

Épületek poláros fényszennyezése és annak kiküszöbölése

– Sinkovics Csenge, Gál József, Bernáth Balázs, Kriska György, Horváth Gábor –

1. A poláros fényszennyezés fogalma

A fényszennyezés fogalma az utóbbi évtizedek során széles körben ismertté vált. A fölfelé világító éjszakai földfelszíni mesterséges fények légkörről való, lefelé történő visszaszóródását eleinte ártalmatlan jelenségnek tekintették, ami csak az éjszakai égbolt csillagainak emberi szemmel való láthatóságát rontja a kivilágított városok fölött és azok közelében. Mivel e fényszennyezés a tudományos csillagászati megfigyeléseket lehetetlenné teszi, e jelenséget csillagászati fényszennyezésnek nevezték el. A közvilágítás elterjedése nyomán azonban kiderült, hogy a mesterséges fények az élővilágra is káros hatással vannak, például egyes rovarok tömeges pusztulását és az életközösségek romlását okozhatják. E jelenséget ökológiai fényszennyezésnek nevezik, aminek kísérletileg bizonyított és lehetséges ökológiai következményeiről egy részletes összefoglalást ad az [1] monográfia.

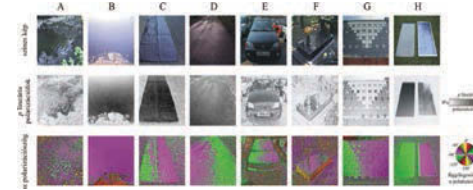
Az emberi eredetű éjjeli fények elsődleges hatása, hogy a sötét környezethez képest nagyobb intenzitásuk miatt vonzzák vagy taszítják az állatokat. E jelenség a pozitív, illetve negatív fototaxis, ami tehát a mesterséges fény intenzitásához és/vagy színéhez, röviden spektrumához köthető. Egészen a közelmúltig úgy vélték, hogy az ökológiai fényszennyezés mögött álló egyetlen biológiai jelenség a fototaxis, így e fényszennyezés forrásait szabad szemmel is könnyen azonosítani lehet. Ennek ellentmond, hogy nemcsak erős fényforrások, hanem egyes sötét felületek (például épületek üveghomlokzatai vagy aszfalt utak) is képesek vízirovarokat tömegesen magukhoz vonzani. A jelenség nemcsak éjszaka, hanem a nappali órákban is megfigyelhető. Oka nem a fototaxis, hanem a vízirovarok

pozitív polarotaxisa (vízszintesen poláros fényhez való vonzódása) és a fénytükröző felületek okozta visszaverődési polarizáció.

Elsőként Rudolf Schwind úttörő kísérletei [2, 3] bizonyították a repülő *Notonecta glauca* vízipoloskáról, hogy a vízfelületről tükröződő vízszintesen poláros fény alapján keresi a vizet, nem pedig a vízről visszavert fény intenzitása, színe vagy a vízfelület csillogása segítségével. A *Notonecta* szemének hasoldali részén ultrabolya-érzékeny fotoreceptorok vannak, melyek a vízszintesen és függőlegesen poláros fényre érzékenyek leginkább. E fotoreceptorok képesek meghatározni, hogy az optikai környezetből érkező fény polarizációiránya vízszintes vagy sem. A repülő *Notonecta*-ban a pontosan vagy közel vízszintesen poláros fény sztereotíp vízbeugrási és vízbeérülési reakciót vált ki. A *Notonecta* vonzódását a vízszintesen poláros fényhez pozitív polarotaxisnak hívjuk.

A Schwind nyomán világszerte végzett kutatások, köztük az ELTE Környezetoptika Laboratóriumában folyó vizsgálatok [4-22] kiderítették, hogy a kérészek (Ephemeroptera), álkérészek (Plecoptera), szitakötők (Odonata), vízibogarak (Coleoptera), vízipoloskák (Heteroptera), legyek (Diptera) és tegzesek (Trichoptera) rendjébe tartozó, 300-nál is több vízirovarfaj rendelkezik pozitív polarotaxissal, azaz a vízfelszínről tükröződő fény vízszintes polarizációja (1A ábra) alapján keresi vízi élőhelyeit. E polarotaktikus vízirovarokat könnyen megtevesztheti és magához vonzhatja minden olyan mesterséges felület, amely erősen (azaz nagy polarizációfokú) és vízszintesen poláros fényt ver vissza. Ha a róluk visszavert vízszintesen poláros fény lineáris polarizációfoka nagyobb, mint a vízről visszaverté, az ilyen felületek a valódi víznél vonzóbb „szuper víznek” tűnnek a vizet kereső vízirovaroknak (1B-H ábra).

