Afr. J. Biotechnol., 10 pp. 6997-7001, (2011)
- Alluri H.K., Ronda S.R., Settalluri V.S., Bondili J.S., Suryanarayana V., P. Venkateshwar Biosorption: An eco-friendly alternative for heavy metal removal Afr. J Biotechnol., 6 (25) pp. 2924-2931 (2007)
- Andreani G., Ferlizza E. Cabbri R., Fabbri M., Bellei E., Isani G., Essential (Mg, Fe, Zn and Cu) and Non-Essential (Cd and Pb) Elements in Predatory Insects (*Vespa crabro* and *Vespa velutina*): A Molecular Perspective, Int. J. Mol. Sci., 22(1), (2021)
- Antoniadis, S.M. Shaheen, E. Levizou, M. Shahid, N.K. Niazi, M. Vithanage, Y.S. Ok, N. Bolan, J. Rinklebe A critical prospective analysis of the potential toxicity of trace element regulation limits in soils worldwide: are they protective concerning health risk assessment? - A review Soil Sediment Contam., 127 pp. 819-847. (2019)
- Arnot, J.A. & Gobas, F.A.P.C. A review of bioconcentration factor(BCF) and bioaccumulation factor (BAF) assessments for organic chemicals in aquatic organisms. Environmental Reviews 14: 257–297.(2006)
- Avgin, S.S. & Luff, M.L. Ground beetles (Coleoptera: Carabidae) as bioindicators of human impact. Munis Entomology & Zoology 5: 209–215. (2010)
- Bahattin Gumgum, Gulsen Ozturk Chemical speciation of heavy metals in the Tigris River sediment, Chemical Speciation and Bioavailability 13(1):25-29(2001)
- Bátori, Z.; Gallé, R.; Gallé-Szpisjak, N.; Császár, P.; Nagy, D.D.; Lőrinczi, G.; Torma, A.; Tölgyesi, C.; Maák, I.E.; Frei, K.; et al. Topographic

- depressions provide potential microrefugia for ground-dwelling arthropods. *Elem. Sci. Anthr.*, 10, 00084. (2022)
- Bohn, H.L. Soil absorption of air pollutants. *Journal of Environmental Quality* 1: 372–377(1972)
- Borenstein M., Hedges LV., Higgins JPT., Rothstein HR. (szerk.), *Introduction to meta-analysis, Statistics and Data Science*Wiley (2009)
- Boros I., Dudich E.,Kotlán S. és Soós L.,*Magyarország állatvilága Fauna Hungariae*, 1. Füzet Holyvaalakúak I. és Staphylinoida I. Budapest, Akadémia Kiadó (1961).
- Bożym M. Heavy metal content in compost and earthworms from home composters *Och. Sr.*, 28 (2017), pp. 1-4, (2017)
- Byrd, J. H., and J. L. Castner. 2009. *Forensic Entomology The Utility of Arthropods in Legal Investigations*. CRC Press, Boca Raton, FL. (2009)
- Cachada A., A C Dias A C, Pato P., Mieiro C., Rocha-Santos T., Pereira M.E., Ferreira E.S., Duarte A. Major inputs and mobility of potentially toxic elements contamination in urban areas, *Environ Monit Assess.* Jan;185(1):279-94. (2013)
- Carola, V., D'Olimpio, F., Brunamonti, E., Mangia, F. & Renzi, P. Evaluation of the elevated plus-maze and open-field tests for the assessment of anxiety-related behaviour in inbred mice. *Behav. Brain Res.* 134, 49–57 (2002)
- Censi P., Spoto S.E., Saiano F., Sprovieri M., Mazzola S., Nardone G., Geronimo S.I. Di, Punturo R., D. Ottonello Heavy metals in coastal water systems. A case study from the northwestern Gulf of Thailand *Chemosphere*, 64 (7) pp. 1167(2006)
- Charabidze, D., M. Gosselin, and V. Hedouin. Use of necrophagous insects as evidence of cadaver relocation: myth or reality? *PeerJ.* 2017: 1–32. (2017)

