

A KIS ÉS KÖZEPES DÓZISÚ IONIZÁLÓ SUGÁRZÁS LEPKÉKRE GYAKOROLT HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA

Nagy-Czitrovsky Blanka^{1*}, Bálint Zsolt², Szántó Péter¹, Fűri Péter¹, Madas Balázs Gergely¹,
Szőcs Gábor³, Bozsik Gábor³, Lakatos Ferenc⁴, Horváth Bálint⁴, Tuba Katalin⁴,
Balásházy Imre¹

¹Magyar Tudományos Akadémia Energiatudományi Kutatóközpont,
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

²Magyar Természettudományi Múzeum,
1088 Budapest, Baross u. 13.

³Magyar Tudományos Akadémia Agrártudományi Kutatóközpont Növényvédelmi Intézet,
1022 Budapest, Herman Ottó út 15.

⁴Soproni Egyetem, Erdőművelési és Erdővédelmi Intézet,
9400 Sopron, Bajcsy-Zsilinszky utca 4.
*czitrovsky.blanka@ymail.com

A kézirat beérkezett: 2019.01.04.

Közlésre elfogadva: 2019.04.24.

Preliminary studies of the effect of low and medium doses of ionizing radiations on butterflies and moths

After the emission of large quantity of radioactive isotopes significant changes in the wildlife of the environment have been reported in several papers. For example, increased mutation rate has been found in insects after the Chernobyl accident, or notably in lycaenid butterflies after the Fukushima nuclear disaster. To answer whether low dose ionizing radiation has a detectable effect on butterflies and moths, we have conducted various gamma-radiation trials on four lepidopterous species: Plebejus argus, Polyommatus icarus (both Lycaenidae), Ostrinia nubilalis (Crambidae: Pyralinae), and Lymantria dispar (Erebidae). Results showed that the adult lifetimes of the irradiated lycaenid butterflies decreased and females laid less eggs. Although the lifespan of the larval, pupal and adult stages of Lymantria dispar did not change in statistically significant manner when eggs had been irradiated by 1Gy gamma radiation, nevertheless slightly different tendency between the reactions of females and males could be surmised. Further investigations are inspired by the results.

Keywords: Ionizing radiation, environmental nuclear pollution, biological effects on butterflies, bioindicator

Nagy mennyiségű radioaktív izotóp kibocsátásával járó események után a környezet élővilágában a háttérállapothoz képest számos változást figyeltek meg. Ilyenek voltak például lepkék megnövekedett gyakoriságú mutációi. Annak megválaszolására, hogy a kis dózisú ionizáló sugárzásnak van-e kimutatható hatása a lepkékre különböző gamma-sugárzásos kísérleteket folytattunk négy faj bevonásával: ezüstös és Ikarusz boglárka (Lángszínérfélék), kukoricamoly (Fényiloncafélék) és gyapjaslepke (Gyapjaslepkefélék). A kísérletek eredményei alapján kijelenthető, hogy az ionizáló sugárzás hatására csökkent a boglárka imágók élettartama és valószínűsíthető a besugárzott nőstények által lerakott peteszám csökkenése is. A peteállapotban besugárzott gyapjaslepkék hernyó-, báb és imágó állapotainak élettartama nem változott szignifikáns mértékben és a változásban különbség mutatkozott a nőstények és a hímek között. Az eredmények további hasonló vizsgálatok elvégzésére inspirálnak.

Kulcsszavak: Ionizáló sugárzás, radioaktív környezetszennyezés, lepkéken biológiai hatás, bioindikátor

BEVEZETÉS

Az 1986-os csernobili és a 2011-es fukushimai nukleáris baleseteket követően a balesetek környezetének élővilágában nagyszámú változást figyeltek meg. E két jelentős radionuklid kibocsátással járó szerencsétlenség következményeit több kutató vizsgálta. A csernobili katasztrófa által szennyezett területeken készült biológiai vizsgálatok eredményeiről számos tanulmány jelent meg, például Zakharov és Kyrsanov [1], Møller és munkatársai [2–6], valamint Yablokov és munkatársai [7]. Ismereteink szerint a rovarok általában jóval kevésbé érzékenyen reagálnak az ionizáló sugárzásra, mint a gerincesek és sokkal nagyobb sugárdózist kibírnak. Møller és Mousseau [5] mégis találtak biológiai hatást olyan ízeltlábúakon, köztük rovarokon, amelyek krónikusan kaptak kis dózisú ionizáló sugárzást. Kutatásaik során a szennyezett területen megfigyelték a biodiverzitás és a biomassza csökkenését, ami a rovarok nagyarányú faj és egyedszám csökkenésének volt a következménye. Eredményeik alapján tehát kijelenthető, hogy a krónikus ionizáló sugárzás kis dózisa is jelentős hatással lehet a rovarokra. Csernobilben jelenleg a legtöbb radioizotóp a talaj legfelső rétegében, a gerinctelenek fő élőhelyén található. A lepkék petéjére, hernyójára és bábjára különösen nagy hatással lehet a talajban jelenlévő radioaktivitás, mert ezek a fejlődési alakok hosszú időn keresztül kapnak ionizáló sugárzást. E hatás kiterjedhet az egész ökoszisztéma működésére, mivel a rovarok szerepe pótolhatatlan a természetben, hiszen például a beporzás hiánya a növények diverzitásának csökkenéséhez vezet. Csernobil környékén a gerinces élőlényeken is, például fecskéken, számos eltérést felfedeztek fel a máshol élő azonos fajú egyedekhez képest [3, 8].