Épületek poláros fényszennyezése és annak kiküszöbölése



1. ábra: Egy természetes vízfelület (A) és különböző mesterséges poláros fényszennyező felületek (B-H) színes fényképe (1. sor), p lineáris polarizációfok-mintázata (2. sor) és α polarizációs szög mintázata (3. sor). B: kuvaiti sivatagi kőolajtó, C: fekete műanyag fólia aszfalt úton, D: napsütötte aszfalt út, E: fekete autó, F: fekete sírkő, G: üveglapokkal díszített épület függőleges homlokzata, H: vízszintes napelemtáblák. A 2. sorban a fekete és sötétszürke tartományok, a 3. sorban pedig a világos zöld és lila területek az erősen poláros fényszennyezők, ahonnan erősen ($p \approx 100\%$) és vízszintesen ($\alpha \approx 90^\circ$) poláros verődik vissza.

Az elmúlt években végzett vizuálökológiai és környezet-biofizikai kutatások alapján [1-22] indokolt megkülönböztetni az ökológiai fényszennyezés egy speciális, új formáját, a poláros fényszennyezést. Ez alatt általában a mesterséges poláros fény polarizáció-érzékeny állatokra kifejtett ártalmas hatásait [23-28], szűkebb értelemben pedig a sima (fényes) mesterséges felületekről visszaverődő, erősen és vízszintesen poláros fénynek (1. ábra) a polarotaktikus vízirovarokra (beleértve minden rovar, amelynek lárvái a vízben vagy nedves iszapban fejlődnek) kifejtett káros hatásait értjük (2-4. ábra).

Minél nagyobb polarizációfokú a fény és minél kevésbé tér el polarizációiránya a vízszintestől, annál vonzóbb a polarotaktikus vízirovaroknak. Ily módon tehát azon felületek részletek tekinthetők poláros fényszennyezőnek, amelyekről visszaverődő fény p lineáris polarizációfoka nagyobb, mint egy p^* küszöbérték ($p > p^*$), és α polarizációs szöge egy $\Delta\alpha^*$ küszöbszögnél kisebbel tér el a vízszintestől ($|90^\circ - \alpha| < \Delta\alpha^*$). A fénypolarizáció foka egy adott hullámhosszon általában

fordítva arányos a fényintenzitással (Umow-féle szabály), de ez nem minden esetben teljesül, az emberi szem pedig a fénypolarizációt gyakorlatilag nem érzékeli. Így az ökológiai fényszennyezéssel ellentétben a poláros fényszennyezés forrásai hatékonyan csak képalkotó polarimetriával [7] térképezhetők föl, megelőzése pedig szakismereteket igényel.



2. ábra: Poláros fényszennyező felületekhez vonzódó polarotaktikus vízirovarok (Kriska György felvételei). A, B: Kőolajba ragadt szitakötők. C: Kőolajba ragadt kérész. D: Pakurába ragadt csibor. E: Fekete műanyag fóliára leszállt álkérész. F: Fekete műanyag fóliára leszállt bögöly. G, H: Fekete műanyag fóliára leszállt párzó, illetve petéző kérészek. I: Függőleges üvegfal előtt rajzó dunai tömegtegzesek. J, K: Üveglapra leszálló dunai tömegtegzesek. L: Fekete sírkő mellett territóriumát védő hím szitakötő. M-P: Vörös autó karosszériájára leszálló kérész, vízipoloska, csibor és bögöly. Q, R: Száraz aszfalt felületre leszálló kérészek. S: Száraz aszfalt felületre leszálló álkérész. T: Száraz aszfalt felületre leszálló csibor.

2. A poláros fényszennyezés jelentősége

A vizes élőhelyek közelében föllépő poláros fényszennyezés súlyosan veszélyezteti a vízi életközösségeket, mivel a vízből kirepülő

Épületek poláros fényszennyezése és annak kiküszöbölése

rovarok jelentős részének pusztulását okozhatja. Az erősen és vízszintesen polarizáló tükröző felületekhez vonzott vízirovarok hamar kiszáradhatnak, a száraz felületekre rakott petéik pedig óhatatlanul elpusztulnak [4-15]. Az erősen és vízszintesen polarizáló mesterséges felületek tehát a vízirovarok populációjának fennmaradását is veszélyeztető poláros ökológiai csapdaként működhetnek [13, 16, 17]. A vízirovar-populációk méretének csökkentésével a poláros fényszennyezés teret nyit idegen invazív rovarfajok betelepülésének, amelyek az értékes honos fajokat kiszoríthatják az élőhelyről. A poláros fényszennyezés forrásai megakaszthatják az élőhelyek közötti vízirovar-vándorlást is, ami a kisebb víztestek együtteséből álló élőhelyek vizes foltjait szigetelheti el, így azokban a ritka rovarfajok a továbbiakban nem képesek a stabil szaporodáshoz szükséges minimális populációméretet fönntartani.

