

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar
Környezettudományi Centrum

Mennyire „zöld” a napelem?

A matt napelemek használata megoldás lehet a poláros
fényszennyezés csökkentésére

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

Készítette:

Mihályi Dávid Krisztián

ELTE TTK Környezettudomány MSc hallgató

Témavezető:

Horváth Gábor

egyetemi docens
ELTE TTK Biológiai Fizika Tanszék,
Környezetoptika Laboratórium



2014 / 2015

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	3
1. A napenergiáról általánosságban.....	4
2. Szolárpanelek poláros fényszennyezése.....	6
2.1. A fény polarizációja.....	6
2.2. A vízirovarok vízkeresése és a poláros fényszennyezés.....	8
2.3. A rácshatás, mint a poláros fényszennyezés csökkentési módja.....	10
3. Matt napelemek.....	11
3.1. Napelemek matt felületének előállítása.....	11
3.2. Matt felületek fénypolarizáló-képessége.....	14
3.3. Matt fekete autók poláros fényszennyezése: terepkísérletünk előzménye.....	15
4. Matt és fényes fekete, vízszintes tesztfelületek polarotaktikus bögölyökre kifejtett vonzó hatásának vizsgálata.....	17
4.1. Viselkedési terepkísérlet bögölyökkel.....	17
4.2. A tesztfelületek bögölyvonzó-képessége.....	20
4.3. A tesztfelületek polarizációs sajátosságai.....	22
5. Összefoglalás és kitekintés.....	30
Köszönetnyilvánítás.....	32
Irodalom.....	33
Internetes források.....	35

Bevezetés

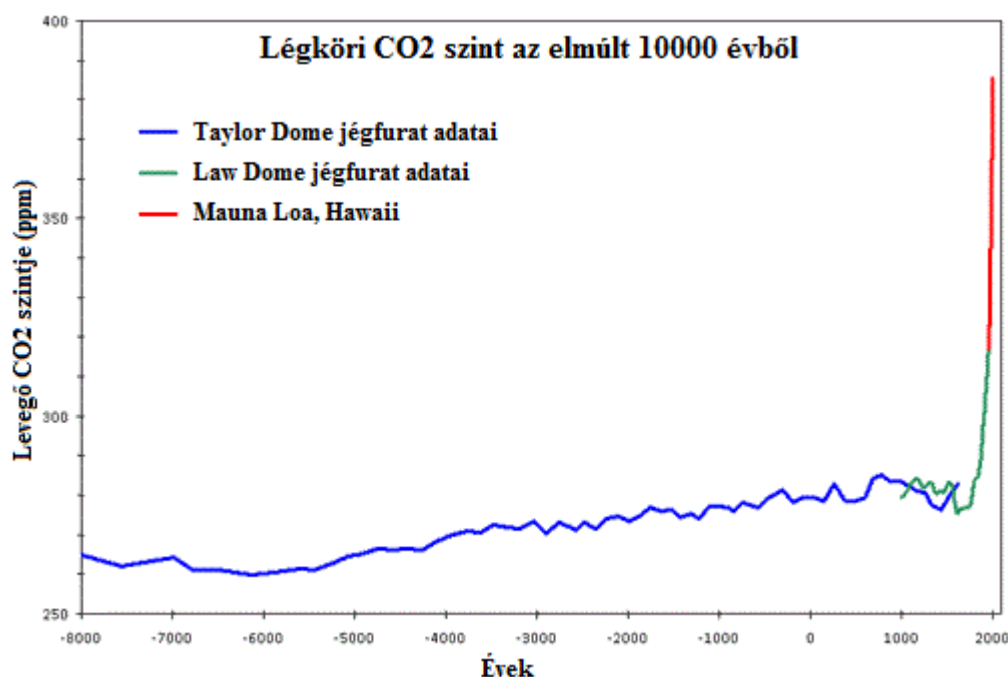
Az elmúlt 10 évben végzett vizuális ökológiai kutatások rámutattak, hogy különböző mesterséges felületekről (például aszfalt utakról, folyóparti üvegépületekről, fekete mezőgazdasági műanyag fóliákról) visszaverődő, vízszintesen poláros fény megzavarhatja egyes vízirovarok (például kérészek, szitakötők, bögölyök) viselkedését, amit poláros fényszennyezésnek nevezünk. A fényes, sima, fekete felületű napelemtáblák és napkollektorok – a továbbiakban szolárpanelek – is erősen és gyakran vízszintesen poláros fényt tükröznek, éppen úgy, mint maguk a természetes vízfelszínek, így az említett felületekhez hasonlóan ezek is vonzzák a vízkereső vízirovarokat, megtévesztve őket.

Napjainkban azonban egyre terjednek a matt fekete borítású szolárpanelek (napelemtáblák és napkollektorok) is, melyek felülete mikroszkópikus méretű kiemelkedéseket vagy légpórusokat tartalmaz. Ezek a kiemelkedések/pórusok „csapdába ejtik” a beérkező fényt, miáltal az ilyen borítású szolárpanelek nagyobb határfokkal működnek, mint a fényes, sima felületű társaik. Mivel a matt fekete felületekről diffúzan visszavert fény kevésbé poláros lehet, mint a fényes fekete felületekről tükröződő fény, felmerült az ötlet, hogy a matt szolárpanelek poláros fényszennyezése kisebb lehet, mint a fényeseké. Ennek ellenőrzésére 2014 nyarán terepkísérletet végeztünk, aminek során azt vizsgáltuk, hogy két egyforma méretű fényes/sima és matt/érdes felszínű fekete, vízszintes tesztfelület mennyi polarotaktikus (azaz a vízszintesen poláros fényre reagáló) bögölyt vonz. Tesztfelületekként ugyanazon fényes és matt üveglapokat használtuk, mint amelyeket a fényes és matt szolárpanelek ipari előállításánál is alkalmaznak (a kísérlet során tehát nem valódi napenergia-hasznosító berendezéseket használtunk, ám korábbi kutatásaink bizonyítják, hogy ez nem módosítja a felületek vonzóképességét). Terepkísérletünkben a matt fekete tesztfelületek statisztikusan szignifikánsan kevesebb bögölyreakciót (körözést, érintést, leszállást) váltottak ki, mint a fényes feketék. Így a vizsgált matt (érdes) fekete tesztfelületek poláros fényszennyezése jóval kisebb, mint a fényes (sima) tesztfelületeké. Képalkotó polarimetriával feltártuk a matt és fényes tesztfelületek eltérő rovarvonzó-képességének fizikai (optikai) okait is. Eredményeink fontos gyakorlati alkalmazása, hogy az úgynevezett antireflektív (vagyis matt, érdes felszínű) szolárpanelek elterjedésének így már nemcsak energetikai indokai vannak, hanem azon környezetvédelmi érv is, hogy a vízirovarokat veszélyeztető poláros fényszennyezésük jóval alacsonyabb, mint a hagyományos, sima, fényes felületű szolárpaneleké.

2015 tavaszán újabb terepkísérletekben további polarotaktikus rovarfajoknak (szúnyoglábu legyeknek és kérészeknek) a matt és fényes fekete tesztfelületekre adott reakcióit tervezzük vizsgálni annak kiderítése céljából, hogy a polarotaktikus bögölyökre kapott eredmények mennyire általánosíthatók. Az eredményeinkről szóló cikk írása folyamatban van (SZÁZ *et al.* 2015).

1. A napenergiáról általánosságban

A történelem folyamán az emberiség energiaigénye folyamatosan nőtt. Kezdetben, az őskorban, elegendő volt egy tábortűz is az emberek energiaszükségletének fedezésére. Idővel azonban, például a fémek megmunkálásához, egyre nagyobb „tábortüzeket”, kohókat kellett építeni. Az ipari forradalomig mindez fenntartható mértékben és módon zajlott, a természetet maradandóan nem károsította. A körülbelül 250 évvel ezelőtt útjának indult ipari fellendülés viszont ezt gyökeresen átalakította. A fő energiaforrás a szén, később pedig a kőolaj és a földgáz lett, aminek eredményeként a globális légköri CO₂ koncentráció két és fél évszázad alatt 100 ppm-el nőtt (1. ábra).



1. ábra: A légköri CO₂ koncentráció (ppm) változása az elmúlt 10000 évben [1].

E globális szén-dioxid-probléma és a fosszilis energiahordozók véges mennyisége miatt az emberiség alternatív, általában környezetbarát („zöld”) energiaforrás után kezdett kutatni. A rengeteg lehetőség közül az egyik széles körben elterjedt, és a hétköznapi emberek számára is elérhető „zöld” energiaforrás a Nap sugárzása. A

napsugárzást hasznosító berendezéseket két csoportba sorolhatjuk: (i) a napfény elnyelésével meleg vizet előállító napkollektorok, és (ii) a napsugárzás segítségével elektromos áramot termelő napelemek.

A napelemek története az 1860-as években kezdődött, amikor a fizikus William Grylls Adams egy véletlen folytán felfedezte, hogy a szelén másképpen viselkedik nappal, mint éjjel: fény hatására elektromos áram keletkezik benne. Ő nevezte el ezt a jelenséget fénykeltette („fotovoltaiikus”) elektromosságnak [2]. 1885-ben megszületett az ezen fotoeffektusra épülő első napelem, ami viszonylag hosszabb ideig volt képes elektromos áramot termelni, hatásfoka viszont még nagyon alacsony volt. Az utóbbi miatt és az egyéb fosszilis energiahordozók piacának felfutása következtében jó időre háttérbe szorult a napelemek iránti érdeklődés. A II. Világháború után a szilícium alapú tranzisztorok megjelenésével, valamint a fényvisszaverődés problémájának kiküszöbölésével jelent meg az első, hivatalosan is 6 %-os maximális hatásfokú napelem [2].

Ma már könnyű olyan forgalomban lévő napelemeket találni, melyek hatásfoka duplája ennek az értéknek, sőt, laboratóriumi körülmények között már sikerült a háromszorosát is elérni. A napelemek elméleti maximális hatásfokát 31 % körülire becsülik [3]. A napelemek hatásfoka emellett nagyban függ a megfelelő elhelyezésüktől és tájolásuktól, valamint a földrajzi szélességtől és az éghajlati adottságoktól is.

A napelemek működéséhez félvezető anyagokra van szükség. Ezekben napfény hatására egyenáram termelődik, amit egy átalakítón (inverteren) kell átvezetni, hogy az elektromos hálózatban is használt váltóáramot kapjunk. Egy napelem-hálózat működhet szigetüzemben, vagyis az általa termelt áram csak a tulajdonos elektromos rendszerébe kerül, a felesleg eltárolásáról, illetve a hiány pótlásáról külön kell gondoskodni. A másik lehetőség az elektromos hálózatra kötött napelemek rendszere, ami a többletenergiát a regionális és/vagy az országos rendszerbe is képes betáplálni (LARSEN *et al.* 2000).

A napelemek terjedése napjainkban folyamatosan gyorsul, bár elég lassan. Ennek oka, hogy a berendezések ára még igen magas, viszont folyamatosan nő rájuk az igény, így a piaci árak lassan, de biztosan csökken. Bízhatunk abban, hogy az általuk termelt elektromos áram ára a közeljövőben már olyan szintre süllyed, hogy a fosszilis erőművekben megtermelt áraméval vetekedhet. A piaci ár csökkenését segíti elő az is, hogy már számos különböző anyagból képesek napelemeket gyártani. Persze ezek

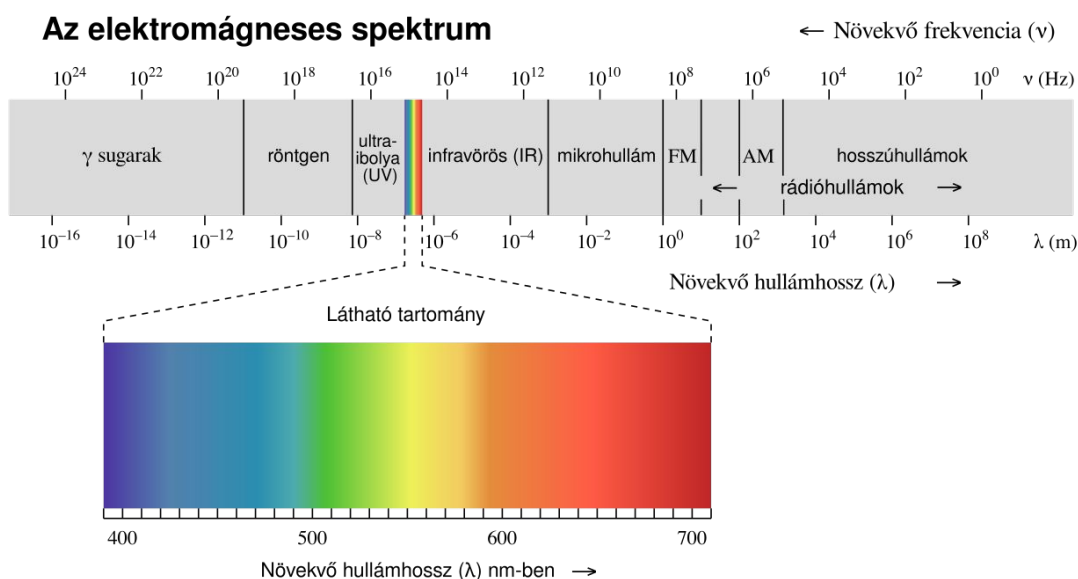
hatásfokukban, illetve az előállításuk technológiájában, így áraikban is jelentősen eltérhetnek. A napelemek árát az egyre nagyobb mértékű termelésük is csökkenti.

