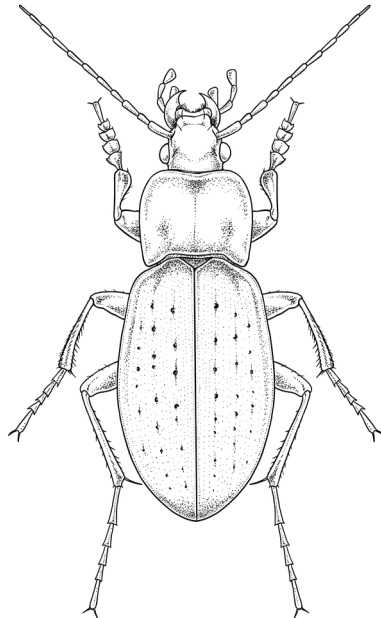


dc_2043_22

Erdők bogarai vagy bogarak erdeje? - Élőhely változások hosszú távú hatásai futóbogár-együttesek szerkezetére, a közösségi szinttől az egyedi viselkedésig



MTA Doktori értekezés tézisei

Elek Zoltán

2022

1. Előzmények, háttér

Nem tévedünk nagyot, ha azt állítjuk, hogy jóval több erdő borította Európát a korai holocénben, mint napjainkban (Fyfe et al. 2015). Az erdőborítás történelmi léptékű változásai nem írhatóak le egyszerű lineáris folyamatként, hanem inkább olyan markáns időszakokra bonthatók, amikor az erdőborítást hol a növekedés, hol pedig a csökkenés jellemezte (Desender et al. 1999). Azaz az európai kontinens tájképi változásai egy hosszú és komplex folyamatként jellemezhetőek, ahol a természetes élőhelyek, ezek közül is elsősorban az erdők helyét a legelők, szántók és az egyre csökkenő fás/erdős területek mozaikja vette át. Habár ebben a folyamatban több tényező is közrejátszott, egyet biztosan állíthatunk, hogy a természetes folyamatok dominálta állapotot lassan felváltotta az emberi beavatkozások által uralt környezeti állapot. Ebben a történelmi folyamatban kulcsszerepe van az emberi népesség folyamatos növekedésének, amihez elengedhetetlen a mezőgazdaság fejlesztése/térnyerése, hiszen egyre több legelőre, szántóföldre van szükség a megfelelő szintű élelmezés biztosításához, illetve egyre több nyersanyag, faanyag és terület szükséges a megfelelő lakókörülmények biztosításához (Fyfe et al. 2015). Napjainkban az Európai Unió területén az erdőterületek aránya 43.5 %, amelynek csupán 4%-a tekinthető természetes erdőnek, ahol a természetes folyamatok és a természetes erdőszerkezeti viszonyok az uralkodóak (European Commission 2021). Ezekben az erdőkben a durva léptékű zavarások, mint a széldöntés vagy az erdőtüzek és a finom léptékű zavaró hatások, mint a spontán lék dinamika biztosítják a szerkezeti heterogenitást állományi- és tájképi szinten egyaránt (Bengtsson et al. 2000). Az erdőművelési technológiákban tapasztalható progresszív technikai fejlődésnek, valamint a vágásos üzemmód által okozott rendszeres zavarásnak köszönhetően pedig a biológiai sokféleség csökkenése tapasztalható a kezelt erdőben (Bengtsson et al. 2000, Hermy & Verheyen 2007, Vanbergen et al. 2005). Az európai erdőgazdálkodásban népszerű vágásos üzemmód egyik fő jellemzője, hogy homogén szerkezetű, egykorú erdőállományokat alakít ki, ahol hiányoznak a faállományhoz köthető mikro-habitatok, mint például az öreg odvas fák, álló- és fekvő holtfák, rönkök, tuskók, gyökértányérok. Azonban ezek a kezelt erdőségek is nagyban hozzájárulhatnak a biológiai sokféleség megőrzéséhez, hiszen számos erdei specialista fajnak adnak otthont (European Commission 2021).

Az elmúlt évtizedekben új kezdeményezések láttak napvilágot az erdőgazdálkodásban, amelyek a fakitermelés mellett a természeti folyamatok és a biológiai sokféleség fenntartását is célul tűzték ki. Ezek a célok megvalósíthatóak például az idős erdők tulajdonságainak fenntartásával (Bauhus et al. 2009, Pommerening & Murphy 2004), a folyamatos erdőborítást biztosító erdőgazdálkodással, a hagyásfacsoportok kialakításával (Lindenmayer et al. 2012, Mori & Kitagawa 2014), vagy akár a

természetes zavarásokat imitáló ún. „close-to-nature forestry” gazdálkodási formákkal (Bengtsson et al. 2000). A különböző megközelítésekben alapvető fontosságú annak feltárása, hogy a profitorientált erdőgazdálkodást hogyan lehet összehangolni olyan kezdeményezésekkel, ahol a biológiai sokféleség megőrzése az erdőgazdálkodás szerves részét képezi.

A emberi társadalomban lezajló progresszív gazdasági fejlődésnek köszönhetően a városias településformák, mint például a kisvárosok, nagyvárosok, a megapoliszok világszerte a fő és az egyetemes élettérre váltak. A 20. században az urbanizáció lett a leggyorsabb és legjelentősebb hajtóereje az élőhely-változásoknak szerte a világon. A városokban jellemzően nagy az embersűrűség, az energiakonzentráció, a szennyezés, és az eredeti természetes élőhelyeknek csak a maradványfoltjai találhatóak meg (McIntyre et al. 2001). Európa évszázadokon keresztül fokozatosan növekvő, mára nagyszámú, emberi populációt tartott és tart el és az eredeti természeti környezetet, beleértve a természetközeli erdőket is, sokféleképpen alakították át. A beépített területek kiterjedésével csökkent a természetes élőhelyek aránya, ezzel megváltoztatva például az erdők szerkezetét és méretét, és ezen keresztül a környezeti feltételeket is (Meyer et al 2020a). Az erdők az urbanizálódó tájkép egyik kulcsélőhelyei, hiszen olyan fontos ökoszisztéma-szolgáltatásokat nyújthatnak, mint a vízvisszatartás, a klímaszabályozás, a levegőtisztítás, illetve a hosszú távú szén- és nitrogénmegkötés (Meyer et al. 2020b, Elmqvist et al. 2015). Az olyan sűrűn lakott európai országokban, mint például Dániában, alig maradt természetközeli élőhely, ezért is fontos ezek megőrzése, hatékony védelme. Azonban a megmaradó biológiai sokféleség megőrzéséhez ismerni kell az ökoszisztémáknak az urbanizációra adott válaszait is (McDonnell & Pickett 1990). Az urbanizáció természetére gyakorolt hatásait az ökoszisztémák szerkezetének és működésének a város-előváros- természetes élőhely gradiensek mentén történő komparatív vizsgálatával lehet felmérni (McDonnell & Pickett 1990). A Globenet nemzetközi kutatási projekt célja az volt, hogy különböző országokban összehasonlítható vizsgálatok keretében felmérje az urbanizáció biodiverzitásra gyakorolt hatásait (Niemelä et al. 2000). Ez a projekt az urbanizációs gradiens megközelítést alkalmazta egy közös módszertani eszköztárral több népszerű modelltaxon urbanizációra adott válaszainak értékelésével. Az erdők vagy más fás élőhelyek tanulmányozásánál fontos a különböző élőhely-változások és az erdei élőlények közötti kölcsönhatások vizsgálata is a lehetséges ökológiai következmények feltárására (Christensen & Emborg 1996, Paillet et al. 2018). A talajfelszíni ragadozó ízeltlábúak közül a futóbogarak (Coleoptera: Carabidae) jó indikátorai a fás élőhelyeket átalakító hatásoknak (Niemelä et al. 2007). Ez az élőlénycsoport viszonylag rövid generációs idővel rendelkezik (Thiele 1977, Lövei & Sunderland 1996) és magas funkcionális pozíciót foglal el a táplálékhálózatban (Wootton 1998), ami lehetővé teszi, hogy komplexen reagáljon a környezeti változásokra. Közösségeik fajösszetétele és szerkezete érzékeny az

erdőállományok szerkezeti komplexitására különböző időbeli és térbeli léptékeken (Negro et al. 2008, Niemelä et al. 2007). Korábbi vizsgálatok igazolták, hogy az erdei futóbogár közösségek fajkompozíciója változik leginkább, míg a faj- és egyedszámban bekövetkező változás nem egyértelmű, inkább szezonális mintázatot mutat (Heikkala et al. 2016, Koivula et al. 2019, Yamanaka et al. 2021). A futóbogár közösségek fajösszetételének változásai jól tükrözik az erdei ökoszisztémákban betöltött funkcionális szerepüket, mivel funkcionális jellegeik nagymértékben kapcsolódnak taxonómiai identitásukhoz a csoport monofiletikus leszármazási viszonyai miatt (Magura 2017, Magura & Lövei 2019).

