



**A klímaváltozás hatása Geometridae (Lepidoptera)
fajok fenológiájára és populációdinamikájára**

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Kúti Zsuzsanna

Budapest

2014

A doktori iskola


megnevezése: Budapesti Corvinus Egyetem
Tájépítészeti és Tájökológiai Doktori Iskola


tudományága: Agrárműszaki

Vezetője: **Csemez Attila, DSc**
tanszékvezető egyetemi tanár
Budapesti Corvinus Egyetem
Tájtervezési és Területfejlesztési Tanszék

Témavezető: **Ladányi Márta, PhD**
egyetemi docens
Budapesti Corvinus Egyetem
Biometria és Agrárinformatikai Tanszék

A jelölt a Budapesti Corvinus Egyetem Doktori Szabályzatában előírt valamennyi feltételnek eleget tett, az értekezés műhelyvitájában elhangzott észrevételeket és javaslatokat az értekezés átdolgozásakor figyelembe vette, ezért az értekezés védési eljárásra bocsátható.


.....
Az iskolavezető jóváhagyása


.....
A témavezető jóváhagyása

I. A MUNKA ELŐZMÉNYEI, A KITŰZÖTT CÉLOK

Az ismert élőlényfajok több mint háromnegyedét gerinctelen állatfajok, többségükben rovarok és más ízeltlábúak alkotják. A gerinctelen élőlényközösségek szerepe azonban nemcsak bolygónk biodiverzitásában ilyen kiemelkedő, hanem a természetközeli és mezőgazdasági ökoszisztémák működését is alapvetően befolyásolják. E tekintetben elegendő a virágos növények megporzására, a kártevő rovarokra, a talaj folyamatait fenntartó ízeltlábúakra vagy a humán-, állat- és növényegészségügyi kórokozók vektoraira utalnunk.

A klíma változékonysága alapvető hatással van a rovargyűttek szerkezetére, a regionális faunák összetételére, és az egyes lokális élőhelyek (mikrohabitatok, biotópok) szezonális cönológiai állapotváltozásaira is. Az időjárás közvetlen hatását a fenológiai és populációdinamikai folyamatokon keresztül fejt ki, amely közvetve eredményezi az area-viszonyok és a biodiverzitás átalakulását.

A gerinctelen életközösségek azonban nemcsak önmagukban fontosak, hanem (úgy a környezet- és természetvédelem, mint a mezőgazdaság tekintetében) a klímaváltozás hatásának hatékony indikátorai is, hiszen segítségükkel olyan információk birtokába jutunk, amelyek más módszerekkel esetleg nem, vagy nehezen közelíthetők meg.

A klimatikus igényekre, fenológiára és a klímaváltozás hatásaira vonatkozó vizsgálatokból olyan információkhoz juthatunk, amelyek részben a növényvédelem, illetve erdővédelem területén is hasznosíthatóak.

Az araszolólepkék populációdinamikai vizsgálatainak a feljegyzett kártételek alapján kiemelt jelentősége van a növényvédelemben mind az erdők, mind pedig a gyümölcsfák védelmének kutatásai terén. E lepkecsoport néhány faja a legnagyobb területi tarrágásokat okozó rovarok közé sorolható. Ma már hosszú távú, bár az adatrögzítés szempontjából sajnos nem minden időszakban egységes szempontok szerint felvételezett adatsor áll rendelkezésünkre ezen lepkefajokat illetően az 1961-ben kiépült erdészeti fénycsapdahálózatnak köszönhetően. Igen fontos és régóta sürgető feladat ezen felbecsülhetetlen értékű adatok feldolgozása és vizsgálata a fajok jobb megismerése, valamint a jövőben várható változások feltérképezése céljából.

Az eddig rendelkezésre álló adatok és tudományos ismeretek birtokában 8 egynemzedékes Lepidoptera faj rajzásdinamikáját vizsgáltam a klímaváltozás tükrében.

Ezek közül négy kártevő, melyek vizsgálatát a nemzetközi szakirodalom is kiemelten fontosnak ítéli, négy pedig nem kártevő, de ez utóbbi fajok is növelik a magyar fauna sokféleségét, és sem nemzetközi, sem hazai kutatásokban nem vizsgálták ilyen szempontból, sőt faunisztikai adatokat tekintve is csak kevés információ van róluk.