A különböző környezeti változásokra – mint például a páratartalom és a hőmérséklet – igen érzékenyen reagál a Boglárkaformák (*Polyommata*) alcsaládjába tartozó fajok szárnyának színe, mintázata és formája [9, 10, 11]. Érzékenyséjük miatt az alcsaládot képviselő fajok indikátorfajnak kiválóan alkalmasak. Egy érdekes tanulmány kimutatta, hogy Dél-Oroszországban, Kiszlovodszk területén egy szokatlan populációt találtak az alcsaládba tartozó csipkés boglárka (*Meleageria daphnis*) nevű fajnál [12]. Kiszlovodszk egy olyan ércfeldolgozó és dúsító központtól 30 km-re helyezkedik el, ahol az első szovjet atombombákhoz uránércet dolgoztak fel, valamint a csernobili katasztrófa során kibocsátott radioizotópok által fokozottan érintett területről van szó. Dantchenko és munkatársai [12] megállapították, hogy a boglárkafaj nőtényeinek 60%-a mozaikosan gүнandromorf – hímnős – jelleggel rendelkezett az 1988 és 1993 közötti vizsgálati időszakban. Ez igen magas aránynak tekinthető, hiszen a teljes – bilaterális – gүнandromorfia gyakorisága nagyon alacsony, 10^{-5} -re tehető a Földön. A mozaikos gүнandromorfia még ennél is jóval kevesebb esetben figyelhető meg a természetben [13]. Valószínűsíthető, hogy a sugárzás által kiváltott magas szintű szomatikus mutáció vagy genetikai eltérés jött létre az Y-kromoszómában, amit a legtöbb nőtény magával hordozott ebben a populációban. Laboratóriumi körülmények között sikerült már növelni rovarok esetében a hímnősség előfordulási gyakoriságát, mégpedig röntgen-sugárzással ecetmuslicában (*Drosophila*) [14]. Elvben nem kizárt, hogy nem a sugárzás okozta a gүнandromorfizmus gyakoriságának növekedését, ugyanis közel hasonló fajok keresztezésével is növekedhet ezen egyébként igen ritka tulajdonság előfordulási valószínűsége [15], valamint terepen gyűjtött, hibrid zónákból származó lepkék között is találtak már erősen megnövekedett gyakoriságú mozaikosan hímnős egyedeket [16].

A Fukushima Dai-ichi atomerőműben történt 2011-es baleset során nagymennyiségű radioaktív anyag került ki a környezetbe. Itt is több tanulmány született az emelkedett szintű radioaktivitás biológiai következményeiről [9, 17, 18]. A balesetet követően a kutatók a

környezetben begyűjtött boglárkalepkéken többféle és gyakori elváltozásokat találtak és arra a következtetésre jutottak, hogy az atomerőműből származó mesterséges radionuklidok fiziológiai és genetikai károsodást okoztak a Japánban nagyon magas egyedszámú *Pseudozizeeria maha* boglárka lepkefaj számos egyedében [9]. Ezek után egy Fukushimától 1700 km-re lévő másik szigeten kísérletsorozatokat indítottak el, amelyek során kis dózisu (55 mSv, 125 mSv) besugárzást alkalmaztak mind külső, mind belső sugárterheléssel és olyan dózisintenzitással, amely a szennyezett területekre jellemző értékekhez hasonló. Így realiztikusan modellezték a katasztrófát követő környezeti folyamatokat. A belső sugárterhelés vizsgálatokor a *Pseudozizeeria maha* nagyszámú egyedét a szennyezett területekről begyűjtött táplálékkal etették [18]. Az így kapott belső sugárterhelés értékét meghatározták és számos tulajdonság változásának mértékét vizsgálták. A sugárzás hatására az egymást követő generációkban akkumulálódva jelentek meg a szabad szemmel is jól észlelhető mutációk. A zónaolvadás után 6 hónappal súlyosabb rendellenességeket figyeltek meg, mint 2 hónappal a baleset után. Az első nemzedékből származó nőtények F1 utódaiban is jelentek meg anomáliák és ezek az F2 generációban még nagyobb mértékben – 33,5%-ban – voltak jelen. Fontos továbbá megemlíteni, hogy ezeknek a deformitásoknak a mértéke csökkent a balesettől távolabb elhelyezkedő területeken. Ilyen morfológiai elváltozások voltak a kisebb szárnyméret, a deformálódott szárnyalak, a szabálytalanul kifejlődött szem, valamint a deformált tapogatók. Ezen kívül a nagyobb sugárterhelést kapott területről származó lepkeegedek mortalitási aránya is magasabb volt, mint a nem szennyezett területen élőké.

Mindezek alapján felmerül a kérdés, hogy érzékenyen reagálnak-e a lepkék, vagy bizonyos lepkék, a kis dózisu ionizáló sugárzásra és alkalmasnak tekinthetőek-e biodozimetria célú alkalmazásra.

ANYAG ÉS MÓDSZER

A fenti kérdések megválaszolására indított el egy kísérletsorozatot az MTA Energiatudományi Kutatóközpont és ezen eredményeket foglalja össze e tanulmány további része. A munka során négy különböző lepkefajjal történtek előzetes vizsgálatok. Az egyik faj az ezüstös boglárka (*Plebejus argus*), a másik az Ikarusz boglárka (*Polyommatus icarus*), a harmadik a kukoricamoly (*Ostrinia nubilalis*), valamint a negyedik a gyapjaslepke (*Lymantria dispar*) volt (1. táblázat). Az 1. táblázat összefoglalja a kísérletben részt vett lepkefajok besugárzás alatti fejlődési alakját, tudományos nevét, a besugárzásban alkalmazott egyedszámot, a besugárzás dózisát és a kontrollcsoport egyedszámát.

Annak érdekében, hogy egyértelműen megállapítható legyen, hogy a bekövetkezett változások az ionizáló sugárzás hatásai-e, vagy csupán a környezeti változás következményei-e, szükségszerű kontroll csoportot kialakítani – tehát olyan csoportot, amelynek egyedei nem kapnak besugárzást, de minden más életkörülmény megegyezik a besugárzott csoporttal.

A befogott boglárka példányokat mesterséges körülmények között tartottuk és igyekeztünk a természeteshez leginkább hasonló kondíciókat biztosítani számukra. A laboratóriumban természetes fényt biztosítottunk, nektárforrásaik olyan növények voltak, amelyeket a természetben is látogatnak. A boglárka fajok egyedei párosodtak, és a nőtények petét is raktak. A példányok terepi begyűjtése során a kolóniába egy kökény-farkincás (*Satyrion spini*) (Lángszinérformák: Lángszinérfélék = Lycaeninae: Lycaenidae) hím egyed is bekerült. Az egyedeket nem vettük ki a tenyésztetecből, a besugárzott boglárkákkal együtt kezeltük. A besugárzás cézium ágyúval történt ($^{137}\text{Cs} \rightarrow 662\text{keV}$ gamma-sugárzás), akut módon, egyszeri alkalommal.

