

Válasz Szócs Gábor, az MTA doktora bírálatára

Köszönöm Bírálómnak a munkát, amit dolgozatom alapos áttanulmányozásába fektetett. Külön köszönöm a dolgozatra vonatkozó elismerő szavait, kérdéseit és hogy az értekezést nyilvános vitára javasolta.

A bíráló kérdéseire adott válaszok:

Megfogalmazásomban a 'fekete' jelző arra utal, hogy a szóban forgó felület által visszavert fény spektruma gyakorlatilag független a hullámhossztól, azaz színtelen és intenzitása nulla vagy igen kicsi minden hullámhosszon. Egy szürke vagy fehér felületre is igaz a hullámhossztól független visszaverődési spektrum, de a visszaverődő fény intenzitása minden hullámhosszon egyre nagyobb a teljes fehérséghez közelítve. A 'fényes' jelző pedig arra utal, hogy a felület sima, vagyis nem érdes, más szóval csillogó, miáltal tükrözően veri vissza a beeső fényt, tehát a visszaverődési szög egyezik a beesési szöggel. Az ilyen tükröző felületek reflektivitása exponenciálisan nő a felületi normálistól számított visszaverődési szög növekedésével, aminek következtében a súrolóan beeső fényt gyakorlatilag teljesen visszaveri, ezért nevezzük fényesnek vagy csillogónak. Abban tehát nincs semmi ellentmondás, hogy egy fekete és sima felület is lehet fényes vagy csillogó, azaz sok fényt ver vissza a felülettel kis szöget bezáró beesés és visszaverődés esetén. Egy felület színe és sötétsége-világossága (feketétől a szürkén át a fehérig) mindig csak merőlegesen beeső fényre értendő, amikor a reflektivitás minimális. Példának okáért tekintsünk egy akármilyen színű sima, fényes, csillogó felületet, amit ha lapos szögben nézünk, akkor nem észleljük a színét, mert a felület alatti pigmentekről visszaszóródó fényt teljesen elnyomja a sima felszínről tükröződő környezeti fehér fény.

Az árvaszúnyogok polarotaxisát vizsgáló eredményes kísérletek lefolytatása szempontjából elengedhetetlen volt, hogy a vizsgálandó árvaszúnyograjok a tesztfelületeink közelében alakuljanak ki, mert csak így állt rendelkezésre kellő számú árvaszúnyog a választásos terepkísérleteinkhez. Az általánosan elfogadott nézet szerint az árvaszúnyograjok kialakulásához szükség van olyan magányos tereptárgyakra vagy -foltokra, amelyek rajzásmarkerként vonzzák a rovarokat (Armitage et al. 1995). Az árvaszúnyogok rajzásmarkereként működő tereptárgyak (pl. nagyobb sziklatömbök) többségére viszont nem jellemző, hogy poláros fényt vernének vissza, ezért úgy vélem a kísérleteket akkor is sikerrel el tudtuk volna végezni, ha nem lettek volna a közelben vízszintesen poláros fényt visszaverő felületek.

Kísérleteinkben a tesztfelületeket többé (autótető) vagy kevésbé (aszfaltút) polarizáló aljzatra helyeztük. Mivel ezen aljzat ugyanaz volt a tesztfelületek alatt/mellett, ezért nyilván nem az okozta a tesztfelületek által vonzott és csapdázott árvaszúnyogok száma közti különbséget. Tehát a kísérleteink eredménye nem változott volna más, homogén aljzat alkalmazása mellett sem.

Ha a vásznas kísérletben használt száraz vásznakat vízzel vagy bármilyen ragadós anyaggal itattuk volna át, akkor már polarizálóká váltak volna a sötétségüktől (fekete-szürke-fehér) függően. Éppen ezért sohasem alkalmaztunk nedves vagy ragadós tesztfelületeket a rovarok polarotaxisát vizsgáló olyan terepkísérleteinkben, amikor nem vagy gyengén polarizáló felületekre is szükségünk volt.

Másrészről pedig egy vízzel átitatott vászon erőteljesebben vonzhatja a vízirovarokat a kibocsátott vízpára miatt. Ha mindegyik tesztfelület egyformán nedves lett volna, akkor a pára szempontjából mindegyik egyformán vonzó lett volna, miáltal a vonzott rovarok száma közti eltéréseket nem magyarázhatta volna a vízzel való átitatás.

A vízirovaroknak nincs színlátása, mert az ultraibolya-, kék- és zöldérzékeny fotoreceptorai elektromos jelei egyszerűen csak összegződnek az agyukban, ami nem dolgozza fel ezen elektromos jelek közti különbségeket, amelyeket nem fordít le színekre (Horváth és Varjú 2004, Horváth 2014).