A fentiek alapján az alábbi célkitűzéseket fogalmaztam meg:

1. A megfigyelt adatok alapján a rajzáskezdet és rajzáshossz időbeli alakulásának leírása, valamint klímamodellek alapján a rajzáskezdetek és rajzáshosszak eloszlásának jövőbeli várható módosulásának becslése;
2. Olyan fajspecifikus klímaindikátor-rendszer kidolgozása, amely igazolhatóan szoros kapcsolatban áll a fajok rajzásdinamikájával;
3. Az éves egyedszámok alakulásának differenciaegyenleten alapuló populációdinamikai modellekkel való közelítése;
4. A kapott populációdinamikai modellek klímaindikátorokkal való bővítésével az egyedszám-becslések javítása;
5. A rendelkezésünkre álló időjárási paraméterek, illetve az azokból előállított klímaindikátorok függvényében a fajok populációdinamikájában, valamint az egyes populációk fenológiai történéseiben rejlő törvényszerűségek felkutatása, leírása.
6. Regionális klímamodell-becslések és a klimatikus indikátorok, valamint az azokkal bővített populációdinamikai modellek alapján a fajok várható egyedszámaira vonatkozó megállapítások megfogalmazása.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1. A VIZSGÁLAT ANYAGA

A hosszú távú meteorológiai és csapdázási adatsorok elengedhetetlenek a klímaváltozás mind a múltbeli, mind a jövőbeli hatásainak elemzéseéhez. A vizsgálathoz felhasznált csapdázási adatok az Országos Erdészeti Fénycsapdahálózat azon 9 csapdájának 46 éves gyűjtési eredményeiből származnak, amelyek 1962 és 2006 között a leghosszabb ideig működtek. A vizsgálatba olyan univoltin araszoló (Geometridae) fajok adatait használtam fel, amelyből mindegyik csapdában minden évben volt befogott példány. A lepkék rendjének az egyik legnagyobb fajszámú családjába tartozó négy erdészeti és kertészeti kártevő Lepidoptera fajt: kis téliaraszoló *Operophtera brumata* (L. 1758), nagy téliaraszoló *Erannis defoliaria* (Cl. 1759), tollascsapú araszoló *Colotois pennaria* (L. 1761), aranysárga téliaraszoló *Erannis aurantiaria* (Hbn. 1799) és továbbá négy nem kártevőt: nagy tarkaaraszoló *Pelurga comitata* (L. 1758), *Idaea dimidiata* (Hfn. 1767), *Scopula nigropunctata* (Hfn. 1767) *Eulithis pyraliata* (D & S. 1775) választottam.

A meteorológiai adatok az Országos Meteorológiai Szolgálat adatbázisából származó napi értékek (közép-, maximum-, minimumhőmérsékletek, csapadékmennyiség) 1961-2000 közötti évekből. A klímaváltozás hatásainak vizsgálatához az ELTE Meteorológiai Tanszéké-

nek munkatársai által adaptált RegCM3.1 (regionális) klímamodell futtatásainak eredményeit használtam fel.

2.2. A VIZSGÁLAT MÓDSZEREI

2.2.1. A CSAPDÁZÁSI ADATOK FELDOLGOZÁSA

A vizsgálatokhoz felhasznált rajzási adatokra vonatkozóan a különböző abiotikus tényezők és a befogás számát módosító hatások csökkentése érdekében célszerű volt az összes fénycsapda adatot egységesen felhasználni, amit mozgóátlag-számítással végeztem el.

2.2.2. A RAJZÁSKEZDET ÉS A RAJZÁSHOSSZ EGYMÁSTÓL ÉS A KLIMATIKUS VISZONYOKTÓL VALÓ FÜGGÉSEINEK VIZSGÁLATA

A lepkék évi rajzáskezdetének és rajzáshosszának egymástól, valamint a klimatikus viszonyoktól való függését vizsgáltam. A rendelkezésre álló mintából a lepke rajzási adatainak, valamint a belőlük számolt 11 éves mozgóátlagok alapján 1972-1988 között először az adott fajok rajzásának kezdete, illetve annak hossza közti összefüggéseket vizsgáltam. Ezt követően a 17 éves időszakra logisztikus regressziót alkalmazva elemeztem a rajzáskezdet és rajzáshossz tendenciáit. A statisztikai elemzéseket a PASW Statistics 18.0 számítógépes programcsomagot alkalmazva végeztem.

2.2.3. DIFFERENCIAEGYENLETEN ÉS INDIKÁTORANALÍZISEN ALAPULÓ POPULÁCIÓDINAMIKAI MODELLEZÉS

Vizsgálatom során három modellel dolgoztam:

1. Alapmodell - az éves egyedszámok differenciaegyenleten alapuló populációdinamikai modellje
2. Klímaindikátorokkal bővített alapmodell
3. Főkomponensekkel bővített alapmodell

Alapmodell

Egy egyszerű, $N_{t+1} = N_t * \exp\left(R_{\max} * \left(1 - \frac{N_t}{K}\right)^\theta\right)$ alakú Ricker-típusú diszkrét differenciaegyenlet-modellből indultam ki, ahol R_{\max} a maximális növekedési rátát, K az eltartó kapacitást, θ a sebességi tényezőt, N_t a t -edik évi egyedszámot, az N_{t+1} pedig a következő év $(t+1)$ egyedszámát jelöli. Az $R_t = \ln\left(\frac{N_{t+1}}{N_t}\right)$ jelölést bevezetve a modellt a következő alakban írtam fel:

$$R_t = \ln\left(\frac{N_{t+1}}{N_t}\right) = R_{\max} * \left(1 - \frac{N_t}{K}\right)^\theta = R_{\max} - R_{\max} \left(\frac{1}{K}\right)^\theta N_t^\theta;$$

$$R_t = R_{\max} - R_{\max} \left(\frac{1}{K} \right)^\theta N_t^\theta = R_{\max} - aN_t^\theta.$$

A matematikai modell paramétereinek becslése

A hibát a legkisebb eltérés-négyzetösszeggel (Root Mean Square Error, RMSE) definiáltam:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_j (N_t - N_{t, pred})^2},$$

ahol az n jelöli az évek számát, $N_{t, pred}$ pedig a modell által a t -edik évre becsült egyedszámot.