A funkcionális jellegek használata elősegíti a forráshasználat, a diszperzió és szaporodás közösségformáló erejének feltárását. Schirmel et al. (2012) kimutatta, hogy a funkcionális tulajdonságok hozzájárulhatnak a környezeti szelekció tulajdonság alapú megvalósulásához. Bár a funkcionális tulajdonságok elemzése közvetett módon becslést adhat az ökoszisztéma funkciókról, használatuk inkább a fajpopuláció szinten alkalmazható hatékonyan (Murray et al. 2017). A funkcionális diverzitási mérőszámok biztosíthatják a zavarás közösségi szintű folyamatokra és az ökoszisztéma funkciók változásaira gyakorolt hatásainak feltárását. Korábbi vizsgálatok a funkcionális diverzitás standardizált módszereivel (Murray et al. 2017, Nolte et al. 2017, Schirmel et al. 2012) értékelték a zavarásra adott funkcionális diverzitás mintázatokat a különböző erdős élőhelyeken és taxonómiai csoportokban. Ezek a tanulmányok igazolták, hogy a futóbogár együttesek funkcionális diverzitása közvetlen kapcsolatot jelent a környezet és a fontosabb ökoszisztéma funkciók között, és taxon függő lehet. Fontos kiemelni, hogy az ökológiai vizsgálatok egyre nagyobb hangsúly fektetnek az ökoszisztémák funkcionális aspektusainak bemutatására. Habár a közösségi szintű metrikákat széles körben használják a közösségökológiában, új szempontok jelentek meg a rovarökológiában, amelyek jól reflektálnak az ökoszisztéma funkciókra, ilyen lehet az egyedi viselkedésen alapú módszerek használata, például az egyedi mozgásmintázat és predációs nyomás, mint az egyedi viselkedés leírói. A predációs nyomás becslése jól reflektál a kockázatfüggő élőhelyhasználatra, akár táplálkozásra, szaporodásra vagy áttelelésre. Ennek pontos igazolásához azonban elsődleges a bogarak tér-időbeli élőhelyhasználatának ismerete. Azaz a klasszikus talajcsapdás mintavételi módszerek mellett más, alternatív módszereket is célszerű alkalmazni, például rádiójeladás nyomon követést vagy akár fogás-jelölés-visszafogás technikákat. Az egyedi viselkedésen alapuló vizsgálatok természetvédelmi szempontból fontosak lehetnek a védelmi szempontból fontos kulcsélőhelyek kijelöléséhez. Mindezekon túlmenően ezen nem túl népszerű/gyakori technikák segíthetnek abban is, hogy azonosítsuk a lehetséges tudásbeli hiányosságokat annak megértésében, hogy az állatok egyedi viselkedése hogyan általánosítható a közösségi szintű folyamatok dinamikájának megértéséhez.

2. Az értekezés felépítése, motivációja, kérdései

A doktori mű három fő részből áll. Az *első fejezetben az urbanizáció hatását tekintem át erdei élőhelyeken*. A vizsgálat helyszínén egy növekvő város fokozatosan körülvette és feldarabolta a korábban egységes erdőállományt. A napjainkban is népszerű városökológiai kutatások olyan korszakából származó rovarökológiai vizsgálatok kerülnek bemutatásra, amikor a városokra még úgy tekintettek, mint a biológiai sokféleség egyik legnagyobb károkozójára. Ebben az időszakban a városi zöld infrastruktúrák fejlesztése még gyerekcipőben járt, pontosabban inkább a tervek, ideák szintjén létezett.

A második fejezetben a féltermészetes erdők, természeti erőforrásként, „nyersanyagként” való használatát veszem górcső alá. Az egyik legfontosabb kérdés, hogy hogyan lehet az erdőgazdálkodás és a természetmegőrzés igényeit összeegyeztetni mindkét fél számára előnyös módon. Elengedhetetlen egy olyan erdőgazdálkodási gyakorlat kialakítása, ami lehetővé teszi ezen természeti kincs fenntartható módon történő használatát a jelen és a jövő generációi számára. Az egyes alfejezetekben bemutatott kutatások rávilágítanak arra, hogyan befolyásolják az egyes erdészeti fahasználatok a futóbogár közösségek és egyes populációik szerkezetét többféle megközelítés alapján.

A harmadik fejezetben olyan módszertani megoldások, innovációk kerülnek bemutatásra, amelyek az egyes kutatások során kerültek kifejlesztésre vagy tesztelésre. A kutatói munka velejárója, hogy a meglévő módszereket, protokollokat időről-időre szükséges újragondolni, kalibrálni kell a jelenkor, vagy az adott kutatás kihívásainak megfelelően. Kutatásaim során, kollégáimmal együtt, egy matematikai-statisztikai grafikus módszer ökológiai alkalmazhatóságát teszteltük, illetve módszertani protokollt dolgoztunk ki a kis térléptékű mozgási adatok felvételére vonatkozóan, azonosítva a módszertani előnyöket és hátrányokat.

A fent bemutatott fejezetekben a közös az, hogy a már elfogadott és széles körben alkalmazott közösségi szintű vizsgálatok mellett az egyedi/fajpopuláció szintű, akár viselkedésbeli, változások nyomon követésére is alkalmas hipotéziseket tesztel. A közösségi szintű vizsgálatokban sokszor alkalmazott mérőszámok, mint a faj- és egyedszám, fajösszetétel és klasszikus és funkcionális diverzitási indexek, robusztus válaszokat adnak az egyes ökológiai jelenségekre. A faj/populáció szintű vizsgálatok azonban jóval közvetlenebb visszajelzést adnak a környezet állapotáról. Még ma sem tudjuk pontosan, hogy a két említett szerveződési szinten tesztelt mintázatok és azok

mérőszámai milyen kapcsolatban állnak egymással, azaz hogyan használhatóak az egyedi/populáció szintű kutatások eredményei standard módon a közösségökológiai vizsgálatok tervezésére a rovarökológiában (például az egyedi mozgásmintázok hogyan hatnak az aktivitás-denzitás becslésére).

3. Alkalmazott módszerek

3.1. Urbanizációs vizsgálatok – a Danglobe projekt

Az urbanizáció által érintett erdős élőhelyek vizsgálatára Sorø városában (2003-ban kb. 7000 lakos), illetve annak közvetlen környékén került sor, a dániai Zéland szigetén, Koppenhágától 80 km-re nyugatra. Három élőhelytípust vizsgáltunk a Globenet protokoll szerint: természetközeli erdő, városszéli erdőfoltok és egy városi fás park. Mindhárom területnek azonos a tájtörténeti múltja, egy korábban összefüggő féltermészetes erdőállomány maradványai, amelyeket az urbanizáció számos erdőfoltra tagolt. A futóbogarak talajcsapdás mintavételére 2004 és 2005 április vége és október közepe között történt, a csapdaanyagok kétheti gyűjtésével. Az első vizsgálati évben a teljes csapdázási ráfordítás 2640 csapdahetet tett ki (120 csapda × 22 hét); csak nagyon kevés (< 10) csapda semmisült meg. A csökkentett mintavételi intenzitás hatásának vizsgálata érdekében 2005-ben két hétig üzemeltek a csapdák két hetes váltásban (ld. Sapia et al. 2006), így a teljes mintavételi ráfordítás 1440 csapdahetet tett ki (120 csapda × 12 hét). A kétéves gyűjtésből származó bizonyítópéldányok a Koppenhágai Egyetem (Dánia) Zoológiai Múzeumának Bogárgyűjteményében kerültek elhelyezésre. A 2004-ben gyűjtött fogásadatokat a közösségi szintű vizsgálatokhoz használtuk fel (2.1. fejezet¹). A kétéves fogásadatokat pedig a szezonális dinamikára (2.2. fejezet), a fejlődési instabilitásra (2.3. fejezet), beleértve a fluktuáló aszimmetriára (2.3.1. fejezet) és a fiziológiai kondícióra (2.3.2. fejezet) vonatkozó vizsgálatoknál használtuk fel. Továbbá a 4.1. fejezetben bemutatott új grafikus módszerekhez is felhasználtuk ezeket a kétéves fogásadatokat.

Az urbanizáció által érintett futóbogár együttesek fajkompozíciójában bekövetkező változások nyomon követése a nem metrikus skálázáson alapuló sokváltozós módszerekkel (NMDS) történt, a Sorensen távolságfüggvény használatával. A további numerikus elemzések esetében a futóbogarak habitataffinitásuk, táplálkozási típusuk és testméretük alapján kerültek osztályozásra. A három urbanizációs stádium között mutatkozó különbségek vizsgálatához a futóbogarak csapdánkenti aktivitás denzitás és fajszám adatait elemeztük hierarchikus variancia analízissel (nested ANOVA),

¹ Az egyes fejezethivatkozások a doktori műre vonatkoznak

a legkisebb szignifikáns különbség post-hoc teszttel (LSD) a többszörös összehasonlításokra vonatkozóan került meghatározásra. A futóbogár közösségek szezonális dinamikájának vizsgálatára az urbanizációs gradiens mentén az ún. „kvartilis” módszert alkalmaztuk (Fazekas et al. 1997), ahol a fogás adatokat (egyedszámok/gyűjtési periódus) átkonvertáltuk kumulatív skálára. Ez a módszer a kumulatív adatokat negyed részekre, azaz kvartilisekre bontva adja meg a főbb aktivitási periódus sarokpontjait. Amikor a kumulatív adatsor eléri a teljes gyűjtött egyedszám 50%-át, ez a pont adja az aktivitási csúcst. Míg a teljes kumulatív egyedszám 25%-os és 75% értéke adja a fő aktivitási periódus kezdeti, illetve végpontját. Ez az adatsor került használatra a 4.1 fejezetben, ahol a kvantilis görbék használatával hasonlítottuk össze a szezonális aktivitást az egyes urbanizációs stádiumokban.

Az egyedfejlődési instabilitás fajpopuláció-specifikus jellemzése során a méret korrigált, abszolút fluktuáló asszimmetria indexet (Palmer 1994), míg a fiziológiai kondíció leírására az ún. reziduális indexet használtuk (Gould 1975), ahol a testtömeget regresszáljuk a testméretre, és a reziduális értékekből becslést kapunk az fiziológiai állapotra (pl. Jakob et al. 1996). A tesztelt függőváltozók (fluktuáló asszimmetria hét vizsgált morfológiai jellegén és a kondíció index), valamint az urbanizációs gradiens és a három vizsgált faj ivarai, mint fix hatások, közötti összefüggés tesztelése általános lineáris modellel (GLM) történt, normál eloszlású hibatagot feltételezve, Tukey -féle post-hoc teszttel.