Pont ezért e fotoreceptorok fényelnyelési spektruma nem szűk, hanem viszonylag széles spektrális tartományt fog át annak érdekében, hogy minél többféle fényviszony között megfelelően működhessen a látás. Mindezek miatt szükségtelen lett volna a zömében színtelen (fekete, szürke, fehér) tesztfelületeink visszaverési spektrumát mérni.

A vízirovarok nagy többségének (kivételt képeznek például a szitakötők) nincs vöröserzékeny fotoreceptora.

Terepkutatásaink során túlnyomórészt égboltfénnyel és napfénnel megvilágított színtelen (fekete, szürke és fehér) tesztfelületekkel dolgoztunk, amelyek a beeső fény teljes spektrumát visszaverték, így a kísérleteket nem csak a hamisszínes fénypolarizációs ábrákon feltüntetett három különböző hullámhosszú fénnel végeztük el. Az említett 650, 550 és 450 nm-es hullámhosszak a képalkotó polarimetriai mérésekre vonatkoztak, nem pedig a kísérletekben jelenlévő fény spektrumára.

Kutatási módszereink megújítása érdekében néhány éve kezdte el Egri Ádám kollégám a Duna-kutató Intézetben azokat a laborfejlesztéseket, amelyek különböző makrogerinctelenek foto- és polarotaxisának vizsgálatára alkalmas kísérleti elrendezések kialakítását célozták. Mostanra, Egri Ádám vezetésével már el is indultak azok a kutatások, amelyek során speciális fényforrásokat alkalmazva különböző hullámhosszú és polarizációs sajátságú, kontrollált intenzitású monokromatikus fényingerek vízirovarokra gyakorolt hatásait vizsgáljuk laboratóriumi körülmények között. Az első kutatási eredmény már meg is jelent (Egri és Kriska 2019).

Elektroretinográfiával a fotoreceptorok közti térrészben mérik a receptorok összességének fényingerekre adott válaszát. A Bírálóm által elektropolarográfnak nevezett kísérleti elrendezéshez mindössze arra van szükség, hogy egy adott fotoreceptorba juttassunk mikroelektródát és annak az egyetlen sejtnek mérjük a különböző polarizációirányú fényingerekre adott válaszát. E régóta jól ismert elektrofiziológiai technika alkalmas a polarizáció-érzékenység sejt szintű mérésére. Egri Ádám kollégámmal, az NKFIH PD-131738 számú pályázatának keretében egyelőre az egyszerűbb, elektroretinográfia alkalmazásáig jutottunk el, aminek során például a dunavirág elektroretinogramját már sikeresen mértük.

A tegzes imágók nagy faj és egyedszámban lelhetők fel a vizes élőhelyek környékén, ezért érthető, hogy Bírálóm különösnek tartja, hogy a taxon képviselői kevés szerephez jutottak kutatásainkban. Ez azonban nem a fajokat meghatározni képes taxonómus hiányára vezethető vissza, hanem arra, hogy a dömörkapui terephelyszínünkön, ahol jelentősebb volt a tegzesfajok jelenléte, a repülési időszakok az éjszakai órákra estek (Hickin 1967, Andrikovics 1991). Ekkor viszont már nem volt lehetőségünk elvégezni az alkonyati égboltfény jelenlétét igénylő terepkísérleteinket. Az általunk vizsgált dunai tömegtegzes (*Hydropsyche pellucidula*) viszont intenzív alkonyati repülés jellemzi, ami miatt alkalmas objektuma volt vizsgálatainknak.

Egyetértek Bírálómmal abban, hogy amellet, hogy a tiszavirággal kapcsolatos kutatásaink alapján nagy valószínűséggel állítható, hogy a nőstények kompenzációs repülésük során főleg a polarizált fény segítségével követik a folyót, eredményeink nem adnak választ arra, hogy milyen inger vezérli a kérészek folyásiránnyal ellenkező irányban történő repülését. Dán kérésszel (*Ephemera danica*) folytatott újabb kutatásaink (Egri et al. 2017) során azt tapasztaltuk, hogy a kompenzációs repülésüket folytató rovarok, amikor egy a patakot keresztező hídnál felrepültek az itt haladó aszfaltúthoz, amely a keresztezés előtt és utána is végig a patak mellett halad, akkor repülésüket hol a folyásiránnyal szemben, hol pedig azzal megegyező irányban folytatták a vízszintesen poláros fényt visszaverő aszfaltút felett. Ez a tapasztalat is azt a feltételezést valószínűsíti, hogy a kompenzációs repülési irány megválasztásában a fénypolarizációs ingerek mellett más tényezők is szerepet játszhatnak. Egyelőre nem ismert, hogy az áramló vizekben élő kérészek pontosan mi alapján ismerik fel a folyásirányt. Mint ahogyan az is ismeretlen, hogy miként szinkronizálják egymással az átváltozásukat és a gyakorlatilag egyszerre megvalósuló tömegrajzásukat.