- Cortet, J., Gomot-De Vauflery, A., Poinso-Balaguera, N., Gomotb, L., Texier C., & Daniel C. The use of invertebrate soil fauna in monitoring pollutant effects. *European Journal of Soil Biology* 35: 115– 134 (1999)
- Cote, J.; Clobert, J.; Fogarty, S.; Sih, A. Personality-dependent dispersal: characterization, ontogeny and consequences for spatially structured populations *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 365, 4065–4076. (2010)
- Delgado Arroyo, R. Miralles De Imperial Hornedo, F. Alonso Peralta, C. Rodríguez Alvestre, J.V. Martín Sanchez Heavy metals concentration in soil, plant, earthworm and leachate from poultry manure applied to agricultural land *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 30 pp. 43-50(2014)
- Del Re, A.C., Hoyt, W.T., 2014. MAD: Meta-analysis with mean with mean differences. R package version 0.8-2. URL: <http://cran.r-project.org/web/packages/MAD>
- Dell, A. I. et al. Automated image-based tracking and its application in ecology. *Trends Ecol. Evol.* 29, 417–428 (2014)
- Dell, A.I.; Bender, J.A.; Branson, K.; Couzin, I.D.; de Polavieja, G.G.; Noldus, L.P.J.J.; Pérez-Escudero, A.; Perona, P.; Straw, A.D.; Wikelski, M.; et al. Automated image-based tracking and its application in ecology. *Trends Ecol. Evol.*, 29, 417–428. (2014)
- Di Carlo E., Boullemant A, Poynton H, Courtney R. Exposure of earthworm (*Eisenia fetida*) to bauxite residue: Implications for future rehabilitation programmes *Sci. Total Environ.*, 716 Article 137126 (2020)
- Eötvös, C.B.; Magura, T.; Lövei, G.L. A meta-analysis indicates reduced predation pressure with increasing urbanization. *Landscape Urban Planning*, 180, 54–59. (2018)

- Farkhodov, K.; Lee, S.H.; Kwon, K.R. Object Tracking using CSRT Tracker and RCNN. In Proceedings of the BIOIMAGING, Valletta, Malta, pp. 209–212 (2020)
- Frederik H., Jean-Pierre M., Nicolas B., Catarina T., Gijs D.L., Filip M.G T., Marc G .V., The importance of biological factors affecting trace metal concentration as revealed from accumulation patterns in co-occurring terrestrial invertebrates Author links open overlay panel Environmental Pollution Volume 127, Issue 3, February, Pages 335-341(2004)
- Gál, J., Markiewicz-Patkowska, J., Hursthouse, A. & Tatner, P. Metal uptake by woodlice in urban soils. Ecotoxicology and Environmental Safety 69: 139–149. (2008)
- Gerhardt A. Gerhardt, A. (2002) Bioindicator Species and Their Use in Biomonitoring. Environmental Monitoring—Vol. I—Bioindicator Species and Their Use in Biomonitoring, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). UNESCO United Kingdom Eolss Publishing (2002)
- Godet, J.P., Demuynck, S., Waterlot, C., Lemièrre, S., Souty-Grosset, C., Scheiffler, R., Douay, F., Leprêtre & A., Pruvot, C.: Growth and metal accumulation in *Porcellio scaber* exposed to poplar litter from Cd-, Pb-, and Zn-contaminated sites. Ecotoxicology and Environmental (2011)
- Graham, J.H.; Raz, S.; Hel-Or, H.; Nevo, E. Fluctuating asymmetry: Methods, theory, and applications. Symmetry, 2, 466–540. (2010)
- Hajar, R. Animal testing and medicine. Heart. Views 12, 42 (2011)
- Harms RH, Buresh RE Influence of three levels of copper on the performance of turkey poults with diets containing two sources of methionine. Poult Sci 66(4):721–724. (1987)
- Hartenstein R., Neuhauser E.F., Narahara A. Effects of heavy metal and other elemental additives to activated sludge on growth of *Eisenia foetida* J. Environ. Qual., 10 pp. 372-376, (1981)

