

**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

Témavezetők:

**Horváth Gábor**

egyetemi docens

ELTE Biológiai Fizika Tanszék, Környezetoptika Laboratórium

**Kálmánczhelyi-Farkas Alexandra**

tudományos segédmunkatárs

MTA ÖK Duna-kutató Intézet

**Száz Dénes**

doktorandusz

ELTE Biológiai Fizika Tanszék, Környezetoptika Laboratórium



2014

|

## Tartalomjegyzék

Bevezetés .....	4
1. A napenergiáról általánosságban .....	5
2. Szolárpanelek poláros fényszennyezése .....	7
2.1. A fény polarizációja .....	7
2.2. A vízirovarok vízkeresése .....	8
2.3. A rácshatás .....	10
3. Matt felületű napelemek .....	11
3.1. Matt napelemek.....	11
3.2. Matt felületek polarizáló képessége .....	13
3.3. Matt autók poláros fényszennyezése: kísérleteink előzményei .....	14
4. Matt napelemtáblák vízirovarokra kifejtett hatásának vizsgálata.....	17
4.1. Kísérleti módszerek.....	17
4.2. Eredmények.....	19
4.3. Fényes és matt napelemtáblák polarizációs sajátosságai.....	20
5. Összefoglalás és következtetések .....	27
Irodalom.....	30
Függelék.....	33

## Bevezetés

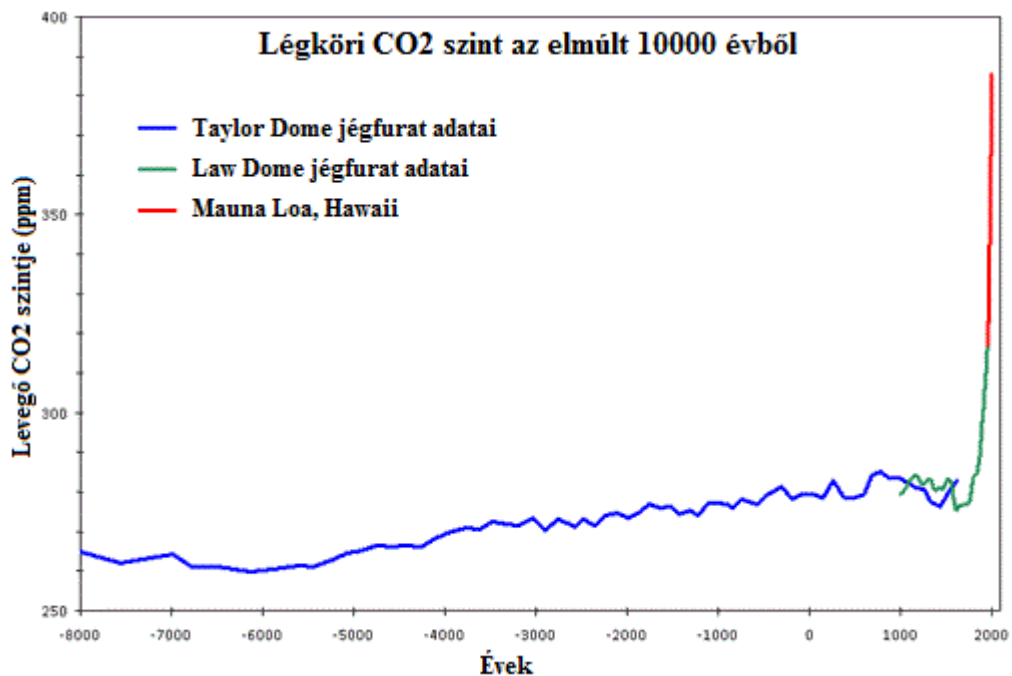
Az elmúlt 10 évben végzett vizuális ökológiai kutatások rámutattak, hogy különböző mesterséges felületekről (pl. sötét aszfalt utakról, folyóparti üvegépületekről, fekete mezőgazdasági műanyag fóliákról) visszaverődő, vízszintesen poláros fény megzavarhatja egyes vízirovarok (pl. kérészek, szitakötők, bögyölők) 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, viselkedésükben megtévesztik őket.