3.2. Erdőökológiai vizsgálatok – a Pilis kísérlet projekt

Egy hosszú távú vizsgálat keretében (2014-2018) a Pilis kísérletben (<https://piliskiserlet.colres.hu/>) arra kerestünk választ, hogy négyféle erdészeti kezelés [kezeletlen kontroll állományhoz viszonyítva: vágásterület, hagyásfacsoport, egyenletes bontás (vágásos üzemmód elemei), valamint lékvágás (örökerdő üzemmód beavatkozása)] hogyan hat a futóbogár együttesek (Coleoptera: Carabidae) szerkezetére illetve egyes fajpopulációikra. A vizsgálati terület a Pilis-hegységben (É 47° 40' és K 18° 54') egy 40 hektár nagyságú, egyenletes korú (80 éves) érett gyertyános-tölgyes erdő (Natura 2000 kód: 91G0). Az állományt vágásos üzemmódban kezelték, ahol a felső lombkoronaszint 21 m-es magasságában a kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl., mellmagassági átmérője 28 cm) dominált, a 11 m-es másodlagos lombkoronaszint pedig főként gyertyánokat (*Carpinus betulus* L.) tartalmazott. Az adatgyűjtés során a Before-After Control-Impact kísérleti elrendezést követtük, az összes vizsgált változót rögzítve a 2014-es vegetációs időszaktól (a kísérleti kezelések kialakítása előtt) egészen 2018-ig. Minden parcellában négy talajcsapda került kihelyezésre egy 5 m-es élhosszúságú négyzettrács csúcspontjaiban. Minden

évben tavasszal (júniusban) és ősszel (szeptemberben) egy-egy hónapig mintavételeztünk, ami megfelel a futóbogarak legnagyobb aktivitási időszakának (Sapia et al. 2006). Az egyedi mozgásmintázat nyomonkövetésére illetve a predációs nyomás vizsgálatára a kísérleti rendszer egyes részelemeiben került sor, a tarvágásokban, a bontásokban illetve az egyes kezelésekhez tartozó kontroll állományokban. Az egyedi mozgás mintázatát, a *Carabus coriaceus* erdei specialista faj 6 egyedén végeztük VHF jeladók [“PicoPip”, Biotrack Ltd, Wareham, England, (www.biotrack.co.uk)] segítségével 2018 őszén. A fajspecifikus predációs nyomás tesztelésére 3D nyomtatott makettek készültek a *C. coriaceus* faj egyedeiről, amelyeket az egyes kezelésekbe kihelyeztünk és a potenciális predációs markereket, nyomokat 2020 őszén és 2021 tavaszán vizsgáltuk meg.

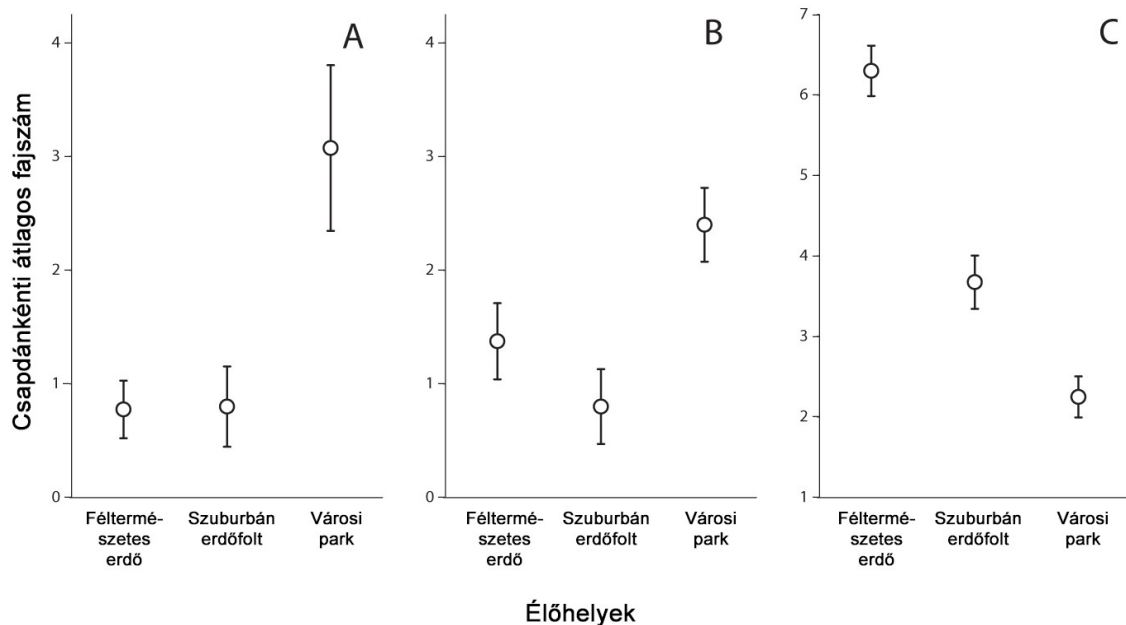
Az egyes erdészeti kezeléseknek a futóbogár együttesek fajösszetételre gyakorolt hatását főkomponens-elemzéssel (PCA) vizsgáltuk. A kezelések közötti különbségeket Permutációs többváltozós varianciaanalízissel (PERMANOVA) teszteltük, euklideszi távolságot használva. A fajok és a kezelések közötti kapcsolatokat az indikátorfaj-elemzés (IndVal) módszerével (Dufrene & Legendre 1997) végeztük el. A további elemzésekhez a futóbogarakat habitataffinitásuk, táplálkozási típusuk, testméretük és röpképességük alapján osztályoztuk. Ezen osztályozás alapján a Rao-féle kvadratikus entrópiát (Rao's Q) használtuk a funkcionális diverzitás leírására. Általánosított lineáris kevert modelleket (GLMM) használtunk az erdészeti kezelések hatásának vizsgálatára, ahol a kezelések és az évek hatását és azok interakcióit (fix hatásként tekintve), mint magyarázó változókat teszteltünk, míg random hatásként a kísérleti parcellák valós térbeli ismétléseit vettük figyelembe. A GLMM-ekben magyarázóváltozóként a fajgazdagságot és az egyedszámot, valamint a számított Rao's Q értékeket és a kiválasztott funkcionális csoportok abundanciáját vettük figyelembe. Az egyed mozgásmintázat elemzésére az ún. Rejtettláncú Markov modellek használtunk, melyek képesek az egyes mozgási fázisok közötti átmeneti valószínűségek standard módon történő becslésére, úgy, hogy közben figyelembe veszik az egyedi különbségeket is (Langrock et al. 2012). A predációs nyomás kvantitatív tesztelésére általánosított lineáris modelleket használtunk, ahol a számított predációs valószínűsége (a regisztrált támadások/és nem támadások aránya), mint függő változókra teszteltük a vizsgált erdészeti kezelések, illetve néhány fontosabb környezeti paraméter (csupasz talajfelszín aránya, avarborítás, lágyszárú- és cserjeszint borítás) hatását.

4. Eredmények

4.1 Futóbogarak a városban

4.1.1 Közösségi szintű mintázatok

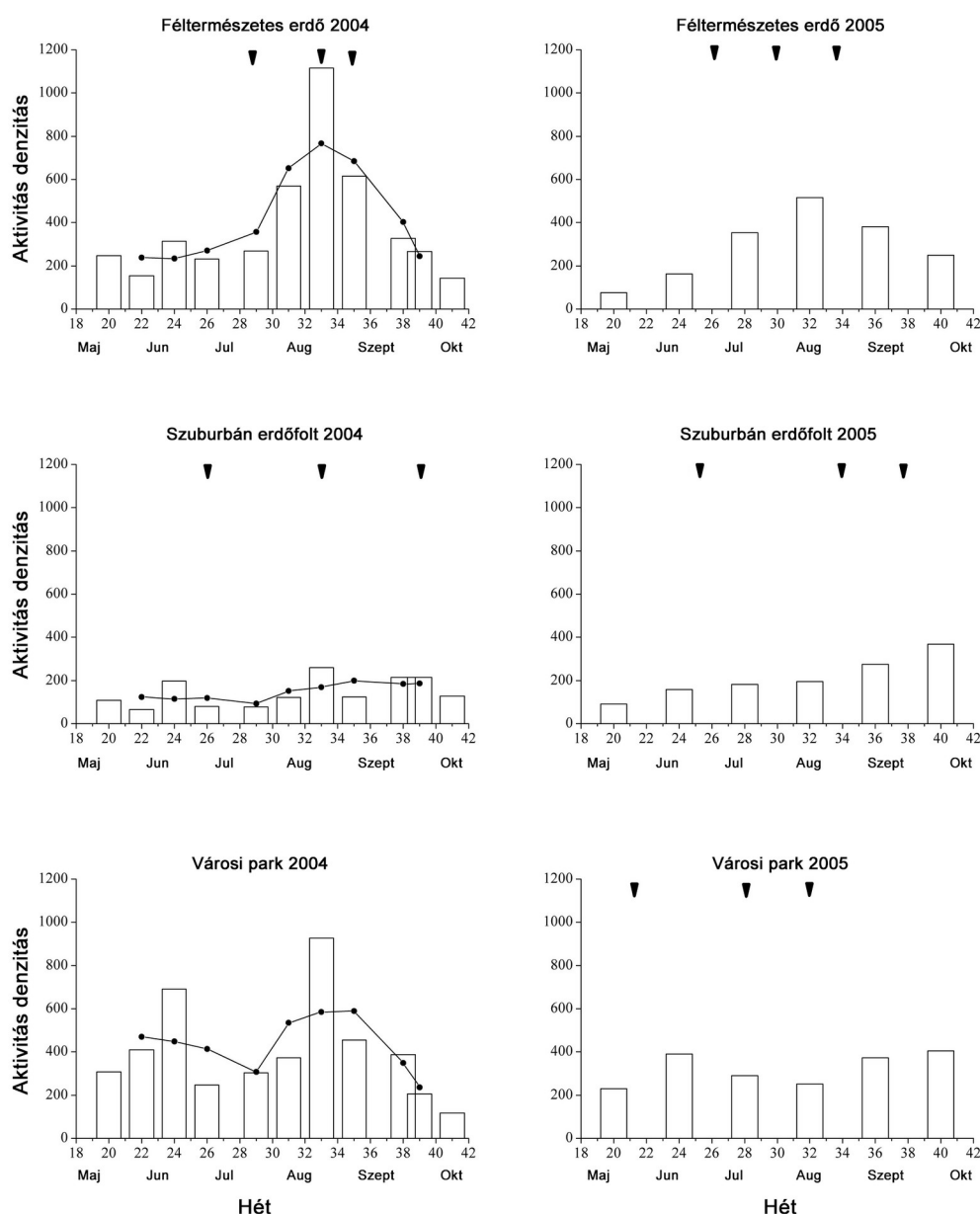
A városiasodás rovarközösség formáló hatása legjobban az egyes taxonok funkcionális jellegeinek vizsgálatával követhető nyomon. A futóbogarak esetén a testméret több szempontból is egy jól vizsgálható jelleg, hiszen jól kifejezi az egyes fajok diszperziós készsége közötti különbségeket. A kis testméretű futóbogárfajok döntően a nyílt élőhelyeket kedvelő és a generalista fajok zömét adják, míg a nagy testméretű fajok általában az élőhely specialista fajokat jelentik, ide tartoznak a röpképtelen nagytestű erdei *Carabus* fajok is. A dániai urbanizációs vizsgálat is igazolta, hogy a mozaikossá váló városi parkban megnőtt a kis és közepes testméretű fajok száma, ami főként a nyílt élőhelyeket kedvelő fajokat ($F_{2,108}=3.94$, $p<0.05$) és generalistákat ($F_{2,108}=6.79$, $p<0.01$) jelenti, míg a nagytestű erdei röpképtelen specialista fajok száma ($F_{2,108}=11.99$, $p<0.001$) a féltérmezetes erdőfoltban volt a legnagyobb (4.1.1.1 ábra).