Három paramétert optimalizáltam a hiba minimalizálásával: a maximális növekedési rátát (R_{\max}), az eltartó kapacitást (K) és a sebességi tényezőt (θ). Az optimalizálást Palisade's Risk Evolver-féle szoftverrel, innovatív genetikai algoritmussal végeztem.

A klimatikus indikátorok adatbázisa

Az OMSZ megfigyelt napi adataiból klimatikus indikátorokat számoltam. A t -edik év 365, illetve 366 napját dekádokra osztottam fel és kiszámoltam:

- az i -edik dekád napi középhőmérsékleteinek átlagát (TATL $_t_i$)
- az i -edik dekád napi minimumhőmérsékleteinek átlagát (TMIN $_t_i$)
- az i -edik dekád napi maximumhőmérsékleteinek átlagát (TMAX $_t_i$)
- az i -edik dekád napi csapadékmennyiségének átlagát (RAIN $_t_i$)
- az i -edik dekád napi minimumhőmérsékleteinek minimumát (TMINN $_t_i$)
- az i -edik dekád napi maximumhőmérsékleteinek maximumát (TMAXX $_t_i$).

Létrehoztam havi klimatikus indikátorokat is a t -edik évre vonatkozóan:

- a j -edik hónap napi középhőmérsékleteinek átlagát (MTATL $_t_j$)
- a j -edik hónap napi minimumhőmérsékleteinek átlagát (MTMIN $_t_j$)
- a j -edik hónap napi maximumhőmérsékleteinek átlagát (MTMAX $_t_j$)
- a j -edik hónap napi csapadékmennyiségének átlagát (MRAIN $_t_j$)
- a j -edik hónap napi minimumhőmérsékleteinek minimumát (MTMINN $_t_j$)
- a j -edik hónap napi maximumhőmérsékleteinek maximumát (MTMAXX $_t_j$)

Kiszámoltam a Pearson-féle korrelációs együttható becslését (r) a klimatikus indikátorokra 1962-2000 között.

Azokat az indikátorokat, amelyek szignifikánsan magas korrelációt mutattak az egyedszámmal vagy annak változásával, leválogattam.

A modell fejlesztése

Az OMSZ megfigyelt napi adataiból készített és a rovar fenológiai fázisaitól függő klimatikus igényeinek megfelelő klimatikus indikátorok lineáris kombinációit additív tényezőként a modellhez adva

$$R_t = R_{\max} - R_{\max} \left(\frac{1}{K} \right)^\theta N_t^\theta + \sum_k C_k I_k$$

alakban finomítottam a modellt, ahol I_k jelöli a klimatikus indikátorokat, $C_k \in \mathbf{R}$ pedig az optimalizálandó paramétereket.

Először csak egy klimatikus indikátort vettem be a modellbe, azt amelyik leginkább korrelált az egyedszámmal vagy annak változásával. Ismét a fent definiált RMSE hibát minimalizáltam az innovatív genetikai algoritmussal, a $3 + 1$ paraméter (maximális növekedési ráta R_{\max} , eltartó képesség K és sebességi tényező θ , valamint C_1) optimalizálásával. Majd stepwise módszerrel további klimatikus indikátor(oka)t vontam be a modellbe. Újfént minimalizáltam az RMSE hibát miközben a korábban már optimalizált paraméterekkel együtt az újonnan bevont indikátor együtthatóját is optimalizáltam.

Minden lépésnél kiszámoltam az Akaike információs kritériumot és a Bayes-féle korrekcióval dolgoztam. Minden további lépésnél kiszámítottam a determinációs együtthatót. A modell bővítését mindig a legerősebben korreláló, a már bevont indikátoroktól független új klimatikus indikátort bevonva addig folytattam, amíg az Akaike információs kritérium Bayes-féle korrekciója el nem érte a minimumát.

2.2.4. FŐKOMPONENS-REGRESSZIÓ

A regresszióanalízis feladata, hogy valamely függvényszerű kapcsolatot keresünk egy függő változó és egy vagy több magyarázó változó között. A regresszióanalízis egyik fontos feltétele az, hogy a magyarázó változók függetlenek egymástól, azaz nem lép fel kollinearitás. Ha ez a feltétel sérül, akkor felmerül az igény, hogy a regresszióanalízist megelőzően a magyarázó változókat úgy tömörítsük, hogy azok a regresszióanalízisre alkalmassá váljanak. Erre alkalmas módszer a főkomponens analízis.