- Helmers, E., Wilk, G. & Wippler, K. Lead in the urban environment studying the strong decline in Germany. *Chemosphere* 30: 89 –101(1995)
- Hashemi H., Khodabakhshi A., Alinia B., Abbasi F. Bioremediation of lead and zinc contaminated soils by compost worm *J. Health Sci. Surveillance Sys.*, 6 pp. 58-63, (2018)
- Hilborn R., Stearns S.C. On inference in ecology and evolutionary biology: the problem of multiple causes *Acta Biotheoretica*, 31, pp. 145-164 (1982)
- Holt, E. A. & Miller, S. W. Bioindicators: Using Organisms to Measure Environmental Impacts. *Nature Education Knowledge* 3(10):8 (2010)
- Hussain N., Chatterjee S.K., Maiti T.K., Goswami L., Das S., Deb U., Bhattacharya S.S., Metal induced non-metallothionein protein in earthworm: A new pathway for cadmium detoxification in chloragogenous tissue *Journal of Hazardous Materials*, 401 (2020)
- James E. Frew and Jeff Dozier Bren Environmental Informatics School of Environmental Science and Management, University of California, Santa Barbara, California 93106-5131 (2012)
- Jones, D.T. & Hopkin, S.P. Reduced survival and body size in terrestrial isopod *Porcellio scaber* from a metal-polluted environment. *Environmental Pollution* 90: 215–233.(1998)
- Jones, K.A.; Godin, J.G.J. Are fast explorers slow reactors? Linking personality type and anti-predator behaviour. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 277, 625–632.(2010)
- Jones, Z.M. Git/GitHub, transparency, and legitimacy in quantitative research. *Political Methodol.* 21, 6–7. (2013)
- Kádár, I. & Koncz, J. Effect of traffic and urban-industrial load on soil. *Acta Agronomica Hungarica* 42: 155-161(1993)
- Kádár, I. A talaj–növény–állat–ember tápláléklánc szennyeződésekémiai elemekkel Magyarországon. Akaprint. KTM, MTA TAKI, Budapest(1995)

- Kerr, J.T.; Currie, D.J. Effects of human activity on global extinction risk. *Conservation Biology*, 9, 1528–1538. (1995)
- Klingenberg, C.P. A developmental perspective on developmental instability: Theory, models and mechanisms. In *Developmental Instability: Causes and Consequences*; Polak, M., Ed.; Oxford University Press: New York, NY, USA; pp. 14–34, (2003)
- Kortet, R.; Hedrick, A.N.N. A behavioural syndrome in the field cricket *Gryllus integer*: Intrasexual aggression is correlated with activity in a novel environment. *Biol. J. Linn. Soc.* 91, 475–482. (2007)
- Kristan, M.; Pflugfelder, R.; Leonardis, A.; Matas, J.; Porikli, F.; Cehovin, L.; Nebehay, G.; Fernandez, G.; Vojir, T.; Gatt, A.; et al. The Visual Object Tracking VOT2013 Challenge Results. In *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops*, Washington, DC, USA, 2–8 december 2013; IEEE: Piscataway, NJ, USA, pp. 98–111.(2013)
- Kristan, M.; Pflugfelder, R.; Leonardis, A.; Matas, J.; Cehovin, L.; Nebehay, G.; Vojir, T.; Fernandez, G.; Lukežič, A.; Dimitriev, A.; et al. The Visual Object Tracking VOT2014 Challenge Results. In *Proceedings of the Computer Vision—ECCV 2014 Workshops*, Zurich, Switzerland, 6–7 September 2014; ECCV 2014, Lecture Notes in Computer Science. Agapito, L., Bronstein, M., Rother, C., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, (2015)
- Labaude, S.; O'Donnell, N.; Griffin, C.T. Description of a personality syndrome in a common and invasive ground beetle (Coleoptera: Carabidae). *Sci. Rep.* 8, 17479. (2018)
- Lagisz, M. Changes in morphology of the ground beetle *Pterostichus oblongopunctatus* F. (Coleoptera; Carabidae) from vicinities of a zinc and