4.1.1.1 ábra. A kis ($x < 9,5$ mm) (A), közepes ($9,6-15,1$ mm) (B) és nagy ($x > 15,2$ mm) (C) testméretű futóbogarak fajgazdagsága az urbanizációs gradiens mentén. Az üres körök az átlagokat, az intervallumok \pm SEM-t jelentenek.

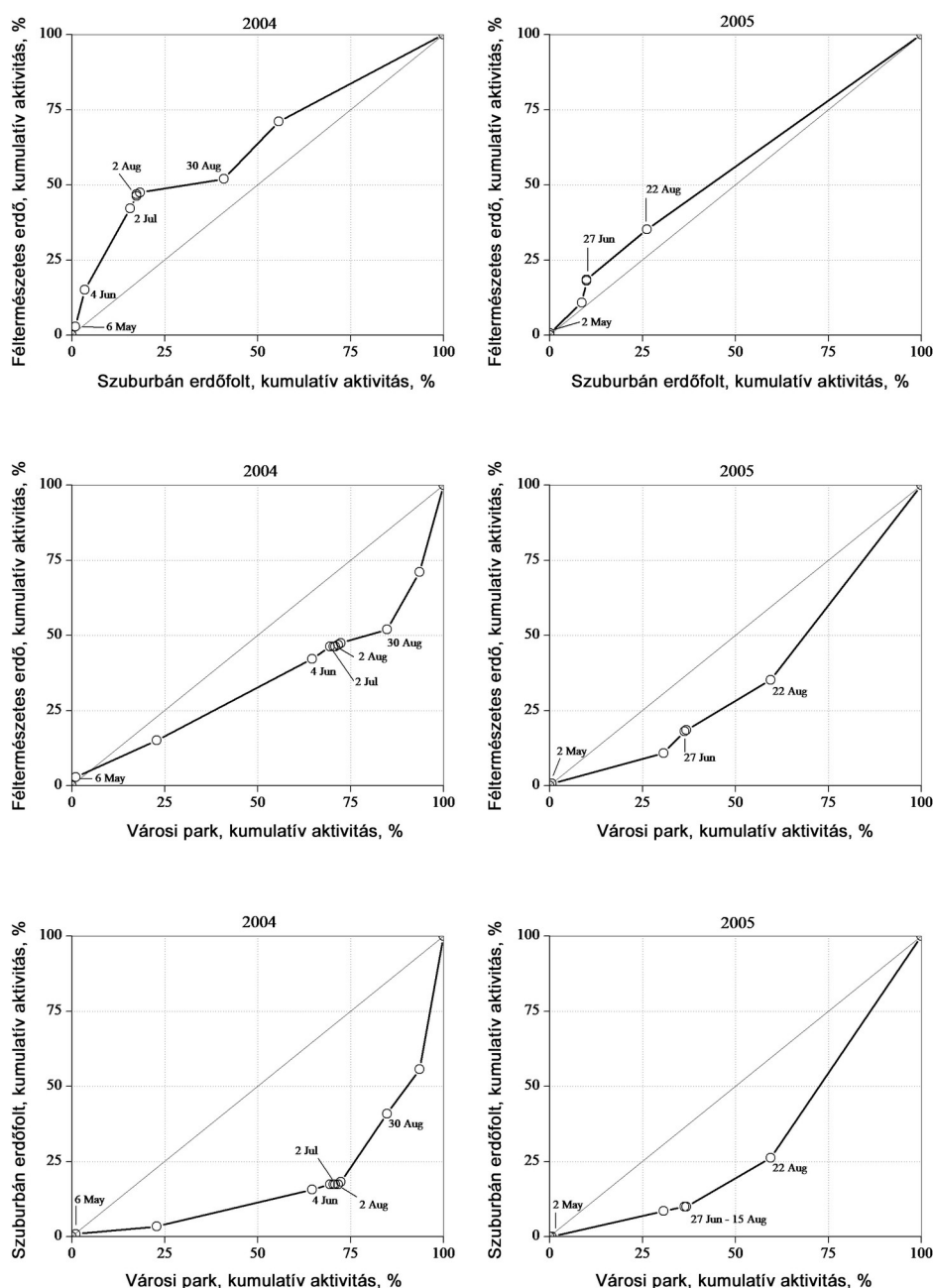
4.1.2 Az urbanizáció hatása a futóbogár együttesek szezonális dinamikájára

A urbanizáció egyik legjelentősebb környezeti hatása a városok körüli ún. hősziget hatás (McDonnell & Hahs 2015), amely az épített környezet általános és tartós melegítő hatására utal a hőszennyezés révén. Nem nehéz belátni, hogy ez a jelenség milyen módon hat a városi rovarokra, hiszen a megemelkedett átlaghőmérséklet egy időben kiterjedt aktivitáshoz vezethet összehasonlítva a természetes élőhelyen élővel (Elek et al. 2017*). Igazolást nyert, hogy a futóbogarak aktivitási periódusa megnőtt a városi élőhelyeken, bimodális aktivitási mintázat volt jellemző egy tavaszi és egy őszi aktivitási csúccsal. Ezzel ellentétben a féltérmezletes erdei élőhelyeken az aktivitás unimodális egy őszi aktivitási csúccsal (4.1.2.1 ábra).



4.1.2.1 ábra A futóbogarak szezonális dinamikája az urbanizációs gradiens mentén. A fekete nyilak a fő aktivitási periódus kezdetét, csúcspontját, illetve végét jelzik. Az oszlopok az aktivitási denzitást (egyedekek száma / csapda × két hét) jelzik a mintavétel teljes időszakában. A 2004-es ábrapaneleken a trendvonal három hetes adatokon alapuló csúszó átlagát jelzi. A 2005. évi adatokra csúszó átlagok nem lettek illesztve a kisebb mintavételi intenzitás miatt.

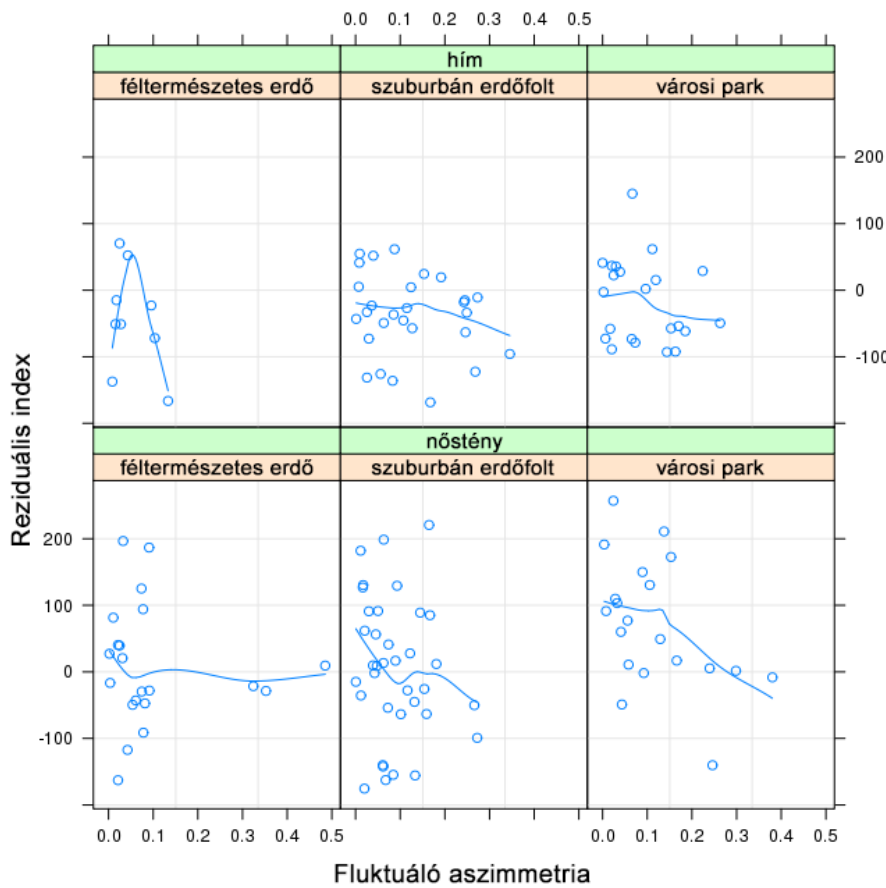
A quantilis-quantilis görbék alkalmazásával sikerült igazolni, hogy a *Nebria brevicollis* faj aktivitása a féltermészetes erdőfoltokban és az elővárosi erdőfragmentumokban hasonló volt, illetve az erdei élőhelyeken egy nyár végi magas aktivitási időszak volt jellemző (4.1.2.2. ábra). Ez a tendencia 2005-ben sokkal kifejezettebb volt. Az erdő-városi park összehasonlítása azt mutatta, hogy az imágók korábban voltak aktívak a városi, mint az erdei élőhelyen, és ez utóbbiban meredek őszi aktivitásnövekedést mutattak, különösen 2005-ben (4.1.2.2. ábra). A módszer segített feltárni, hogy a vizsgált faj egyedei átterjednek a szomszédos élőhelyekre abban az esetben, amikor ugrásszerűen megnő az egyedszámuk a városi élőhelyeken.