A harmadik lepkefaj, amellyel rendszeres vizsgálatokat végeztünk a kukoricamoly (*Ostrinia nubilalis*) volt, amely a trópusokon igen magas fajszámot elérő Fényiloncafélék családjának egyik legismertebb képviselője. Hazánkban a mezőgazdasági kártételei jelentősek. Az imágók

elsősorban éjszaka aktívak, de tömeges rajzáskor nappal is repülnek. A tenyésztési kísérletek a Magyar Tudományos Akadémia Agrártudományi Kutatóközpontjának Növényvédelmi Intézetében történtek, ahol a nőstény lepkék feromon kibocsátása került elemzésre. A kukoricamoly nőstények tojócsövéből készített kivonatok feromon-tartalmának meghatározása lángionizációs detektorral ellátott gázkromatográf (6890N, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA) valósult meg. A minőségi azonosítás a feromon-komponensek retenciós ideje alapján, a feromon főkomponens, a (Z)11-tetradecenil acetát (Z11-14:Ac) [19] mennyiségének kiértékelése pedig egy nőstényre vonatkoztatva (female equivalent - FE) belső szintetikus standarddal történő összehasonlítással, a megfelelő csúcs

1. táblázat: A kísérletbe vont lepkefajok besugárzási állapota, neve és rendszertani helye, a besugárzás dózisa és a mintaszámok

Besugárzási fejlődési alak, lepkefaj	Besugárzott	Kontroll
lepke, <i>Plebejus argus</i> (Lycaenidae)	8 példány 100 mGy 6 példány 250 mGy	8 példány
lepke, <i>Polyommatus icarus</i> (Lycaenidae)	2 példány 100 mGy	6 példány
báb, <i>Ostrina nubilalis</i> (Pyralidae)	20 példány 50 mGy 20 példány 475 mGy	20 példány
pete, <i>Lymantria dispar</i> (Erebidae)	324 példány 1 Gy	258 példány

alatti területek (peak area) arányának meghatározásával történt. A besugárzott bábokból kikelt nőstény lepkéket laboratóriumi körülmények között hímekkel pároztattuk, majd az életképes peték arányát az összes lerakott petéhez viszonyítva csoportonként meghatároztuk és statisztikailag összehasonlítottuk (Chi-square test with Yates correction, two tailed, P=5%).

A negyedik lepkefaj az erdészeti szempontból fontos gyapjaslepke (*Lymantria dispar*), amelynek faunaterületünkön hímjei nappal aktívak, nőstényei viszont röpkétlenek. Családjában számos erdészeti és mezőgazdasági kártevő ismert. A kísérletet a Soproni Egyetem munkatársainak közreműködésével végeztük. A magyarországi példányoktól származó petéket kezelés után laboratóriumban keltettük, majd az egyedeket elkülönítve neveltük, félszintetikus tápanyaggal.

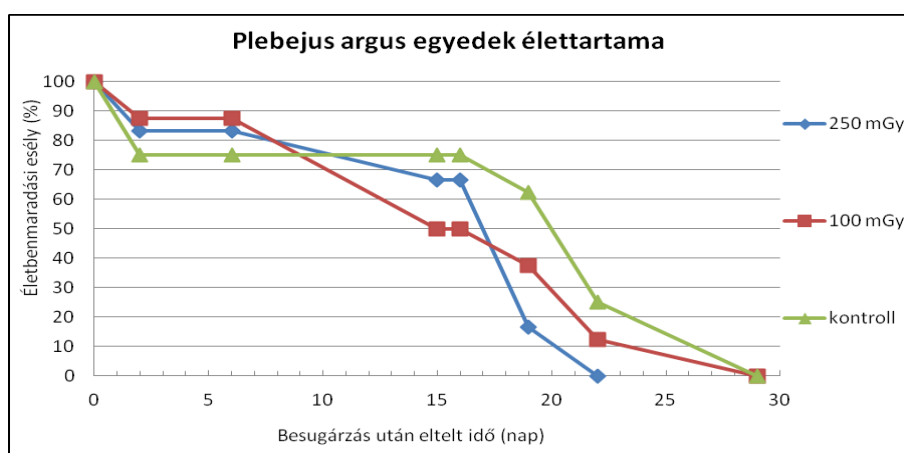
Mint az 1. táblázatból is látható, az Ikarusz boglárka, valamint az ezüstös boglárka egyedszáma nagyon alacsony, e fajok esetében a jövőben szükségszerű lesz nagyobb egyedszámmal részletes kísérleteket végezni. Vizsgálataink ezért előkísérletnek tekinthetők.

EREDMÉNYEK

Az ezüstös boglárkával végzett kísérletek során az imágókból 3 eltérő csoportot alakítottunk ki, az egyiket 100 mGy (4 nőstény és 4 hím), a másikat 250 mGy (3 nőstény és 3 hím) dózissal sugaraztuk be, a harmadik csoport (4 nőstény és 4 hím) pedig a kontroll csoport volt.

Az 1. ábrán jól látható, hogy a 250 mGy dózissal besugárzott ezüstös boglárkacsoportok túlélési gyakorisága jóval hamarabb éri el a nullát, mint a 100 mGy-vel besugárzottaké, valamint a kontroll csoporté. Mindhárom csoport közül a legnagyobb dózissal besugárzott csoportba tartozó példányok pusztultak el legelőször, pontosan egy héttel korábban a másik két csoporthoz képest. A 250 mGy-vel besugárzott lepkéknél a kísérlet első 6 napján kis mértékben, fokozatosan csökkent az életben maradtak száma. A 16-19. napok között jóval intenzívebb halálozási arány növekedés következett be. A besugárzást követő 22. napon az utolsó élő példány is elpusztult. A 100 mGy-vel besugárzott egyedek elhullása az első 6

napban a legkisebb és a 9-17. napokban a legnagyobb mértékű volt, viszont az utolsó élő egyed elhullása csak akkor következett be, amikor a kontroll csoportban lévő utolsó egyedé. A kísérlet első hat napján legnagyobb arányban a 100 mGy-vel besugárzott lepkék voltak jelen. Ezt követően egészen a 22. napig viszonylag intenzív a halálozás mértéke különösen a 19-22. napok között. Ez után az életben maradt egyedek számának csökkenése kevésbé intenzív és alacsony egyedszámban egészen a 29. napig megfigyelhetők voltak túlélő példányok. A kontroll csoportba tartozó egyedeknél a kísérlet kezdeti stádiumában (első két nap) megfigyelhető volt egy kisebb egyedszámú halálozás. Ami talán a legfontosabb információ az 1. ábrán az az, hogy a besugárzás következtében a túlélés gyakorisága a besugárzott egyedeknél a besugárzástól számított 11. naptól jelentősen kisebb volt a kontroll csoporthoz viszonyítva és a nagyobb dózis esetén meredekebben csökkent a túlélő egyedek száma. Amíg a legnagyobb dózissal besugárzott egyedek közül az utolsó is elpusztult a 22. napon, addig a másik két csoportban ez egy héttel később történt csak meg. Mivel nem minden nap történt mérés, ezért nem vízszintes és függőleges szakaszokat alkot az 1. és a 2. ábra.