- lead smelter. *Environmental Toxicology and Chemistry* 27: 1744–1747.(2008)
- Łapiński S., Rosciszewska M., The impact of cadmium and mercury contamination on reproduction and body mass of earthworms *Plant Soil Environ.*, pp. 61-65 (2008)
- Latif R., Malek M, Mirmonsef H. Cadmium and lead accumulation in three endogeic earthworm species *B. Environ. Contam. Tox.*, 90, pp. 456-459 (2013)
- Laycock A., Diez-Ortiz M., Larner F, Dybowska A, Spurgeon D., Valsami-Jones E., Rehkämper M, Svendsen C., Earthworm uptake routes and rates of ionic Zn and ZnO nanoparticles at realistic concentrations, traced using stable isotope labeling *Environ. Sci. Technol.*, 50 pp. 412-419, (2016)
- Li C., Zhou K., Qin W., Tian C., Qi M., Yan X., Han W. A review on heavy metals contamination in soil: Effects, sources, and remediation techniques *Soil Sediment Contam.*, 28 pp. 380-394. (2018)
- Li, Z.; Yokoi, S.; Toriwaki, J.; Fukumura, T. Border following and reconstruction of binary pictures using grid point representation. *Trans. Inst. Electron. Commun. Eng. Jpn.* J65, 1203–1210. (1982)
- Liang, P.; Blasch, E.; Ling, H. Encoding color information for visual tracking: Algorithms and benchmark. *IEEE Trans. Image Proc.*, 24, 5630–5644. (2015)
- Lock K., Janssen C.R., Ecotoxicity of nickel to *Eisenia fetida*, *Enchytraeus albidus* and *Folsomia candida* *Chemosphere*, 46, pp. 197-200 (2002)
- Lonnerdal B Dietary factors influencing zinc absorption. *J Nutr* 130:1378-1383. 2000
- Lukezic, A.; Vojir, T.; Cehovin, L.; Matas, J.; Kristan, M. Discriminative Correlation Filter with Channel and Spatial Reliability. In *Proceedings of*

- the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Honolulu, HI, USA; pp. 6309–6318. (2017)
- Magura, T.; Horváth, R.; Mizser, S.; Tóth, M.; Nagy, D.D.; Csicsek, R.; Balla, E. Urban individuals of three rove beetle species are not more exploratory or risk-taking than rural conspecifics. *Insects*, 13, 757. (2022)
- Magura, T.; Lövei, G.L. Consequences of urban living: Urbanization and ground beetles. *Curr. Landscape. Ecology Rep.*, 6, 9–21 (2021)
- Maleque, M.A., Maeto, K. & Ishii, H.T. Arthropods as bioindicators of sustainable forest management, with a focus on plantation forests. *Applied Entomology and Zoology* 44: 1–11.(2009)
- Málík-Roffa H., Tózsér D., Tóthmérész B. Magura T. BugTracker: Software for Tracking and Measuring Arthropod Activity (2023)
- Málík-Roffa, H. Ízeltlábúak Viselkedés Kutatását Támogató Szoftver Fejlesztése Python Nyelven (Development of Software Supporting the Research of Arthropod Behavior in Python). GAMF Műszaki és Számítástechnikai Kar, Neumann János Egyetem, Kecskemét (2021)
- McIntyre, N.E. Urban ecology—Definitions and goals. In *The Routledge Handbook of Urban Ecology*; Douglas, I., Goode, D., Houck, M., Wang, R., Eds.; Routledge: London, UK; pp. 7–16. (2011)
- Millman, K. Jarrod and Aivazis, Michael Python for Scientists and Engineers Python for Scientists and Engineers. *Computing in Science & Engineering*, 13 (2). pp. 9-12. ISSN 1521-9615. (2011)
- Møller, A.P.; Swaddle, J.P. Asymmetry, Developmental Stability, and Evolution; Oxford University Press: Oxford, UK, (1997)
- Morrin II, T.H. Chain-link compression of arbitrary black-white image. *Comput. Graph. Image Process* 5, 172–189. (1976)
- Mueller, M.; Smith, N.; Ghanem, B. A Benchmark and Simulator for UAV Tracking. In *Computer Vision—ECCV 2016. ECCV 2016. Lecture Notes*