2. Szolárpanelek poláros fényszennyezése

Az emberiség növekvő energiaigénye számos környezeti problémát okoz (például globális felmelegedést, tengerszint emelkedését, biodiverzitás csökkenését, atomhulladék elhelyezését), így egyre nagyobb az igény arra, hogy a szükséges energiát valamilyen megújuló és környezetkímélő („zöld”) forrásból fedezzük, mint például amilyenek a szolárpanelek. De valóban olyan „zöldek” a hagyományos szolárpanelek, mint azt sokan gondolják? Ebből a fejezetből kiderül, hogy nem.

2.1. A fény polarizációja

A fény transzverzális elektromágneses hullám, melyben a terjedési irányra és egymásra is merőlegesen szinuszosan változnak az elektromos és mágneses térerősségvektorok. A részlegesen lineárisan poláros fénynek (ami dominánsnak számít a földi természetben a cirkulárisan/elliptikusan poláros fényhez képest) négy fő jellemzője van: I intenzitás, λ hullámhossz, d polarizációfok és α polarizációszög (vagy -irány). A fény intenzitása nem más, mint amit az emberi szem fényerősségként érzékel: a sötétebb tárgyak fényének intenzitása alacsonyabb, mint a világosaké. A tárgyak színét a róluk visszaverődő fény spektruma, azaz hullámhossztól függő intenzitása határozza meg a fotoreceptorok érzékenységi spektruma mellett. Az emberi szem körülbelül a 400-750 nm-es hullámhossztartományt képes érzékelni. 400 nm az ibolya, 750 nm a vörös színeknek felel meg, a többi érzékelhető szín köztük található (HORVÁTH és VARJÚ 2004). Az elektromágneses sugárzás hullámhossza és frekvenciája közti kapcsolatot a 2. ábra mutatja.



2. ábra: Az elektromágneses spektrum [4].

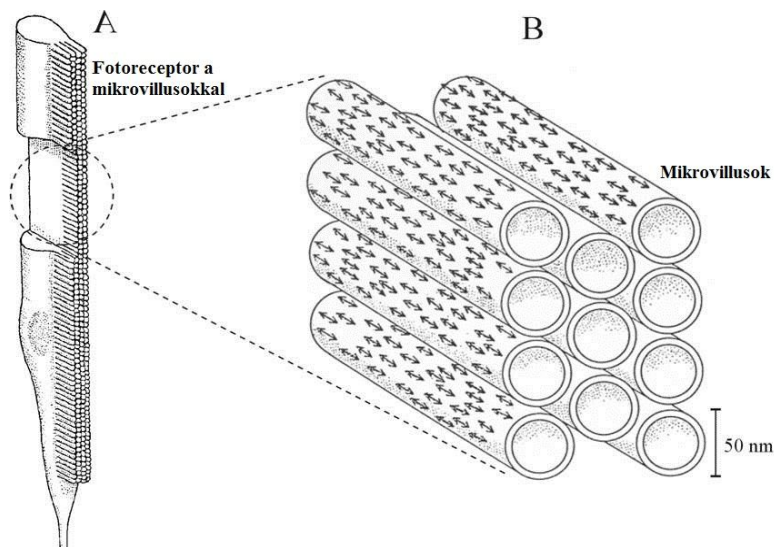
A fény polarizációirányát és a polarizációfokát az ember (és az emlősök) nem képesek érzékelni, ellentétben a többi állatcsoport képviselőivel (HORVÁTH és VARJÚ 2004, HORVÁTH 2014). A polarizációfok megmondja, hogy egy adott hullámhosszúságú fényben az elektromágneses sugárzás összintenzitásának hányad része lineárisan poláros. Ha az elektromágneses hullám elektromos térerősségvektora (E vektor) csak egyetlen kitüntetett irányban rezeg, akkor beszélünk $d = 100\%$ polarizációfokról, ami a természetben leginkább a nemfémes tükrözőfelületekről (például vízről) verődik vissza. Az ilyen fényt teljesen lineárisan polárosnak nevezzük. Amennyiben sok különböző rezgéssíkú lineárisan poláros fényt elegyítünk, vagyis a tér bármely irányába állhat az E vektor, úgy $d = 0\%$ polarizációfokot kapunk, azaz a fény polarizálatlan. Legközismertebb példa erre a Napból érkező fény, amiben a létező összes rezgéssík megtalálható. Végül, ha teljesen lineárisan poláros fényt keverünk polarizálatlan fényvel, úgy a d polarizációfok 0 és 100 % közötti lesz. Ez azt jelenti, hogy a fényben minden irányú rezgéssík előfordul, de van egy kitüntetett rezgéssík, aminél maximális az intenzitás. Ezt az irányt nevezzük polarizációiránynak. Ilyen, részlegesen lineárisan poláros fény verődik vissza például minden nem-fémes tárgy felületéről, de a szórt égboltfény is ebbe a kategóriába tartozik (HORVÁTH és VARJÚ 2004).

De miért jó az állatoknak, hogy a fény polarizációját is képesek érzékelni? Azért, mert a fénypolarizáció ugyanolyan értékes információt hordoz, mint az intenzitás és a színek. A polarizáció segítségével az állatok képesek például tájékozódni, vagy

megtalálni az életben maradásukhoz nélkülözhetetlen vizes élőhelyeket (WEHNER 1976). A továbbiakban az utóbbira koncentrálunk.

2.2. A vízirovarok vízkeresése és a poláros fényszennyezés

A vízirovaroknak állandóan vagy csak életciklusuk egy-egy meghatározó szakaszában, például szaporodáskor, képesnek kell lenniük megtalálni a szükségleteiknek megfelelő mennyiségű és minőségű vizes élőhelyeket. Ebben nem a víz színe, hanem a vízfelületről visszavert lineárisan poláros fény van segítségükre. A vízfelszínről csak teljesen felhős időben verődik vissza kizárólag vízszintesen poláros fény, mikor az égboltna fény (felhőfény) polarizálatlan. Minden más esetben vannak olyan részei a vízfelületnek, melyek függőlegesen vagy ferdén poláros fényt tükröznek. Egy speciális szögben, az úgynevezett Brewster-szögben nézve a vízfelszínt, mindig vízszintesen és maximálisan poláros a visszaverődő fény. Ekkor a víz felületéről visszavert és a vízben megtörve továbbhaladó fénysugár egymással derékszöget zár be (HORVÁTH és VARJÚ 2004, HORVÁTH 2014).



3. ábra: (A) Egy rovar-látósejt (fotoreceptor) külső részének membránja.
(B) A receptormembrán mikrocövecskéi kinagyítva, melyek lehetővé teszik a rovarok számára a polarizált fény érzékelését (WEHNER 1976).

Számos vízirovarfaj, köztük a bögölyök szeme is a spektrum valamelyik (zöld, kék vagy ultraibolya) tartományában érzékeli a fénypolarizációt (SCHWIND 1995). Retinájukat olyan fotoreceptorok építik fel, melyek hosszúka, hengeres sejtjei külső részének membránjából egymással párhuzamos tengelyű mikrobolyhok (mikrovilluszok) tömörkednek ki (3A ábra). Ezekben a nanocövecskében a látópigment óriásmolekulái

egymással és a bolyhok hossz tengelyével közel párhuzamosan, rendezetten irányulnak (3B ábra), ami lehetővé teszi a poláros fény érzékelését. Ez a rendezett szerkezet lényegében lineáris polárszűrőként működik: egy fotoreceptor annál nagyobb elektromos kimenőjelet küld az agyba, minél kisebb szöget zár be a beeső fény polarizációsíkja a mikrobolyhok tengelyével, mert annál több fényt nyelnek el a látópigment molekulái.

A vízirovarok vizes élőhelyüket a víz felületéről visszaverődő fény vízszintes polarizációjának érzékelésével találják meg. Úgynevezett pozitív polarotaxissal rendelkeznek, vagyis a vízszintesen poláros fényhez vonzódnak. Sajnos azonban az emberi környezet átalakításával számos olyan tárgy jelent meg az életterükben, amelyek bár nem vízfelületek, mégis vízszintesen poláros fényt vernek vissza, így a poláros vizet utánozva magukhoz vonzzák, becsapják a polarotaktikus vízirovarokat, melyek rájuk petéznek, a petecsomók pedig kiszáradva elpusztulnak. Az ilyen tárgyak polarizációs ökológiai csapdaként működnek. Hatásukra a vízirovarok a lárváik fejlődésére alkalmatlan helyet (a vízszintesen polarizáló mesterséges tárgyat) választanak, ami az egyedek vagy akár az egész populáció pusztulását okozhatja.

A vízirovarok többnyire a fényes, fekete, vízszintes mesterséges felületeket szokták vízként érzékelni, melyek esetén nagyobb polarizációfokú lehet a vízszintes polarizációjú visszaverődő fény, mint a vízfelületekről visszaverődő általában. Az ilyen, úgynevezett poláros fényszennyező felületeket a vízirovarok igen vonzó „szupervízként” érzékelik, így nem tudnak ellenállni nekik, és úgy viselkednek a közelükben, mint természetes vizes élőhelyükön: köröznék felettük, őrzik a territóriumukat, felületet érintenek a testük hűtése érdekében, rájuk petéznek (WILDERMUTH *et al.* 2005, HORVÁTH *et al.* 2009). Sajnos mindezek következménye, hogy rövid időn belül a kifejlett rovarok kiszáradnak, lerakott petéik pedig elpusztulnak. Ilyen poláros fényszennyező tárgyak például a nagy, fekete mezőgazdasági műanyag fóliák (SINKOVICS *et al.* 2012), a fényes fekete sírkövek (HORVÁTH *et al.* 2007), a sötét aszfalt utak (KRISKA *et al.* 1998), a sötét, fényes festésű autók (WILDERMUTH *et al.* 2005, KRISKA *et al.* 2006), a kőolajfoltok, pakuratavak (BERNÁTH *et al.* 2001), az épületek üvegfelületei (KRISKA *et al.* 2008) és a napelemek, illetve napkollektorok fényes fekete felülete is (HORVÁTH *et al.* 2010).

2.3. A rácshatás, mint a poláros fényszennyezés csökkentési módja

A szolárpanelek minél magasabb hatásfokkal való működéséhez szükséges, hogy sötét felületűek legyenek, hiszen így képesek a lehető legtöbb napfényt elnyelni. A hagyományos szolárpanelek fekete felszíne ráadásul fényes, sima, miáltal a Brewster-szögben visszaverődő fény igen nagy polarizációfokú. Ha a visszaverődés síkja közel függőleges, akkor a visszavert fény közel vízszintesen poláros, ami a polarotaktikus vízirovarokat vonzza, mert vízként detektálják. Mivel a fényes fekete szolárpanelek napsütésben felforrósodnak, ezért a rájuk szálló vízirovarok rövid időn belül rájuk sülnek, csökkentve ezzel a panelek hasznos felületét. Ráadásul a panelekre rakott peték is elpusztulnak, a bennük lévő fehérjék pedig erős szulfonsavvá vagy szulfinsavvá alakulva károsítják a panelek felszínét (STEVANI *et al.* 2000). Mindezek miatt a vizes élőhelyek közelében telepített szolárpanelek felületét gyakran kell tisztítani.

Az amorf anyagú napelemekkel ellentétben a mono- és polikristályos napelemeket több kisebb fekete cella alkotja, melyeket egy rendszerint világos (fehér) fémfelületre rögzítenek. Így alakul ki egy világos rácsmintázat a sötét, fényelnyelő felületen (4. ábra) (BOXWELL 2012). Ezeket a rácisos, cellás szerkezetű napelemeket még akkor sem összefüggő vízfelületként értelmezik a polarotaktikus vízirovarok, ha vízszintesen poláros fényt vernek vissza. A több kisebb vízfelületnek tűnő cellasokaságra már nem éri meg rászállni és lepetézni a vízirovaroknak, mert a víznek vélt cellák túl kicsinek tűnnek a peték fejlődéséhez. A világos (fehér) rácsozás tehát bizonyítottan csökkenti a cellás napelemek poláros fényszennyezését (Horváth *et al.* 2010). Az amorf szilícium napelemek és számos napkollektor felülete viszont összefüggő fekete (HOUGH 2007), így nagyfokú a poláros fényszennyezésük.