A főkomponens-analízis a többváltozós elemzéseknek egy olyan módszere, amely a kiindulási, nagyszámú, egymással erősen korreláló változókat azok lineáris kombinációjaként létrehozott főkomponensek segítségével jelentősen kisebb számú, egymástól független

változóba tömöríti. A főkomponens analízis módszerével összekapcsolt regresszióanalízist röviden főkomponens regresszióknak nevezzük.

Vizgáltam a korrelációs együttható szignifikanciáját, és elvégeztem a modellre vonatkozó ANOVA tesztet. A becslés és annak standard hibájának hányadosára *t*-próbát végeztem.

A statisztikai elemzéseket a SPSS 20, az optimalizálást a Palisade Optimizer számítógépes programok segítségével végeztem.

2.2.5. A JÖVŐRE VONATKOZÓ BECSLÉSEK

A klimatikus indikátoroknak a RegCM3.1 regionális klímamodell becslései alapján előállított értékei és a lepkék megfigyelt és a modellek által becsült egyedszámait összevettem. Az indikátor- és főkomponens-analízisben kapott faktorok értékeit a RegCM3.1 regionális klímamodell 1961-1990-es, a 2021-2050-es és a 2071-2100-as időszakokra prognosztizált eredményeivel is kiszámoltam, és becsültem a várható egyedszámot.

A statisztikai hipotézis vizsgálatokhoz egymintás *t*-próbát, kétmintás *t*-próbát, páros *t*-próbát és Welch-próbát használtam.

3. EREDMÉNYEK

3.1. A RAJZÁSKEZDET ÉS A RAJZÁSHOSSZ EGYMÁSTÓL, VALAMINT A KLIMATIKUS VISZONYOKTÓL VALÓ FÜGGÉSEI

A rajzáskezdet – rajzashossz egymással való összefüggésének vizsgálata során a rajzáskezdet időpontja (Julianus nap) és a rajzashossz (nap) között szignifikáns lineáris negatív korrelációt tudtam kimutatni. A nyolc lepkefajt vizsgálva, mindegyikre elmondható, hogy az imágó minél későbbi megjelenésével, a rajzás ideje lerövidül.

OPEROPHTERA BRUMATA (L.) FAJRA VONATKOZÓ RÉSZLETES EREDMÉNYEK ÉS AZOK ÉRTÉKELÉSE

A lárvák aktivitási időszakában mért alacsony tavaszi hőmérséklet kisebb imágó populációkat és későbbi rajzáskezdetet indukál. Elmondható az is, hogy a nagyobb mennyiségű októberi csapadék, valamint az azt követő hideg/fagyos időjárás jobban elősegíti a rajzás megindulását. A rajzás kezdetét az első fagyok utáni enyhébb időjárás segíti a leginkább, mivel a november eleji minimumhőmérséklet indikátora szignifikáns negatív irányú korrelációjú a rajzáskezdettel.

A rajzáskezdetek megfigyelt és a RegCM 3.1 modell alapján 2021-2050-re becsült gyakoriságát tekintve a 2021-2050-es időszakra még több késői rajzáskezdet várható. A rajzáskezdetek várható terjedelme 9 nappal nő a megfigyelthez képest. Az extrém késői (november közepi) rajzáskezdetek gyakorisága várhatóan növekedni fog, ami valószínűleg igen rövid rajzashosszal párosul majd.

3.2. POPULÁCIÓDINAMIKAI MODELLEK

Elmondható, hogy a megfigyelt közel 40 éves intervallumra (1962-2000) alkotott populációdinamikai modelljeink becslései jónak bizonyultak. A lepkék egyedszáma, illetve annak változása és a különböző klímaindikátorok közötti szignifikáns lineáris kapcsolat alapján az indikátorok vagy azok lineáris kombinációjaként előállított főkomponensek jelentősen javítani tudták az alapmodellt:

- *Operophtera brumata* esetében az alapmodellt javította a rajzást megelőző év március közepének napi maximumhőmérsékletének maximuma.
- *Erannis defoliaria* esetében az egyedszám jobb becsléséhez az alapmodellt a rajzást megelőző év februári és márciusi csapadékkal; a december második felének legmagasabb hőmérsékletével, valamint a vizsgált év április közepi átlaghőmérsékletével és áprilisi legalacsonyabb hőmérsékletével, valamint augusztus legmagasabb hőmérsékletével és az október végi-november eleji és december második felének csapadék értékeivel egészítettem ki.
- *Colotois pennaria* esetében a modellt bővítette a rajzást megelőző év februári csapadéka; április legmagasabb hőmérséklete; az augusztus közepi csapadék; az október végi-november eleji maximumhőmérséklet; a novemberi minimumhőmérséklet; a november végi-december eleji átlaghőmérséklet; a decemberi legalacsonyabb és a december második felének legmagasabb hőmérséklete, valamint a vizsgált év április közepi maximumhőmérséklete; az augusztusi csapadék; november közepének minimumhőmérséklete és a november végi-december eleji maximumhőmérséklet.
- *Erannis aurantiaria* esetében a rajzás évének október végi és novemberi csapadék értékével javítottam az alapmodellt.