- in Computer Science; Leibe, B., Matas, J., Sebe, N., Welling, M., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, (2016)
- Nation, J. L. Insect physiology and biochemistry. CRC Press, Boca Raton, FL. (2015)
- Nirola R., Megharaj M., Subramanian A., Thavamani P., Ramadass K., Aryal R., Saint C. Analysis of chromium status in the revegetated flora of a tannery waste site and microcosm studies using earthworm *E. fetida* Environ. Sci. Pollut. R., 25 pp. 5063-5070, (2018)
- Oliphant, T. E. Python for Scientific Computing. Computing in Science & Engineering, 9(3), 10–20. (2007)
- Olton, D. S. Mazes, maps, and memory. Am. Psychol. 34, 583–596 (1979)
- Palmer, A.R Fluctuating asymmetry analyses: a primer. In Markow TA (ed) Developmental instability: its originals and evolutionary implications. Kluwer, Netherlands, pp 335-364.(1994)
- Palmer, A.R. & Strobeck, C. Fluctuating asymmetry as a measure of developmental stability: implications of non-normal distribution and power of statistical test. Acta Zoologica Fennica 191:57-72.(1992)
- Palmer, A.R. & Strobeck, C. Fluctuating asymmetry and developmental stability: heritability of observable variation vs. heritability of inferred cause. Journal of Evolutionary Biology 10: 39–49 (1997)
- Palmer, A.R.; Strobeck, C. Fluctuating asymmetry: Measurement, analysis, patterns. Annu. Rev. Ecol. Syst. 17, 391–421.(1986)
- Panadeiro, V.; Rodriguez, A.; Henry, J.; Wlodkowic, D.; Andersson, M. A review of 28 free animal-tracking software applications: Current features and limitations. Lab. Anim., 50, 246–254 (2021)
- Parmar, K.T., Rawtani, D. & Agrawal, Y.K.: Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution. Frontiers in Life Science 9: 110–118 (2016)

- Pavlidis, T. Algorithms for Graphics and Image Processing, 1st ed.; Computer Science Press, Inc.: Rockville, MY, USA (1982)
- Pesti Gene M., Bakllai Remzi I. Studies on the Feeding of Cupric Sulfate Pentahydrate and Cupric Citrate to Broiler Chickens Poultry Science, Volume 75, Issue 9, 1, Pages 1086-1091 (1996)
- Peterson WT. The effects of seasonal variations in stratification on plankton dynamics in long island sound, Marine Sciences Research Center SUNY Stony Brook Stony Brook, NY 11794 p.225-319 (1986)
- Phytoextraction with *Salix viminalis* in a moderately to strongly contaminated area Environmental Science and Pollution Research 25, pages3275–3290 (2018)
- Piwowar, H.A.; Day, R.S.; Fridsma, D.B. Sharing detailed research data is associated with increased citation rate. PLoS ONE 2, e308(2007)
- Podolak A., Piotrowska E., Klimek M, Klimek B.A., Kruk J., Plytycz B., Effects of nickel, zinc, and lead-contaminated soil on burrowing rate and coelomocytes of the earthworm, *Allolobophora chlorotica* Folia Biol-Krakow., 59 pp. 91-97, (2011)
- Polak, M. Developmental Instability: Causes and Consequences; Oxford University Press: New York, NY, USA, (2003)
- Pulli, K.; Baksheev, A.; Korniyakov, K.; Eruhimov, V. Real-time computer vision with OpenCV. Commun. ACM, 55, 61–69. (2012)
- Purchart, L. & Kula, E. 2007: Content of heavy metals in bodies of field ground beetles (Coleoptera: Carabidae) with respect to selected ecological factors. Polish Journal of Ecology 55: 305–314. (2007)
- Qubaiová J., Jakubec P., Montoya-Molina S., Novák M., Šuláková H., Influence of Diet on Development and Survival of *Thanatophilus rugosus* (Coleoptera: Silphidae, Journal of Medical Entomology, Volume 58, Issue 6, Pages 2124–2129 (2021)