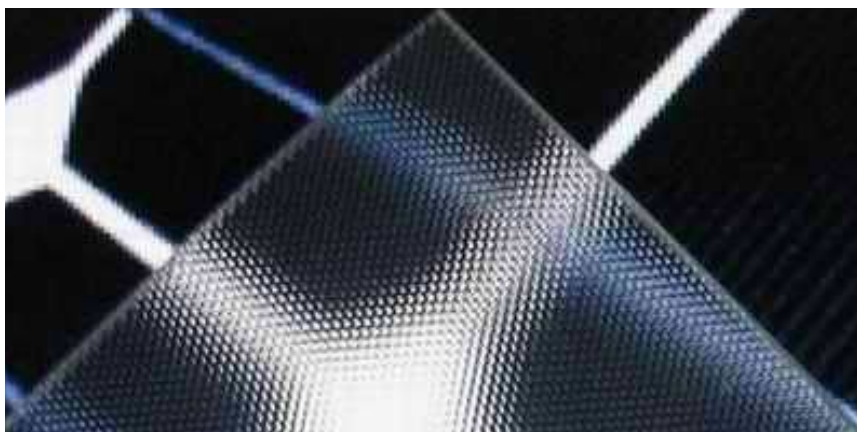
4. ábra: Amorf (balra), monokristályos (középen) és polikristályos (jobbra) napelemtáblák [5].

3. Matt napelemek

Az eddig bemutatott jelenségek fényes és fekete felületekre érvényesek. Ugyanakkor egyre terjednek az olyan felületek, melyeknek pont az a lényege, hogy egyáltalán ne legyenek fényesek. Talán a legfurcsábbak és leglátványosabbak az egyre gyakrabban megfigyelhető matt festésű fekete és szürke autók, ám a napelemek között is feltűntek már a matt felületűek.

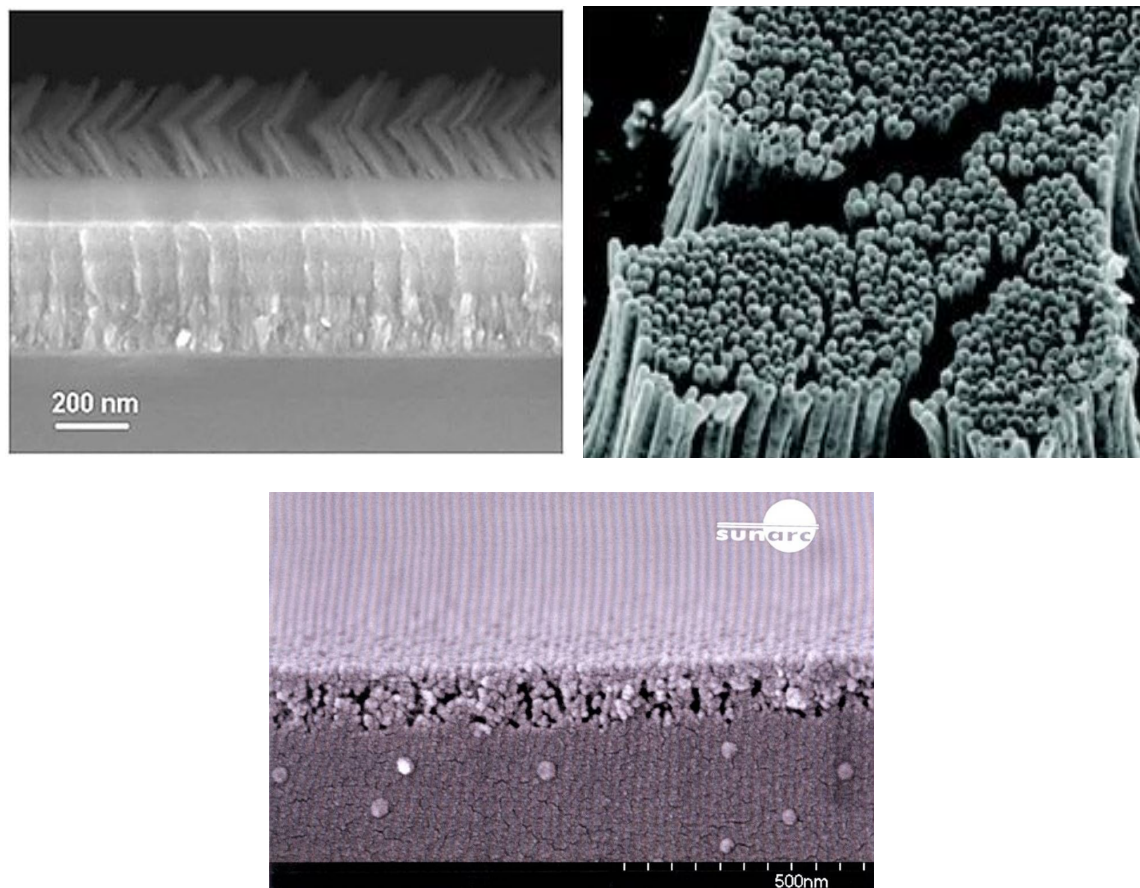
3.1. Napelemek matt felületének előállítása

A napelemek legfontosabb tulajdonsága, hogy a fekete felületük a beeső fény hány százalékát képes elnyelni. A kereskedelmi forgalomban jelenleg kapható napelemek hatásfoka 17-18 % körüli, habár laboratóriumi körülmények között már 25 %-ot is elértek (PAULESCU *et al.* 2013). A 31 %-os elméleti határ minél jobb megközelítése érdekében az utóbbi években kifejlesztették az úgynevezett antireflektív vagy matt felületű napelemeket. Ezek abban különböznek a hagyományosaktól, hogy felületük érdes (5-7. ábra), ezáltal az ilyen matt napelemekre eső fény csapdába esik, kevésbé verődik vissza, így nagyobb az elnyelt fotonok száma, ami hatékonyabb energiatermelést jelent.



5. ábra: Matt napelemtáblákban használatos, érdes felületű üveglap [6].

A matt fekete kinézetű, érdes felület előállításához például az elkészült napelem külső felszínét több rétegben 50 és 100 nm közti hosszúságú SiO_2 vagy TiO_2 nanocsövekkel borítják be (KANG *et al.* 2009). A nanocsövek szabálytalanul, a tér minden irányába állnak, elősegítve ezzel, hogy a beeső fotonok az energiatermelő felületre terelődjenek (6. ábra).

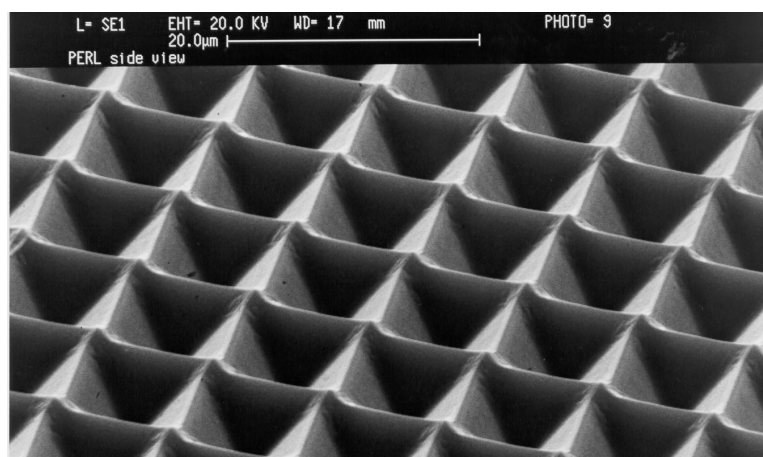


6. ábra: Matt napelemtáblát borító nanocsövek elektronmikroszkópos képe (bal felső kép forrása: KUO *et al.* 2008, jobb felsőkép forrása: KANG *et al.* 2009. Az alsó képet a Sunarc Technology készítette egy, az általunk is használt típusú felületről).

A nanocsövek szabálytalan elrendezése azt is megelőzi, hogy az esetlegesen visszaverődő fotonok elhagyhassák a napelem felszínét, jó eséllyel újra visszaterelik őket az energiatermelő felület irányába.

Ugyanez a fénytérelő és -csapdázó hatás más technológiával is elérhető. Lehetőség van a napelem felületét például mikroszkópikus méretű, piramis alakú kitüremkedések hálózatával, rácsával befedni (7. ábra). Ekkor a piramisok csúcsánál a levegő határfelületén a fény törésmutatója 1. Minél mélyebbre halad a fény a hullámhosszával összemérhető kiterjedésű, lefelé szélesedő piramisok között, annál nagyobb átlagos/effektív törésmutatóval találkozik, míg elérve a piramisok alját, az effektív törésmutató megegyezik a piramisok anyagáéval. Az ilyen folytonos törésmutató-átmenetű felületről a fényvisszaverődés minimális, így a fényelnyelés maximális. Az éjszaka vagy szürkületkor aktív rovarok összetett szemében a kitinlencsésckék felülete pont ezért érdekes a fényhullámhossz nagyságrendjébe eső méretű kitinkitüremkedéseknek (úgynevezett kornea-papilláknak: kúpoknak,

piramisoknak, bordáknak vagy barázdáknak) köszönhetően (Miller *et al.* 1966; Meyer-Rochow & Stringer 1993). A gyér fényviszonyok között élő rovaroknak létfontosságú, hogy a szemlencsék felületének fényvisszaverő képessége minimális, fényelnyelőképessége maximális legyen, hogy ezáltal minél több fény jusson a lencsék alatti fotoreceptorokra. A kornea-papillás felszínű lencsékkel bíró rovarok szemei matt feketék, aminek a fényelnyelés megnövelésén túl az a másik előnye, hogy napközben, mikor pihenve, nyugalomban rejtőzködnek a nappali ragadozók elől, nem csillognak feltűnően a fekete szemek. A felületek mattosítását/éresítését mint hatékony fényelnyelő módszert, tehát az ember előtt jóval korábban a rovarok is „feltalálták”.



7. ábra: Mikroszkópikus méretű piramisokkal mattá tett szilíciumlap felületének elektronmikroszkópos képe [7].

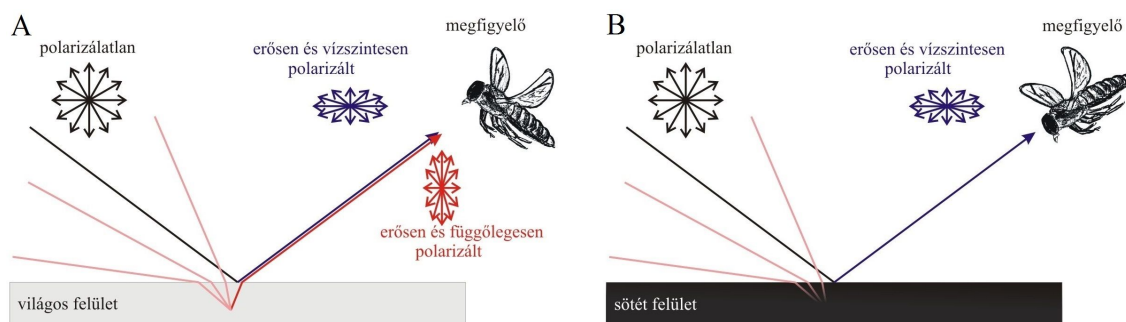
Az éres/matt fekete napelemfelületnek több energetikai előnye is van: (i) Az éres felületű napelemfelszínek a rájuk jutó napfény akár 96,2 %-át is képesek elnyelni (KUO *et al.* 2008), szemben a hagyományos, fényes/sima felületű napelemekkel, amelyek, ideális beesési szög mellett is csak maximum 70 %-át [8]. (ii) Továbbá, a véletlenszerű elrendezésű nanocsövek, bármilyen szögből is essen rájuk a fény, képesek azt az energiatermelő felületre irányítani, ezáltal feleslegessé teszik a Nap égi pályáját követő, energiát fogyasztó motorok használatát. (iii) A matt napelemek előállítása nem olyan költséges, mint gondolnánk. Egy ausztrál cég, a *Brisbane Materials* például olyan módszerek kifejlesztésén dolgozik, melyekkel normál légköri nyomáson, szobahőmérsékleten is előállíthatóak az említett nanocsövek [9]. Jelenleg az antireflektív napelemekkel táplált LED-es megvilágítás terén érnek el sikereket (a LED-es világítás sokak szerint a jövő, bizonyítja ezt az is, hogy a 2014. évi fizikai Nobel-díjat a kék LED feltalálói kapták).

A napelemek felületének érdesítése/mattosítása jelenleg 2-3 %-al növeli a hatásfokot [10]. Ez egyelőre csak kis javulásnak tűnhet, azonban a matt napelemek jelenleg a piacon kaphatók között a legjobbaknak számítanak.

3.2. Matt felületek fénypolarizáló-képessége

A matt felületek mikroszkóp alatt nézve megszámlálhatatlanul sok, apró fragmentumból állnak. Ezek teljesen véletlenszerűen helyezkednek el a közeg felszínén, így bár az egyes fragmentumok felülete fényes/sima, a fragmentumok összessége a fényt minden lehetséges irányba, diffúzan verik vissza. Ez azt eredményezi, hogy a matt felületek által visszavert fény átlagos polarizációfoka lecsökken a véletlenszerűen elhelyezkedő fragmentumok által visszavert fény véletlenszerű polarizációirányainak kölcsönhatása (egymás hatásának lerontása) miatt. Így, logikus feltételezni, hogy a matt/érdes fekete felületek, például szolárpanelek poláros fényszennyezése kisebb, mint a fényes/sima felületű társaiké. Más szóval, az várható, hogy például a matt fekete szolárpanelek a vízirovarokra nem gyakorolnak olyan erős vonzást, mint a fényes fekete megfelelőik.