Az értekezésem 48. oldalán szereplő 10. ábrán a tiszavirág egyedek röppályáját szemléltető trajektória kezdőpontja jelöli a befogott példányok szabadon bocsátási helyét, amint azt leírtuk az eredeti angol nyelvű cikkünkben is. Ez nem éppen egy szembeötlő jelölési mód, ezért egyetértek Bírálómmal abban, hogy ezt a pontot egyéb jelöléssel jobban is kihangsúlyozhattam volna.

Egyetértek Bírálóm árvaszúnyogokkal kapcsolatos kutatásunkra vonatkozó megjegyzésével, miszerint a megfigyelt rovarok ivararányának megállapítását jól segítette volna az árvaszúnyog rajból történő hálózás.

A bögölyökkel folytatott választásos terepkísérleteink egy részében tesztfelületeinket színtelen, szagtalan, átlátszó ragasztóval (BabolnaBio® egérragacs) vontuk be. Ettől az eredeti felületek bizonyos esetekben kissé fényesebbé válhattak, miáltal több vízszintesen poláros fényt tükrözhettek. Ez azonban azért nem okozott metodikai problémát, mert minden tesztfelület ugyanazzal a vékony ragasztóréteggel volt bevonva. Kétségtelenül problémát okozhat viszont a rovartetemek felhalmozódása, ami megváltoztathatja a tesztfelületek optikai sajátságait. Ezt elkerülendő, a tesztfelületekről rendszeresen eltávolítottuk a csapdázott rovarokat, amit azért is tudtunk hatékonyan elvégezni, mert a terephelyszíneken a vizsgálati időszakokban nem alakultak ki árvaszúnyog rajzások.

Bírálóm kérdésére válaszul el tudom mondani, hogy laboratóriumi körülmények között elő lehet állítani és újabban elő is állítunk monokromatikus viszonyok között különbözőképpen poláros felületeket, illetve létrehozunk monokromatikus, eltérő polarizációs sajátságú aktív fényforrásokat is, amelyek hasznos eszközei új kutatásainknak (Egri és Kriska 2019).

Egyetértek Bírálóm értelmezésével, miszerint a nőstény kérészek kompenzációs repülése rajban történik, így nem egymástól függetlenül repülnek a folyó felett. Ezt támaszthatja alá az a megfigyelésünk is, hogy a hidaknál visszaforduló tiszavirágnőstények folyásirányú repülését a hídtól távolabb lévő kérészek is gyakran követik, egészen addig, amíg feltehetően a folyásiránnyal szemben érkező újabb kérésztömegek hatására újra visszaáll a folyásiránnyal szembeni mozgás. E feltételezéseket, hasonlóan a rovarok közötti esetleges kémiai kommunikáció meglétéhez, mindezidáig nem erősítették meg kísérleti eredmények.

A dunavirág pozitív fototaxisával kapcsolatban jelenleg nem rendelkezünk olyan tudományos magyarázattal, ami segítené a kérdés megválaszolását, hogy milyen evolúciós hatásra jöhetett létre ez az ingermozgás. Emiatt sajnos arra sem tudok választ adni, hogy a dunavirág fototaxisa vagy polarotaxisa lehet-e az ősbibb tulajdonság. Habár a kérészeknél nem tudható, hogy a fototaxis (fény/színérzékelés) vagy a polarotaxis (polarizáció-érzékelés) az ősbibb, például a háziméh (*Apis mellifera*) esetében anatómiai és polarizáció-érzékelési vizsgálatokból s megfontolásokból gyanítható, hogy a polarizáció-érzékelésük fejlődött ki előbb s csak utána tökéletesedett a színlátásuk (Horváth et al. 2002, Horváth 2014).

A kérészvédő fénysorompónk elsősorban a védett dunavirág túlélése szempontjából bír jelentőséggel, általánosan nem segíti a biodiverzitás fenntartását. Sőt, a működtetését is kifejezetten csak a dunavirág rajzási idejére korlátozva ajánljuk, mert fényszennyező forrásként eddig még fel nem tárt káros hatásai is lehetnek.

Nagyobb dunavirágrajzások alkalmával a Széchenyi Lánchídnál és az Árpád hídnál is megfigyeltem már a kompenzációs repülésüket folytató kérészrajok feltorlódását, feljutásukat és pusztulásukat a hidakon, ami arra utal, hogy ezek a hidak is ökológiai csapdát jelentenek a dunavirág számára.