- R: A language and environment for statistical computing R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria (2018) URL: <https://www.R-project.org/>
- R: A language and environment for statistical computing R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria (2023) URL: <https://www.R-project.org/>
- Réale, D.; Reader, S.M.; Sol, D.; McDougall, P.T.; Dingemanse, N.J. Integrating animal temperament within ecology and evolution. *Biol. Rev.* 82, 291–318. (2007)
- Rhee J.A.V. Development of earthworm populations in polder soils *Pedobiologia*, 9 pp. 133-140 (1969)
- Richardson J.B., Görres J.H., Sizmur T., Synthesis of earthworm trace metal uptake and bioaccumulation data: Role of soil concentration, earthworm ecophysiology, and experimental design *Environ. Pollut.*, 262, Article 114126, (2020)
- Ribbiera, I., Doledec, S., Downie, I.S. & Foster, G.N. Effect of land disturbance and stress on species traits of ground beetle assemblages. *Ecology* 82: 1112–1129. (2001)
- Richard, F.O.; Margaret, C.T. Monitoring animals' movements using digitized video images. *Behav. Res. Meth. Instr.* 20, 485–490. (1988)
- Rodriguez, A.; Henry, J.; Wlodkovic, D.; Andersson, M. A review of 28 free animal-tracking software applications: Current features and limitations. *Lab. Anim.* (2021)
- Rosenfeld, A.; Kak, A.C. *Digital Picture Processing*, 2nd ed.; Academic Press: New York, NY, USA, Volume 2 (1982)
- Stat J.. *Softw.*, Conducting meta-analyses in R with the metafor package 36 (pp. 1-48, 2010),

- Schuett, W.; Delfs, B.; Haller, R.; Kruber, S.; Roelfs, S.; Timm, D.; Willmann, M.; Drees, C. Ground beetles in city forests: Does urbanization predict a personality trait? *PeerJ* 6, e4360. (2018)
- Seehausen, O.; Alphen, J.J.M.; Witte, F. Cichlid fish diversity threatened by eutrophication that curbs sexual selection. *Science*, 277, 1808–1811. (1997)
- Sharma S, Nagpal A.K., Kaur I. Heavy metal contamination in soil, food crops and associated health risks for residents of Ropar wetland, Punjab, India and its environs *Food Chem.*, 255, pp. 15-22. (2018)
- Sih, A.; Bell, A.; Johnson, J.C. Behavioral syndromes: An ecological and evolutionary overview. *Trends Ecol. Evol.* 19, 372–378. (2004)
- Sih, A.; Ferrari, M.C.O.; Harris, D.J. Evolution and behavioural responses to human-induced rapid environmental change. *Evolutionary Applications.*, 4, 367–387. (2011)
- Silverman, J. L., Babineau, B. A., Oliver, C. F., Karras, M. N. & Crawley, J. N. Influence of stimulant-induced hyperactivity on social approach in the BTBR mouse model of autism. *Neuropharmacology* 68, 210–222 (2013)
- Simon, E., Harangi, S., Baranyai, E., Braun, M., Fábíán, I., Mizser, Sz., Nagy, L. & Tóthmérész, B.: Distribution of toxic elements between biotic and abiotic components of terrestrial ecosystem along an urbanization gradient: Soil, leaf litter and ground beetles. *Ecological Indicators* 60: 258–264.(2016)
- Skalski, T., Stone, D., Kramarz, P. & Lakowski, R. Ground beetle community responses to heavy metal stress. *Baltic Journal of Coleopterology* 10: 1–12 (2010)
- Smeulders, A.; Chu, D.; Cucchiara, R.; Calderara, S.; Dehghan, A.; Shah, M. Visual tracking: An experimental survey. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 36, 1442–1468 (2014)

