

# MATT FEKETE AUTÓK POLÁROS FÉNYSZENNYEZÉSE: A MATT BEVONAT SEM KÖRNYEZETBARÁT – 2. RÉSZ

Blahó Miklós, Herczeg Tamás, Száz Dénes, Czinke László, Horváth Gábor  
ELTE Biológiai Fizika Tanszék, Környezetoptika Laboratórium

Barta András

Estrato Kutató és Fejlesztő Kft., Budapest

Egri Ádám, Farkas Alexandra, Tarjányi Nikolett

MTA Ökológiai Kutatóközpont, Duna-kutató Intézet

Kriszka György

ELTE Biológiai Szakmódszertani Csoport

MTA Ökológiai Kutatóközpont, Duna-kutató Intézet

A januári számban megjelent első részben leírt vizsgálatok, elemzések eredményeit mutatjuk be az alábbiakban.

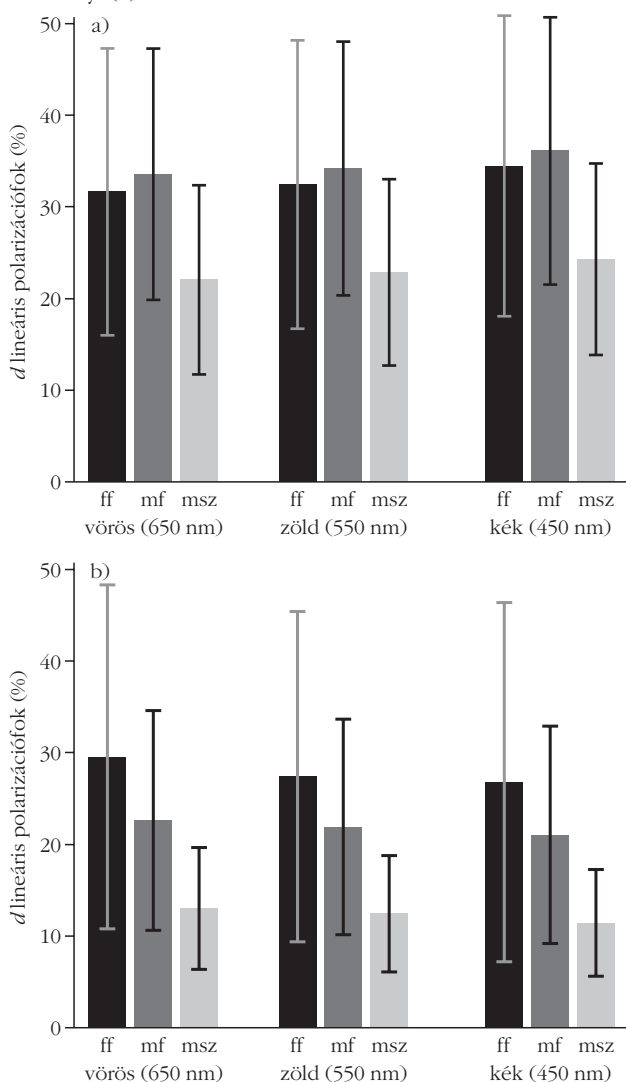
## Eredmények

### Matt fekete autók polarizációs mintázatai

A 3. ábra az első belső borítóoldalon egy tipikus matt fekete autó öt különböző irányból mért polarizációs mintázatát mutatja a spektrum kék (450 nm) tartományában. Jól megfigyelhető, hogy a szélvédő napsütötte részéről visszavert fény  $d$  polarizációfoka igen magas ( $85\% < d < 100\%$ ), míg a függőleges ablakok és karosszériarészek csak gyengén polárosak ( $d < 15\%$ ). A tető, motorháztető és csomagtartó csak részlegesen poláros fényt ver vissza ( $25\% < d < 55\%$ ). Az autóról visszavert fény polarizációfokának térbeli eloszlása meglehetősen homogén. A ferde szélvédő és a vízszintes tető, csomagtartó és motorháztető vízszintesen poláros fényt ver vissza, míg a többi ferde és függőleges autófelület ferde vagy függőleges polarizációirányút. Az autókarosszéria azon részeit, amelyek egy küszöbnél ( $d > 15\%$ ) magasabb polarizációfokú és közel vízszintes polarizációirányú ( $80^\circ < \alpha < 100^\circ$ ) fényt vernek vissza, a polarotaktikus rovarok víznek tekintik [2, 6]. E kettős feltétel a 3. ábra alapján a matt fekete autó szélvédőjére, tetejére és motorháztetejére teljesül, így e felületrészek vonzzák

a vizet kereső polarotaktikus rovarokat. Mindez általában is igaz a matt fekete/szürke karbonfólia- vagy festékbevonatú autókra.