A fényes/sima fekete felületek a következő okból tükröznek erősen poláros (nagy polarizációfokú) fényt. Egy felületről a fény két komponense ered: (1) A levegő-közeg határáról visszavert fény, ami részlegesen lineárisan poláros a felszínnel párhuzamos polarizációiránnyal. (2) A közegből kilépő és annak határán megtörő összetevő, aminek polarizációiránya a felszínre merőleges (8A ábra).



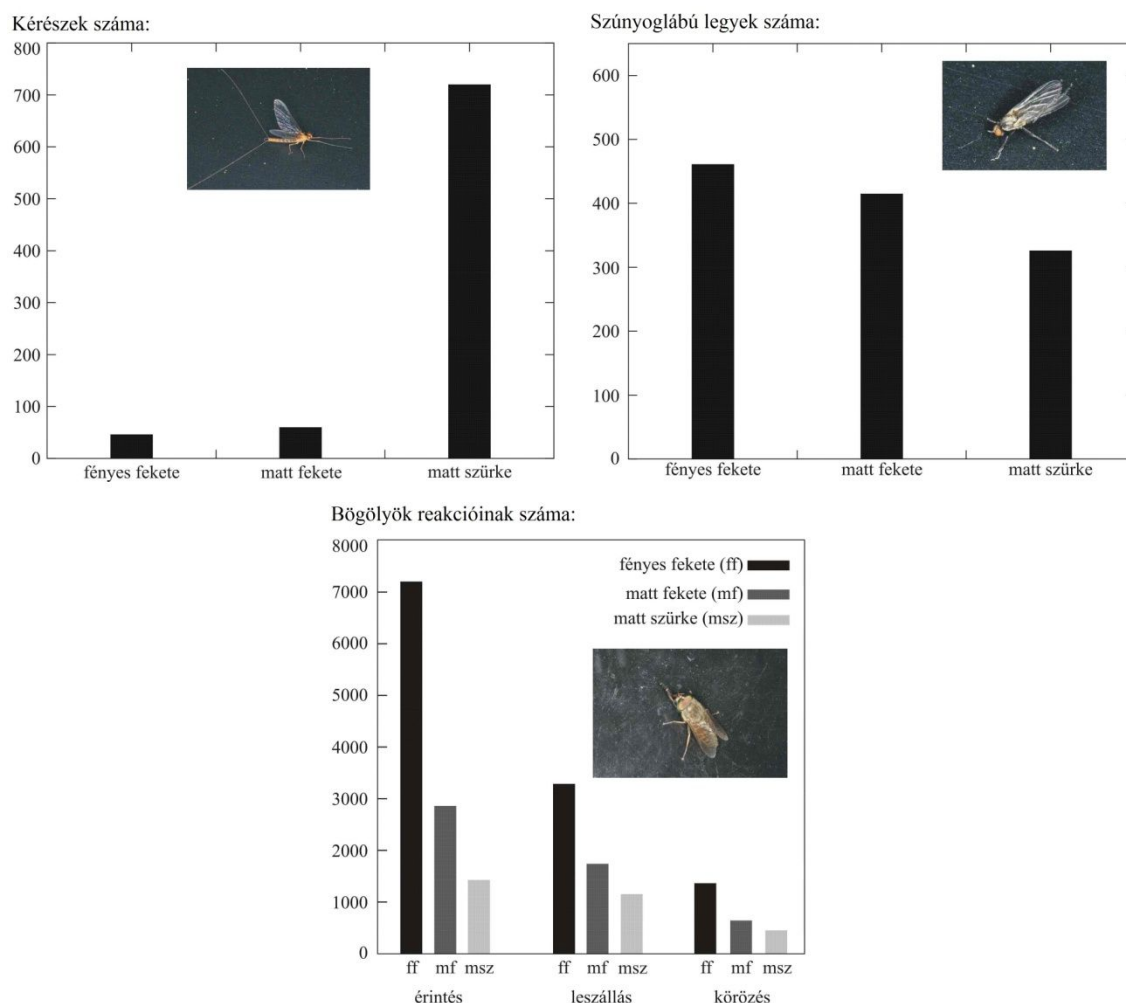
8. ábra: Polarotaktikus vízirovarok reakciói világos és sötét felületekről visszaverődő, részlegesen lineárisan poláros fényre (EGRI 2014a).

Fényes fekete felületek esetén az 1. komponens dominál, mert a 2. komponens a fekete közeg elnyeli (8B ábra). Ezért ilyenkor a visszavert fény polarizációfoka nagy, mivel az 1. összetevő felülettel párhuzamos polarizációját nem rontja le a 2. összetevő felületre merőleges polarizációja. Így, amennyiben a fényes fekete felület vízszintes, a róla

visszaverődő erősen és vízszintesen poláros fény vonzza a pozitív polarotaxissal rendelkező vízkereső vízirovarokat, vagyis poláros fényszennyező (EGRI 2014a,b).

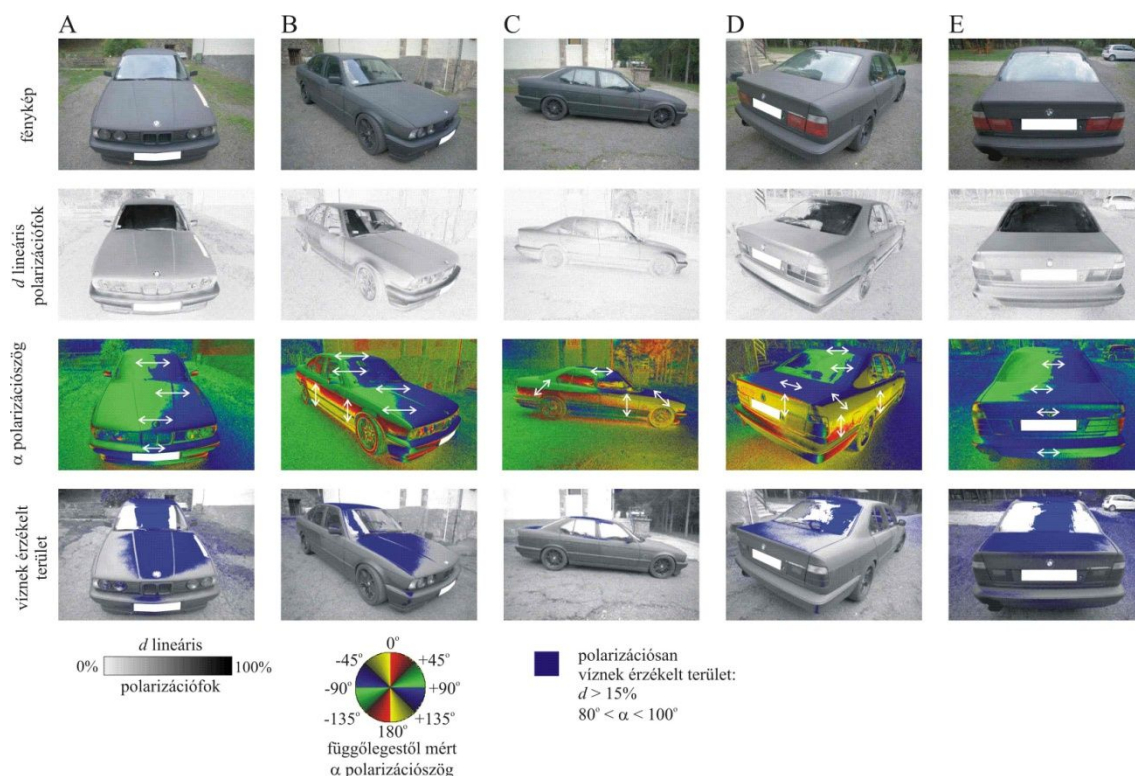
3.3. Matt fekete autók poláros fényszennyezése: terepkísérletünk előzménye

Néhány éve kezdett hódítani az autósok körében az az új divat, hogy az autó egész felületét vagy csak egyes részeit (például a motorháztetőt, tetőt, csomagtartót) matt feketére vagy matt szürkére festik, ezáltal kölcsönözve neki különleges megjelenést. Az első gondolatunk az lehetne, hogy egy olyan divathóbort kezd kibontakozni, amely a 3.1. fejezetben leírt okból csökkenti a poláros fényszennyező források számát, hiszen minél többen mattosítanak a fényes felületű, fekete autójukat, annál kevesebb jármű lenne káros hatással a polarotaktikus vízirovarokra. Ezt az elképzelést BLAHÓ *et al.* (2014) tesztelte: terepkísérletek során az autóiparban használatos fényes fekete, matt fekete és matt szürke autókarosszéria felületek bögölyökre, szúnyoglábu legyekre és kérészekre kifejtett vonzókéességét vizsgálták (9. ábra). A bögölyök és szúnyoglábu legyek kevésbé vonzódtak a matt fekete/szürke tesztfelületekhez, számukra a fényes fekete tesztfelület szignifikánsan vonzóbb volt. Ám a várakozásokkal ellentétben, egyes (fokozottan védett) kérészfajok számára egy nagyságrenddel vonzóbb volt a matt szürke tesztfelület, mint a matt fekete és fényes fekete. BLAHÓ *et al.* (2014) ezt azzal magyarázta, hogy ezek a kérészfajok petezésükhöz tökéletesen nyugodt vízfelszínt keresnek, a matt szürke tesztfelület visszaverődési-polarizációs sajátságai pedig éppen olyanok voltak, mint a nyugodt vízfelszíné: a polarizációirány vízszintestől való eltérése (szórása) kicsi, viszonylag nagy polarizációfokok mellett.



9. ábra: Fényes fekete, matt fekete és matt szürke vízszintes tesztfelületek által csapdázott kérészek és szúnyoglábu legyek száma, valamint a rajtuk megfigyelt bögöly-reakciók száma (BLAHÓ *et al.* 2014).

Képalkotó polarimetriai mérésekkel az is kiderült, hogy a matt fekete autók, bár alacsonyabb polarizációfokú fényt vernek vissza, mint a sötét vízfelszínnek, a karosszériájukról tükröződő fény polarizációirányának vízszintestől való eltérése kicsi (10. ábra), aminek következtében a pozitív polarotaxissal vizet kereső rovarok ugyanúgy vízként érzékelik őket, mint a fényes fekete autókat, így hasonló viselkedést mutatnak a közelükben, mint a vizeknél (körözés, leszállás, petezés, territórium védelem).



10. ábra: Egy matt fekete autó polarizációs sajátosságai. 1. sor: fényképek. 2. sor: polarizációfok-mintázatok. 3. sor: polarizációs szög-mintázatok. 4. sor: a polarotaktikus vízirovarok által vízként érzékelt területek (BLAHÓ *et al.* 2014).

Összességében, BLAHÓ *et al.* (2014) kísérletei és mérései megmutatták, hogy a matt/érdes fekete/szürke felületek nem feltétlenül jelentenek megoldást a pozitív polarotaxissal vizet kereső vízirovarok megtévesztődésének, vonzódásának, azaz a poláros fényszennyezésnek a problémájára, sőt, bizonyos esetekben még súlyosbíthatják is azt.

4. Matt és fényes fekete, vízszintes tesztfelületek polarotaktikus bögölyökre kifejtett vonzó hatásának vizsgálata

4.1. Viselkedési terepkísérlet bögölyökkel

A 2014 nyarán végzett terepkísérletünk célja annak kiderítése volt, hogy a nemrég kifejlesztett matt felületű napelemtáblák mennyire vonzóak néhány polarotaktikus vízirovarfaj számára, vagyis mennyire poláros fényszennyezőek. A kísérletben a matt napelemtáblák külső borításaként használatos, 40 cm × 40 cm felületű, 3 mm vastag matt üveglapokat használtunk, melyeket a dán *Sunarc Technology* cég készített és bocsátott ingyen a rendelkezésünkre. Kontrollként ugyanilyen méretű hagyományos, sima, fényes üveglapokat használtunk. A matt és fényes üveglapokat fekete fakeretbe

foglaltuk, ami a biztonságos szállítást tette lehetővé. Az üveglapok alá fekete kartonlapot helyeztünk, ami a napelemtáblák fekete fényelnyelő anyagának felelt meg (11. ábra). Korábbi polarimetriai méréseink eredményeinek ismeretében (HORVÁTH *et al.* 2010) megállapítottuk, hogy egy fekete kartonlap alapú üveglap visszaverődési-polarizációs jellemzői gyakorlatilag azonosak a valódi fényes/sima fekete szolárpanelekéivel. Ez optikailag érthető, hiszen az üveglap alatti felület egyedüli szerepe a maximális fényelnyelés, amit bármilyen fekete felület (például az általunk használt fekete karton) biztosíthat, aminek a spektrum közeli ultraibolya, látható és közeli infravörös tartományaiban megfelelően kicsi a fényvisszaverő-képessége. Ily módon elég a kísérletet elvégezni az említett üveglapokból és kartonlapokból álló tesztfelületekkel, nincsen szükség a sokkal nehezebben kezelhető valódi napelemtáblákra.