A poláros fényszennyezés csökkentése azonban nem csupán környezetvédelmi okokból fontos. Maguk a poláros fényszennyező tárgyak és felületek is hátrányt szenvedhetnek a közelükben vagy a felületükön összegyűlő vízirovarok miatt: Például a lámpatestek fényét tompítja a rajtuk elpusztult rovarok tömege, az aszfaltfelületek (járda és utak) csúszóssá, balesetveszélyessé válnak. Továbbá, fokozott korrózió léphet föl például a vízirovarok gépjárművekre rakott petéiből keletkező savak okozta foltosodás formájában [8, 10, 29]. A napelemtáblák, épületek és kivilágított szabadtéri létesítmények üzemeltetőit jelentős többletkiadással terhelheti az épületek és szabadon álló fényforrások körül, illetve a belső terekben elpusztuló vízirovarok takarítása [19], a rovartetemek károsíthatják a légkondicionáló berendezéseket, zavarhatják az épületben folyó normál napi tevékenységet [14, 15], esetenként pedig ellehetetlenítik a szabadtéri szabadidős tevékenységeket. Emellett a bő táplálékforrást (4. ábra) fölfedező ragadozók, elsősorban pókok, madarak és denevérek (3. ábra) is bosz-

zúságot okozhatnak tömeges jelenlétükkel és ürülékükkel [16, 17, 25].



3. ábra: Poláros fényszennyező üvegfelületek által vonzott polarotaktikus vízirovarok által odacsalt rovarevő madarak (A-H) és pókok (I-L). Poláros fényszennyező pakurafelület által vonzott polarotaktikus vízirovarok által odacsalt és a pakurában elpusztult madarak (M-S) és egy denevér (T). (Kriszka György felvételei).

3. A poláros fényszennyezés kialakulása

Poláros fényszennyezést okozhat bármely mesterséges tárgy, amely a vízirovarok alsó látóterébe kerülve vízszintesen poláros fényt ver vissza. Poláros fényszennyezés nemcsak napközben fordulhat elő, hanem éjszaka is, mikor a holdfény vagy a települések fényei verődnek vissza a poláros fényszennyező felületekről. Káros hatása erősödhet az éjszakai mesterséges megvilágítások által okozott hagyományos (azaz fototaxis által előidézett) fényszennyezéssel kombinálódva. Befolyásolhatja a holdciklus is, főleg vidéki környezetben, ahol a mesterséges éjszakai megvilágítás ritka, vagy hiányzik.

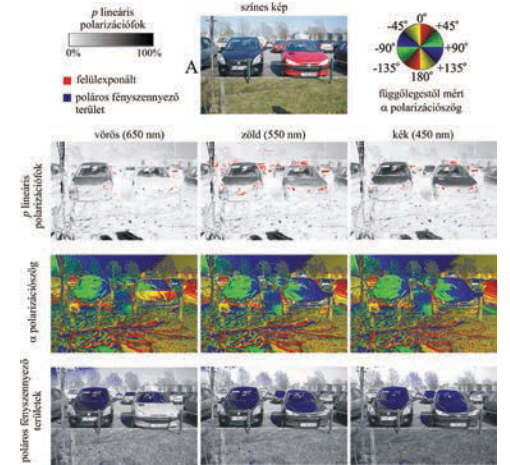
A természetben poláros fény leggyakrabban fényszórás (például égbolt-polarizáció), tükröződés (például vízfelszín polarizációja) vagy fénytörés (például víz alatti polarizáció) útján vagy ezek kombinációjaként keletkezik. Legfőbb természetes forrása az égbolt

Épületek poláros fényszennyezése és annak kiküszöbölése

az eredendően polarizálatlan napfény földi légkörben való szóródásának köszönhetően. Azonban csak a sima vízfelület ver vissza vízszintesen poláros fényt nagyobb látószögben, ezért lehet olyan sikeres stratégia a vízirovarok polarotaktikus vízkeresése. Az emberi eredetű polarizációs mintázatok is főként a fénytükröződéssel hozhatók kapcsolatba: A technikai fejlődés az utóbbi évtizedekben egyre több poláros fényszennyező forrásnak számító mesterséges felülettel (1., 5-8. ábra) árasztotta el a természetes élőhelyeket. A poláros fényszennyezés zömében építészeti, ipari és mezőgazdasági technológiák mellékterméke, de bizonyos „zöld technológiák”, például a napelemtáblák, napkollektorok és különböző üvegburkolatok szintén jelentős poláros fényszennyezéssel terhelik környezetünket. E jelenség az egész világra kiterjed (globális), és evolúciós értelemben újkeletű, hiszen csak az elmúlt évtizedekben fokozódott a vízszintesen polarizáló mesterséges felületek (például nyílt olajfelszínek, aszfaltutak, műanyag mezőgazdasági fóliák, üvegegyületek, autókarrossziák, fekete sírkövek, napelemtáblák és napkollektorok) világméretű elterjedésével (1., 5-8. ábra).