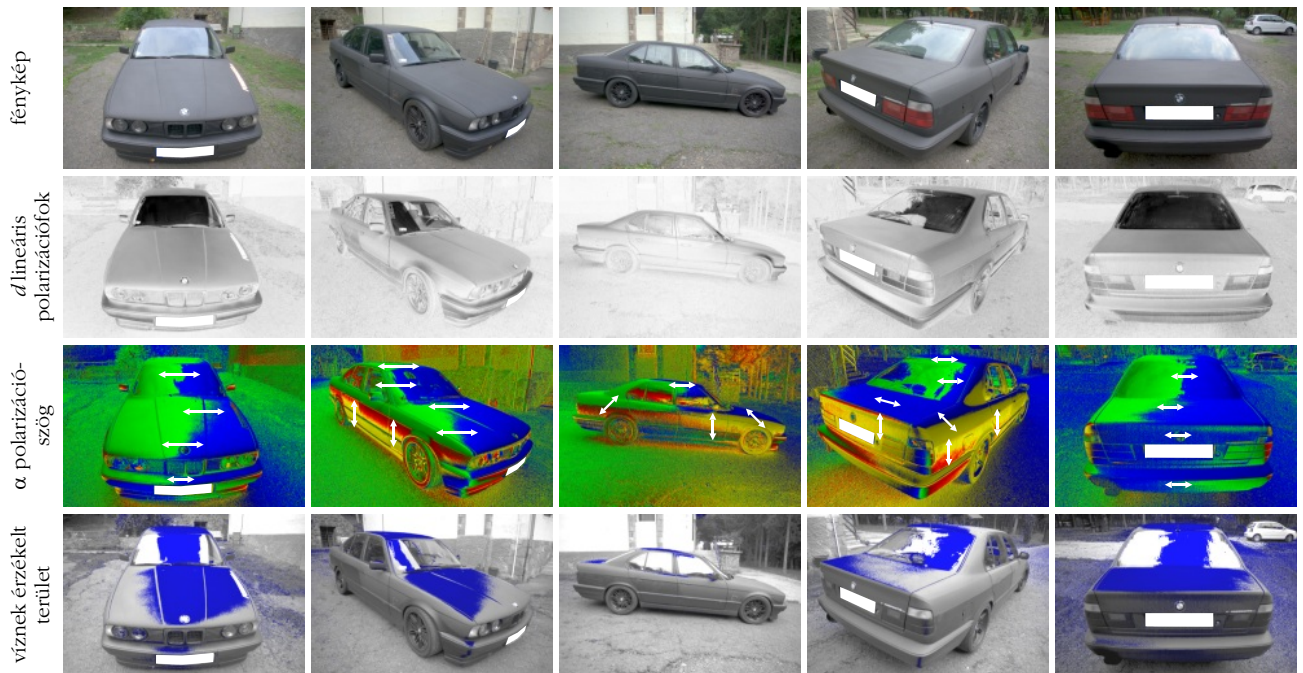
5. ábra. A terepkísérletekben használt fényes fekete (ff), matt fekete (mf) és matt szürke (msz) vízszintes tesztfelületek képalkotó polarimetria segítségével mért  $d$  lineáris polarizációfokának átlaga (oszlopok) és szórása (nagy I alakú pálcikák) a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában, amikor a felületek nap- és égboltfényt (a), illetve fákrol és bokrokról érkező lombfényt (b) vernek vissza.