Napjainkban egyre terjednek azonban a matt fekete borítású szolárpanelek (napelemtáblák és napkollektorok) is, melyek felülete mikroszkopikus méretű kiemelkedéseket vagy légpórusokat tartalmaz. E pórusok csapdába ejtik a beérkező fényt, így nagyobb hatásfokkal működnek, mint a fényes, sima felületű társaik. Mivel a matt felületekről diffúzan visszavert fény már jóval kevésbé poláros, felmerült, hogy a matt szolárpanelek poláros fényszennyezése esetleg 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 szolárpanel mennyi polarotaktikus (azaz a vízszintesen poláros fényhez vonzódó) bögyölyt vonz. Kísérleteinkben a matt szolárfelületek statisztikusan szignifikánsan kevesebb bögyölyreakciót (körözés, érintés, leszállás) váltottak ki. Így a matt szolárpanelek poláros fényszennyezése jóval kisebb, mint a fényes, sima szolárfelületeké. Képzelt polarimetriával a matt és fényes szolárpanelek eltérő rovarvonzó-képességének fizikai (optikai) okait is feltártuk. Eredményeink fontos gyakorlati alkalmazása, hogy az antireflektív 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 (szúnyoglábú legyeknek és kérészeknek) a matt/érdes és fényes/sima szolárfelületekre adott reakcióit tervezem vizsgálni annak érdekében, hogy a fenti eredmény mennyire általánosítható.

## 1. A napenergiáról általánosságban

A történelem folyamán az emberiség energiaigénye folyamatosan nőtt. Kezdetben, az őskorban elegendő volt egy egyszerű tábortűz használata igényeik energiaszükségletének fedezésére, idővel azonban a fémek megmunkálásához egyre nagyobb kohókat kellett építeniük. Az ipari forradalom idejéig 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, melynek ma már konszenzusosan elfogadott eredménye az, hogy a globális légköri CO<sub>2</sub> koncentráció ilyen rövid idő alatt 100 ppm-el megnőtt.



1. ábra: A légköri CO<sub>2</sub> koncentráció (ppm) változása az elmúlt 10000 évben  
([1]: <http://www.skepticalscience.com/>)

Ezen globális problémákat, valamint olyan tényeket figyelembe véve, hogy a fosszilis energiahordozók mennyisége véges, az emberiség más, alternatív, általában környezetbarát energiaforrás után kezdett kutatni. A rengeteg lehetőség közül az egyik széles körben elterjedt, és a hétköznapi emberek számára is elérhető ilyen energiaforrás a Nap energiáját hasznosítja. Az ilyen berendezéseket két csoportba soroljuk: azokat, amik Nap hőenergiáját hasznosítják és meleg vizet biztosítanak, napkollektoroknak,

amik pedig a Nap elektromágneses sugárzásának segítségével áramot termelnek, napelemeknek nevezzük.

A napelemek története az 1860-as években kezdődött, amikor kutatók egy véletlen folytán rájöttek arra, hogy a szelén másképpen viselkedik nappal, mint éjjel: elektromos áramot termel. Erre William Grylls Adams jött rá, ő nevezte el a jelenséget fotovoltaikus elektromosságnak ([2]: <http://ujenergiak.hu/>). 1885-ben már meg is született az első napelem, ami viszonylag hosszabb ideig volt képes elektromos áramot termelni, hatásfoka viszont még nagyon alacsony volt. Az egyéb fosszilis energiahordozók piacának felfutása miatt egy időre háttérbe szorult a napelemek iránti érdeklődés. A második világháború után a szilícium alapú tranzistorok megjelenésével, valamint a fényvisszaverődés problémájának kiküszöbölésével jelent meg az első, hivatalosan is 6 %-os hatásfokot elérni képes napelem ([2]: <http://ujenergiak.hu/>).