Az alábbi 4 fajjal kapcsolatban a magyar szakirodalomban semmilyen érdemleges publikáció sincs, amely a klimatikus tényezőkkel, illetve a fajokra gyakorolt hatásával foglalkozna.

- *Idaea dimidiata* esetében az egyedszám becslését javította a rajzást megelőző év január elejének leghidegebb hőmérséklete; a február eleji, április közepi és június végi minimumhőmérséklet; a szeptember közepi csapadék; az október végi-november eleji maximumhőmérséklet, valamint a vizsgált év március havának csapadék értéke.
- *Scopula nigropunctata* esetében az alapmodellt a rajzást megelőző év június végi és november közepi minimumhőmérséklettel; az augusztus végi-szeptember eleji legalacsonyabb hőmérséklettel, valamint a vizsgált év február végi csapadék értékeivel bővítettem.
- *Pelurga comitata* esetében az egyedszám becslését a rajzást megelőző év január utolsó hetének csapadékával; az április közepi minimumhőmérséklettel; július végének legala-

csenyebb hőmérsékletével; az augusztus közepi legmagasabb hőmérséklettel; az augusztus végi csapadékkal; a december közepi minimumhőmérséklettel, valamint a vizsgált év január eleji, március és április közepi legalacsonyabb hőmérsékletével; az április utolsó három hetének minimum-hőmérsékleteivel; az áprilisi átlaghőmérséklettel és csapadékkal (azaz áprilisi átlag-, minimum-, legalacsonyabb hőmérséklet és csapadék indikátorokkal); az október végi november eleji legmagasabb hőmérséklettel javítottuk.

- ***Eulithis pyraliata*** esetében az alapmodellt a rajzást megelőző év január végi, március közepi, november végi-december eleji csapadékával; az április végi legmagasabb hőmérséklettel; valamint a vizsgált év áprilisi minimumhőmérsékletével és csapadékával; az április végi, június eleji, szeptember második felében lévő legmagasabb hőmérséklettel; az augusztus végi-szeptember eleji legalacsonyabb hőmérséklettel; a november közepi minimumhőmérséklettel; a december közepi csapadék és a december végi maximumhőmérséklettel bővítettem.

3.3. A KLIMATIKUS INDIKÁTOROKNAK A REGCM3.1 REGIONÁLIS KLÍMAMODELL BECSLÉSEI ALAPJÁN ELŐÁLLÍTOTT ÉRTÉKEI ÉS A LEPKÉK MEGFIGYELT ÉS A MODELLEK ÁLTAL BECSÜLT EGYEDSZÁMAINAK ÖSSZEVEZÉSE

Az alapmodellek, az indikátorral bővített modellek, valamint a főkomponensekkel bővített modellek a klimatikus indikátorok jövőbeli változását a RegCM3.1 regionális klímamodellel becslései szerint figyelembe véve a fajok egyedszámának becsült minimum és maximum értékeire az alábbi prognózisokat eredményezték:

- ***Operophtera brumata***: Rövidtávon a jövőben (2021-2050) az minimális egyedszámok emelkedésére számíthatunk. Hosszútávon (2071-2100) azonban csökkenést várhatunk. A modell egyedszám-becsléseinek maximum értékeit tekintve, a 2021-2050 intervallumra vonatkozó becslések az 1961-1990-es referencia-időszakhoz képest emelkedést, a 2071-2100-as időszakra vonatkozóan pedig további szignifikáns emelkedést jeleznek.
- ***Erannis defoliaria***: A faj egyedszámának becsült minimum és maximum értékei is szignifikáns csökkenést vetítenek előre mind a 2021-2050-es, mind pedig a 2071-2100-as időszakokra vonatkozóan.
- ***Colotois pennaria***: A modell által becsült egyedszámok minimumait időszakonként összehasonlítva a referencia időszakhoz (1961-1990) képest rövidtávon némi emelkedést becsülhetünk, de hosszabb távon (2071-2100) jelentősebb egyedszám-csökkenést jósol a modell. A modell egyedszám-becsléseinek maximum értékeit vizsgálva is csökkenés várható.