4. ábra: Egy Duna-parti épület függőleges üveglapjai előtt rajzó (A), majd arra leszálló (B) dunai tömegtegzések (C-E), és a nyitott ablakon az épületbe bejutó s annak ablakpárkányain elpusztult tegzesek tetemei (F). (Kriszka György felvételei).

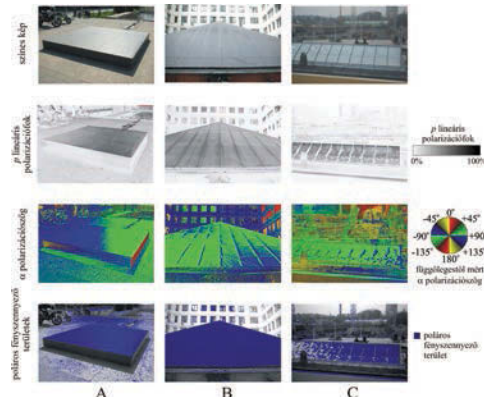


5. ábra: Egy fekete és egy vörös karosszériájú autónak a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában képalkotó polarimetriával mért p lineáris polarizációfok- és α polarizációs szög-mintázatai, valamint a polarotaktikus vízirovarok által víznek érzékelt ($p > 15\%$ és $80^\circ < \alpha < 100^\circ$), azaz poláros fényszennyező felületrészei.

Az Umow-szabály szerint, minél sötétebb egy felület a spektrum adott tartományában, annál nagyobb a róla visszaverődő fény lineáris polarizációfoka. Mivel a durva (matt) felületekről való visszaverődés depolarizációval jár, ezért minél simább egy felület, annál polárosabb a róla visszaverődő fény. A sima felszínű nem-fémes anyagokról visszavert fény polarizációjának iránya mindig merőleges a visszaverődés síkjára, ezért ha a sík pontosan vagy közel függőleges, akkor a visszavert fény pontosan vagy közel vízszintesen poláros. A polarizációfok a tükrözött fénynek a beesési merőlegessel bezárt szögétől is függ, és az anyag n optikai törésmutatója által meghatározott $\theta = \arctan(n)$ Brewster-szögben történő beesés és visszaverődésnél maximális. Az üveg, a víz és az elterjedt burkolóanyagok esetében a Brewster-szög értéke $50-60^\circ$ körüli. Mindebből következik, hogy függőleges visszaverődési sík mellett a sima és sötét

Épületek poláros fényszennyezése és annak kiküszöbölése

felületek erősen és vízszintesen poláros fényt tükröznek, miáltal nagyon vonzóak a polarotaktikus vízirovarok számára, ezért e rovarok poláros ökológiai csapdáiként működnek, és a poláros fényszennyezés egyik legfőbb forrásainak számítanak.

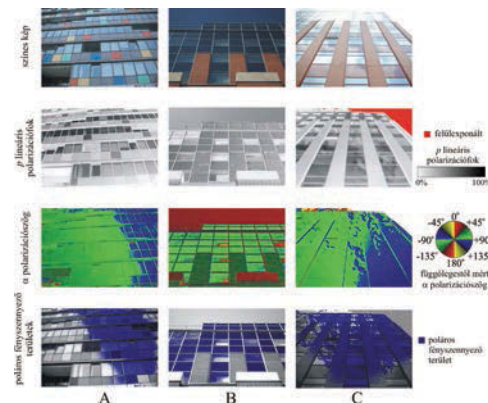


6. ábra: Egy sötétszürke vízszintes márvány díszlap (A), az ELTE TTK északi épülettömbje közepén lévő üvegpiramist fedő fekete műanyag burkolat (B), és az ELTE TTK északi épülettömbje mellett húzódo ferde üvegtető színes fényképe (C), a spektrum zöld (550 nm) tartományában képalakító polarimetriával mért p lineáris polarizációfok- és α polarizációs szög-mintázatai, valamint a polarotaktikus vízirovarok által víznek érzékelt ($p > 15\%$ és $80^\circ < \alpha < 100^\circ$), azaz poláros fényszennyező felületrészei.