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]: <http://ujenergiak.hu/>). A napelemek hatásfoka emellett nagyban függ a megfelelő elhelyezéstől és tájolástól, valamint természetesen a földrajzi és éghajlati adottságoktól is.

Működésükhöz félvezető anyagokra van szükség. Ezekben napfény hatására egyenáramú elektromos energia termelődik, amit egy inverteren kell átvezetni, hogy a 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 gondoskodni kell. A másik lehetőség az elektromos hálózatra kötött napelemek rendszere, mely a többletenergiát a regionális és/vagy az országos rendszerbe is képes betáplálni (LARSEN, C. *et al.* 2000).

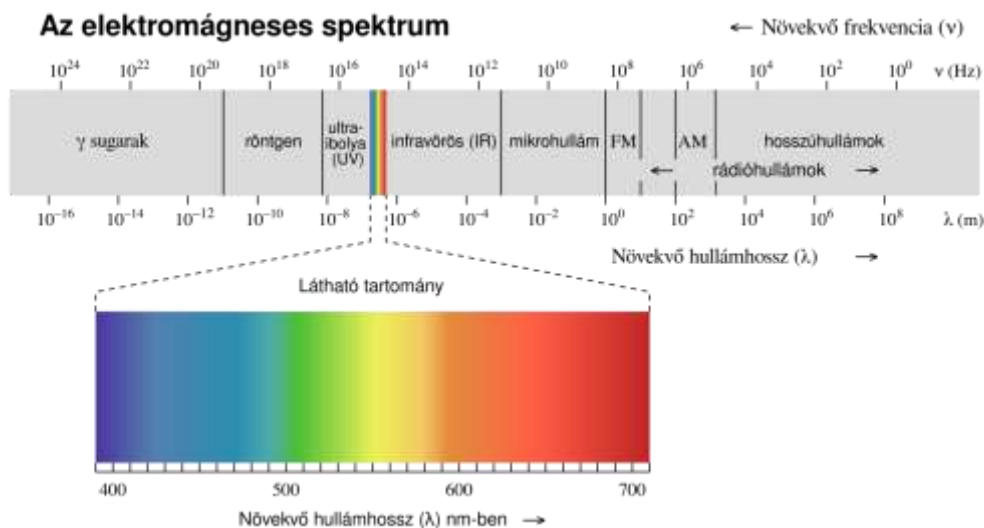
A napelemek terjedése napjainkban még lassú, de folyamatosan gyorsuló. Ennek oka, hogy a berendezések ára még igen magas, viszont folyamatosan nő rájuk az igény, így a piaci ár lassan, de biztosan csökken. Szakértők abban bíznak, hogy az általa termelt elektromos áram ára a közeljövőben már olyan szintre süllyed, hogy a fosszilis erőművekben megtermeltekével vetekedjen. 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. Az árakat az egyre nagyobb volumenű termelés is csökkenti.

## 2. Szolárpanelek poláros fényszennyezése

Az emberiség növekvő energiaigénye számos környezeti problémát vet fel (globális felmelegedés, tengerszint emelkedése, biodiverzitás csökkenése, atomhulladék elhelyezése, stb.), így egyre nagyobb az igény arra, hogy a szükséges energiát valamilyen megújuló forrásból fedezzük. De valóban olyan „zöldek” (környezetbarátok) a szolárpanelek, mint az sokan gondolják?