Ha a piacon kapható egy-egy fényes és matt felületű szolárpanelt vettünk volna a kísérletünkhöz, akkor nem tudtuk volna biztosítani, hogy a tesztfelületeink csak a felületi érdességben (mattságban/simaságban/fényességben) különbözzenek egymástól, más fontos paraméterben (méret, alak, keret, fényelnyelő fekete réteg) pedig ne. Mivel a szolárpanelek poláros fényszennyezése szempontjából a felületi érdesség az egyedüli mérvadó, ezért és az előbb említett technikai ok miatt döntöttünk úgy, hogy a kísérletünkben nem teljes szolárpaneleket használunk, hanem csak a bennük alkalmazott fényes és matt üveglapokat, melyek alá a szolárpanelekbeli fekete sugárzáselnyelő réteget optikailag utánozó fekete kartonlapot helyeztünk.



11. ábra: A terepkísérletünkben használt fényes (bal) és matt (jobb) fekete, vízszintes tesztfelületek.

Kísérletünkre 2014. július 5. és augusztus 1. között, a hazai bögölyök fő aktivitási időszakában, 11 kísérleti napon került sor egy szokolyai lovas farmon. A Környezetoptika Laboratórium már több korábbi, hasonló kísérletét is itt végezte

(például BLAHÓ *et al.* 2012, EGRI *et al.* 2012, 2013; HERCZEG *et al.* 2014), mert itt a lovak közelsége miatt nagy mennyiségben fordulnak elő polarotaktikus bögölyök (Diptera, Tabanidae). A kísérlet minden nap reggeltől délutánig tartott. A kísérlethez meleg, napos idő volt szükséges, mert a bögölyök máskülönben (hűvös, felhős, szeles vagy esős időben) nem repülnek (HERCZEG *et al.* 2014). Minden kísérleti napon két megfigyelő vonult ki Szokolyára, akik közül az egyik mindig én voltam. A kísérletben két matt és két fényes tesztfelületet helyeztünk a füves talajra. Az azonos fajtájú (matt vagy fényes) felületek szorosan egymás mellé voltak illesztve, a különböző fajtájúak között pedig 50 cm távolságot hagytunk (12. ábra). A tesztfelületeket 30 percenként felcseréltük a helyhatás kiküszöbölése érdekében.



12. ábra: A terepkísérleti helyszín és beállítás (balra: matt fekete tesztfelületek, jobbra: fényes fekete tesztfelületek).

A megfigyelők 2 m távolságból folyamatosan figyelték a bögölyök tesztfelületekre adott reakcióit, a vízfelületeknél megfigyelhető következő három tipikus viselkedésre koncentrálnak:

- 1) Körözés: a szálló bögöly jellegzetes, 8-as alakú íve(ke)t ír le a tesztfelület felett.
- 2) Érintés: a bögöly röptében érinti a tesztfelületet, de nem száll le rá.
- 3) Landolás: a bögöly leszáll a tesztfelületre, ahol legalább 2 másodpercig tartózkodik (egy helyben vagy mászkálva).

A kísérletünkben nincs jelentősége annak, hogy pontosan milyen bögölyfaj jelenik meg a tesztfelületeknél, hiszen a Szokolyán előforduló következő bögölyfajok mindegyike pozitív polarotaxissal rendelkezik (BLAHÓ *et al.* 2014; EGRI 2014): *Tabanus tergustinus*, *T. bromius*, *T. bovinus*, *T. autumnalis*, *Atylotus fulvus*, *A. loewianus*, *A. rusticus*, *Haematopota italica*. A bögölyöket kizárólag csak indikátorfajokként használtuk a kísérletünkben, vagyis arra, hogy a tesztfelületekhez való vonzódásuk számszerűsítésével következtessünk a matt és fényes szolárpanelek poláros fényszennyezésének mértékére.

Egyes korábbi hasonló bögölyös terepkísérletek során (EGRI *et al.* 2012), mikor a különböző mesterséges felületek bögölyvonzó-képességét vizsgálták, a tesztfelületeket beragacsozták, így egyszerűen leszámolható volt egy hosszabb időszak után, hogy melyik felületre mennyi bögöly repült rá. A kísérletünkben azonban ilyen ragacsozás nem volt alkalmazható, mert a matt tesztfelület ragadós anyaggal való bekenése fényessé tette volna azt, megszüntetve ezzel a mattságot. Ezért volt szükséges a kísérletünkben folyamatosan szemmel figyelni és feljegyezni a bögölyök tesztfelületekre adott reakcióit.

4.2. A tesztfelületek bögölyvonzó-képessége

A polarotaktikus bögölyöknek a fényes és matt tesztfelületekre adott számszerű reakcióit az 1. táblázat tartalmazza.

Dátum (2014) Idő (GMT+2 óra)	Fényes üvegtábla			Matt üvegtábla		
	körözés	érintés	landolás	körözés	érintés	landolás
Július 5. 11:00-17:00	11 (53)	8 (39)	12 (306 s)	0 (0)	0 (0)	0 (0 s)
Július 15. 11:00-16:00	12 (58)	7 (27)	9 (32 s)	1 (4)	0 (0)	0 (0 s)
Július 16. 12:30-16:00	25 (122)	24 (139)	28 (409 s)	7 (28)	5 (14)	2 (36 s)
Július 19. 11:50-17:00	68 (341)	80 (397)	75 (307 s)	17 (68)	12 (38)	13 (19 s)
Július 21. 9:30-14:30	71 (263)	66 (229)	113 (3598 s)	22 (66)	18 (66)	25 (367 s)
Július 24. 9:30-14:30	59 (274)	72 (365)	95 (3215 s)	22 (72)	22 (81)	26 (1045 s)
Július 25. 9:30-14:30	78 (503)	88 (628)	108 (8180 s)	31 (147)	18 (119)	36 (1110 s)

Július 26. 10:00-13:00	57 (312)	57 (416)	65 (4315 s)	17 (68)	8 (38)	10 (240 s)
Július 27. 9:30-12:30	20 (80)	19 (112)	23 (660 s)	5 (10)	6 (15)	6 (235 s)
Július 31. 11:00-12:30	7 (18)	3 (12)	2 (25 s)	0 (0)	0 (0)	0 (0 s)
Augusztus 1. 10:00-13:20	103 (362)	185 (795)	151 (1563 s)	29 (76)	19 (49)	13 (96 s)
Összesen	511 (2386)	609 (3159)	681 (22610 s)	151 (539)	108 (420)	131 (3148 s)

1. táblázat: A terepkísérletben használt vízszintes fényes és matt fekete üveglapokon megfigyelt bögölyviselkedési formák számadatai. A körözesek, érintések és a landolások felső értékei darabszámban, a landolások alsó értékei pedig másodpercben értendők. A cellákbeli felső szám a bögölyök számát mutatja, míg az alsó zárójelben a körözéskor leírt összes hurok száma, az összes érintés és a landolások összes időtartama van megadva. GMT (Greenwich Mean Time) = greenwichi középideő.

Az 1. táblázat minden cellája két értéket tartalmaz: körözésnél és érintésnél a felső szám azon bögölyök számát adja, melyek körözésbe kezdtek, vagy megérintették a tesztfelületet, míg alatta a zárójelben levő szám azt mutatja, hogy ezeket a reakciókat hányszor tették a bögölyök. Tehát például július 5-én a fényes tesztfelület felett 11 bögöly összesen 53 ívet írt le a levegőben, illetve 8 bögöly összesen 39-szer érintette a felületet. A landolás oszlopaiban a tesztfelületekre leszállt bögölyök száma, illetve az általuk ott összesen eltöltött idő látható másodpercben.

A terepkísérletünkben nem lehetett kiküszöbölni az úgynevezett pseudo-replikációt (álismétlést), azaz hogy egy adott bögöly akár többször is reagáljon egy tesztfelületre. Ezt csak a felületek ragasztóval való bekenésével lehetett volna meggátolni, ami viszont lehetetlen volt, mert (ahogyan már említettem) ez a matt felületek fényessé tételéhez vezetett volna. Mindazonáltal, a tesztfelületek beragasztásának lehetetlensége nem okozott gondot, hiszen nem arra voltunk kíváncsiak, hogy milyen bögölyfajokat vonzanak magukhoz a felületek, hanem arra, hogy a két különböző felület közül melyik a vonzóbb számukra. Továbbá, ragadós tesztfelületek alkalmazása estén azt sem tudtuk volna kideríteni, hogy egy bögöly csak érinteni akarta volna a felületet, vagy esetleg rá is szállt volna, és ha az utóbbi, akkor mennyi ideig.

Az 1. táblázat adataiból tisztán kitűnik, hogy a fényes fekete tesztfelület jóval több bögölyt vonzott, mint a matt fekete. Két napon egyáltalán nem reagáltak a bögölyök a matt fekete tesztfelületre, bár ezek közül az egyik napon csak viszonylag

rövid ideig folytatott a megfigyelés egy vihar átvonulása miatt. Az 1. táblázat összesített adatain jól látszik, hogy a fényes tesztfelületek a körözések tekintetében 4,4-szer, az érintések darabszámát vizsgálva 7,5-ször, a landolások összes időtartamát nézve pedig 7,2-szer váltottak ki több reakciót a bögölyökből, mint a matt felületek.

Statisztikai elemzést is végeztünk a Statistica 8.0 szoftverrel. Mivel az adataink nem normál eloszlásúak voltak, ezért a nem-paraméteres Mann-Whitney U tesztet használtuk. Ez a teszt az értékeknek egy-egy rangot ad, amivel sorba rendezi őket, és a mediánokat hasonlítja össze, hogy hibahatáron belül megegyeznek-e. Azt a valószínűséget, ami ehhez a határhoz tartozik, szignifikancia-szintnek (p-szint) nevezzük. A leggyakrabban a $p = 0.05$ értéket használják: ha a statisztika alapján számolt p-érték ennél kisebb, akkor szignifikáns a különbség, máskülönben pedig nem. A statisztikai elemzéseink eredményeit a 2. táblázat tartalmazza.

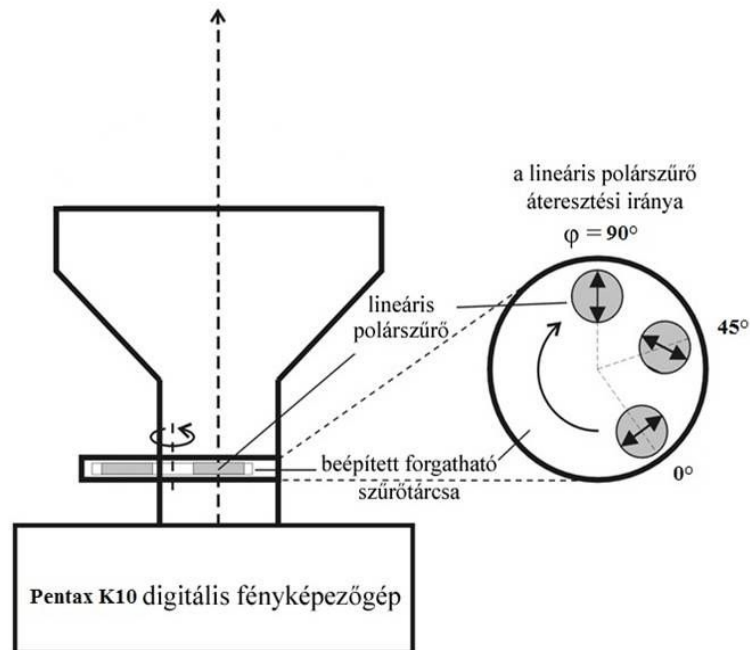
Bögölyök száma (1. táblázat, összesített cellák felső számai)	Tesztfelületek összehasonlítása	Mann-Whitney U teszt paraméterei	Szignifikancia
köröző	fényes – matt	$U = 24.5, Z = 2.366$ $p = 0.018$	szignifikáns
érintő	fényes – matt	$U = 21, Z = 2.599$ $p = 0.0093$	szignifikáns
landoló	fényes – matt	$U = 25, Z = 2.337$ $p = 0.0194$	szignifikáns
Reakciók száma (1. táblázat, összesített cellák alsó, zárójeles számai)			
körözés	fényes – matt	$U = 21, Z = -2.595$ $p = 0.0094$	szignifikáns
érintés	fényes – matt	$U = 19, Z = -2.729$ $p = 0.0063$	szignifikáns
landolás	fényes – matt	$U = 24, Z = 2.399$ $p = 0.0164$	szignifikáns

2. táblázat: Az 1. táblázat számadatain Mann-Whitney U teszt alapján végzett statisztikai elemzés eredményei.

4.3. A tesztfelületek polarizációs sajátosságai

Képalkotó polarimetriával mértem a kísérletben használt matt és fényes tesztfelületekről visszaverődő fény d polarizációfokát és α polarizációs szögét. Az eljárás lényege, hogy egy digitális tükörreflexes fényképezőgéppel három különböző áteresztési irányú (0° , 45° , 90°) lineáris polárszűrőn át (13. ábra) egy-egy fényképet készítünk a vizsgált

tesztfelületről, majd ezeket a polarizációs képeket egy számítógépes programmal (Dr. Hegedüs Ramón: *Polarworks*) kiértékeljük.