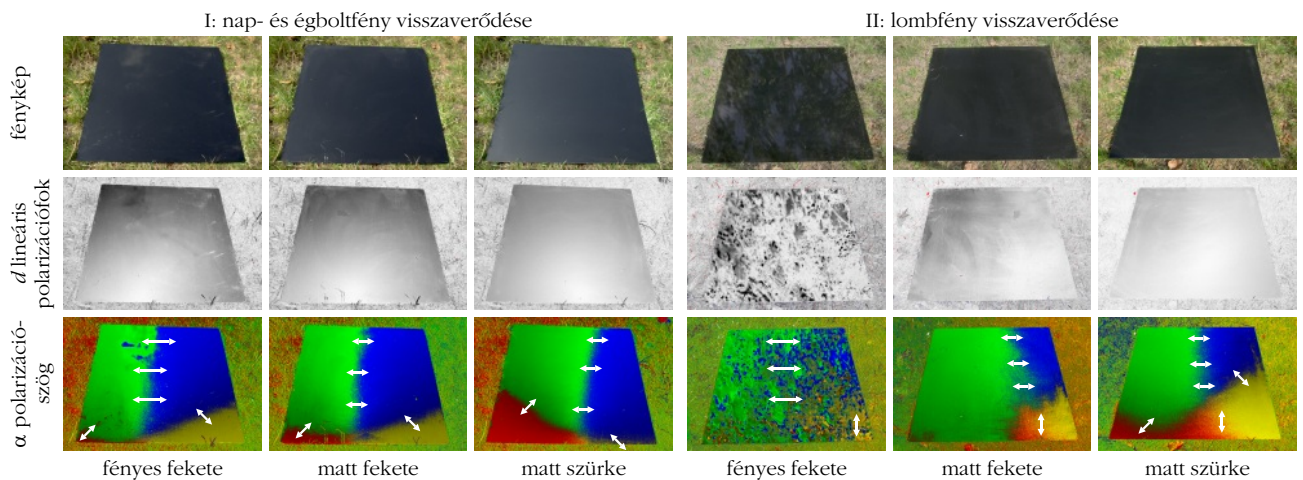
Kutatásainkat az Európai Unió (EU-FP7, TabaNOid-232366: Trap for the novel control of horse-flies on open-air fields) támogatta. Horváth Gábor köszöni a német Alexander von Humboldt Alapítvány műszeradományát és egy három hónapos, regensburgi kutatási ösztöndíját (3,3-UNG/1073032 STP, 2013. június 1. és augusztus 31. között).

Köszönettel tartozunk *Viski Csabának* (Szokolya), hogy lovastanyáján engedélyezte a 2. kísérletünket. Hálaadás vagyunk *Gyurkovszky Mónikának* és *Farkas Róbertnek* (Parazitológiai és Állattani Tanszék, Állatorvos-tudományi Kar, Szent István Egyetem, Budapest) a 2. kísérletünkben előforduló bögölyfajok meghatározásáért. *Gubek István* (ELTE) logisztikai segítségével is köszönettel tartozunk. Köszönjük továbbá *Antoni Györgyinek* (Pályázati és Innovációs Központ, ELTE) és *Kovács Emesének* (Vörösmarty Turistaház, Mátraháza), hogy a 2.b-c és 3. ábrákon látható matt fekete autókat egy mérés erejéig biztosították számunkra. Köszönettel tartozunk *Rebecca Allennek* is (Michigan State University, USA) az 1.a ábra fényképéért.

Blahó Miklós és társai *Matt fekete autók poláros fényszennyezése: a matt bevonat sem környezetbarát* című írásához

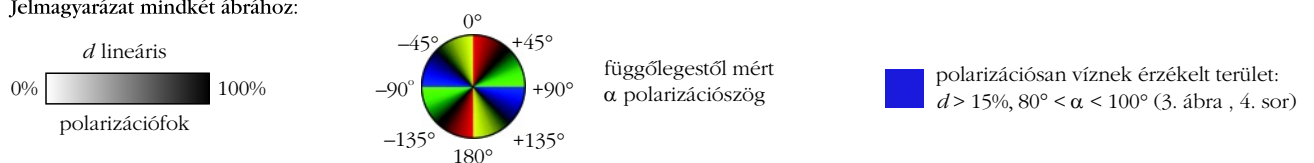


3. ábra. Matt fekete autó öt különböző nézőpontból mért polarizációs mintázatai a spektrum kék (450 nm) tartományában. Az első sorban az eredeti fényképfelvételek, a második sorban a  $d$  lineáris polarizációfok-mintázatok, a harmadik sorban a polarizációirány-mintázatok ( $\alpha$ , az óramutató járásával megegyező irányban) láthatók. A negyedik sorban sötétkék színnel ábrázoltuk a polarotaktikus rovarok által vízként érzékelt területeket, amelyek esetében a visszavert fény a következő tulajdonságokkal rendelkezik:  $d > 15\%$ ,  $80^\circ < \alpha < 100^\circ$ . A képalkotó polariméter optikai tengelyének magassági szöge a vízszintestől  $-20^\circ$  volt.