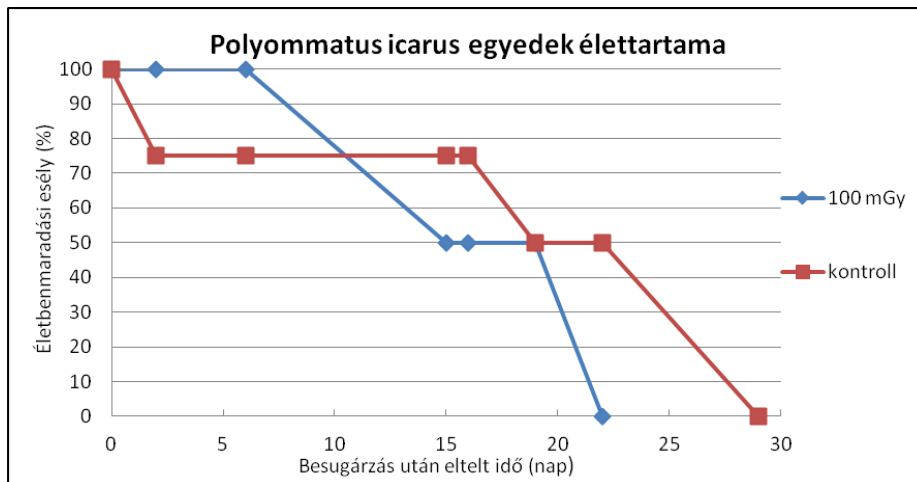
1. ábra: *Plebejus argus* besugárzott és kontroll egyedeinek élettartama

A csökkent élethossz és feltehetően a szervezet károsodása miatt, kevesebb utódot tudnak létrehozni a besugárzott nőstény egyedek, amelyet jól szemléltet, az ezüstös boglárka szaporodásával kapcsolatos következő kísérletünk is. E kísérletben párosítottuk a sugárterhelésnek kitett nőstény és hím egyedeket, illetve a kontroll csoportból a sugárzásnak ki nem tett nőstény és hím példányokat is. Eredményeink szerint a kontroll csoportba tartozó 4 nőstény lepkénél az átlagos peteszám 5,83 volt, viszont a 7 besugárzott nőstény egyednél (4 példánynál 100 mGy és 3 példánynál 250 mGy) ez a szám átlagos értéke csak 0,89 lett. Jelentős különbség mutatható tehát ki a két csoport által lerakott peteszám között. A természetben jelentős hatása lehet ennek, hiszen ez az adott faj egyedszámának drasztikus csökkenéshez, végső soron akár az adott élőhelyről való eltűnéséhez is vezethet.

Az Ikarusz boglárka egyedeiből kevesebb állt a rendelkezésünkre, ezért ebből a fajból csupán két csoportot alakítottunk ki. Az egyiket 100 mGy-vel sugaraztuk be, míg a másik a kontroll csoport volt. Két lepkét sugaraztunk be és 6 került a kontroll csoportba. Az alacsony besugárzott példányszám miatt ezen eredményeket csak tájékoztatásként mutatjuk be.

A 2. ábrán látható, hogy az előző kísérlethez hasonlóan, itt is előbb következett be a besugárzott egyedek elpusztulása, mint a kontroll csoportban lévőké. A kísérlet elején (az első 6 napban) a 100 mGy-vel besugárzott példányok változatlanul, maximális egyedszámban voltak jelen, majd a 6. naptól a besugárzás utáni 15. napig a felére csökkent az

egyedszám, és egészen a besugárzást követő 19. napig változatlan maradt, majd onnan meredeken csökkent az élő példányok száma, és 22. napon az utolsó besugárzott egyed is elhullott. A kontroll csoportba tartozó példányok között az első két napban csökkent egy kicsit a túlélő egyedek száma, majd attól kezdve konstans volt a 16. napig, és innen csökkent a 19. napig, amelytől a 22. napig állandó értéken állt, végül onnan a 29. napig nullára csökkent az élő egyedek száma.



2. ábra: *Polyommatus icarus* besugárzott és kontroll egyedeinek élettartama

Mind az ezüstös boglárka, mind pedig az Ikarusz boglárka esetében a kísérletbe bevont alacsony egyedszám miatt, a kapott eredmények csak jelzés értékűek.

Érdekességgként jegyezzük meg, hogy az egyetlen besugárzott kökény-farkincás egyed élettartama a kontrollcsoportéval pontosan megegyezett.

A harmadik lepkefaj, amellyel rendszeres vizsgálatokat végeztünk az a kukoricamoly. Tenyészetben tartott friss kolóniából származó 20-20 friss bábót, 50 mGy, valamint 475,5 mGy dózisu akut gamma-besugárzásnak tettünk ki. Ugyanekkor egyedszámmal a kontroll csoport is biztosítva volt. E kísérletben a besugárzást követően a nőstény lepkék feromon kibocsátása került elemzésre a Magyar Tudományos Akadémia Agrártudományi Kutatóközpontja Növényvédelmi Intézetében (lásd az Anyag és Módszer fejezet idevágó részét). A különböző dózisu besugárzások hatására, a kontroll csoporttal összehasonlítva, csak egészen minimális mértékben változott meg a nőstény egyedekből kivonható feromon főkomponensének a mennyisége (0,8 – 1,1 ng/FE) (2. táblázat). Azon felül, hogy a változás mértéke valószínűleg a mérési hibahatáron belül mozog, az eredményekből azért sem mutatható ki egyértelmű tendencia, mivel az 50 mGy-vel besugárzott nőstények esetében 0,81 ng/FE, a 475 mGy-vel besugárzottak esetében pedig 1,06 ng/FE főkomponens mennyiség volt kimutatható, amíg a kontroll csoport esetében ehhez nagyon hasonló érték – 1,14 ng/FE. Azt, hogy még a magasabb sugáradag sem eredményezett kimutatható hatást az is alátámasztja, hogy nem találtunk szignifikáns különbséget a kontroll és a besugárzott csoportok között az életképes peték arányában sem (kontroll: 68,1%, 50mGy: 73,1%, 475mGy: 70,4 % - a kísérletben leszámolt összes peteszám: 5310 db; $\chi^2=0,023$, $df=1$, $P=0,5351$). Célszerű lenne a kísérletet valamivel nagyobb dózisu besugárzással és nagyobb egyedszámú csoporton megismételni.