Bírálóm kérdésére, amely az olajszennyezések miatti vízirovar csapdázások minimalizálási lehetőségeire vonatkozott, a pestlőrinci nyíltfelszínű pakuratórolók felszámolásánál szerzett tapasztalataimra építve tudok válaszolni: Ezen a helyszínen a polarotaktikus repülő rovarokra a nagy

kiterjedésű erősen és vízszintesen poláros fényt tükröző olajfelületek jelentették a legnagyobb veszélyt, amelyek évtizedeken át tömegesen vonzották magukhoz és pusztították el a vízirovarokat. Miután az olajszennyezés felszámolásakor az ottani úszómedence nagyságú nyílfelszínű tárolókból kiszivattyúzták és elszállították a pakurát, időlegesen eltűnt a vízirovarokat csapdázó fekete olajfelület. Ez a kedvező hatás azonban csak időleges volt, mert a kőolajszármazékokkal teljesen átitatott talajból elkezdtek újra feltöltődni pakurával a medencék. Mivel a szennyezett talaj kitermelése és helyszíni kiégetése csak nagyon lassan haladt, az újraképződött poláros csapdák továbbra is pusztították a vízirovarokat (Kriska et al. 2006). Úgy gondolom, hogy a károkozást a víztestek olajszennyezés-elhárításánál általánosan használt adszorbensek alkalmazásával lehetett volna minimalizálni. E nagy fajlagos felületű, kis sűrűségű, a felszínen összefüggő réteget képező anyagok közül is leginkább a világos színűek lettek volna a leghatékonyabbak, mert az olajfelszínekre kiszórva ezekkel lehet elérni a legteljesebb fénydepolarizáló hatást.

A dunavirággal és a *Caenis robusta* kérészfajjal folytatott terepkísérleteinkben sikerrel alkalmaztunk vízszintesen és függőlegesen poláros fényt kibocsátó csapdákat, ugyanakkor a bögölyök esetében ezek használata nem vetődött fel e rovarok nappali aktivitása miatt. A kérészvédő fénysorompó tervezésekor viszont komolyan felmerült bennünk, hogy az erőteljesebb vonzóhatás elérése céljából érdemes lenne vízszintesen poláros fényforrást alkalmaznunk. Végül azonban elvetettük ezt az ötletet a polárszűrők jelentős, közel 50 %-os fényintenzitáscsökkentő hatása és drága volta miatt.

Folyamatosan keressük annak lehetőségét, hogy újabb vízirovaraxonokat vonjunk be kutatásainkba, amire fejlődő laborvizsgálati körülményeink is egyre több lehetőséget adnak. Jelenleg púposzúnyogokkal folytatunk vizsgálatokat és őszinte örömmre szolgálna, ha a közeljövőben a tarka vízimollyal vagy a talán még elterjedtebb békalencsemollyal (*Cataclista lemnata*) is foglalkozhatnánk.

Irodalom

Andrikovics, S. (1991) On the long-term changes of the invertebrate macrofauna in the creeks of the Pilis-Visegrádi mountains (Hungary) *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 24: 1–4

Armitage, P. D.; Pinder, L. C.; Cranston, P. eds. (1995) *The Chironomidae. Biology and ecology of non-biting midges.* Chapman & Hall, London

Egri, Á.; Pereszlényi, Á.; Farkas, Alexandra.; Horváth, Gábor.; Penksza, K.; Kriska, Gy. (2017) How can asphalt roads extend the range of in situ polarized light pollution? A complex ecological trap of *Ephemera danica* and a possible remedy. *Journal of Insect Behavior* 30 (4): 374–384

Egri, Á.; Kriska, Gy. (2019) How does the water springtail optically locate suitable habitats? Spectral sensitivity of phototaxis and polarotaxis in *Podura aquatica*. *Journal of Experimental Biology*, 222 (9): 1–8

Hickin, N. E. (1967) *Caddis Larvae. Larvae of the British Trichoptera.* Hutchinson of London

Horváth, G.; Varjú, D. (2004) *Polarized Light in Animal Vision - Polarization Patterns in Nature.* Springer-Verlag, Heidelberg - Berlin - New York, p. 447

Horváth G., Gál J., Labhart T., Wehner R. (2002) Does reflection polarization by plants influence colour perception in insects? Polarimetric measurements applied to a polarization-sensitive model retina of *Papilio* butterflies. *Journal of Experimental Biology* 205 (21): 3281–3298

Horváth G. (editor) (2014) *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences.* Springer: Heidelberg, Berlin, New York, p. 649

Kriska Gy., Kiss T., Horváth G. (2006) "Kis kacska fürdik, fekete tóban" - Továbbra is pusztít a pakura. *Élet és Tudomány* 61: 916-918

Végezetül még egyszer köszönöm Bírálóm alapos munkáját és a dolgozatom pozitív értékelését.

Budapest, 2021. január 30.

Kriska György