13. ábra: A tesztfelületek polarizációs sajátosságainak mérésére használt képalkotó polariméter vázlatja.

A tesztfelületeken 24 polarimetriai mérést végeztem derült és felhős égbolt alatt, a Naphoz képest eltérő irányokból (mikor a Nap jobbról, balról, szemből és hátulról sütött). A polarizációs képeket a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában értékeli ki a program. Ha a felvett kép adott pontjáról jövő fény részlegesen lineárisan poláros, akkor a fény I intenzitása szinusz-négyzetesen változik a forgó polárszűrő φ irányától függően. A program segítségével az adott képponthoz tartozó három fényintenzitás-értékre illesztett függvény paramétereiből kiszámítható a vizsgált pontból jövő fény lineáris polarizációjának d foka ($d = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$), ahol $I_{\max}$ és $I_{\min}$ az elforgatott polárszűrőn áthaladó fény intenzitásának maximuma és minimuma a kép adott pontján), és iránya (az $I_{\max}$ fényerősség α iránya). A számításokat a felvett kép minden pontjára elvégezve végül meghatározható és hamisszínes kódolással megjeleníthető a vizsgált felület I fényintenzitásának, d lineáris polarizációfokának, és a helyi meridiántól mért α polarizációs szögének térbeli eloszlása. A d lineáris polarizációfok különböző értékei a szürke különböző árnyalataival vannak kódolva (fehér: $d = 0\%$, fekete: $d = 100\%$) a helyi meridiántól mért α polarizációs szög különböző értékei pedig eltérő színekkel lettek megjelenítve. A felvételek archiválása

után a fent leírtak alapján az összes elkészített polarizációs fényképhármasra elvégeztük a kiértékelést.

Az eredményül kapott d polarizációfok és α polarizációs szög ismeretében a program azt is meghatározta, hogy a képen mely területeket érzékelik vízként a polarotaktikus rovarok. KRISKA *et al.* (2009) vizsgálatai szerint azokat, melyekre a következő két feltétel teljesül: $d > 15 \%$ és $80^\circ < \alpha < 100^\circ$. Ezek a felületeket sötétkék színnel kerültek megjelenítésre.

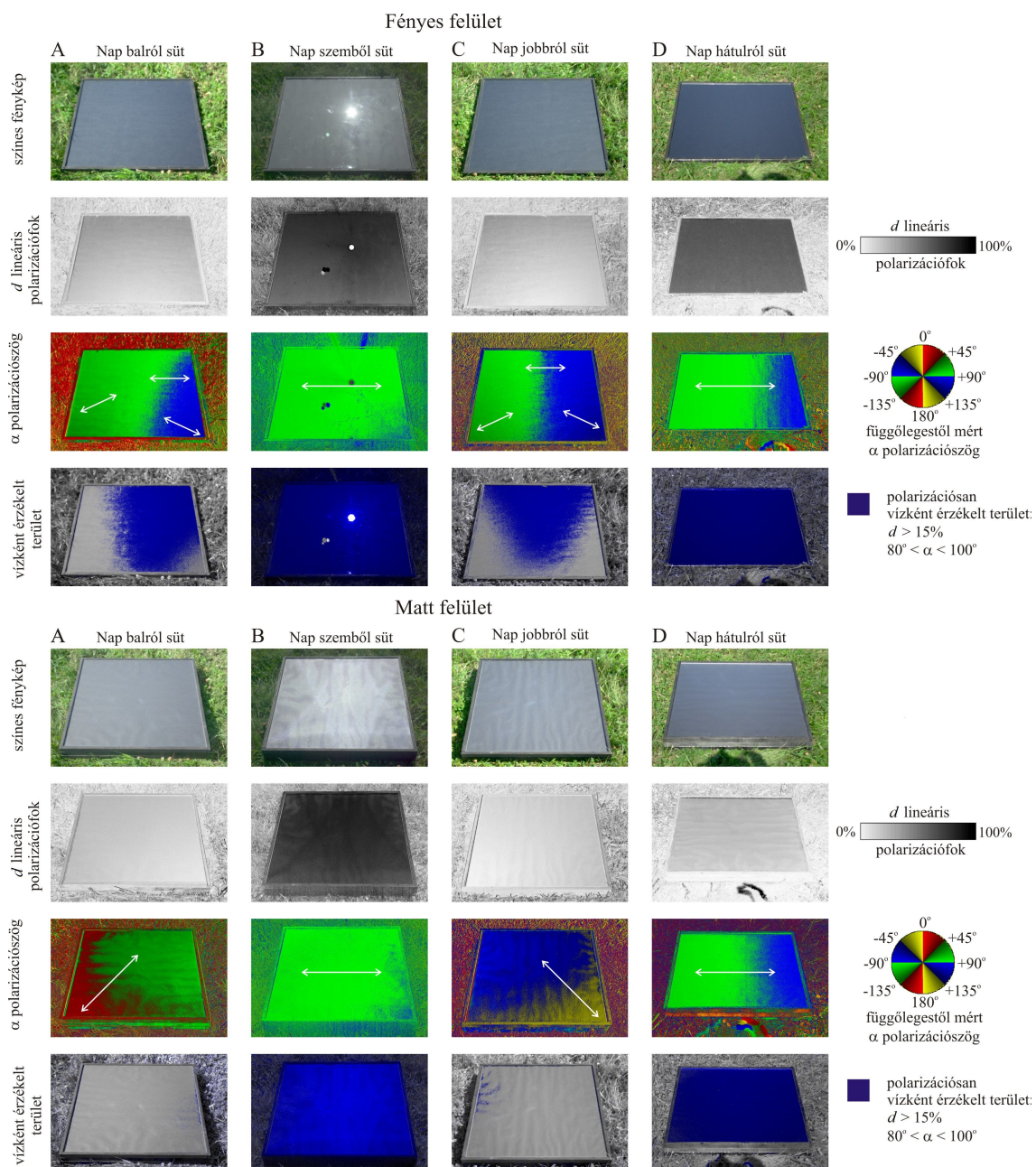
A kapott eredmények a színkódolás mellett számszerűsíthetőek is: a program segítségével egy maszkot készítettem, ami a képeken csak a tesztfelületekre korlátozódott, így a program csak azokat a pixeleket vette figyelembe a kiértékeléskor, amik a maszkon belülre estek, a többi pontot figyelmen kívül hagyta. Eredményül adódott a tesztfelületekről visszaverődő fény d polarizációfokának és α polarizációs szögének átlaga és szórása. Ezeket az adatokat a 3. és 4. táblázatok, a 14-16. ábrák, valamint a (külön dokumentumként feltöltött) Függelékben látható F1-F10. ábrák foglalják össze.

Tesztfelület	Megvilágítás iránya	d polarizációfok $\pm$ szórás (%)			α polarizációsög $\pm$ szórás (°)		
		R	G	B	R	G	B
Fényes fekete	Nap balra	18.7 ± 6.8	20.1 ± 6.4	25.9 ± 7.4	63.7 ± 14.3	71.4 ± 12.8	81.2 ± 12.3
	Nap balra	18.2 ± 6.9	17.4 ± 6.2	20.7 ± 6.7	53.7 ± 10.5	62.3 ± 10.3	74.8 ± 12.1
	Nap szemben	70.3 ± 8.8	70.0 ± 8.7	70.2 ± 9.0	87.1 ± 4.9	86.7 ± 4.3	86.4 ± 4.6
	Nap szemben	71.5 ± 8.4	71.2 ± 8.4	71.5 ± 8.8	85.0 ± 3.5	85.0 ± 3.2	84.6 ± 3.6
	Nap jobbra	16.0 ± 6.5	17.0 ± 6.4	22.6 ± 8.2	67.0 ± 23.0	79.0 ± 19.8	89.2 ± 16.9
	Nap jobbra	15.1 ± 6.0	13.8 ± 5.5	17.1 ± 6.4	57.3 ± 17.1	67.7 ± 17.4	84.8 ± 17.4
	Nap hátul	20.5 ± 4.3	28.0 ± 4.2	40.7 ± 4.6	87.6 ± 7.2	87.4 ± 4.3	87.4 ± 4.0
	Nap hátul	42.0 ± 5.3	49.9 ± 4.4	61.4 ± 4.1	87.2 ± 5.0	87.0 ± 3.6	87.0 ± 3.5
	felhős, irány 1	58.6 ± 9.9	58.3 ± 9.8	58.8 ± 10.0	87.6 ± 7.8	87.5 ± 7.7	87.5 ± 7.7
	felhős, irány 1	50.9 ± 9.0	50.1 ± 8.9	50.5 ± 9.0	88.6 ± 7.3	88.5 ± 7.1	88.6 ± 7.1
	felhős, irány 2	59.1 ± 11.0	58.1 ± 11.0	58.1 ± 11.0	89.8 ± 7.5	90.0 ± 7.5	90.0 ± 7.5
	felhős, irány 2	60.5 ± 12.0	59.9 ± 11.9	60.0 ± 11.9	88.6 ± 8.0	88.6 ± 8.0	88.6 ± 8.0

3. táblázat: A terepkísérletben használt fényes, fekete, vízszintes, üveg tesztfelületről visszavert fény képalkotó polarimetriával mért átlagos d polarizációfoka és α polarizációsöge, valamint ezek szórása a spektrum vörös (R, 650 nm), zöld (G, 550 nm) és kék (B, 450 nm) tartományában. Felhős égbolt esetén az 1. és 2. irányok egymásra merőlegesek voltak.

Tesztfelület	Megvilágítás iránya	d polarizációfok $\pm$ szórás (%)			α polarizációs szög $\pm$ szórás (°)		
		R	G	B	R	G	B
Matt fekete	Nap balra	20.2 ± 7.6	19.7 ± 5.7	21.3 ± 6.2	45.7 ± 12.2	50.6 ± 9.6	60.5 ± 11.4
	Nap balra	23.5 ± 7.3	24.0 ± 5.9	27.0 ± 5.7	52.2 ± 9.2	58.1 ± 8.7	67.9 ± 10.4
	Nap szemben	88.3 ± 6.6	85.6 ± 5.8	83.8 ± 6.2	84.4 ± 10.0	84.5 ± 7.2	84.4 ± 7.5
	Nap szemben	80.7 ± 8.5	79.3 ± 7.5	77.8 ± 8.2	85.3 ± 4.5	85.2 ± 3.0	85.2 ± 3.6
	Nap jobbra	17.0 ± 5.8	15.2 ± 5.3	15.7 ± 5.4	45.9 ± 11.6	53.2 ± 12.0	69.7 ± 16.1
	Nap jobbra	22.3 ± 7.3	21.9 ± 6.8	24.2 ± 7.0	57.0 ± 13.3	63.5 ± 13.5	76.0 ± 15.2
	Nap hátul	27.8 ± 7.0	32.0 ± 4.2	41.0 ± 4.3	86.5 ± 9.5	87.1 ± 6.1	86.9 ± 5.7
	Nap hátul	18.3 ± 4.3	23.4 ± 3.7	32.8 ± 3.6	86.8 ± 8.6	86.9 ± 5.8	87.2 ± 5.4
	felhős, irány 1	38.3 ± 5.5	38.3 ± 5.3	39.8 ± 5.5	90.0 ± 7.8	89.8 ± 7.7	89.8 ± 7.7
	felhős, irány 1	43.8 ± 7.3	43.7 ± 7.1	44.8 ± 7.3	89.6 ± 7.7	89.9 ± 7.6	89.8 ± 7.6
	felhős, irány 2	53.2 ± 7.9	52.3 ± 7.8	52.6 ± 8.0	89.0 ± 6.7	89.0 ± 6.7	89.0 ± 6.7
	felhős, irány 2	47.4 ± 6.7	47.0 ± 6.6	47.9 ± 6.9	88.7 ± 6.7	89.0 ± 6.6	89.0 ± 6.8

4. táblázat: Mint a 3. táblázat, de most matt, fekete, üveg tesztfelületre.



14. ábra: A terepkísérletben használt fényes és matt fekete, vízszintes tesztfelületek fényképei és a spektrum kék (450 nm) tartományában mért polarizációs mintázatai, valamint a polarotaktikus bögölyök által víznek érzékelt területei.

A 3-4. táblázatok, valamint a 14-16. és F1-F10. ábrák alapján a következő eredményekre jutottunk:

(1) Amikor a Nap szemből sütött, akkor a matt fekete tesztfelület közel 10 %-al polárosabb volt ugyan a fényes feketénél ($d_{\text{fényes}} = 70,9 \%$, $d_{\text{matt}} = 80,8 \%$ átlagos polarizációfok a spektrum kék tartományában), ám a matt felület polarizációs szögének

szórása kétszer nagyobbak adódott, mint a fényesé ($\alpha_{\text{fényes}} = 86,4 \pm 3,6^\circ$ és $\alpha_{\text{matt}} = 84,4 \pm 7,5^\circ$), miáltal a matt felület jóval kisebb hányada volt vízként értelmezhető, vagyis kevésbé volt vonzó a vízkereső polarotaktikus bögölyök számára.