- ***Erannis aurantiaria:*** A faj becsült egyedszám-értékeinek minimuma rövidtávon emelkedik, de hosszabb távon a csapadék indikátor értékének változása az egyedszám visszaeséséhez vezethet. A becsült egyedszámok minimum és maximum értékeit összehasonlítva a különböző időszakokkal elmondható, hogy a bővített modell becslései alapján adott induló egyedszám mellett a 2071-2100-as időszak esetében alacsonyabb becsült egyedszám várható, bár rövidtávon (2021-2050) kisebb ütemű növekedést tapasztalhatunk.
- ***Idaea dimidiata:*** A becsült egyedszám minimum értékét tekintve a különböző időszakokat összehasonlítva, megállapíthatjuk, hogy 1961-1990-től 2071-2100 időszak irányában az egyedszám egyre kevésbé emelkedik adott induló egyedszám mellett. A modell egyedszám-becsléseinek maximum értékeit vizsgálva egyedszám-csökkenést várhatunk 2021-2050-ig, valamint a 2071 és 2100 közötti időszakokra is. Az időszakokat összehasonlítva a távoli jövő felé egyre csökken az egyedszámok növekedésének mértéke.
- ***Scopula nigropunctata:*** A becsült egyedszám minimum értékét tekintve, rövidtávon a 2021-2050-es időszakban 400 kiinduló egyedszámmal a faj következő évi egyedszáma nőhet, ezután viszont csökkenhet. A 2071-2100-as időszaknál mindez a változás már 350 kiinduló egyedszámmal kialakulhat. A modell egyedszám-becsléseinek maximum értékeit nézve rövidtávon elmondható, hogy 1300 kiinduló egyedszámmal a faj következő évi egyedszáma magasabb, s ezután alacsonyabb. A 2071-2100-as időszaknál mindez az egyedszám-növekedés már 800 kiinduló egyedszámmal előkezdődhet. Mindent egybevetve mind a közel-, mind pedig a távolabbi jövő is hátrányosan érinti ezt a fajt.
- ***Pelugra comitata:*** A modell egyedszám-becslésének minimum értékeit elemezve rövidtávon az egyedszám-csökkenést várhatunk, majd 2071-2100 időszakban az előzőhöz viszonyítva kismértékben növekedhet. Az egyedszám változást tekintve mindegyik időszakra elmondható, hogy 100 kiindulási egyedszám értékig a modell a következő évre egyedszám-növekedést becsül. A modell egyedszám-becsléseinek maximum értékeit nézve elmondhatom, hogy a 2021-2050-es időszak az egyedszám-csökkenés, s 2071-2100 időszakot a stagnálás jellemezheti.
- ***Eulithis pyraliata:*** A becsült egyedszám értékét nézve mindegyik időszakra elmondható, az egyedszám minimuma a következő időszakra várhatóan csökken. A modell egyedszám-becsléseinek maximum értékeit tekintjük, az egyedszám értéke nőhet mind a két vizsgált 2021-2050-es és a 2071-2100-as jövőbeli időszakra vonatkozóan.

3.4. A KUTATÁS ÚJ ÉS ÚJSZERŰ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEI:

1. *A rajzáskezdet és rajzáshossz összefüggésének igazolása*

Az 1962 és 2000 közötti időszakban az Országos Erdészeti Fénycsapda-hálózat által begyűjtött lepkeadatokból kiválasztott négy kártevő araszoló faj (*O. brumata*, *C. pennaria*, *E. aurantiaria*, *E. defoliaria*) rajzáskezdetének időbeli alakulását, illetve a rajzáskezdet–rajzáshossz egymással való összefüggését vizsgáltam. A vizsgálatot az 1972-1988-as időintervallumra vonatkozóan a rajzáskezdetre és a rajzás hosszára logisztikus regressziós modellt illesztve, az idő függvényében végeztem el. Megállapítottam, hogy a rajzáskezdet időpontja és a rajzáshossz között szignifikáns lineáris negatív korreláció van. Mind a négy vizsgált lepkefajra elmondható, hogy az imágója minél később jelenik meg, a rajzás ideje úgy lerövidül. Az egyik jelentős kártevőnk, *O. brumata* esetében megmutattam, hogy a megfigyelt rajzáskezdetek eloszlása a 2021-2050-es időszakra még több késői rajzáskezdet becsül, valamint a rajzáskezdetek várható terjedelme 9 nappal nő a megfigyelthez képest. Az extrém késői (november közepi) rajzáskezdetek gyakorisága várhatóan növekedni fog, ami valószínűleg igen rövid rajzáshosszal párosul majd.

2. *Klimatikus indikátorrendszer kidolgozása*

A vizsgált nyolc lepkefaj esetében fenológiától függő, fajspecifikus klimatikus indikátorrendszert dolgoztam ki olyan elemekkel, melyeknek az egyedszámmal, illetve annak változásával szignifikáns összefüggését bizonyítottam.