4. ábra. A terepkísérletekben használt fényes fekete, matt fekete és matt szürke tesztfelületek polarizációs mintázatai a spektrum kék (450 nm) tartományában. Az első sorban az eredeti fényképfelvételek, a második sorban a  $d$  lineáris polarizációfok-mintázatok, a harmadik sorban a polarizációirány-mintázatok ( $\alpha$ , az óramutató járásával megegyező irányban) láthatók. A polariméter nézőpontjai: (I) egy nyílt terület felé (a felületek nap- és égboltfényt vernek vissza), (II) fák és bokrok felé (a felületek lombfényt vernek vissza). A polariméter optikai tengelyének magassági szöge a vízszintestől  $-45^\circ$  volt.

Jelmagyarázat mindkét ábrához:



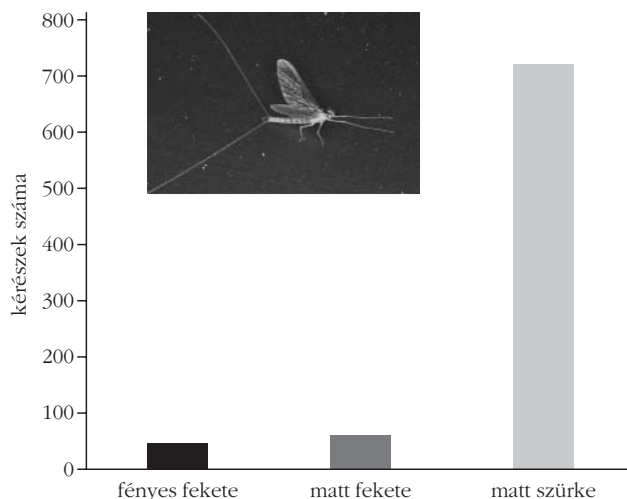
1. táblázat

Az 1. és 2. terepkísérlet során használt 3 vízszintes tesztfelület képalkotó polarimetria segítségével mért  $d$  lineáris polarizációfoka (átlag  $\pm$  szórás, a teljes felületre átlagolva) a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában, amikor a felületek napfényt és égboltfényt, illetve fákrol és bokrokról érkező lombfényt vertek vissza

teszt-felületekhez jutó fény forrása	tesztfelület	$d$ lineáris polarizációfok (%) a spektrum látható részének különböző tartományában		
		vörös	zöld	kék
napfény és égboltfény	fényes fekete	31,6 $\pm$ 15,7	32,4 $\pm$ 15,7	34,5 $\pm$ 16,4
	matt fekete	33,6 $\pm$ 13,7	34,2 $\pm$ 13,9	36,1 $\pm$ 14,6
	matt szürke	22,0 $\pm$ 10,3	22,9 $\pm$ 10,2	24,3 $\pm$ 10,5
fákrol és bokrokról érkező lombfény	fényes fekete	29,6 $\pm$ 18,8	27,4 $\pm$ 18,0	26,8 $\pm$ 19,6
	matt fekete	22,6 $\pm$ 12,0	21,9 $\pm$ 11,8	21,1 $\pm$ 11,9
	matt szürke	13,0 $\pm$ 6,7	12,4 $\pm$ 6,4	11,4 $\pm$ 5,8

A kísérletekben használt tesztfelületek polarizációs mintázatai

A 4–5. ábra és az 1. táblázat az 1. és 2. terepkísérletünkben használt fényes fekete, matt fekete és matt szürke tesztfelületek polarizációs jellemzőit mutatják a spektrum vörös, zöld és kék tartományában, amikor a felületek napfényt és égboltfényt, illetve fákrol és bokrokról származó fényt vertek vissza. A tesztfelületek nagy része vízszintesen poláros fényt tükrözött, ám kis részükről függőlegesen vagy ferden poláros fény verődött vissza, a neutrális pont környékéről (a vízszintesen és függőlegesen poláros területek határától) pedig polarizálatlan fény tükröződött. A fényes fekete és matt fekete felületek verték vissza a legmagasabb polarizációfokú fényt, míg a matt szürke felület csak kevésbé volt poláros. E felületek polarizációs mintázatai csak némileg függték a hullámhossztól. Amikor a tesztfelületek napfényt és égboltfényt vertek vissza, akkor polárosabbak voltak, mint mikor fák és bokrok képét tükrözték. A spektrum kék és zöld tartományában a matt szürke felület polarizációfokának szórása volt a legkisebb (5. ábra, 1. táblázat). A fényes/matt fekete/szürke autók (3. ábra) és a tesztfelületek (4. ábra az első belső borítóoldalon, 1. táblázat) polarizációs mintázatait összehasonlítva azt tapasztaltuk, hogy azok gyakorlatilag egyformák, így tesztfelületeink jól utánozták a megfelelő autókarszériák optikai sajátosságait. Az 1. táblázat és a 4. ábra szerint a megfigyelés irányától függően a spektrum kék, zöld és vörös tartományában a fényes fekete tesztfelület polarizációfokának  $\Delta d$  szórása (kék:  $\pm 16,4$ – $19,6\%$ , zöld:  $\pm 15,7$ – $18,0\%$ , vörös:  $\pm 15,7$ – $18,8\%$ ) 1,9–2,8-szer, 1,8–2,5-szer és 1,5–2,8-szer nagyobb volt, mint a matt szürke felületé (kék:  $\pm 5,8$ – $10,5\%$ , zöld:  $\pm 6,4$ – $10,2\%$ , vörös:  $\pm 6,7$ – $10,3\%$ ). A matt fekete felület  $\Delta d$  szórása (kék:  $\pm 11,9$ –