4.1.2.2. ábra A *Nebria brevicollis* összehasonlító aktivitási diagramjai az urbanizációs gradiens mentén.

4.1.3 Az egyedfejlődési instabilitás vizsgálata egy urbanizációs gradiens mentén

Az egyedfejlődési instabilitást a bilaterális jellegeken alapuló fluktuáló asszimmetriával (FA) és a fiziológiai kondíció indexszel (PC) lett becsülve. Az FA és az PC között általában negatív kapcsolat volt. A *C. nemoralis* esetében a kapcsolat meredeksége nagyobb volt, azaz az urbanizáltabb élőhelyeken (külvárosi erdőrészek és városi park), a magasabb FA értékhez rosszabb kondíció társult, mint az erdőben (4.1.3.1. ábra). Ez az összefüggés konzisztens volt az ivarok között is. A *N. brevicollis* esetében hasonló mintázatot tapasztaltunk, azonban *P. melanarius* esetében sem az élőhelytípusok, sem a nemek esetében nem találtunk következetes mintázatot a FA és a PC között.

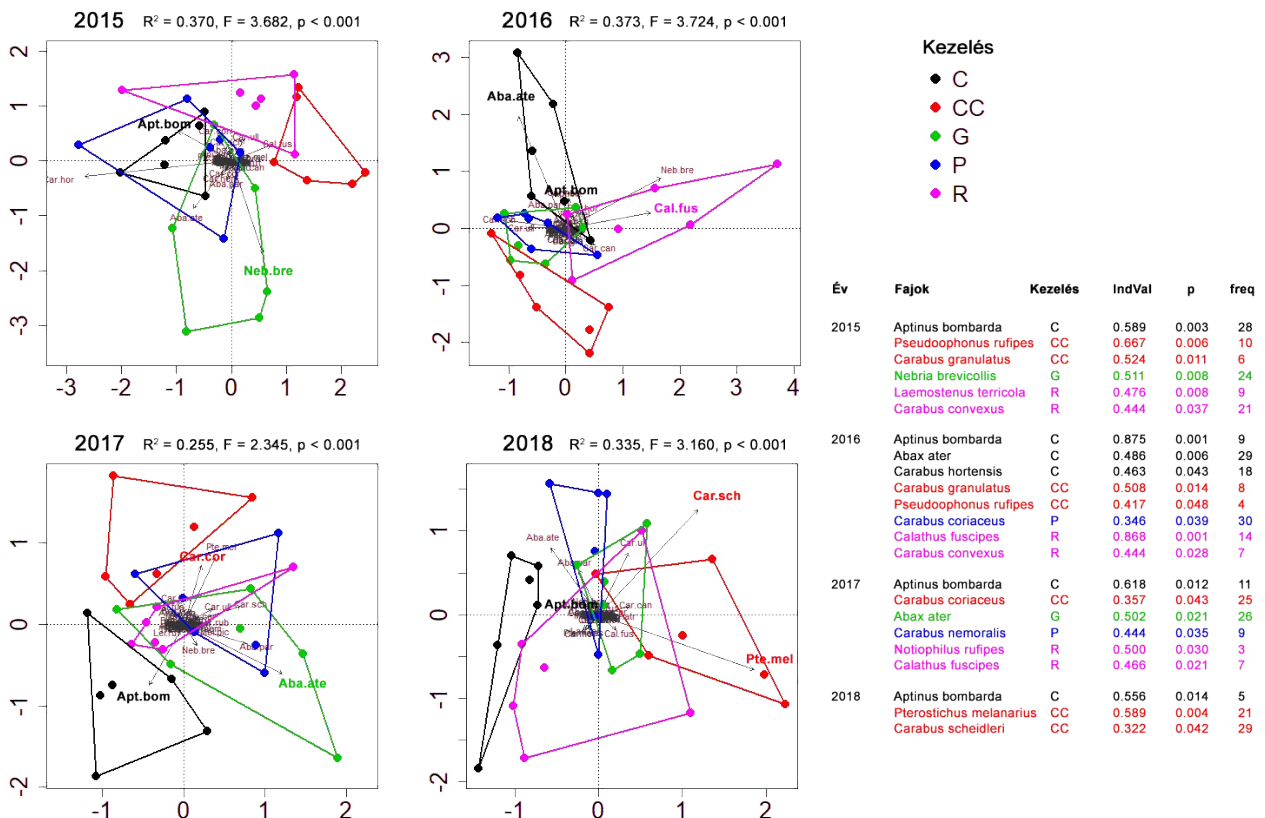


4.1.3.1 ábra A fluktuáló asszimmetria és a kondíció index közötti kapcsolat a *C. nemoralis* faj esetén az urbanizációs gradiens mentén, és az ivarok szerint. Az illesztett trendvonal a két változó közötti lokálisan súlyozott regresszió ($\lambda=1, \alpha=0,9$).

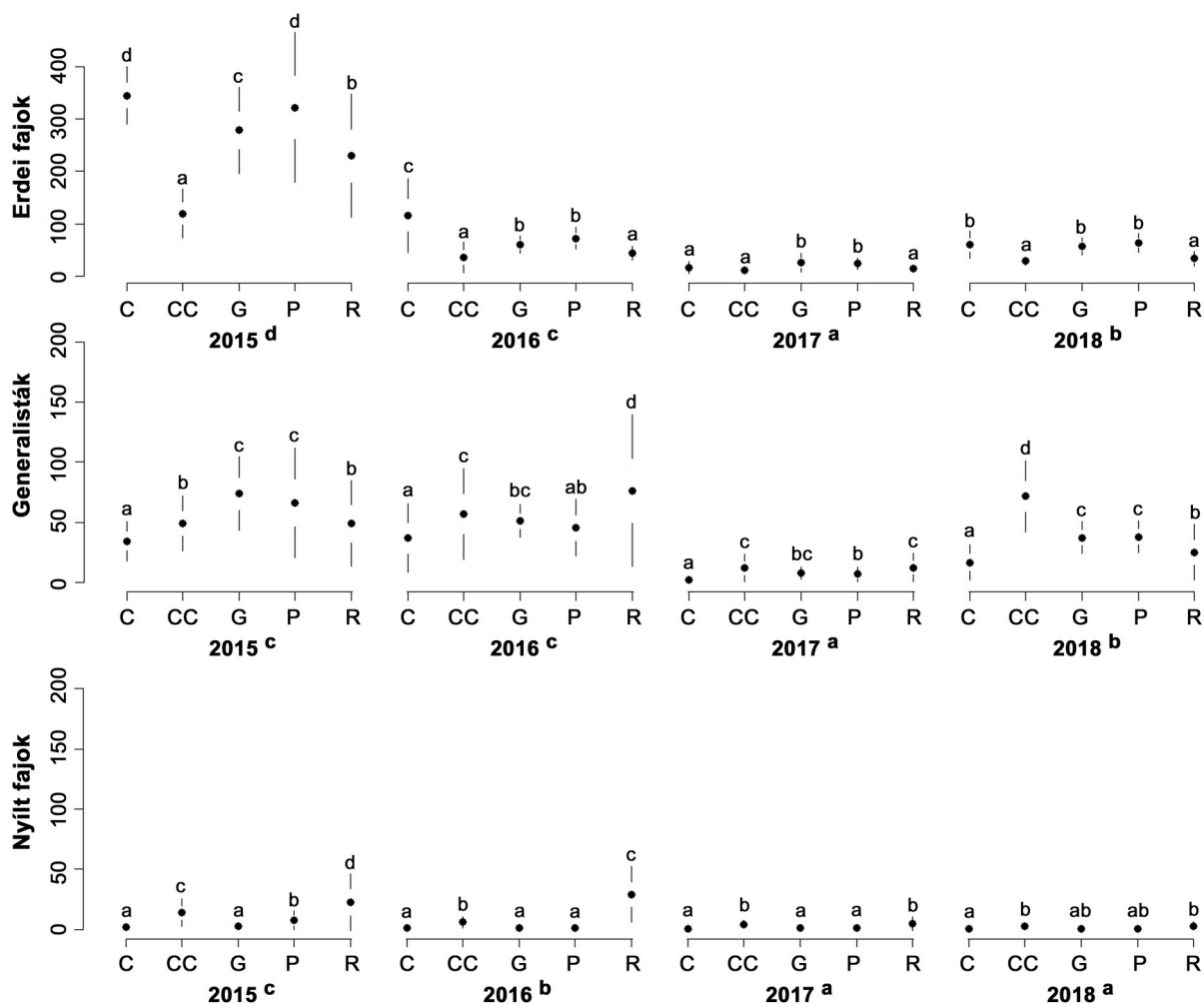
4.2 Futóbogár együttesek faj-specifikus válaszai a különböző erdészeti kezelésekre

4.2.1 Közösségi szintű válaszok

A közösségi vizsgálatok legfontosabb eredménye, hogy a fajkompozíció 2015 és 2018 között nem változott jelentős mértékben. Közvetlenül az egyes kezelések kialakítása után a tarvágások és a hagyásfacsoportok tértek el leginkább a többi kezeléstől (4.2.1.1. ábra). Az évek előrehaladtával azonban ez a különbség eltűnt és a kontroll állomány és az összes kezelés - mint egy egység - közötti kompozicionális differencia lett a meghatározó. A kvantitatív karakterfaj analízis alapján elmondható (táblázat a 4.2.1.1. ábrán), hogy kezelés-specifikusan változott a futóbogár-együttesek összetétele az egyes évek között. A legnagyobb mértékű fajkicserélődés a tarvágásban (CC) és a hagyásfacsoportban (R) volt tapasztalható, míg a legkisebb mértékű a bontásban (P) és kontroll (C) állományban volt.