A negyedik lepkefaj, a gyapjaslepke esetében az egyedszám már jóval nagyobb (582 darab pete) volt, és a besugárzott lepkék mind 1 Gy sugárdózist kaptak. Azért alkalmaztunk nagyobb dózist, mert feltételeztük, hogy minél nagyobb a dózis, annál nagyobb a biológiai

hatás, ugyanakkor a túlélés esélye még jelentősen nem csökkenhet le, ugyanis az irodalomban, e lepkefajnál sterilizációra és nem elpusztításra 50 Gy besugárzási dózist javasolnak [20]. Így az 1 Gy besugárzási dózis biológiai hatás kereséséhez nem tűnt túl nagyoknak. Nem alkalmaztunk több különböző besugárzási dózisértéket, hogy az eredmények statisztikája minél megbízhatóbb legyen. Itt pete állapotban került sor a besugárzásra. A tél

2. táblázat: *Ostrina nubilalis* feromontermelése, különböző dózissal besugárzott csoportok esetében

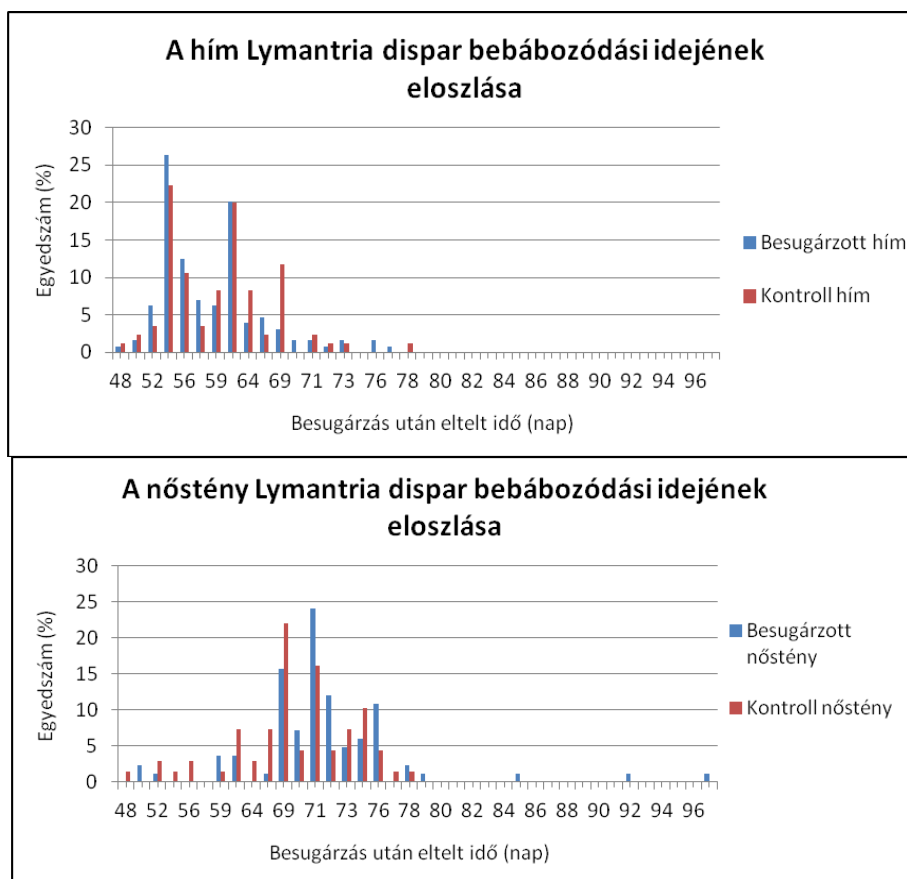
Csoport	Mennyiség Z11-14:Ac (ng/FE)
Kezeletlen kontroll	1,14
50 mGy	0,81
475,5 mGy	1,06

folyamán 7 Celsius fokon tartott petéket hagytuk szobahőmérsékleten felmelegedni, majd fél napon belül besugaraztuk azokat. Feltételeztük, hogy a besugárzás ideje alatt a peték kikelése elkezdődik, így intenzív sejtosztódás alatt történik a besugárzás. A sejtosztódás feltételezésünk szerint növeli a károsodás esélyét, ezért sugaraztuk be ilyen fázisban az állatokat. E kísérletekben főként a bebábozódás besugárzást követő időpontját és a bábállapotban töltött idő hosszát elemeztük.

A hím és a nőstény gyapjaslepke bebábozódási gyakoriság-eloszlását mutatja a 3. ábra a besugárzástól a bábozódásig eltelt idő függvényében. A besugárzott hím egyedek száma: 197, a besugárzott nőstény példányok száma: 127. A kontroll csoportba került hímek száma: 146 és a kontroll csoport nőstény lepkéinek száma: 112.