4. Mesterséges fényforrások fénypolarizációs tulajdonságai

A mesterséges fényforrások típusa és spektruma az alkonyati és éjszakai időszakban befolyásolja ugyan a poláros fényszennyezés kialakulását, jelentőségük azonban csekély. Általánosságban elmondható, hogy a jelenleg világitásra hasznított fizikai folyamatok – feketetest-sugárzás, ívkisülés, fluoreszcencia – gyakorlatilag polarizálatlan fényt hoznak létre. A kereskedelmi forgalomban elérhető LED-ek fényének vizsgálatánál sem tapasztaltunk jelentős polarizációt (eltekintve a LED műanyag burkolatán át kilépő

fény gyöngye törési polarizációjától, aminek iránya párhuzamos a törési síkkal). Ugyanakkor a szerelt fényforrások műanyag- vagy üvegburkolatán fénytörés következtében törési polarizáció lép föl, ami annál nagyobb, minél nagyobb a törési szög. Ekkor a kilépő fény a burkolatfelület síkjára merőleges polarizációirányú, polarizációfoka pedig 30% körüli is lehet. E jelenség a diffúzan szóró fényforrások és a homályosított üvegű izzólámpák, valamint a fénycsövek polarizációs mintázatán jól megfigyelhető (9. ábra). Az egyenletesebb intenzitáseloszlást szolgáló homályosított burák és alkatrészek emellett a fény szóródása által is okozhatnak csekély mértékű polarizációt. A kibocsátott fény távoli megfigyelő által érzékelhető/mérhető eredő polarizációfoka azonban többnyire igen alacsony vagy nulla.

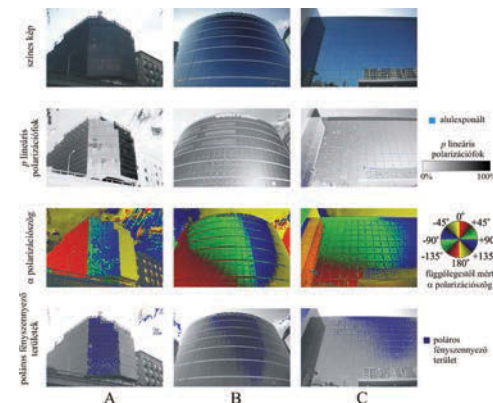


7. ábra: Egy budapesti irodaépület színes műanyag lapokkal fedett függőleges üveghomlokzatának (A), és az ELTE TTK északi épülettömbje vörös téglából, ablakokból és sötétszürke üveglapokból álló függőleges homlokzatának (B, C) színes fényképe, a spektrum zöld (550 nm) tartományában képalakító polarimetriával mért p lineáris polarizációfok- és α polarizációs szög-mintázatai, valamint a polarotaktikus vízirovarok által víznek érzékelt ($p > 15\%$ és $80^\circ < \alpha < 100^\circ$), azaz poláros fényszennyező felületrészei.

A lámpatestek dekorációs és funkcionális részein (refraktorok, azaz fénytörő lámparé-

Épületek poláros fényszennyezése és annak kiküszöbölése

szek, illetve reflektorok, azaz fényvisszaverő lámparészek) fellépő törési polarizáció és tükröződési polarizáció (10. ábra) nagyobb mértékű is lehet, aminek eredményeként akár vízszintesen poláros fény is keletkezhet. Mégis, a klasszikus ökológiai fényszennyezéssel ellentétben, a mesterséges fényforrások és lámpatestek csak igen ritkán önálló forrásai a poláros fényszennyezésnek, mert többnyire nem kerülnek a repülő polarotaktikus vízirovarok látóterének alsó részébe. A poláros fényszennyezés kialakulásában a legnagyobb jelentősége a fényforrások elhelyezkedésének, a visszaverődési síkok irányainak, a megvilágított felületek (például falak, függönyök) tulajdonságainak (érdességének, visszaverődési spektrumának), és az ablakokon át kivetülő fény intenzitásának van.

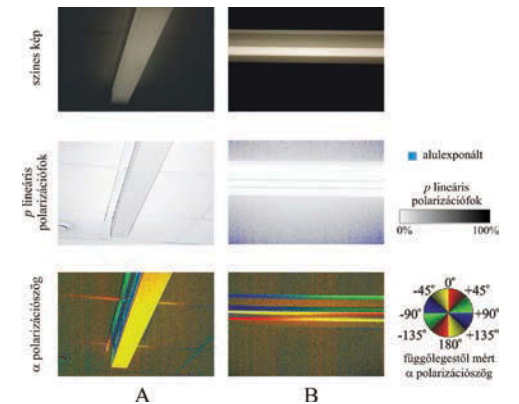


8. ábra: A budapesti Skála Metró (A), és a Duna Pláza (B, C) üvegépületének a spektrum zöld (550 nm) tartományában képalakító polarimetriával mért p lineáris polarizációfok- és α polarizációs szög-mintázatai, valamint a polarotaktikus vízirovarok által víznek érzékelt ($p > 15\%$ és $80^\circ < \alpha < 100^\circ$), azaz poláros fényszennyező felületrészei.

5. A poláros fényszennyezés csökkentése és kiküszöbölése

Látható, hogy fontos világitástechnikai feladat a fényszennyezés, ezen belül a poláros

fényszennyezés megelőzése, az általa okozott ökológiai/biológiai károk csökkentése. A továbbiakban ehhez kívánunk segítséget nyújtani. Hangsúlyozzuk azonban, hogy ehhez elengedhetetlen az adott létesítmény környezetének megismerése, mivel a poláros fényszennyezés káros hatása fokozottan jelentkezik vizes élőhelyek, akár kis kiterjedésű lápok mintegy 10 kilométeres körzetében, illetve az uralkodó széljárás irányában jelentősen nagyobb távolságokra is.