3. *Fenológiától és klimatikus paraméterektől is függő populációdinamikai modell építése és tesztelése*

A vizsgált nyolc lepkefaj esetében differenciaegyenleten alapuló egyszerű populációdinamikai modellt írtam fel az egyedszám alakulására, ezt kiegészítve készítettem egy fajspecifikus klimatikus paramétereket is figyelembe vevő populációdinamikai modellt is. Az alapmodell és a klimatikus indikátorokkal bővített kétféle modell becsléseit összehasonlítva megmutattam, hogy az időjárási tényezőket is figyelembe vevő modellek esetén pontosabb eredményt kaptunk. A kutatásba bevont lepkék 39 éves adatsorát elemezve az 1961-2000 közötti időszakra évenként 37 dekádra és 12 hónapra alkotott klímaindikátorokat vizsgálva kimutattam, hogy gátolja az egyedszám-növekedést: az *O. brumata* esetében az előző év március közepi maximumhőmérsékletek emelkedése; az *E. defoliaria*-nál az októberi minimumhőmérsékletek emelkedése; a *C. pennaria*-nál az vizsgált évet megelőző december közepi maximumhőmérsék-

letek emelkedése; az *E. aurantiaria* esetében a novemberi csapadék mennyiségének emelkedése; az *I. dimidiata*-nál a vizsgált évet megelőző január eleji hőmérsékleti minimum, és a június végi minimumhőmérsékleteinek emelkedése; a *S. nigropunctata* esetében az előző év november közepi minimumhőmérséklet emelkedése; a *P. comitata*-nál az áprilisi csapadéértékek és az előző évi április közepi hőmérsékleti minimumok növekedése. Magas egyedszámot eredményezett: a *C. pennaria* esetében az előző év februári; az *I. dimidiata*-nál a március végi; az *E. pyraliata* esetében az előző évi január, március és november végi nagyobb csapadékmennyiség.

4. Regionális klímamodellek és a populációdinamikai modellek alkalmazása jövőre vonatkozó becslésekhez

A bővített modelleket a RegCM3.1 regionális klímamodell 1961-1990-es referencia-időszakra, valamint a 2021-2050-re és a 2071-2100-as jövőbeli időszakokra vonatkozó becsléseivel is futtattam. A klímamodell a klímátényezők 30-30 évre vonatkoztatott becslése szerint az egyedszámok alakulásában a *S. nigropunctata* esetében szignifikáns változás nem várható. A vizsgált fajok közül valószínűleg csupán két fajnak, az *E. pyraliata*-nak és az átlagértékeket tekintve hosszútávon az *O. brumata* egyedeinek fog kedvezni a jövő. Ezzel ellentétben a klimatikus viszonyoknak a RegCM3.1 által becsült változása várhatóan kedvezőtlenül befolyásolja az *E. aurantiaria*, *E. defoliaria*, *I. dimidiata*, és *C. pennaria* egyedszámát. Rövidtávon a *P. comitata* egyedszámát is csökkentheti, de ennél a fajnál a becsült egyedszám maximumban stagnálást is prognosztizálhatunk.

4. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS A JAVASLATOK

Magyarország Európa legsérülékenyebb régiójának határán fekszik, ahol a jelentős hőmérséklet-emelkedés és a csökkenő csapadékmennyiség együttes hatása érződik. A klímaváltozás érzékenyen fogja érinteni hazánk biodiverzitását is (EU Green Paper, 2007).

A Kárpát-medencében valószínűleg a jövőben szárazabbá válik a klíma, ami jelentősen fogja érinteni a rovarvilágot (Czúcz et al., 2007), hiszen a rovarok életére jelentős hatással van a külső környezet. Fejlődésükben nagy szerepet játszik a csapadék és a hőmérséklet, mert ezek a tényezők gyorsíthatják vagy lassíthatják a rovarok életfolyamatait.

Az araszolólepkék populációdinamikai vizsgálatainak kiemelt jelentősége van hazánkban az erdővédelem és a növényvédelem terén, hiszen a vizsgált fajok közül a téliaraszolók a legnagyobb területi tarrágásokat okozó rovarok közé sorolhatók. A különböző rovarfajok rajzásának ideje és időtartama eltérő, ezért az állandóan változó környezeti hatások különböző módon befolyásolják a rovarok repülését.

- A lepkék rajzáskezdetének időpontja és a rajzáshossz között szignifikáns negatív korrelációt tudtam kimutatni, azaz az imágó minél későbbi megjelenésével, a rajzás ideje lerövidül. Megmutattam, hogy a rajzáskezdetek és rajzáshosszak a vizsgált időszakban logisztikus görbével leírható módon változtak. Továbbá megállapítottam az *O. brumata* esetében a rajzás későbbre tolódását.
- Az egynemzedékes araszoló lepkefajok populációdinamikai habitusának leírását differenciaegyenleten és indikátoranalízisen alapuló populációdinamikai modellezéssel (alapmodell) végeztem, s ezután az OMSZ megfigyelt napi adataiból a rovar fenológiai fázisaitól függő klimatikus igényeinek megfelelően az egyedszámmal magas korrelációban álló klimatikus indikátorokat definiáltam, melyek lineáris kombinációit additív tényezőként illesztettem a modellbe. Az alapmodell és a klimatikus indikátorokkal bővített modell becsléseit összehasonlítva megmutattam, hogy az időjárási tényezőket is figyelembe vevő modellek esetén pontosabb eredményt kaptam. A téliaraszolók esetében kapott eredményeim részben megegyeznek Leskó és munkatársai (1998), valamint Szentkirályi és munkatársai (1998) eredményeivel, miszerint a téli araszolók egyedszáma a meleg-aszályos évben növekszik. Vizsgálatom során ezen állítás az egyes meteorológiai tényezők hatásának időpontjaival kiegészítésre kerültek. A téli araszolókon kívül vizsgált „nyári araszolók” fejlődése a tavaszi, legfőképp a márciusi és áprilisi klimatikus elemektől függ. Ezeket a nem kártevő fajokat nem vizsgálták populációdinamikai vonatkozásban, így valószínűleg ezek az első adatok ezekre a lepkékre nézve. A magyar szakirodalomban az *E. pyraliata*, *P. comitata*, *I. dimidiata*, *S. nigropunctata* fajokra semmilyen érdemleges feljegyzés sincs,