- Spurgeon D. J., Lofts S., Hankard P.K., Toal M., McLellan D., Fishwick S., Svendsen C., Effect of pH on metal speciation and resulting metal uptake and toxicity for earthworms *Environ. Toxicol. Chem.*, 25, pp. 788-796, (2006)
- Suzuki, S.; Be, K. Topological structural analysis of digitized binary images by border following. *Comput. Vision Graph.*, 30, 32–46. (1985)
- Tózsér, D., Mizser, S., Karaffa, K., Málik-Roffa, H., Magura, T.: A meta-analysis-based evaluation of metallic element accumulation in earthworms *Environ. Int.* 169 1-9, (2022)
- Tózsér D., Gyomfajok fémakkumulációjának vizsgálata szennyezett területen *Természetvédelmi Közlemények* 24, 196-207 (2018)
- Trishala K. Parmar, Deepak Rawtani & Y. K. Agrawal Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution Pages 110-118 (2016)
- Underwood A.J. *Ecological Experiments: their logical design and interpretation using analysis of variance*, Cambridge University Press, Cambridge, UK (1997)
- Van Valen, L. A study of fluctuating asymmetry. *Evolution* 16, 125–142. (1962)
- Vineesh, C.; Nehemiah, S. A Review on using Python as a Preferred Programming Language for Beginners *Int. Res. J. Eng. Technol.* 8, 4258–4263. (2021)
- Walsh GE. 1978. Toxic Effects of Pollutants on Plankton Environmental Research Laboratory, United States Environmental Protection Agency Gulf Breeze Florida 32661, U.S.A (1978)
- Weller, B. & Ganzhorn, J.U. Carabid beetle community composition, body size, and fluctuating asymmetry along an urban-rural gradient. *Basic and Applied Ecology* 5: 193–201. (2004)

- Weltje L. Mixture toxicity and tissue interactions of Cd, Cu, Pb, and Zn in earthworms (*Oligochaeta*) in laboratory and field soils: a critical evaluation of data *Chemosphere*, 36 pp. 2643–2660, (1998)
- Wilczek, G., Babczynska, A., Wilczek, P., Dolezych, B., Migula, P. & Mlynska, H.: Cellular stress reactions assessed by gender and species in spiders from areas variously polluted with heavy metals. – *Ecotoxicology and Environmental Safety* 70: 127–137. (2008)
- Witzel, B. Die Eignung von *Porcellio scaber* Latr. (Isopoda) zum aktiven Monitoring von Blei- und Cadmiumimmissionen in anthropogen belasteten Ökosystemen. Ph.D. thesis, Free University Berlin (1992)
- Wong, B.B.M., Candolin, U. Behavioral responses to changing environments. *Behavioral Ecology* 26, 665–673. (2015)
- Wu, Y.; Lim, J.; Yang, M.H. Online object tracking: A benchmark. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Portland, OR, USA; IEEE: Piscataway, NJ, USA, pp. 2411–2418. (2013)
- Xiao R., Ali A., Xu Y., Abdelrahman H., Li R., Y. Lin, Bolan N., Shaheen S.M., Rinklebe J., Zhang Z. Earthworms as candidates for remediation of potentially toxic elements contaminated soils and mitigating the environmental and human health risks: A review *Soil Sediment Contam.*, 158, Article 106924. (2022)
- Xiao L., Li M.H., Dai J., Motelica Heino M., Chen X.F., Wu J.L., Zhao L., Liu K., Zhang C., Assessment of earthworm activity on Cu, Cd, Pb and Zn bioavailability in contaminated soils using biota to soil accumulation factor and DTPA extraction *Ecotox. Environ. Safe.*, 195, Article 110513, (2020)
- Yokoi, S.; Toriwaki, J.; Fukumura, T. An analysis of topological properties of digitized binary pictures using local features. *Comput. Graph. Image Process*, 4, 63–73. (1975)

- Zaller, J.G.; Kerschbaumer, G.; Rizzoli, R.; Tiefenbacher, A.; Gruber, E.; Schedl, H. Monitoring arthropods in protected grasslands: Comparing pitfall trapping, quadrat sampling and video monitoring. *Web Ecol*, 15, 15–23. (2015)
- Zhang W., Chen L., Liu K., Chen L., Lin K., Guo J., Liu L., Cui C., Yan Z. Lead accumulations and toxic effects in earthworms (*Eisenia fetida*) in the presence of decabromodiphenyl ether *Environ. Sci. Pollut. R.*, 21 pp. 3484-3490 (2014)
- Zödl B., Wittmann K.J, Effects of sampling, preparation and defecation on metal concentrations in selected invertebrates at urban sites, Volume 52, Issue 7, Pages 1095-1103(2003)

Függelék

9. függelék