4.2.1.1. ábra A futóbogár-együttesek eloszlása az egyes erdészeti kezelési típusokban főkomponens (PCA) elemzés alapján. A egyes kezelések közötti különbségek minden egyes panelen szerepelnek a permutációs ANOVA (PERMANOVA) alapján (együttható, F és p értékek). A jobb oldali táblázat összefoglalja a fajok maximális indikátorértékeit és azok szignifikanciáját az egyes kezelések szerint az IndVal módszer alapján. Csak a szignifikáns eredmények ($P < 0,05$) szerepelnek. A kezelések a kódjai: kontroll (C, fekete), tarvágás (CC, piros), lék (G, zöld), bontás (P, kék) és hagyásfacsoport (R, lila).

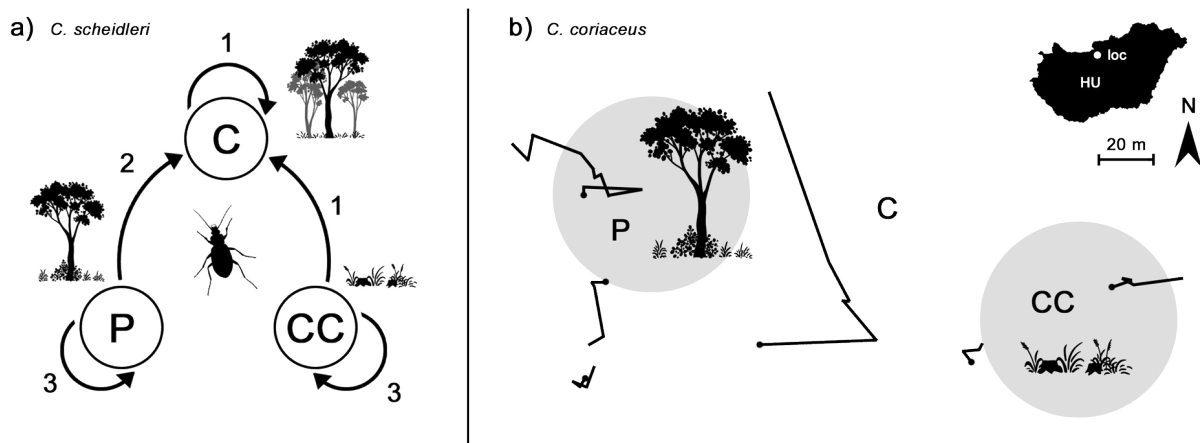


4.2.1.2 ábra A futóbogarak egyes habitataffinitási csoportjainak egyedszám változása a vizsgált erdészeti kezelések és évek között. A fekete teli körök a számtani átlagot jelölik, a függőleges vonalak a szórást, a fehér terület a körök és a függőleges vonalak között pedig az átlaghoz tartozó standard hibát jelölik. A betűk az ábratérben az egyes kezelések közötti szignifikáns különbséget jelölik ($\alpha=0.05$). A kezelések rövidítései: C- kontroll, CC- tarvágás, G- lék, P- bontás, R-hagyásfacsoport.

A funkcionális csoportok vizsgálata megerősítette, hogy a kompozíciós változásokért a tarvágásban és hagyásfa csoportban leginkább a nyílt élőhelyekre jellemző, generalista fajok tényerése a felelős. Ezeknek a csoportoknak az időbeli változásai (4.2.1.2. ábra) határozzák meg az egyes évek közötti mintázatokat.

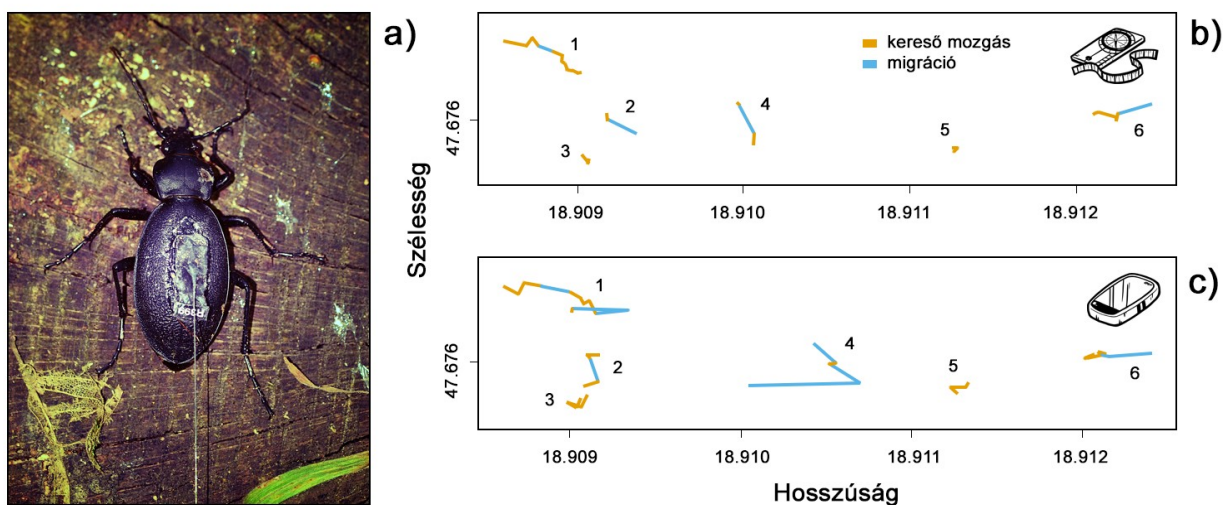
4.2.2 Egyedi mozgásmintázatok és erdészeti kezelések

Korábbi elővizsgálataink (4.2.2.1a. ábra) igazolták, ahogy a fogás-jelölés-visszafogás vizsgálatok (CMR) alapján inkább az egyes élőhelyen belüli mozgás dominált, míg a migráció mértéke az egyes élőhelyek között elhanyagolható mértékű volt (Ruzicková et al. 2021*). Rádiótelemetriás vizsgálataink megerősítették, hogy a lombkoronazáródás mértékében történő bármilyen változás a fajok direkcionális, azaz migrációs mozgását váltja ki (4.2.2.1b. ábra) és a jeladóval felszerelt egyedek pár napon belül elhagyják a kezelt erdőállományokat.



4.2.2.1 ábra A *C. scheidleri* (a) mozgása az egyes erdészeti kezeléseken belül és között (C = kontroll, CC = tarvágás, P = bontás) a CMR alapján. A nyíl melletti szám megfelel a rögzített mozgások számának. A rádiójeladóval nyomon követett *C. coriaceus* egyedek (b) mozgásmintázata a kísérleti területen, a fekete pontok az egyedek kiindulópontját jelölik.

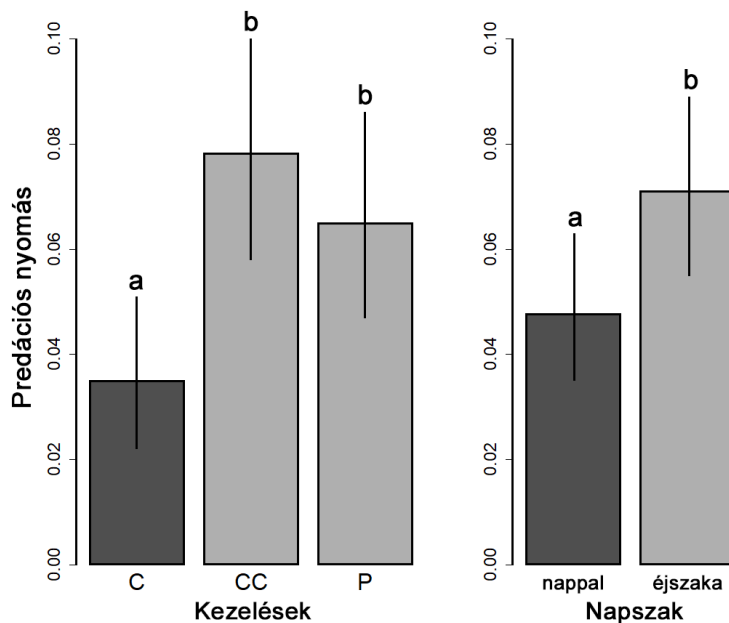
Az egyedi mozgásmintázatok felvételére vonatkozó módszertani vizsgálatokkal igazolást nyert, hogy az eltérő módszerekkel rögzített trajektóriák profilja erősen különbözik egymástól (4.2.2.2a-c. ábra). A jelenség háttérében két metodikai probléma állhat. Vagy a GPS készülékek mérési pontossága nem elégséges 3 méter távolság alatt, vagy az R szoftver „adehabitaLT” moduljának „as.ltraj” funkciója nem megfelelő (amely a geokoordinátákból számítja ki az egyes pontok közötti távolságot) az 1,6 méternél kisebb távolságértékek esetén. Mivel a módszer erre a referenciaértékre kerekít, ezért nem lehetséges az 1,6 méternél rövidebb mozgásadatokat becslni.