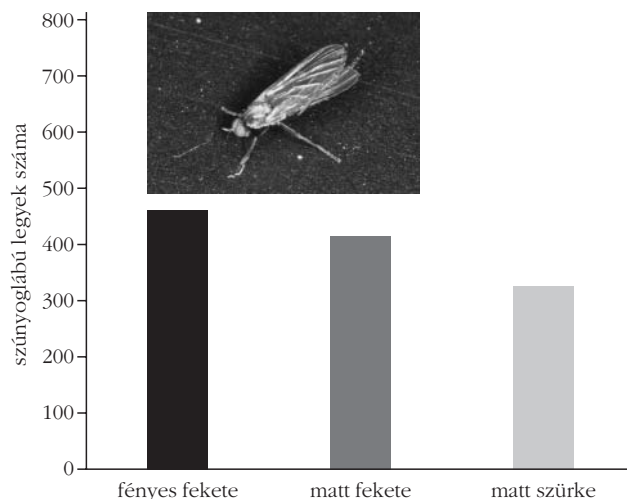
6. ábra. A fényes fekete, matt fekete és matt szürke vízszintes tesztfelületekre rászálló kérészek összegyedszáma az 1. terepkísérlet 6 alkalma során. A fényképen egy fényes fekete tesztfelületre leszállt kérész látható.

14,6%, zöld:  $\pm 11,8$ – $13,9\%$ , vörös:  $\pm 12,0$ – $13,7\%$ ) pedig 1,4–2,1-szer, 1,4–1,8-szer és 1,3–1,8-szer volt nagyobb, mint a matt szürke felületé. Ennek nagy jelentősége lesz a tesztfelületek rovarvonzó-képességének alábbi magyarázatában.

Kérészek, szúnyoglábú legyek és bögölyök tesztfelületekhez való vonzódása

A 6. ábra az 1. kísérlet során a három tesztfelületre leszállt kérészek számát mutatja. Nem volt statisztikailag szignifikáns különbség a fényes fekete és matt fekete felület kérészekre gyakorolt vonzóképesége között. Ám meglepő módon a matt szürke felület 10,7–15,7-szer több kérészt vonzott, mint a másik két fekete felület. A 7. ábrán az 1. kísérletben a tesztfelületekre szállt szúnyoglábú legyek száma látható. E rovarok számára a fényes fekete felület volt a leginkább, míg a

7. ábra. A fényes fekete, matt fekete és matt szürke vízszintes tesztfelületekre rászálló szúnyoglábú legyek összegyedszáma az 1. terepkísérlet 6 alkalma során. A fényképen egy matt fekete tesztfelületre leszállt szúnyoglábú légy látható.