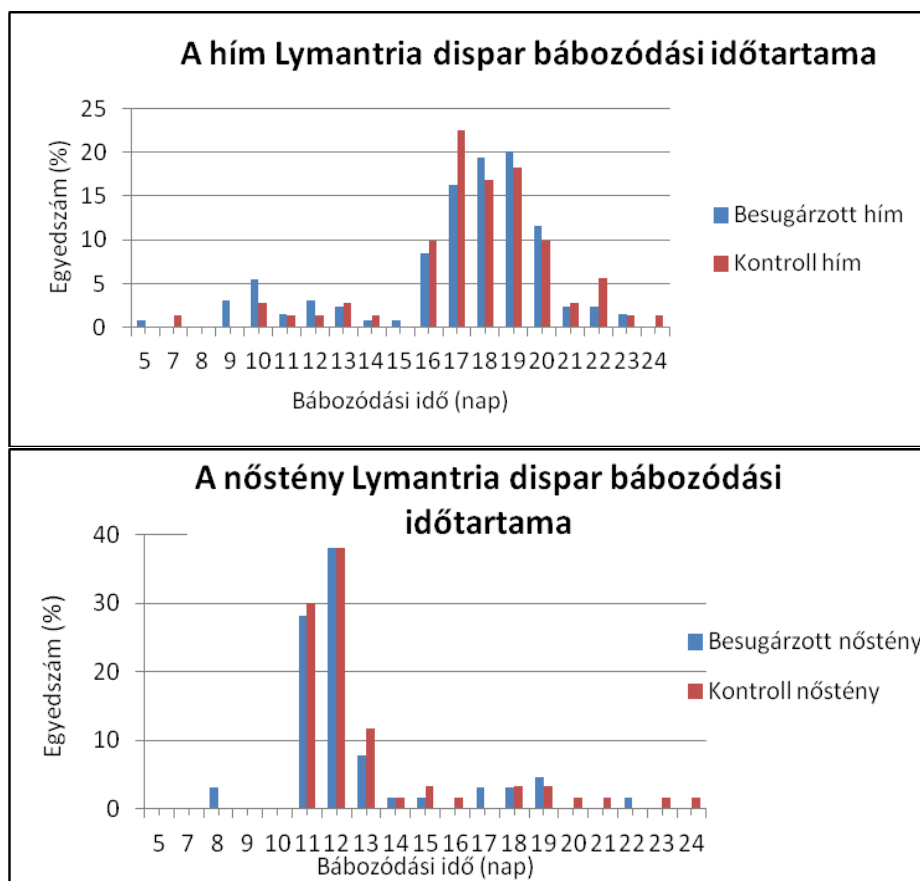
A 3. ábra felső panelja alapján megállapítható, hogy a besugarazott és a kontroll gyapjaslepke hímeknek a besugárzástól a bebábozódásáig eltelt ideje (bebábozódási ideje) között nincs jelentős különbség. Ugyanakkor megfigyelhető, hogy besugárzott hímek valamivel nagyobb arányban bábozódtak be a korábbi (52-59. nap közötti) időszakban, a kontroll csoport hímjei pedig a későbbi (64-69. napok közötti) időszakban. Az alsó panel alapján megállapítható, hogy a nőstényeknél sincs jelentős különbség a besugarazott és a kontroll egyedek bebábozódási idejének gyakoriságeloszlás értékei között, viszont itt a hímekhez képest az eloszlás nagyobb szórása figyelhető meg. Ezenkívül megállapítható, hogy a besugárzott nőstények a későbbi időpontokban (70. naptól) bábozódtak be nagyobb arányban a kontroll csoport egyedeihez viszonyítva.

A gyapjaslepkék bábozódási idő szerinti gyakoriságeloszlásai alapján egyrészt megállapítható, hogy a hím gyapjaslepkéknél a besugarazott, míg a nőstényeknél a kontroll csoport tagjai bábozódnak be hamarabb, másrészt, hogy nőstényeknél a besugárzottak adatai jobban szórnak, mint a kontroll csoporté. Ezenkívül besugárzástól függetlenül, a hímek átlagosan két héttel hamarabb bábozódnak be, mint a nőstények. A hím lárvák az 5. vagy a 6. lárvastádium, míg a nőstény lárvák a 6. lárvastádium után bábozódnak be [21].



3. ábra: A hím (felső panel) és a nőstény (alsó panel) *Lymantria dispar* bábozódási gyakoriság-eloszlása a besugárzás és a bebábozódás napja közt eltelt idő függvényében a besugárzott és a kontroll egyedek esetében. (Átlagok és szórásaik: hím besugárzott: $59,3 \pm 5,9$ nap, hím kontroll: $60,3 \pm 6,1$ nap, nőstény besugárzott: $71,6 \pm 6,8$ nap, nőstény kontroll: $68,5 \pm 6,3$ nap.)

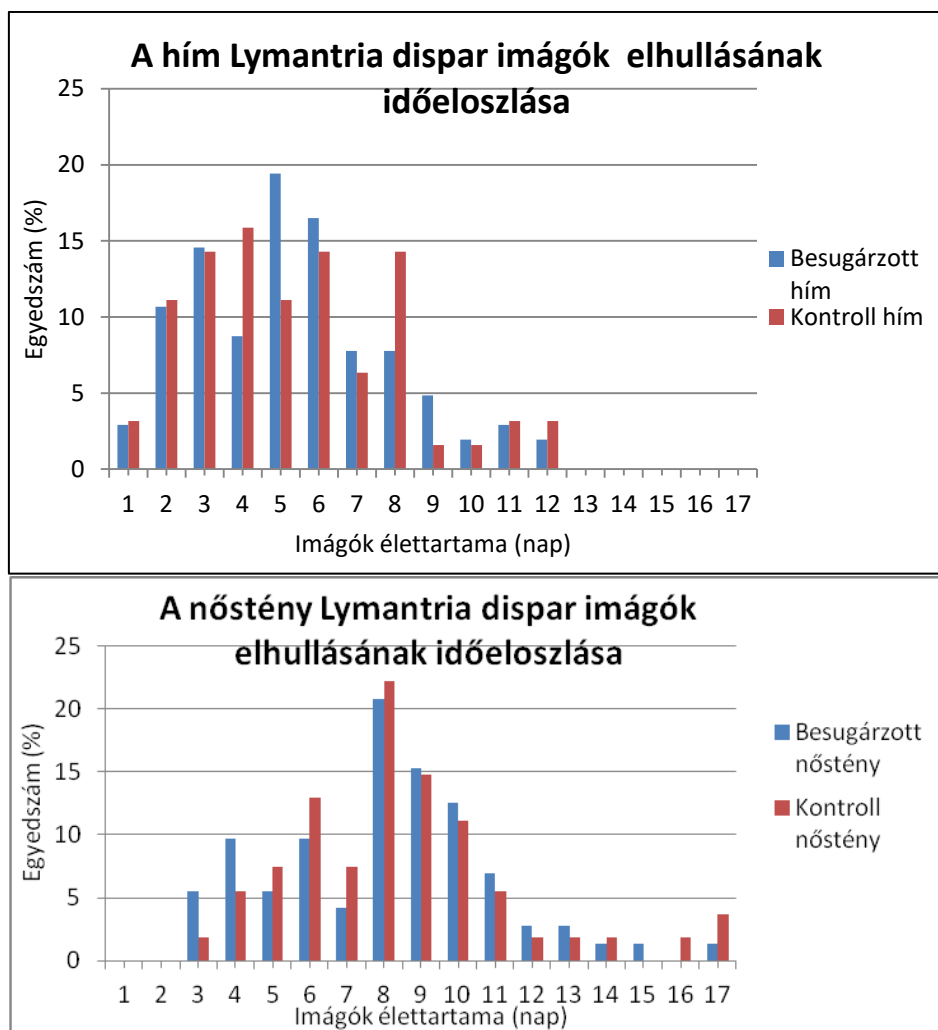
A 4. ábra a bábállapot időtartamának eloszlását mutatja hím és nőstény gyapjaslepkék besugárzott és kontroll csoportjainál.