4.2.2.2 ábra Egy jeladóval felszerelt *C. coriaceus* egyed közvetlenül az elengedés után (a), az egyedi trajektóriák, azaz mozgási útvonalak profilja, a kézzel rögzített mozgási adatok esetén (b) és GPS-el rögzített geokoordinátákból származtatott adatok alapján (c).

4.2.3 Faj- és időspecifikus predációs nyomás a különböző erdészeti kezelésekben

A 3D-nyomatott makettek megfelelő eszközeit jelentik a nagytestű erdei futóbogárfajokra gyakorolt predációs nyomás vizsgálatára, mivel a rovarévő ragadozók ragadozási próbálkozásai tetten érhetőek voltak. A predációs nyomást mind térbeli, mind időbeli faktorok befolyásolták, hiszen mindkét vizsgált kezelésben ($\chi^2=11.33$, $p=0.003$) több támadási eseményt regisztráltunk, mint a kontrollban (4.2.3.1. ábra). A predációs nyomás pedig éjszaka magasabbnak bizonyult, mint nappal ($\chi^2=4.44$, $p=0.03$), amely nem korrelált semmilyen mikroélelőhelyi jellemzővel, mint például a lombavar- vagy a cserjeszint borítás mértékével, mivel ezek nem közvetlenül hatnak a nagytestű futóbogarak ragadozói számára.



4.2.3.1 ábra A kezelés (a) és a napszak (b) hatása az átlagos predációs nyomásra. A függőleges vonalak 95%-os konfidencia-intervallumot jelölik; a betűk a szignifikáns különbségeket jelzik a Tukey-féle post-hoc teszt alapján.

5. Összegzés és kitekintés

A doktori műben bemutatott eredmények alapján az alábbi állításokat fogalmazhatjuk meg:

5.1 Urbanizáció és futóbogarak

1) Az urbanizáció a futóbogarak két jól elkülöníthető csoportjára hat markánsan. Az általában nagyobb testméretű, röpképtelen erdei specialista fajok számára és relatív gyakoriságára erősen negatívan hat az urbanizáció, míg a nyílt területekre jellemző, főként kis testméretű és röpképes fajok esetén ez a hatás pozitív, azaz faj és egyedszámuk az urbanizált élőhelyeken nagyobb, mint a féltermészetes erdőkben. Ennek a mintázatnak az egyik lehetséges oka a környező élőhelymátrix hatása volt: a városi területen kiterjedt nyílt élőhelyek (füves területek) aránya és az ott élő nyílt élőhelyekhez kötődő fajok hatással vannak az urbanizáció által érintett erdőrészek futóbogár közösségeinek összetételére.

2) A hat vizsgált faj szezonális dinamikája alapján elmondható, hogy az egyedek aktivitása az erdei és a városi élőhelyeken volt a legnagyobb. A városi élőhelyeken élő fajoknál következetesen hamarabb kezdődött a tavaszi aktivitási periódus. A külvárosi területeken ez a mintázat nem volt következetes: a tavaszi és az őszi aktivitási periódus időben erős varianciát mutattak. Ennek oka lehet a városi hősziget hatás, amely a városi erdőrészeket melegebbé téve az ott élő futóbogár

közösségek aktivitási periódusának meghosszabbodását idézte elő. A szezonális dinamika komparatív vizsgálatára alkalmazott grafikus módszer eredményesnek bizonyult és segített feltárni, hogy a *Nebria brevicollis* faj egyedei átterjednek (spillover) a szomszédos élőhelyekre abban az esetben, amikor ugrásszerűen megnő az egyedszámuk a városi élőhelyeken.

3) Nem sikerült igazolni, hogy az urbanizáció egyértelműen negatívan hat a futóbogarak egyedfejlődési instabilitására, elsősorban a fluktuáló aszimmetriára. Inkább annak faj- és ivarspecifikus volta került igazolásra, bár ez utóbbi esetében a szaporodásba befektetett eltérő fiziológiai költség hatását sikerült kimutatni. A módszer lehetséges alkalmazása a környezeti stressz mérésére továbbra is kérdéses a futóbogarak esetén.

4) Az eredmények igazolták, hogy a fiziológiai kondíció vizsgálata jó prediktora lehet a környezeti feltételeknek az urbanizációs vizsgálatokban. Az alkalmazott reziduális kondíció index megfelelő elemzési eszközhöz tűnt, a fajspecifikus hatás ebben az esetben is fennáll. Azonban a kondíció index és a fluktuáló aszimmetria összefüggésének vizsgálata kimutatta, hogy az urbanizáció hatására feldarabolt erdőfoltok valóban kedvezőtlenebb feltételeket teremthetnek a futóbogarak számára.

5.2 Erdőgazdálkodás és futóbogarak

1) Igazolásra került, hogy a közösségi szintű mérőszámok, amelyek a taxonómiai identitáson alapulnak, mint például a faj- és egyedszám, érzékenyebbek a szezonális különbségekre, időbeli változásokra. A funkcionális csoportokon alapuló megközelítés alkalmasabbnak bizonyult az erdészeti kezelések hatásainak nyomonkövetésére. A két megközelítés egyidejű használata lehetővé teszi, hogy pontosabb képet kapjunk a futóbogár-közösségek állapotáról az erdőgazdálkodással érintett erdőkben és segít feltárni, hogy mely csoportok lehetnek érzékenyek az egyes erdészeti kezelésekre.

2) A tarvágásban és a hagyásfacsoportban kimutatott magas funkcionális redundancia összefügg a röpképes generalista és nyílt élőhelyűekre jellemző fajok inváziójával (az egyes kísérleti kezelések kialakítása után), ami a gyenge diszperziós képességű, erdei specialista fajok populációjának csökkenését okozza. Ez a funkcionális divergencia az évek között is konzisztens marad, ami arra utal, hogy a vizsgált erdészeti kezelések kialakítása után négy évvel indult meg az erdei specialista fajok populációinak rekolonizációja.

3) A mozgásmintázatok elemzései azt mutatták, hogy az erdőkben a lombkorona záródásának hiánya az egyedeket a direkcionális, azaz elvándoroló mozgásra készíti. A környező zárt erdőállományoknak kulcsszerepe van abban, hogy ezen nyílt erdei élőhelyeket az erdei fajok újból

be tudják népesíteni. A mozgásmintázatokban detektált aktivitásmentes periódusok szerepe pedig a ragadozók elkerülésére irányuló magatartás lehet, ami a túlélés kulcsfontosságú eleme. Ezt is alátámasztja, hogy a 3D makettekkel vizsgált predációs nyomás mértéke a kezelt erdőállományokban magasabb volt, mint a zárt kontroll állományokban. Ezek az eredmények fontosak lehetnek a ragadozó-préda koevolúciós adaptációt vizsgáló további kutatások tervezéséhez.

4) Bár a rovarok, és ezen belül a futóbogarak viselkedésökológiájának módszertani vonatkozásai folyamatosan fejlődnek az eszközök és a statisztikai módszerek tekintetében, azonban a rovarok mozgásával kapcsolatos vizsgálatok még mindig meglehetősen módszer-központúak, csak néhány tanulmány foglalkozik célzottan ökológiai kérdéssel. A rádiótelemetriás és a predációs nyomás vizsgálatok igazolták, hogy az erdészeti kezelések által módosított élőhelyek ökológiai csapdaként működhetnek a futóbogarak számára, azaz annak ellenére használják az állatok az élőhelyet táplálkozásra, hogy ott nagyobb a ragadozás általi mortalitási kockázat. Ezek a fent említett támpontok segíthetnek abban is, hogy megvizsgáljuk a lehetséges tudásbeli hiányosságokat annak megértésére, hogy az állati viselkedést (amelyet akár a mozgással vagy a predációs nyomással, mint módszerrel írunk le) hogyan köthetjük össze általánosítható közösségi szintű mintázatokkal.

6. Hivatkozott irodalmak

- Bauhus J, Puettmann K, Messier C (2009): Silviculture for old-growth attributes. *Forest Ecology and Management*, 258: 525-537.
- Bengtsson J, Nilsson S G, Franc A, Menozzi P (2000): Biodiversity, disturbances, ecosystem function and management of European forests. *Forest Ecology and Management*, 132: 39-50.
- Christensen M, Emborg J (1996): Biodiversity in natural versus managed forest in Denmark. *Forest Ecology and Management*, 85: 47-51.
- Desender K, Eryvynck A, Tack G (1999): Beetles diversity and historical Ecology of woodlands in the Flanders. *Belgian Journal of Zoology*, 129: 139-156.
- Dufrêne M, Legendre P (1997): Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*, 67: 345-366.
- Elmqvist T, Setälä H, Handel S N, Van Der Ploeg S, Aronson J, Blignaut J N, Gomez-Baggethun E, Nowak D J, Kronenberg J, De Groot R (2015): Benefits of restoring ecosystem services in urban areas. *Current opinion in environmental sustainability*, 14: 101-108.
- European Commission (2021): New EU Forest Strategy for 2030. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, New EU Forest Strategy for 2030: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0572> (last access: 25/05/2022).
- Fazekas J, Kádár F, Sárospataki M, Lövei G L (1997): Seasonal activity, age structure and egg production of the ground beetle *Anisodactylus signatus* (Coleoptera: Carabidae) in Hungary. *European Journal of Entomology*, 94: 473-484.
- Fyfe R M, Woodbrigde J, Roberts N (2015): From Forest to Farmland: pollen-inferred land cover change across Europe using the pseudobiomization. *Global Change Biology*, 21: 1977-1212.
- Gould S (1975): Allometry in primates, with emphasis on scaling and evolution of the brain. *Contributions to Primatology*, 5: 244-292.
- Heikkala O, Seibold S, Koivula M, Martikainen P, Müller J, Thorn S, Kouki J (2016): Retention forestry and prescribed burning result in functionally different saproxylic beetle assemblages than clear-cutting. *Forest Ecology and Management*, 359: 51-58.
- Hermý M, Verheyen K (2007): Legacies of the past in the present-day forest biodiversity: a review of past land-use effects on forest plant species composition and diversity. In: Nakashizuka T (ed.) *Sustainability and Diversity of Forest Ecosystems*. Tokyo: Springer, pp. 361-371.
- Jakob E M, Marshall S D, Uetz G W (1996): Estimating fitness: a comparison of body condition indices. *Oikos*, 77: 61-67.