amely a klimatikus tényezőkkel foglalkozna. Vizsgálataimban egyértelműen igazolható volt, hogy mind a csapadék, mind a hőmérsékleti minimum/maximum értékek szignifikáns kapcsolatot mutattak a rajzással, illetve a lepkék különböző fejlődési szakaszaival. Munkám eredményeként, közel dekádokra bontható pontossággal meghatározhatók azok az időjárási paraméterek, amelyek befolyásolhatják a fajok fejlődését, s ez az információ főleg a kártevők elleni védekezésben fontos.

- A RegCM3.1 regionális klímamodell becslései alapján az alábbi prognózisokat eredményezték: A klímamodell adott időjárás és klímátényezők 30-30 évre vonatkozó becslése szerint a becsült egyedszámok értékei alapján rövidtávon az *O. brumata*, *C. pennaria*, *E. aurantiaria* és az *E. pyraliata* esetében várható egyedszám-növekedés, míg *E. defoliaria* és *Pelugra comitata* esetében egyedszám-csökkenésre számíthatunk. Hosszútávon egyedszám-csökkenés prognosztizálható az *Erannis* fajok esetében, míg egyedszám-növekedés az *E. pyraliata* esetében. A *S. nigropunctata*, *P. comitata* és *I. dimidiata* esetében szignifikáns változás nem várható, tehát e fajok populációjának alakulását hosszú távon várhatóan nem befolyásolja jelentősen a klímaváltozás. A vizsgált fajok közül valószínűleg csupán egy fajnak lesz előnyös a klímaváltozás, azaz várhatóan kedvezni fog a jövő a *E. pyraliata*-nak. Ezzel ellentétben a változások várhatóan kedvezőtlenül érintik az *E. aurantiaria* fajt, de a modellünk becslése alapján meg fogják sínyleni a klíma változását és *C. pennaria* fajok egyedei is.

Az eredmények a növényvédelmi prognosztika számára is fontosak lehetnek a kártevők elleni védekezésben, de a kutatás további folytatásának lehetőségeként ezen modelleket a továbbiakban védett vagy ritka, valamint kártevő lepkék, rovarok populációdinamikai karakterének, illetve ezek jövőbeli várható változásának feltárására is alkalmazhatjuk.

5. A SZERZŐNEK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓI

IMPAKT FAKTOROS FOLYÓIRATCIKK

Kúti Zs., Hirka A., Hufnagel L., Ladányi M. (2011): A population dynamical model of *Operophtera brumata*, L. extended by climatic factors. *Applied Ecology and Environmental Research* 4, 433-447. **IF: 0,379**

NEM IMPAKT FAKTOROS FOLYÓIRATCIKK

Kúti Zs., Hirka A., Petrányi G., Szabóky Cs., Gimesi L., Hufnagel L., Ladányi M. (2010): A kis téliaraszoló (*Operophtera brumata* L.) aktivitásának modellezése abiotikus paraméterekkel. *Agrárinformatika* 1, 40-46.

MAGYAR NYELVŰ KONFERENCIA ÖSSZEFOGLALÓK (ABSTRACT)

Ladányi M., **Kúti Zs.**, Hirka A. (2014): A lepkék rajzáskezdetének és a rajzáshosszának időbeli változása. IX. Regionális Természettudományi Konferencia, 2014. január 30. Összefoglalók 16.

MAGYAR NYELVŰ KÖNYV, KÖNYVRÉSZLET

Kúti Zs., Hirka A., Hufnagel L., Szenteleki K., Ladányi M., (2011): A kis téliaraszoló (*Operophtera brumata* L.) rajzáskezdetének és rajzáshosszának elemzése, és várható változásainak becslése. Magyar Agrárinformatikai Szövetség, Debrecen. <http://tamop.magisz.org/poldoc/docstore/tanulmany/AT-II.pdf>

Hufnagel L., **Kúti Zs.**, Hlaszny E., Reiczigel Zs., Molnár M., Homoródi R., Flórián N., Gergócs V., Türei D., Ladányi M. (2012): A klímaváltozás közösségökológiai hatásainak elemzése. In: Szenteleki, K., Szilágyi, K. (szerk): Fenntartható fejlődés, élhető régió, élhető települési táj; Tudományos közlemények III. Budapesti Corvinus Egyetem, Budapest. 7-24.