4. ábra: A *Lymantria dispar* bábállapotának gyakoriság-eloszlása a hím (felső panel) és nőstény (alsó panel) egyedeknél a bábállapot időtartamának függvényében a besugárzott és a kontroll csoportok esetében. (Átlagok és szórásaik: hím besugárzott: $17,1 \pm 3,4$ nap, hím kontroll: $17,7 \pm 3,0$ nap, nőstény besugárzott: $12,3 \pm 2,3$ nap, nőstény kontroll: $13,1 \pm 3,1$ nap.)

A hímek bábállapotban eltöltött időtartama alapján megállapítható, hogy a besugárzott hímek a kontroll csoport hím egyedéhez viszonyítva átlagosan valamivel hamarabb kezdtek el imágóvá alakulni, azaz valamivel hamarabb keltek ki a besugárzott hím peték lepkéi. A 13-17. nap közötti időszakban a kontroll, a 18-20. nap adta időtartamban pedig újra a besugárzott csoport hím példányai keltek ki nagyobb arányban.

A nőstények bábállapotának időeloszlása meglehetősen aszimmetrikus. A kontroll csoport eloszlása a baloldalon nagyon élesen indul, mert az első érték a 11. nap, és ott máris 30% gyakorisággal kelnek ki a lepkék, azaz 11 napnál hamarabb egy kontroll nőstény sem kelt ki. Amikor viszont kikelt az első egyed, aznap rögtön kikelt az összes kontroll nőstény 30%-a. A besugárzott nőstények között néhány a 8. napon kikelt, viszont a következő nap, amikor besugárzott egyed kelt ki az a 11. nap. A nőstények 80%-a három napon belül kelt ki (11-13. napok) mind a besugárzott, mind a kontroll csoportokban. Az eloszlás jobb oldala meglehetősen széles. A leghosszabb bábállapot besugárzott nőstény esetében 22 nap, kontroll nőstény lepke esetén 24 nap időtartam. A sugárzás hatása nőstény gyapjaslepkékre, hogy a sugárzás néhány esetben lerövidíti a bábállapot idejét, míg más esetekben megnöveli azt (17 és 19 napos időtartamoknál a besugárzott gyakorisáértékek a nagyobbak).



5. ábra: A *Lymantria dispar* imágók élettartamának eloszlása hím (felső panel) és nőstény (alsó panel) egyedek esetén a besugárzott és a kontroll csoportokban. (Átlagok és szórásaik: hím besugárzott: $5,3 \pm 2,5$ nap, hím kontroll: $5,3 \pm 2,7$ nap, nőstény besugárzott: $8,1 \pm 3,0$ nap, nőstény kontroll: $8,4 \pm 3,1$ nap.)

A gyapjaslepkék lepkeállapotának (imágója) élettartam-eloszlását mutatja az 5. ábra hím és nőstény egyedek esetén a besugárzott és a kontroll csoportokban. Az egy, kettő, vagy három napig élő hím lepkék gyakorisága igen hasonló. A negyedik nap hullik el a besugárzott lepkék 9%-a és a kontroll csoporthoz tartozó lepkék 16%-a. A következő három napban a besugárzott hímek, míg a 8. napon a kontroll csoportnál hullnak el nagyobb mennyiségben (8% kontra 14%). Összességében hím egyedeknél a besugárzás hatására az imágó élettartama valamivel csökken. Nőstényeknél az eloszlás a 3. nappal kezdődik, azaz ellentétben a hímekkel, nem volt nőstény, amely csak egy vagy két napig élt volna. A csak 3 vagy 4 napot élt egyedek közt több a besugárzott, mint a kontroll példány. A nagyon hosszú életűek közt (az eloszlás jobb oldala) viszont több a kontroll csoportba tartozó lepke. Ezek arra utalnak, hogy az átlagos élettartamot nőstény lepkék (imágók) esetében a sugárzás valamennyire rövidítette. Ugyanakkor, ha kiszámítjuk az eloszlások átlagértékeit és szórásait, akkor Gauss-eloszlást feltételezve megállapítható, hogy 95%-os konfidenciaintervallum mellett nincs szignifikáns különbség a besugárzott és a kontroll egyedek bebábozódási ideje, a bábállapotuk hossza és az imágók élettartama között sem a hímek sem a nőstények esetében.

KÖVETKEZTETÉSEK

A Lángszinérféléknél (*Lycaenidae*) a kísérleteink alacsony egyedszáma miatt nem vonhatók le biztos következtetések. Az előkísérleteink azt sugallják, hogy a kis dózisú (100 és 250 mGy) sugárterhelésnek kitett ezüstös boglárka és Ikarusz boglárka imágók várható élettartama csökken, valamint hogy az ezüstös boglárka peteszám a besugárzás hatására erősen csökken. A család különböző genetikai hátterű (más rokonsági körbe tartozó) fajtái esetleg másképpen reagálnak a sugárzásra. Ezt jelzi az a kökény-farkincás egyed, amely a 250 mGy besugárzásra rezisztensnek bizonyult.