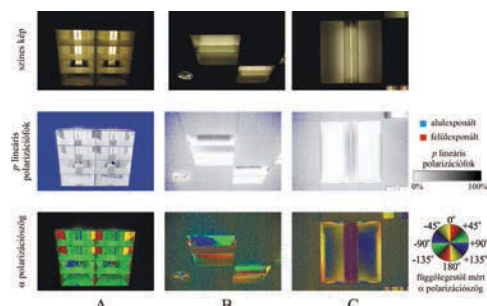


9. ábra: Egy téglatest alakú tejfehér műanyag burkolatú fénycsőlámpa (A), és egy fehér fénycső (B) színes fényképe, valamint a spektrum zöld (550 nm) tartományában képalakító polarimetriával mért p lineáris polarizációfok- és α polarizációs szög-mintázatai. A lámpatest és a fénycső nagy része gyakorlatilag polarizálatlan (fehér és nagyon világos szürke árnyalatok a polarizációfok-mintázaton), csak a lámpatest és a fénycső oldala felől érkező fény rendelkezik nagyobb (30%-ot meg nem haladó) polarizációfokkal (ami a 2. sorban középszürke árnyalatú) a fénytörési polarizáció következtében.

A világitási rendszerek tervezőinek csak ritkán van lehetőségük pusztán a fényforrások körültekintő megválasztásával és elhelyezésével csökkenteni a poláros fényszennyezést, ezért leginkább a világitás és a tükröző felületek kedvező irányának, valamint a burkolóanyagok körültekintő megválasztására kell törekedniük. Speciális világitási rendszerek,

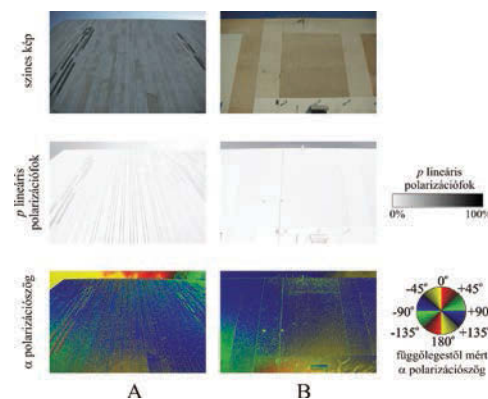
Épületek poláros fényszennyezése és annak kiküszöbölése

például homlokzati díszkivilágítás esetében korlátozott lehetőség adódhat kiegészítő fényforrások elhelyezésével a függőlegestől jelentősen eltérő visszaverődési síkok és a merőlegeshez közeli visszaverődések létrehozására, s ezáltal csökkenteni a visszavert fénykomponensek polarizációfokát, valamint azok polarizációirányát a vízszintestől eltéríteni. Azonban többnyire számolni kell a mesterséges fényforrások intenzitásánál nagyságrendekkel intenzívebb természetes fényforrásokkal. Így a poláros fényszennyezés csökkentésének legfőbb eszközei a tükröző felületek kiterjedésének csökkentése, a függőleges visszaverődési síkok elkerülése, továbbá a világos és matt felületek alkalmazása lehetnek. Mivel a természetes megvilágítást, a létesítmények helyét, tájolását és az alkalmazott szerkezeti anyagokat sem a világítástechnikai szakemberek határozzák meg, ezért az ő lehetőségük és felelősségük elsősorban javaslatokkal segíteni a velük együttműködő építészeket, várostervezőket és üzemeltetőket. Annál is inkább, mert a poláros fényszennyezés előrejelzését és megelőzését segítő modulokkal a ma használatos tervező-szoftverek még nem rendelkeznek.



10. ábra: Mennyezetre szerelt fénycsövekből és fehér fényvisszaverő lapokból álló lámpatesteknek a spektrum zöld (550 nm) tartományában képződő polarimetriával mért p lineáris polarizációfok- és α polarizációs szög-mintázatai. Jól látható, hogy visszaverődéskor többé vagy kevésbé lineárisan poláros fény keletkezik (ami a 2. sorban szürke árnyalatú) a fényvisszaverődési polarizáció következtében.

A poláros fényszennyezés jelentős forrásai a vízirovarok polarizációs ökológiai csapdájaként működő városi csupaüveg épületek [14, 15, 25], melyek poláros fényszennyezését (IG, 3A-H, 4., 7., 8. ábra) a következő környezetbarátabb építészeti megoldásokkal lehetne kiküszöbölni, vagy csökkenteni [30]:



11. ábra: A budapesti Művészetek Palotája (A) és Duna Pláza (B) Duna felé néző függőleges falait világos matt fehér és matt drapp mészkőlapok borítják (1. sor), ezért a róluk visszavert fény polarizációfoka igen kicsi (2. sor), miáltal annak ellenére sem poláros fényszennyezők, hogy a visszavert fény vízszintesen poláros (3. sor).