### 2.1. A fény polarizációja

A fény transzverzális elektromágneses hullám, melyben a terjedési irányra és egymásra is merőlegesen szinuszosan változnak az elektromos és a mágneses térerősség vektorok. A fényt négy tulajdonsága alapján lehet vizsgálni: intenzitás, hullámhossz, polarizációirány és polarizációfok. A fény intenzitása nem más, mint amit az emberi szem fényerősségként érzékel, a sötétebb tárgyak fényének intenzitása alacsonyabb, mint a világosaké. A tárgyak színét adja a hullámhossz. Az emberi szem körülbelül a 400-780 nm-es hullámhossztartományt képes érzékelni. 400 nm az ibolya, 780 nm a vörös színeknek felel meg, a többi érzékelhető szín közöttük található. Az elektromágneses hullámok hullámhossza és frekvenciája közötti kapcsolatot az 2. *ábra* mutatja.



2. *ábra*: Az elektromágneses spektrum ([4]: [http:// commons.wikimedia.org/](http://commons.wikimedia.org/))

A másik két tulajdonságot, a polarizációirányt és a polarizációfokot az ember (és az emlősök) nem képesek érzékelni, ellentétben a többi állatcsoport képviselőivel. A polarizációfok megmondja, hogy az adott hullámhosszúságú fényben az

elektromágneses sugárzás összintenzitásának hányad része lineárisan poláros. Ha az elektromágneses hullám elektromos térerősség vektora (**E** vektor) csak egyetlen kitüntetett irányban rezeg, akkor beszélünk 100 %-os polarizációfokról, ami a természetben leginkább a tükröződő felületekről (pl. víz) verődik vissza. Az ilyen fényt teljesen lineárisan poláros fénynek nevezzük. Amennyiben sok különböző rezgésű lineárisan poláros fényt elegyítünk, úgy 0 %-os polarizációfokról beszélünk, azaz a fény polarizálatlan. Legközismertebb példa rá a Napból érkező fény, ebben ugyanis a létező összes rezgésű megtalálható. Végül, ha teljesen lineárisan poláros fényt keverünk polarizálatlan fényvel, úgy a polarizációfok 0 és 100% közötti lesz. Ez azt jelenti, hogy a fényben minden irányú rezgésű előfordul, de egy kitüntetett irányú rezgésű többször fordul elő a többinél, ezért ott maximális az intenzitás. Ezt az irányt nevezzük a polarizációirányának. Ilyen, részlegesen poláros fény verődik vissza például minden nem-fémes tárgy felületéről, de a szórt égbolt fény is ebbe a kategóriába tartozik.

De miért jó az állatoknak, hogy a fény ezen két tulajdonságát képesek érzékelni? A polarizációfok és irány ugyanolyan értékes információt hordoznak, mint például a színek. Segítségével az állatok képesek tájékozódni, vagy képesek megtalálni az életben maradásukhoz, esetleg fajuk fenntartásához nélkülözhetetlenül szükséges vizes élőhelyeket (HORVÁTH és VARJÚ 2004).

## **2.2. A vízirovarok vízkeresése**

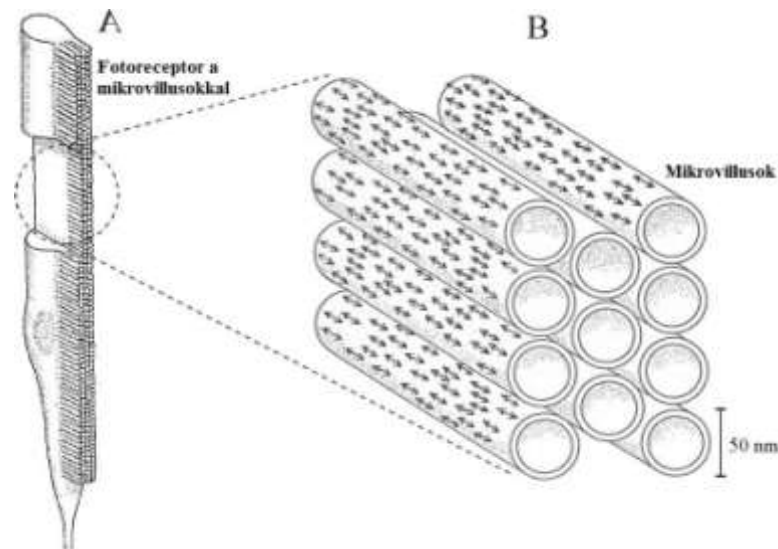
A vízirovaroknak állandóan, vagy csak életciklusuk egyes meghatározó szakaszában, például szaporodásnál, képesnek kell lennie megtalálni a szükségleteinek megfelelő mennyiségű és minőségű vizeket. Ebben a vízfelületről visszavert poláros fény van segítségükre.