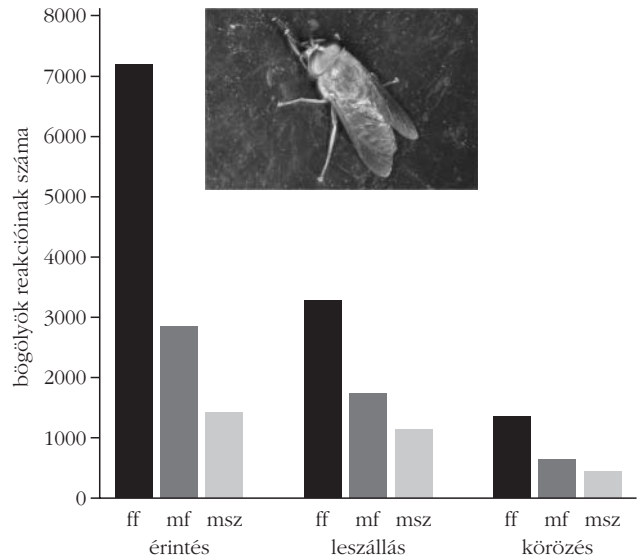
matt szürke a legkevésbé vonzó. A fényes fekete és matt szürke, valamint a matt fekete és matt szürke felületek vonzóképesége közti különbség szignifikáns volt, míg nem adódott szignifikáns különbség a fényes fekete és matt fekete felületeken landoló szúnyoglábú legyek száma között. A 8. ábra a 2. kísérlet során a tesztfelületekre leszálló, azokat érintő és fölöttük köröző bögyök számát mutatja. E három reakciót tekintve, a bögyök számára szignifikánsan a legvonzóbb felület a fényes fekete volt, a leszállás és érintés szempontjából pedig a matt szürke felület volt a legkevésbé vonzó. A matt fekete felület vonzóképesége e két felület vonzóképesége közé esett.

Összefoglalva: (i) A polarotaktikus rovarok fekete autók iránti vonzódása összetetten függ a felületi érdességtől (fényes, matt) és az érintett taxonoktól (kérész, szúnyoglábú légy, bögyö). (ii) A matt fekete autók rovarfajtól függően kevésbé vagy közel azonos módon lehetnek vonzóak, mint a fényes feketék. (iii) A fényes fekete autók poláros fényszennyezése általában nem csökkenthető a jelenleg használt matt festékek használatával. (iv) Nem várt módon a matt szürke autók vonzóbbak lehetnek bizonyos kérészfajok számára, mint a matt feketék.

## Az eredmények megvitatása

Feltételeztük, hogy az erősen és vízszintesen polarizáló felületekkel (tető, motorháztető, csomagtartó) rendelkező fényes fekete autók mattá tétele csökkenti a poláros fényszennyezést, mivel a felület érdessége (mattsága) depolarizálja a visszaverődő fényt. Terepkísérleteinkben azonban azt találtuk, hogy ez nem mindig történik így, ugyanis a vizsgált matt fekete és matt szürke karosszéria-elemek hasonlóan vonzóak vagy még vonzóbbak voltak bizonyos polarotaktikus kérészfajok számára, mint a tanulmányozott fényes fekete autófelületek. Ennek okai a következők lehetnek: (i) Habár a matt szürke tesztfelület kisebb  $d$  polarizációfokú fényt vert vissza, mint a fényes fekete, és (ii) a matt fekete felület kevésbé poláros lombfényt vert vissza a fényesnél, a polarizációfok csökkenése nem volt elég nagy ahhoz, hogy ne legyen vonzó a polarotaktikus rovarok számára. (iii) A matt fekete tesztfelület nagyobb polarizációfokú nap- és égboltfényt vert vissza, mint a fényes fekete. A polarotaktikus vízirovarok vonzódásának egyik feltétele, hogy a visszaverődő fény  $d$  polarizációfoka nagyobb legyen a polarizációérzékelés fajspecifikus  $d^*$  küszöbénél [6]. Ennél fogva az autók fényezésének polarotaktikus rovarokra kifejtett vonzó hatása akkor áll fenn, ha az autó egyes felületrészeiről visszavert fény  $d$  polarizációfoka nem kisebb, mint  $d^*$ .

Meglepő volt azon eredményünk, hogy a matt szürke tesztfelület vonzó hatása a vizsgált polarotaktikus kérészekre jóval nagyobb volt, mint a matt és fényes fekete felületeké. Ennek egyik oka az lehet, hogy a fényes fekete felület  $d$  polarizációfokának  $\Delta d$  szórása 2–3-szor nagyobb volt, a matt fekete felület  $\Delta d$  szórása



8. ábra. A fényes fekete (ff), matt fekete (mf) és matt szürke (msz) vízszintes tesztfelületekre érintéssel, leszállással vagy levegőben körözéssel reagáló bögyök összegyűjtése a 2. terepkísérlet 10 alkalma során. A fényképen egy matt szürke tesztfelületre leszállt bögyö látható.