- Minimalizálni kell az üvegfelületeket és kerülni a fényes és sötét burkolófelületeket. Kerüendő minden fölösleges üvegtábla, amelynek csak díszítő szerepe van.
- Kerüendők a sima felszínű dísztéglák is, helyettük matt felületűek használandók (11. ábra).
- Mivel a vízirovarok általában nem érzékelik a vörös fényt, s így számukra a vörös és fényes felületek sötétnek és erősen polarizálóknak tűnnek, ezért kerüendő a fényes és vörös felületek használata.
- Az energetikailag igen kedvező és „zöld technológiának” tekintett üveg áhomszövet alkalmazása vizes élőhelyek közelében kifejezetten környezetkímélő lehet.

Épületek poláros fényszennyezése és annak kiküszöbölése

- A szintén „zöld technológiának” tekintett homogén sötét felületű napelemtáblák elterjedt típusai is jelentős poláros fényszennyezők, de kaphatók a poláros fényszennyezést jelentősen csökkentő fehér rácskerettel és rácsoszattal szerelt változataik is. Korábban kimutattuk [19], hogy ha egy erősen és vízszintesen polarizáló (poláros fényszennyező) mesterséges felületet egy megfelelően sűrű, fehér, négyzetes rácsmintázattal apró cellákra osztunk, akkor a polarotaktikus vízirovarok már nem egy nagy, vonzó vízfelszínnek tekintik, hanem sok apró víztestnek, amelyek a kicsiségük miatt külön-külön alkalmatlanok lennének a rovarlárvák kifejlődéséhez, ezért elvesztik a vízirovarokra kifejtett vizuális vonzásukat.
- Az épület felületei nem lehetnek túl világosak sem, mert napnyugta után nagy mennyiségű városfényt vernek vissza, ami vonzhatja a fototaxissal rendelkező védendő rovarokat. Az optimális kompromisszum a középszürke és matt felületek használata, amelyek csak mérsékelten vernek vissza fényt, gyenge polarizációval (11. ábra).
- A legtöbb épületen szükséges üvegfelületek az ablakok. Azonban ezek káros hatása is jelentősen csökkenthető fehér függönyök segítségével, az ezekről diffúzan visszaverődő fény csökkenti az ablaküveg felszínéről visszavert fény polarizációfokát.
- Hátrányos, ha az ablakok nem függőleges forgástengely körül nyithatóak, hanem vízszintes forgástengely körül csak részben dönthetőek. Az ilyen ablakok varsához hasonlóan működnek, és sokkal nagyobb eséllyel ejthetik csapdába az odavonzott és a szobákba bejutott rovarokat. Élővizek közelében álló bukáblakokkal ellátott épületek ablakait (ha lehetséges) célszerű zárva tartani a polarotaktikus és/vagy fototaktikus rovarok fő (tavaszi, esetleg őszi) rajzási időszaka(i) alatt.
- A burkolatok színe és anyaga sokszor nem választható meg szabadon. Azonban ekkor is a poláros fényszennyezés egyik hatékony ellenszere lehet az azt okozó tükröző felületek olyan mértékű érdesítése, hogy a róluk visszaverődő, s depolarizálódó fény polarizációfoka a polarotaktikus vízirovarok ingerküszöbe alá essen.

A poláros fényszennyezés jelentős forrásai lehetnek a gépjárművek is (5. ábra). A jellemzően zöldmezős beruházásként létesülő, nagy területű P+R parkolóknak vagy hipermarketek parkolóiban hosszú távon tömegesen várakozó járművek poláros fényszennyezése okozhat károkat. Sajnálatos módon, az autót gondosan fényesítő, s így a karosszériát erősebben fénypolarizálóvá tevő autótulajdonosok akaratlanul is hozzájárulnak a poláros fényszennyezéshez. Nem közömbös a járművek színe sem: Az Umow-szabály miatt a fehér vagy világos színű autók karosszériája kevésbé polarizálja a róla visszaverődő fényt, míg a sötét, különösen a fekete és vörös karosszériák jelentős poláros fényszennyezést keltenek. Ahogy már láttuk, a karosszériára rakódott piszok és sár matt felületéről visszavert fény kevésbé poláros, mint a makulátlan csillogó felszínűekéről tükröződő. Tehát azon autók poláros fényszennyezése a legkisebb, amelyek világosak és nem mossák őket, más szóval a „legzöldebb” autók fehér és piszkos [8, 10]. Ezért előnyös, ha a természetvédelem alatt álló vizes élőhelyeket csak fehér vagy világos színű autókkal lehet látogatni, miáltal elkerülhető a veszélyeztetett polarotaktikus vízirovarok autókhoz való vonzódása és petéiket sem rakják le rájuk. Ám mivel a gépjárművek színe és fényezése piaci értéket nagymértékben befolyásolja, az utak megvilágításának tervezésében pedig a balesetmegelőzés szempontjai elsődlegesek, a gépkocsik által keltett poláros fényszennyezést leginkább fedett parkolók építésével, az úthálózatok körültekintő tervezésével, és forgalomszervezéssel lehet csökkenteni.