- Koivula M J, Venn S, Hakola P, Niemelä J (2019): Responses of boreal ground beetles (Coleoptera, Carabidae) to different logging regimes ten years post harvest. *Forest Ecology and Management*, 436: 27-38.
- Langrock R, King R, Matthiopoulos J, Thomas L, Fortin D, Morales J M (2012): Flexible and practical modeling of animal telemetry data: Hidden Markov models and extensions. *Ecology*, 93: 2336-2342.
- Lindenmayer D B, Likens G E, Andersen A, Bowman D, Bull C M, Burns E, Dickman C R, Hoffmann A A, Keith D A, Liddell M J, Lowe A J, Metcalfe D J, Phinn S R, Russell-Smith J, Thurgate N, Wardle G M (2012): Value of long-term ecological studies. *Austral Ecology*, 37: 745-757.
- Lövei G L, Sunderland K D (1996): Ecology and behaviour of ground beetles (Coleoptera: Carabidae). *Annual Review of Entomology*, 41: 231-256.
- Magura T (2017): Ignoring functional and phylogenetic features masks the edge influence on ground beetle diversity across forest-grassland gradient. *Forest Ecology and Management*, 384, 371-377.
- Magura T, Lövei G L (2019): Environmental filtering is the main assembly rule of ground beetles in the forest and its edge but not in the adjacent grassland. *Insect Science*, 26: 154-163.
- McDonnell M J, Hahs A K. (2015): Adaptation and Adaptedness of organisms to urban environments. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 46: 261-280.
- McDonnell M J, Pickett S T (1990): Ecosystem structure and function along urban-rural gradients: an unexploited opportunity for ecology. *Ecology*, 71: 1232-1237.
- McIntyre N E, Rango J, Fagan W F, Faeth S H (2001): Ground arthropod community structure in a heterogeneous urban environment. *Landscape and Urban Planning*, 52: 257-274.
- Meyer S, Rusterholz H P, Baur B (2020a): Urbanisation and forest size affect the infestation rates of plant-galling arthropods and damage by herbivorous insects. *European Journal of Entomology*, 117: 34-48.
- Meyer S, Rusterholz H P, Salamon J A, Baur B (2020b): Leaf litter decomposition and litter fauna in urban forests: Effect of the degree of urbanisation and forest size. *Pedobiologia*, 78: 150609.
- Mori A S, Kitagawa R (2014): Retention forestry as a major paradigm for safeguarding forest biodiversity in productive landscapes: A global meta-analysis. *Biological Conservation*, 175: 65-73.
- Murray B.D, Holland J D, Summerville K S, Dunning J B, Saunders M R, Jenkins M A (2017): Functional diversity response to hardwood forest management varies across taxa and spatial scales. *Ecological Applications*, 27: 1064-1081.

- Negro M, Casale A, Migliore L, Palestini C, Rolando A (2008): Habitat use and movement patterns in the endangered ground beetle species, *Carabus olympiae* (Coleoptera: Carabidae). *European Journal of Entomology*, 105: 105-112.
- Niemelä J, Kotze J, Ashworth A, Brandmayr P, Desender K, New T, Penev L, Samways M, Spence J (2000): The search for common anthropogenic impacts on biodiversity: a global network. *Journal of Insect Conservation*, 4: 3-9.
- Niemelä J, Koivula M, Kotze D J (2007): The effects of forestry on carabid beetles (Coleoptera: Carabidae) in boreal forests. *Journal of Insect Conservation*, 11: 5-18.
- Nolte D, Schuldt A, Gossner M M, Ulrich W, Assmann T (2017): Functional traits drive ground beetle community structures in Central European forests: Implications for conservation. *Biological Conservation*, 213: 5-12.
- Paillet Y, Archaux F, Du Puy S, Bouget C, Boulanger V, Debaive N, Gilg O, Gosselin F, Guilbert E (2018): The indicator side of tree microhabitats: A multi-taxon approach based on bats, birds and saproxylic beetles. *Journal of Applied Ecology*, 55: 2147-2159.
- Palmer A R (1994): Fluctuating asymmetry analyses: A primer. In: Markow T A (ed.) *Developmental Instability: Its Origins and Evolutionary Implications*. Dordrecht: Kluwer, pp. 335-364.
- Pommerening A, Murphy S T (2004): A review of the history, definitions and methods of continuous cover forestry with special attention to afforestation and restocking. *Forestry*, 77: 27-44.
- Sapia M, Lövei G L, Elek Z (2006): Effects of varying sampling effort on the observed diversity of carabid (Coleoptera: Carabidae) assemblages in the Danglobe Project, Denmark. *Entomologica Fennica*, 17: 345-350.
- Schirmel J, Blindow I, Buchholz S (2012): Life-history trait and functional diversity patterns of ground beetles and spiders along a coastal heathland successional gradient. *Basic and Applied Ecology*, 13: 606-614.
- Thiele H U (1977): *Carabid Beetles in Their Environments*. New York: Springer.
- Vanbergen A J, Woodcock B A, Watt A D, Niemelä J (2005): Effect of land-use heterogeneity on carabid communities at the landscape scale. *Ecography*, 28: 3-16.
- Wootton J T (1998): Effects of disturbance on species diversity: a multitrophic perspective. *The American Naturalist*, 152: 803-825.
- Yamanaka S, Yamaura Y, Sayama K, Sato S, Ozaki K (2021): Effects of dispersed broadleaved and aggregated conifer tree retention on ground beetles in conifer plantations. *Forest Ecology and Management*, 489: 119073.

7. Az értekezés témakörében megjelent publikációk

(A nagydoktori értekezés témájához kapcsolódó, a PhD. fokozat megszerzése óta megjelent tudományos közlemények, eseti hivatkozásaik csillaggal jelölve a szövegben)

1. Elek Z, Růžičková J, Ódor P (2022): Functional plasticity of carabids can presume better the changes in community composition than taxon-based descriptors. *Ecological Applications*, 32(1): 1–13. <https://doi.org/10.1002/eap.2460> (IF:6.105)
2. Elek Z, Růžičková J, Ódor P (2021): Individual decisions drive the changes in movement patterns of ground beetles between forestry management types. *Biologia*, 76: 3287–3296. <https://doi.org/10.1007/s11756-021-00805-x> (IF:1.653)
3. Růžičková J, Elek Z (2021): Recording fine-scale movement of ground beetles by two methods: Potentials and methodological pitfalls. *Ecology and Evolution*, 11: 8562–8572. <https://doi.org/10.1002/ece3.7670> (IF:3.167)
4. Růžičková J, Elek Z (2021): Unequivocal Differences in Predation Pressure on Large Carabid Beetles between Forestry Treatments. *Diversity*, 13: 484. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/d13100484> (IF:3.029)
5. Růžičková J, Sándor B, Szlákvo A, Elek Z (2021): Individual movement of large carabids as a link for activity density patterns in various forestry treatments. *Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 67(1): 77–86. <https://doi.org/10.17109/AZH.67.1.77.2021> (IF:0.97)
6. Lövei G L, Horváth R, Elek Z, Magura T (2019): Diversity and assemblage filtering in ground-dwelling spiders (Araneae) along an urbanisation gradient in Denmark. *Urban Ecosystems*, 22(2): 345–353. <https://doi.org/10.1007/s11252-018-0819-x> (IF:2.547)
7. Elek Z, Kovács B, Aszalós R, Boros G, Samu, F, Tinya F, Ódor P (2018): Taxon-specific responses to different forestry treatments in a temperate forest. *Scientific Reports*, 8(1): 16990. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35159-z> (IF:4.011)
8. Lövei G L, Elek Z, Howe A, Enggaard M (2018): The use of percentile-percentile plots to compare differences in seasonal dynamics, illustrated by the case of ground beetles (Coleoptera, Carabidae) reacting to urbanisation. *Community Ecology*, 19(1): 1–8. <https://doi.org/10.1556/168.2018.19.1.1> (IF:0.746)
9. Elek Z, Howe A G, Enggaard M K, Lövei G L (2017): Seasonal dynamics of common ground beetles (Coleoptera: Carabidae) along an urbanisation gradient near Sorø, Zealand, Denmark. *Entomologica Fennica*, 28: 27–40. (IF:0.943)

10. Elek Z, Lövei G L, Bártki M (2017): Sex-specific interaction of body condition and asymmetry in carabids in distinct urbanisation stages. *Community Ecology*, 18(3): 253–259. <https://doi.org/10.1556/168.2017.18.3.4> (IF:0.934)
11. Elek Z, Lövei G L, Bártki M (2014): No increase in fluctuating asymmetry in ground beetles (Carabidae) as urbanisation progresses. *Community Ecology*, 15(2): 131–138. <https://doi.org/10.1556/C> (IF:1.214)
12. Elek Z, Dauffy-Richard E, Gosselin F (2010): Carabid species responses to hybrid poplar plantations in floodplains in France. *Forest Ecology and Management*, 260: 1446–1455. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.034> (IF:1.992)
13. Elek Z, Lövei G L (2007): Patterns in ground beetle (Coleoptera: Carabidae) assemblages along an urbanisation gradient in Denmark. *Acta Oecologica*, 32(1): 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2007.03.008> (IF:1.306)
14. Sapia M, Lövei G, Elek Z (2006): Effects of varying sampling effort on the observed diversity of carabid (Coleoptera : Carabidae) assemblages in the Danglebe Project, Denmark. *Entomologica Fennica*, 17(3): 345–350. (IF:0.25)