sa pedig 1,3–2,1-szer volt nagyobb, mint a matt szürkéé (5. ábra, 1. táblázat). A visszavert fény polarizációfokának kis  $\Delta d$  szórása alapvetően a nyugodt, sima felszínű víztestekre jellemző a fodrozódások hiánya miatt [2]. Ezzel szemben a zavaros, turbulens vizek hullámzó, fodrozódó felületére nagy  $\Delta d$  érték jellemző, mert a visszavert fény polarizációfoka nagyban függ a felszín normál vektorának irányától, ami térben és időben véletlenszerűen változik a vízfelszíni hullámzással. Mivel az 1. terepkísérletben vizsgált kérészfajok a nyugodt víztesteket részesítik előnyben [10], így a kis  $\Delta d$  szórású matt szürke tesztfelület egy nyugodt vízfelszín utánözva vonzóbb lehetett számukra, míg az 1,3–3-szor nagyobb  $\Delta d$  szórású két fekete tesztfelületet számukra kedvezőtlenebb, hullámzó vízfelszínként érzékelhették.

A kérészek matt szürke tesztfelülethez való erőteljesebb vonzódásának másik oka az lehetett, hogy a 90%-os szürkességű matt szürke felület 10%-kal világosabb volt a 100%-os szürkességű fekete tesztfelületeknél, miáltal a matt szürke a kérészek pozitív fototaxisa miatt vonzóbb lehetett. Azonban korábban kimutattuk, hogy a vizsgált kérészfajok (*Baetis rhodani*, *Epeorus sylvicola*, *Rhithrogena semicolorata*) a vízfelszín nem fototaxissal detektálják [5]: a fényes/matt, fehér/szürke/fekete vízszintes felületek iránti vonzalmuk a visszavert fény vízszintes polarizációjának következménye, amely polarotaxist nem fényintenzitás (világosság/sötétség) vezérl.

Az 1. táblázatban és az 5. ábrán látható, hogy a kísérleteinkben használt tesztfelületek polarizációs jellemzői gyakorlatilag függetlenek voltak a hullámhossztól a látható tartományban: adott tesztfelület  $d$  polarizációfoka adott megvilágítás mellett 5%-nál kisebb mértékben változott, ami minden ismert állat polarizációérzékelési küszöbe alatti érték.

A fekete autók polarotaktikus rovarok vonzását kiváltó nagy polarizációfokának fizikai okai a következők [2]: Egy dielektromos közeg fényes (sima) felülete két fénykomponenst ver vissza. Az első összetevő a levegő-közeg határáról visszavert fény, amely részlegesen lineárisan poláros, ahol a fő polarizációirány a felszínnel párhuzamos. A közegből jövő és a közeg-levegő határon megtört második komponens szintén részlegesen lineárisan poláros, ám a fő polarizációirány merőleges a felszínre. Ha az 1. vagy a 2. összetevő dominál, akkor az eredő visszavert fény polarizációfoka nagy, a polarizációirány pedig párhuzamos a felszínnel, illetve merőleges arra. Egy fényes (sima) fekete felület esetén az 1. komponens dominál, mert a 2. komponens erősen elnyeli a fekete közeg, így a visszavert fény polarizációfoka nagy lesz. Ha egy fekete felület érdes (matt), akkor mikroszkopikus skálán számtalan apró, elemi felületről áll, amelyek felszíne ugyan sima (fényes), ám véletlenszerű irányulással, miáltal minden lehetséges irányba, diffúzan veri vissza a fényt. Egy adott elemi felület a Brewster-szögben és környékén nagy polarizációfokkal veri vissza a fényt a fent említett 2. komponens elnyelése miatt, ám a felületről visszavert fény polarizációiránya összességében véletlenszerű lesz az elemi felületek véletlenszerű irányulása miatt. Ráadásul, a beeső fény egynél többször is visszaverődhet az elemi felületek erdejéről. Mindez azt eredményezi, hogy egy matt fekete felület által visszavert fény polarizációfoka kisebb, mint egy fényes fekete felületé.