(2) Amikor a Nap valamelyik (bal vagy jobb) oldalról sütött, akkor a fényes fekete tesztfelület polárosabb volt a mattnál a spektrum kék és zöld tartományában (a bögölyök a spektrum vörös tartományát nem érzékelik), a matt felületről visszaverődő fény polarizációiránya pedig annyira eltért a vízszintestől, hogy a matt tesztfelület már nem tekintődött víznek a polarotaktikus bögölyök számára. Ugyanakkor a fényes tesztfelületről továbbra is közel vízszintesen poláros fény verődött vissza. Ezzel magyarázható, hogy a bögölyök számára ekkor is a fényes tesztfelület volt a vonzóbb.

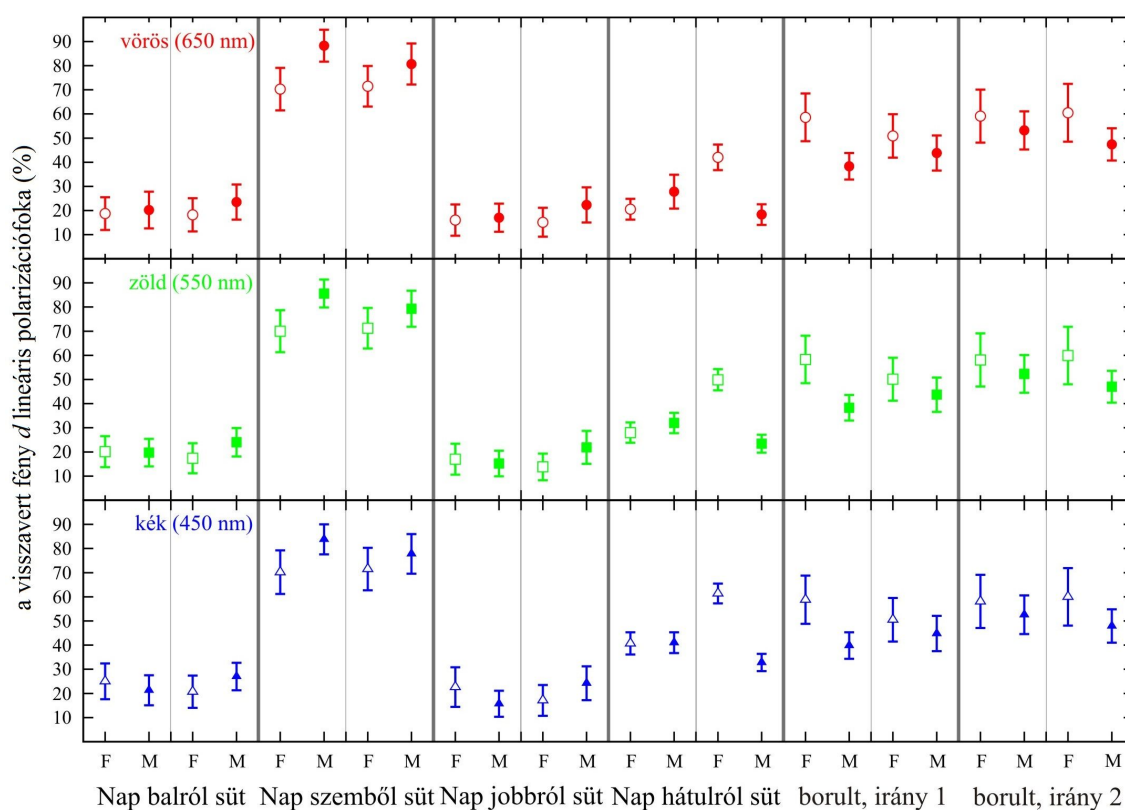
(3) Amikor a Nap hátulról sütött, akkor a visszavert fény polarizációiránya a fényes és a matt tesztfelület esetében is közel vízszintes volt, azonban a polarizációfok a matt felületnél valamivel kisebbnek adódott, mint a fényesnél. Ezáltal megint a fényes fekete tesztfelület volt vonzóbb a polarotaktikus bögölyök számára.

(4) Az előbbieket szerint tehát napsütésben a vizsgált vízszintes fekete tesztfelületeknek olyanok a visszaverődési-polarizációs sajátosságai, hogy a Naphoz képesti látóiránytól függően a fényes felület többé-kevésbé vonzóbb a polarotaktikus bögölyöknek, mint a matt felület, mert a fényes fekete felületet sokkal nagyobb mértékben érzékelik víznek, mint a mattot.

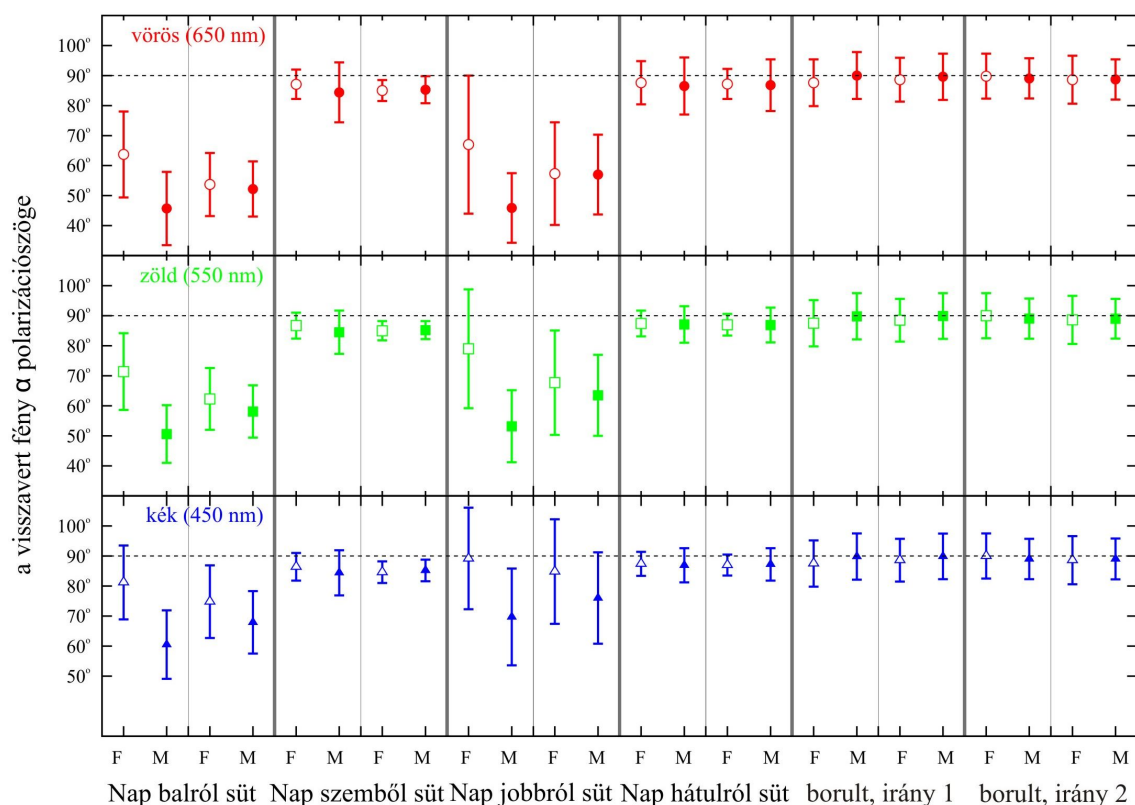
(5) Teljesen borult égbolt alatt a fényes és matt fekete tesztfelületekről mindig közel vízszintesen poláros fény verődött vissza ($\alpha_{\text{fényes}} = 88,7^\circ$, $\alpha_{\text{matt}} = 89,4^\circ$). Ám ekkor is, a bögölyök számára azért lehetett vonzóbb a fényes felület, mert annak átlagos polarizációfoka közel 10 %-al nagyobb volt, mint a matté ($d_{\text{fényes}} = 56,9\%$, $d_{\text{matt}} = 46,3\%$). A tesztfelületeink teljesen borult ég alatti polarizációs jellemzőit azonban csak a teljesség kedvéért vizsgáltuk, mert ilyen időben a bögölyök nem repülnek, nem aktívak, nem keresnek vizet (HERCZEG *et al.* 2014). Az 1. táblázat eredményei ezért a napsütéses időre vonatkoznak, az ott foglalt szám adatok akkor gyűltek, mikor sütött a nap a terepkísérletünk alatt.

Az 1. táblázat szerint a bögölyök a fényes fekete tesztfelületen $22610/3148 = 7,2$ -szer több időt töltöttek, mint a matt feketén. Felmerülhet a kérdés, hogy ennek nem csupán az volt-e az oka, hogy napsütésben a matt fekete felület jobban felmelegedett, mint a fényes fekete, és a bögölyöket esetleg zavarhatta a matt felület nagyobb hőmérséklete, amiért közel hetedannyi időt tartózkodtak rajta, mint a fényesen.

Egyrészt, korábbi bögölyös terepkísérletekből ismeretes (KRISKA *et al.* 2009; HORVÁTH *et al.* 2010; EGRI *et al.* 2012, 2013; BLAHÓ *et al.* 2014; EGRI 2014; HORVÁTH 2014), hogy a fényes és matt, világos és sötét tesztfelületek bögölyök általi választásában a hőmérséklet nem játszik lényeges szerepet. Másrészt pedig, az 1. táblázat szerint mindhárom reakciót (körözés: $N_{\text{fényes}}/N_{\text{matt}} = 511/151 = 3,4$; érintés: $N_{\text{fényes}}/N_{\text{matt}} = 609/108 = 5,6$; landolás: $N_{\text{fényes}}/N_{\text{matt}} = 681/131 = 5,2$) tekintve a fényes fekete tesztfelület 3,4; 5,6; 5,2-szer több bögölyt vonzott, mint a matt fekete. Márpedig amíg a bögölyök hozzá nem értek a tesztfelületeinkhez, addig nem érezhették azok hőmérsékletét, tehát az 1. táblázat cellának felső (nem zárójeles) számadatait, vagyis a reagáló/vonzódó bögölyök N számát tekintve a tesztfelületek hőmérséklete irreleváns. Ezért a fényes fekete tesztfelületnek a matt fekete tesztfelülethez képesti sokkal nagyobb bögölyvonzóképessége a hőmérséklet helyett egyedül a visszaverődő fény polarizációs sajátágaival magyarázható.



15. ábra: A terepkísérletben használt fényes (F) és matt (M) fekete, vízszintes tesztfelületekről visszavert fénynek a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában képalkotó polarimetriával mért d polarizációfoka (átlag $\pm$ szórás) a megvilágítási viszonyok függvényében (a 3. táblázat adatainak ábrázolása). Borult égbolt esetén az 1. és 2. irányok egymásra merőlegesek voltak.



16. ábra: A terepkísérletben használt fényes (F) és matt (M) fekete, vízszintes tesztfelületekről visszavert fénynek a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában képalkotó polarimetriával mért α polarizációs szöge (átlag $\pm$ szórás) a megvilágítási viszonyok függvényében (a 4. táblázat adatainak ábrázolása). Borult égbolt esetén az 1. és 2. irányok egymásra merőlegesek voltak.

5. Összefoglalás és kitekintés

Az emberiség technikai fejlődése egyre több energiát igényel mind ipari, mind pedig háztartási szinten. Folyamatosan nő azon berendezéseink, eszközeink száma, melyek árammal működnek és a nap nagy részében be vannak kapcsolva (például számítógépek, tabletek, mobiltelefonok). Létfontosságú a környezetkímélő, „zöld” energiaforrások használatának elterjesztése, mint amilyenek például a napelemtáblák és napkollektorok (szolárpanelek) is, hiszen ezek előállítása jár a teljes életciklusukat figyelembe véve a legkisebb környezetterheléssel. Ahogyan fejlődik a technológiájuk, egyre biztosabban egyre több villamos áramot és meleg vizet lesznek képesek szolgáltatni a szolárpanelek, és amint lassan elterjednek a közéletben, úgy fog csökkenni az árak is, egyre inkább elérhetővé válva mindenki számára.

Ilyen jövőkép mellett létfontosságú, hogy olyan szolárpaneleket használjunk, amelyek minél kevesebb környezeti problémát okoznak. A szolárpanelek dolgozatomban bemutatott negatív hatásait a pozitív polarotaxissal vizet kereső

vízírovarok kapcsán ritkán emlegetik, pedig fokozatos terjedésükkel egyre komolyabb ökológiai károkat okoznak ezek a poláros fényszennyező felületek, főként vízpartok és vizes élőhelyek közelében. Éppen ezért kapott eredményeink alapján fontos lenne, hogy valamennyi piacra kerülő szolárpanel érdes, matt felületű legyen, mert – bár a felületi mattságuk/érdességük előállításával nem ez volt az eredeti cél – a mattosítással a szolárpanelek poláros fényszennyezését csökkenteni lehet úgy, hogy közben a hatásfokuk még javul is, miáltal a felhasználókkal együtt a környezet is jól jár.