A kukoricamolylal végzett kis dózisú (50 és 475 mGy) vizsgálataink során a besugárzás a bábállapot elején történt, a várható hatásokat viszont már az imágókon (a nőtény lepkéken) néztük. Nevezetesen a szaporodáshoz elengedhetetlen feromon termelését és az életképes peték arányát elemeztük. Az eredmények alapján elmondható, hogy a nőtények feromon termelésénél a besugárzás hatására a főkomponens mennyisége számottevően nem változott meg, és az életképes peték arányában sem mutatkozott egyértelmű tendencia az alkalmazott sugárdózis tartományban. Az egyes lepkefajok között jelentős különbség mutatkozhat különböző dózisú sugárterhelésnél, és nem lenne meglepő, ha későbbi vizsgálatok során kiderülne, hogy az egész világon elterjedt, agresszív kukoricamolyl az ellenállóbb fajok csoportjába tartozik.

A gyapjaslepkénél a mérések statisztikája már megbízhatónak mondható. Itt az alkalmazott dózis 1 Gy volt, amelyet az állatok pete állapotban kaptak. A kikelt hím hernyók élettartama nagyon enyhén lerövidült a nőtényeké kicsit megnőtt, különösen néhány egyedé, így a bebábozódás ideje eloszlásának szórása is enyhén nőtt. A bábállapot ideje mind hímeknél, mind nőtényeknél igen enyhén, de csökkent. A kikelt lepkék élettartama hímeknél nagyon enyhén nőtényeknél enyhén csökkent a peték besugárzásának hatására. Azonban ezen enyhe változások az eloszlások statisztikus elemzése alapján nem tekinthetők szignifikánsnak [22].

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap által támogatott VKSZ_14-1-2015-0021 azonosító számú projekt keretében zajlott.

IRODALOM

- [1] Zakharov V and Krysanov E. (1996) Consequences of the Chernobyl catastrophe: environmental health. Moscow, Russia: Center for Russian Environmental Policy. p. 160.
- [2] Møller AP and Mousseau TA. (2006) Biological consequences of Chernobyl: 20 years on. *TRENDS in Ecology and Evolution* 4 (21): 200–207.
- [3] Møller AP, Mousseau TA, de Lope F and Saino N. (2007) Elevated frequency of abnormalities in barn swallows from Chernobyl. *Biology Letters* 3:414–417.
- [4] Møller AP, Mousseau TA, Lynn C, Lynnn C, Ostermiller S and Rudolfsen G. (2008) Impaired swimming behaviour and morphology of sperm from barn swallows *Hirundo rustica* in Chernobyl. *Mutation Research* 650:210–216.
- [5] Møller AP and Mousseau TA. (2009) Reduced abundance of insects and spiders linked to radiation at Chernobyl 20 years after the accident. *Biology Letters* 5 (3):356–359.
- [6] Møller AP and Mousseau TA. (2011) Conservation consequences of Chernobyl and other nuclear accidents. *Biological Conservation* 144:2787–2798.

- [7] Yablokov AV, Nesterenko VB and Nesterenko AV. (2009) Chernobyl: Consequences of the catastrophe for people and the environment. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1181:318–326.
- [8] Mousseau TA and Møller AP. (2013) Elevated frequency of cataracts in birds from Chernobyl. *PLoS ONE*. 8:e66939.
- [9] Hiyama A, Nohara C, Kinjo S, Taira W, Gima S, Tanahara A and Otaki JM. (2012) The biological impacts of the Fukushima nuclear accident on the pale grass blue butterfly. *Scientific Reports* 2:570.
- [10] Hiyama A, Nohara C, Taira W, Kinjo S, Iwata M and Otaki JM. (2013) The Fukushima nuclear accident and the pale grass blue butterfly: evaluating biological effects of long-term low-dose exposures. *BMC Evolutionary Biology* 13:168.
- [11] Kertész KI, Piszter G, Horváth ZE, Bálint Zs and Biró LP. (2017) Changes in structural and pigmentary colours in response to cold stress in *Polyommatus icarus* butterflies. *Scientific Reports* 7 (1): 1-12.
- [12] Dantcenko A, Emmel TC and Surakov A. (1995) Nuclear pollution and gynandromorphic butterflies in southern Russia. *Holarctic Lepidoptera* 2(2): 77-79.
- [13] Robinson R. (1971) *Lepidoptera genetics*. Pergamon Press, Oxford. 687.
- [14] Patterson JT. (1933) The Mechanism of Mosaic Formation in *Drosophila*. *Genetics* 18, 1, 32–52.
- [15] Blanchard R and Descimon H. (1988) Hybridization between two species of swallowtails, meiosis mechanism, and the genesis of gynandromorphs. *Journal of Lepidopterists' Society* 42:94–102.
- [16] Scriber, JM, Mercader RJ, Romack H and Deering MD. (2009) Not all bilateral gynandromorph butterflies are interspecific hybrids: new *Papilio* specimens from field populations. *Journal of the Lepidopterists' Society* 63:37–47.
- [17] [Mousseau TA](#) and [Møller AP](#). (2014) Genetic and ecological studies of animals in Chernobyl and Fukushima. The [Journal of Heredity](#) 2014 Sep-Oct; 105(5):704-9.
- [18] Taira W, Nohara C, Hiyama A and Otaki JM. (2014) Fukushima's biological impacts: the case of the pale grass blue butterfly. The [Journal of Heredity](#) 105:710–22.
- [19] Kochansky J, Cardé RT, Liebherr J and Poelofs WL. (1975) Sex pheromone of the European corn borer, *Ostrinia nubilalis* (Pyralidae), in New York. *J. Chemical Ecology* 14: 1359-1366.
- [20] Zúbrik M and Novotný J. (2009) Impact of gamma radiation on the developmental characteristics of the gypsy moth, *Lymantria dispar* (Lepidoptera: Lymantriidae) preparatory to their use as supplemental hosts/prey for natural enemy enhancement. *Biocontrol Science and Technology* 1 (19): 291-301.
- [21] Markóné Nagy K. (2013) A gyapjaslepke (*Lymantria dispar* L.) tömegszaporodásának (2003-2006) elemzése, valamint táplálkozásbiológiai vizsgálatok gyapjaslepkével és apácalepkével (*Lymantria monacha* L.). Doktori (Phd) Értekezés, Nyugat-magyarországi Egyetem Sopron, 2013.
- [22] Czitrovsky BM. (2016) A kis és közepes dózisú ionizáló sugárzás lepkékre gyakorolt hatásának vizsgálata. MSc diplomamunka. Sopron 2016. Nyugat-Magyarországi Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Erdőművelési és Erdővédelmi Intézet, Erdővédelem Tanszék.