Terepkísérleteinkben a különböző polarizációs tulajdonságú tesztfelületek által vonzott kérészeket, szúnyoglábú legyeket és bögölyöket számoltuk meg. Az 1. kísérletben a vizsgált kérészek nagyon rövid, néhány napos rajzási periódusa során 6 nap alatt 6 számolást hajtottunk végre. Ez  $6 \times 2 = 12$  óra megfigyelést jelentett, ami alatt minden egyes tesztfelületről 96 fénykép készült. A helyhatás kiküszöbölése érdekében a három tesztfelület sorrendjét minden egyes fénykép elkészítése után átrendeztük (egy kísérleti periódusban 24-szer, 5 percenként). A vizsgált kérészek csupán 1 napig élnek, így egy adott nap adott 2 órás kísérlete alatt egy kérész egynél többször is reagálhatott a tesztfelületekre. Ezért a kísérlet során előfordulhatott pszeudoreplikáció a tesztfelületek átrendezése ellenére is. A pszeudoreplikáció akkor lehetett volna elkerülhető, ha a tesztfelületeket ragaccsal vontuk volna be, ami végleg megfogta volna a rájuk szálló rovarokat, ám a matt felületet egy ragasztó csillogóvá tette volna, jelentősen megváltoztatva a reflexiós-polarizációs sajátosságait. Így nem alkalmaztunk ragadós anyagot, miáltal tehát az esetleges pszeudoreplikáció nem volt kiküszöbölhető. Másfelől viszont a vizsgált kérészek egy napos élete azt is jelenti, hogy a 6 kísérleti napon különböző egyedek reagáltak a tesztfelületekre, így összességében az 1. kísérletben a pszeudoreplikáció minimális lehetett. A szúnyoglábú legyek kifejlett egyedei egy napnál tovább élnek, így náluk a pszeudoreplikáció valószínűsége nagyobb lehetett, mint a kérészeknél. Mindamellét valószínű,

hogy a 6 kísérleti napon nem mindig ugyanazon szúnyoglábú legyek szálltak a tesztfelületekre. Hasonló megállapítást tehetünk a bögölyökre is a 2. kísérlet 20 napja alatt, amikor óránként került sor a három tesztfelület ciklikus átrendezésére. A kérészekkel, szúnyoglábú legyekkel és bögölyökkel végzett korábbi hasonló terepkísérleteink [4–6] tapasztalatai és eredményei alapján azt mondhatjuk, hogy az ismétlések száma, illetve az 1. és 2. kísérletünk időtartama elegendően nagy volt ahhoz, hogy statisztikusan szignifikáns különbségeket mutathassunk ki a polarotaktikus rovarok tesztfelületek iránti vonzódásában.

Jelen kutatásunkban a rovarfajok pontos meghatározása lényegtelen volt, mivel a megfigyelt vízirovarcsoportok csupán a tesztfelületek okozta poláros fényszennyezés indikátorainak szerepét töltötték be. Az egyetlen fontos szempont az volt, hogy terepkísérleteinkben a polarotaktikus rovarok reakcióit figyeljük meg a matt/fényes, fekete/szürke karrosszériaelemek optikai vonzó hatásának vizsgálatára érdekében. A kísérleteinkben tanulmányozott összes rovarfajról korábban már kimutattuk, hogy pozitív polarotaxissal rendelkeznek [2].

Minden évben egyre több és több autó rója az utakat. Ha ezek túlnyomórészt fényes és sötét felületűek, akkor erőteljes poláros fényszennyezést okoznak például a fekete vagy sötétszürke aszfaltutakhoz hasonlóan [1, 3, 5]. Cikkünkben bemutattuk, hogy ez a fajta fényszennyezés sajnos nem küszöbölhető ki a manapság a piacon elérhető matt fekete/szürke festékek vagy karbonbevonatok használatával. Az utóbbi időben a matt fényezés technológiája sokat fejlődött, egyrészt azért, hogy az autóknak szembeűnő, matt megjelenést biztosítson, másrészt pedig, hogy a karcok ellen védje a kényes fényezést. Leginkább akkor érné meg e technológiát továbbfejleszteni, ha nagyobb mértékben csökkentené a visszavert fény polarizációfokát, ezáltal csökkentve az autókarrosszériák poláros fényszennyezését. Ekkor a fekete autók mattsága egy környezetbarát divathóbort lehetne a veszélyeztetett polarotaktikus rovarpopulációk védelmét tekintve.

## Következtetés

Terepkísérleteink eredményeiből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy az autókarrosszériák mattá tétele nem csökkenti a fekete autók poláros fényszennyezését. Az autók matt felületei bizonyos polarotaktikus rovarokat (például egyes kérészfajokat) még nagyobb számban is vonzhatják, mint a fényes fekete autók. Ezért a fényes fekete festés/bevonat mattrá cserélése környezetvédelmi szempontból egy kedvezőtlen divathóbortnak számít.

## Irodalom

10. Encalada A. C., Peckarsky B. L.: A comparative study of the cost of alternative mayfly oviposition behaviors. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 61 (2007) 1437–1448.