A szolárpanelek poláros fényszennyezése Észak-Amerikában is problémát jelent, amire a további terepkísérleteink során szeretnénk megoldást találni. Dr. Bruce Robertson (Division of Science, Mathematics and Computing, Bard College, Annandale-on-Hudson, New York) személyes levelezés során számolt be az ELTE Környezetoptika Laboratórium munkatársainak arról, hogy az SEGS (Solar Energy Generating Systems) kaliforniai parabolavályús naperőmű környezetében szintén megfigyeltek tömegével megjelenő rovarokat és madarakat. Ezt a jelenséget nagy valószínűséggel az ottani, összesen 6,4 km²-en telepített, közel 1 millió napfénygyűjtő tükörfelület (STODDARD *et al.* 2006) poláros fényszennyezése okozhatja. A szóban forgó tükörfelületek polarizációs tulajdonságait feltárva tehetünk majd javaslatot a közeljövőben arra, hogy miként lehet módosítani ezeknek a tükröknek a felületét úgy, hogy ne váljanak ökológiai csapdává. Fontos megjegyezni, hogy a tükörfelületek bemattosítását nem tekinthetjük megoldásnak, a kaliforniai naperőmű ugyanis parabola keresztmetszetű, a Nap mozgását követő tükröző vályúkból áll, melyek a rájuk eső fény 94 %-át verik vissza (STODDARD *et al.* 2006). A tükrök keresztmetszeti fókuszpontjára merőlegesen egy cső fut végig, amin átvezetik a felfűtendő folyadékot, majd ezt követően állítanak elő elektromos áramot. Ha a tükörfelületeket mattá tennénk, akkor fényvisszaverő-képességük drasztikusan csökkenne, ami a rendszert működésképtelenné tenné. A szükséges intézkedések feltárása további kutatásokat igényel.

További terveink között szerepel a dolgozatomban leírt terepkísérlet elvégzése kérészekkel és szúnyoglábu legyekkel is. 2015. májusa végén és júniusában a Dömörkapu melletti természetvédelmi területen azt fogjuk vizsgálni, hogy a bögölyös kísérletben használt matt és fényes fekete, vízszintes tesztfelületek mennyire vonzók a polarotaktikus kérészek és szúnyoglábu legyek számára. Ezeket a rovarokat a bögölyökhöz hasonlóan a poláros fényszennyezés indikátorainak fogjuk használni. Az eredményeinkről szóló cikk írása folyamatban van (SZÁZ *et al.* 2015).

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Horváth Gábornak, aki nélkül a kutatás nem valósulhatott volna meg.

Hálás vagyok Kálmánczhelyi-Farkas Alexandrának és Száz Dénesnek, akik rengeteget segítettek a dolgozatom írásában és számos tanáccsal láttak el.

Köszönöm továbbá a Környezetoptika Laboratórium tagjainak (Száz Dénes, Kálmánczhelyi-Farkas Alexandra, Barta András, Egri Ádám, Blahó Miklós, Kriska György, Herczeg Tamás) a terepkísérletünkben való részvételüket és segítségüket.

Végezetül köszönettel tartozom Viski Csabának, aki engedélyezte lovas tanyáján a terepkísérletünk elvégzését.

Irodalom

- BERNÁTH, B.; SZEDENICS, G.; MOLNÁR, G.; KRISKA, G.; HORVÁTH, G. (2001) Visual ecological impact of "shiny black anthropogenic products" on aquatic insects: oil reservoirs and plastic sheets as polarized traps for insects associated with water. *Archives of Conservation and Landscape Research* 40(2): 89-109
- BLAHÓ M.; EGRI Á.; BARTA A.; ANTONI GY., HORVÁTH G. (2012) How can horseflies be captured by solar panels? A new concept of tabanid traps using light polarization and electricity produced by photovoltaics. *Veterinary Parasitology* 189: 353-365
- BLAHÓ, M.; HERCZEG, T.; KRISKA, G.; EGRI, Á.; SZÁZ, D.; FARKAS, A.; TARJÁNYI, N.; CZINKE, L.; BARTA, A.; HORVÁTH, G. (2014) Unexpected attraction of polarotactic water-leaving insects to matt black car surfaces: Mattness of paintwork cannot eliminate the polarized light pollution of black cars. *Public Library of Science One* 9(7): e103339 + electronic supplement (doi: 10.1371/journal.pone.0103339)
- BOXWELL, M. (2012) *Solar Electricity Handbook: A Simple, Practical Guide to Solar Energy – Designing and Installing Photovoltaic Solar Electric Systems*. Greenstream Publishing, Dunsmore, Warwickshire, United Kingdom, p. 197
- EGRI, Á.; BLAHÓ, M.; KRISKA, G.; FARKAS, R.; GYURKOVSKY, M.; ÅKESSON, S.; HORVÁTH, G. (2012) Polarotactic tabanids find striped patterns with brightness and/or polarization modulation least attractive: An advantage of zebra stripes. *Journal of Experimental Biology* 215: 736-745
- EGRI, Á.; BLAHÓ, M.; SZÁZ, D.; BARTA, A.; KRISKA, G.; ANTONI, G.; HORVÁTH, G. (2013) A new tabanid trap applying a modified concept of the old flypaper: Linearly polarising sticky black surfaces as an effective tool to catch polarotactic horseflies. *International Journal for Parasitology* 43: 555-563
- EGRI Á. (2014a) Bögölyök gazdaállat-keresése, polarotaxisának kísérleti vizsgálata és polarizációs csapdái. *Doktori védés*. 2014. július 19.
- EGRI, Á. (2014b) *Experimental Study of Tabanid Polarotaxis, Host-Tabanid Interaction and Polarization Tabanid Traps*. PhD Thesis, Environmental Optics Laboratory, Department of Biological Physics, Eötvös University, Budapest, p. 139 (supervisor: G. Horváth)
- HERCZEG, T.; SZÁZ, D.; BLAHÓ, M.; BARTA, A.; GYURKOVSKY, M.; FARKAS, R.; HORVÁTH, G. (2014) The effect of weather variables on the flight activity of horseflies (Diptera: Tabanidae) in the continental climate of Hungary. *Parasitology Research* (in press) (doi: 10.1007/s00436-014-4280-3)
- HORVÁTH G.; VARJÚ D. (2004) *Polarized Light in Animal Vision - Polarization Patterns in Nature*; Springer-Verlag, Heidelberg - Berlin - New York, 2004. p. 447.
- HORVÁTH, G.; MALIK, P.; KRISKA, G.; WILDERMUTH, H. (2007) Ecological traps for dragonflies in a cemetery: The attraction of *Sympetrum* species (Odonata: Libellulidae) by horizontally polarizing black gravestones. *Freshwater Biology* 52: 1700-1709
- HORVÁTH, G.; KRISKA, G.; MALIK, P.; ROBERTSON, B. (2009) Polarized light pollution: A new kind of ecological photopollution. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7: 317-325
- HORVÁTH, G.; BLAHÓ, M.; EGRI, Á.; KRISKA, G.; SERES, I.; ROBERTSON, B. (2010) Reducing the maladaptive attractiveness of solar panels to polarotactic insects. *Conservation Biology* 24: 1644-1653 + electronic supplement
- HORVÁTH G. (editor) (2014) *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences* (Second Edition) Springer Series in Vision Research, volume 2 (series editors: S. P. Collin, J. N. Marshall) Springer-Verlag: Heidelberg, Berlin, New York, p. 649
- HOUGH, T. P. (2007) *Recent Developments in Solar Energy*. Nova Publishers, New York, USA, p. 368

KANG, T. S.; SMITH, A. P.; TAYLOR, B. E.; DURSTOCK, M. F. (2009) Fabrication of highly-ordered TiO₂ nanotube arrays and their use in dye-sensitized solar cells. *Nano Letters* 9: 601-606

KRISKA, G.; HORVÁTH, G.; ANDRIKOVICS, S. (1998) Why do mayflies lay their eggs *en masse* on dry asphalt roads? Water-imitating polarized light reflected from asphalt attracts Ephemeroptera. *Journal of Experimental Biology* 201: 2273-2286

KRISKA, G.; CSABAI, Z.; BODA, P.; MALIK, P.; HORVÁTH, G. (2006) Why do red and dark-coloured cars lure aquatic insects? The attraction of water insects to car paintwork explained by reflection-polarization signals. *Proceedings of the Royal Society B* 273: 1667-1671

KRISKA, G.; MALIK, P.; SZIVÁK, I.; HORVÁTH, G. (2008) Glass buildings on river banks as "polarized light traps" for mass-swarming polarotactic caddis flies. *Naturwissenschaften* 95: 461-467

KRISKA, G.; BERNÁTH, B.; FARKAS, R.; HORVÁTH, G. (2009) Degrees of polarization of reflected light eliciting polarotaxis in dragonflies (Odonata), mayflies (Ephemeroptera) and tabanid flies (Tabanidae). *Journal of Insect Physiology* 55: 1167-1173

KUO, M. L.; POXSON, D. J.; KIM, Y. S.; MONT, F. W.; KIM, J. K.; SCHUBERT, F. E.; LIN, S. Y. (2008) Realization of a near-perfect antireflection coating for silicon solar energy utilization. *Optics Letters* 33: 2527-2529

LARSEN, C.; BROOKS, B.; STARRS, T. (2000) *Connecting to the Grid - A guide to PV Interconnection Issues*. third edition, North Carolina Solar Center, Interstate Renewable Energy Council, Latham, New York, USA

MEYER-ROCHOW, V. B.; STRINGER, I. A. N. (1993) A system of regular ridges instead of nipples on a compound eye that has to operate near the diffraction limit. *Vision Research* 33: 2645-2647

MILLER, W. H.; MLER, A. R.; BERNHARD, C. G. (1966) The corneal nipple array. In: *Functional Organization of the Compound Eye*. Bernhard, C. G. (ed.), pp. 21-33, Oxford: Pergamon Press

PAULESCU, M.; PAULESCU, E.; GRAVILA, P.; BADESCU, V. (2013) *Weather Modeling and Forecasting of PV Systems Operation*. Springer-Verlag: Heidelberg, Berlin, London

SCHWIND, R. (1995) Spectral regions in which aquatic insects see reflected polarized light. *Journal of Comparative Physiology A* 177: 439-448

SINKOVICS CS., GÁL J., BERNÁTH B., KRISKA GY., HORVÁTH G. (2012) *Épületek poláros fényszennyezése és annak kiküszöbölése*. Világítástechnikai Évkönyv 2012-2013: A fény és élettani hatásai. 146-156. oldal (szerkesztők: Barkóczy G., Bolváry G., Szabó F.), Magyar Elektrotechnikai Egyesület Világítástechnikáért Társasága és Magyar Világítástechnikáért Alapítvány, Budapest

STEVANI, V.S., DE FARIA D.L.A., PORTO J.S., TRINDADE D.J., BECHARA, E.J.H. (2000) Mechanism of automotive clearcoat damage by dragonfly eggs investigated by surface enhanced Raman scattering. *Polymer Degradation and Stability* 68: 61-66.

STODDARD, L.; ABIECUNAS, J.; O'CONNELL, R. (2006) *Economic, Energy, and Environmental Benefits of Concentrating Solar Power in California*. Subcontract Report, April 2006, National Renewable Energy Laboratory, Overland Park, Kansas

SZÁZ, D.; FARKAS, A.; MIHÁLYI, D.; BARTA, A.; EGRI, Á.; BLAHÓ, M.; KRISKA, G.; HORVÁTH, G. (2015) Mattness of solar panels reduces their polarized light pollution: a new argument why to use matt photovoltaics and sun collectors (under preparation)

WEHNER, R. (1976) Polarized-light navigation by insects. *Scientific American* 235(1) 106-115

WILDERMUTH, H.; HORVÁTH, G. (2005) Visual deception of a male *Libellula depressa* by the shiny surface of a parked car (Odonata: Libellulidae). *International Journal of Odonatology* 8: 97-105

Internetes források

- [1] <http://www.skepticalscience.com/co2-pollutant-advanced.htm>
- [2] <http://ujenergiak.hu/napenergia-hasznositas-hazilag-a-napenergia-felhasznalasa/napelem-keszites-hazilag-napelem-gyartas/218-a-napenergiarol-ii-resz-a-napelem-i>
- [3] <http://ujenergiak.hu/napenergia-hasznositas-hazilag-a-napenergia-felhasznalasa/napelem-keszites-hazilag-napelem-gyartas/219-a-napenergiarol-ii-resz-a-napelem-ii>
- [4] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_spectrum_hu.svg
- [5] Montázs a <http://www.bio-info.hu/eng/content/solar-power> és a <http://blogs.dailyrecord.com/domestitech/2013/03/28/solar-primer/> oldalakon található képek felhasználásával
- [6] <http://www.solarfeeds.com/multilayer-anti-reflective-coating-solar-cell-efficiency-special-sauce/>
- [7] <http://pveducation.org/pvcdrom/design/surface-texturing>
- [8] <http://pveducation.org/pvcdrom/design/anti-reflection-coatings>
- [9] <http://www.brismat.com/technology>
- [10] <http://www.treehugger.com/solar-technology/anti-reflective-glass-coating-traps-more-light-boosts-solar-panel-efficiency.html>