A széles körben alkalmazott aszfaltburkolatú utak jelentős poláros fényszennyezésének csökkentésére szintén részben az Umow-szabály alkalmazása ad lehetőséget. Az út felülete akár utólag is a visszaverődő fényt depolarizáló tulajdonságúvá tehető, ha felületét durvává és világossá teszik, például fehér és szemcsés anyag (például sóder) aszfaltba való hengerlésével. Az útburkolat ilyen fehéritése egyébként is hasznos lehet, mert ekkor sötétetés után kevesebb mesterséges fényáram is elegendő az útfelület megvilágításához. A jelentős költségek miatt az útburkolat e fehéritése és érdesítése elsősorban érzékeny vizes élőhelyek közelében indokolt, mint például a védett kérészfajoknak otthont adó patakok völgyében, vagy lápos területeken átvezető utaknál. Hasonlóképpen, a poláros fényszennyezés csökkentése céljából tanácsos volna korlátozni a védett vizes területek közelében sima, fekete műanyag fóliákat alkalmazó fóliatakarásos technológiát a mezőgazdaságban (1C ábra). Alkalmazhatók ugyanakkor világosszürke, s lehetőleg matt felületű takarófóliák, amelyek a gyomok visszaszorításában és a napsugárzás hőhatásának hasznosításában nem olyan hatékonyak, a fényt azonban kevésbé polarizálják, így a vízirovarokra nem veszélyesek.

6. Összefoglalás

Sima és sötét mesterséges felületek pontosan/közel függőleges visszaverődési sík esetén erősen és pontosan/közel vízszintesen poláros fényt vernek vissza, miáltal többé/kevésbé vonzóak a polarotaktikus vízirovarok számára, ezért e rovarok poláros ökológiai csapdáiként működnek, és a poláros fényszennyezés legfőbb forrásainak számítanak. A poláros fényszennyezés egyik fő ellenszere, hogy (1) csökkentjük a visszavert fény polarizációját azzal, hogy lecseréljük az erősen polarizáló sötét és fényes tükröző felületeket (1) világosakkal és/vagy (2) durva felületűekkel, mert az ilyenek csak gyengén poláros fényt vernek vissza, ami nem vonzó a polarotaktikus vízirovarok szá-

mára. (ii) A másik lehetőség, hogy figyelembe véve a természetes fény irányát és a mesterséges fényforrások elhelyezkedését, a közel függőleges visszaverődési síkok számát lehetőleg minimálisra csökkentjük. Mindezen információ a tájkép-, út-, város- és épülettervezők, valamint a döntéshozó (szak)politikusok figyelmébe ajánlandó, bízva a támogatásukban az egyre komolyabban veendő poláros fényszennyezés elleni környezetvédelmi küzdelemben.

Köszönetnyilvánítás:

Köszönetünket fejezzük ki Arató Andrásnak, hogy lehetővé tette a Holux Kft.-nél lámpatesztek polarizációjának mérését. Horváth Gábor köszöni az Alexander von Humboldt Alapítvány nagyjértékű műszeradományát, Bernáth Balázs pedig köszönetét fejezi kis az Alapítvány kétéves brémai kutatói ösztöndíjért. A szerzők hálásak Andrikovics Sándor, Boda Pál, Csabai Zoltán, Benno Meyer-Rochow, Molnár Gergely, Rudolf Schwind, Szedenics Gábor, Szivák Ildikó, Varjú Dezső, Rüdiger Wehner, Hansruedi Wildermuth és Jochen Zeil kollégáiknak a gyűmölcsöző hazai és nemzetközi együttműködésekért. Kutatásainkat az OTKA (K-68462: Közvetlen és közvetett polarotaxis vizsgálata tegzeseknél és kétszárnyúaknál) és az Európai Unió (Eu-FP7, No. 232366, TabaNOid: Trap for the Novel Control of Horse-flies on Open-air Fields - Research for the Benefit of Small and Medium Enterprises) támogatta. Vizsgálatainkat az Eötvös Loránd Tudományegyetem Pályázati és Innovációs Központja is támogatta a TÁMOP 4.2.1/09/1/KMR – Együttműködés, Lehetőség, Tudáshasznosítás című Európai Uniói pályázat keretében.