Egy vízfelületről csak felhős időben verődik vissza kizárólag vízszintesen poláros fény, vagy ha az égboltnál polarizálatlan. Minden más esetben vannak olyan részei a víznek, melyek függőlegesen polárosak. Viszont van egy speciális szög, az úgynevezett Brewster-szög, melyből megfigyelve az adott vízfelszínt, mindig vízszintesen poláros a visszaverődő fény. Ilyenkor a víz felületéről visszavert és a vízben megtörve továbbhaladó fénysugár egymással derékszöget zár be (HORVÁTH és VARJÚ 2004).

Számos vízirovar (köztük a bögöly) szeme úgy evolválódott, hogy az elektromágneses spektrum zöld-kék és UV-tartományában képesek érzékelni a fény hullámhosszát, a vörösben nem (SCHWIND 1995). Retinájukat olyan fotoreceptorok



építik fel, melyek hosszúkás, henger alakú sejtekből állnak (3. ábra). Ezen sejtek oldalán türemkednek ki az úgynevezett mikrovillusok. A mikrovillusokban a látópigment rodopszin-óriásmolekulái rendezetten helyezkednek el, magukkal a mikrovillusokkal párhuzamosan, ami lehetővé teszi számukra a polarizált fény érzékelését. A sejt annál nagyobb elektromos kimenőjelet ad le, minél több fényt nyelnek el a látópigment óriásmolekulái.



3. ábra: (A) Egy rovar látósejtje (fotoreceptora) külső részének membránja.  
(B) A receptormembrán mikrosövecskéi kinagyítva (WEHNER 1976)

A vízirovarok tehát vizes élőhelyüket a víz felületéről visszaverődő vízszintesen poláros fény érzékelésével találják meg. Kialakult bennük az eltelt évmilliók alatt az úgynevezett pozitív polarotaxis, vagyis olyan ingermozgás, mely során az élőlény a vízszintesen poláros fényhez vonzódik. Sajnos azonban az emberi környezet átalakításával számos olyan tárgy jelent meg az életterükben, melyek bár nem vízfelületek, mégis arra utaló polarizáltságú fényt vernek vissza, tehát becsapják őket. Az ilyen tárgyakat, helyeket polarizációs ökológiai csapdáknak nevezzük. Hatásukra az új környezeti viszonyok miatt, melyekhez még nem voltak képesek alkalmazkodni, például letelepedésre egy rossz minőségű élőhelyet választanak. Az ilyen viselkedés hamar az egyed, vagy akár az egész populáció halálát okozhatja.

A vízirovarok a fényes, fekete vízszintes felületeket szokták vízként érzékelni, melyekről sokkal erősebb a visszaverődő fény polarizációja, mint egy hétköznapi vízfelületről visszaverődő. Az ilyen, úgynevezett poláros fényzennyező felületeket a rovarok „szupervíznek” érzékelik, így nem is tudnak ellenállni nekik, úgy viselkednek a

környezetükben, mintha természetes vizes élőhelyükön figyelnék meg őket: köröznék fölöttük, őrzik a territóriumukat, felületet érintenek a testük hűtése érdekében, lepetéznek rájuk, stb. (WILDERMUTH *et al.* 2005, HORVÁTH *et al.* 2009). Sajnos mindezek következménye, hogy rövid időn belül a kifejlett rovarok is, és a lerakott peték is elpusztulnak. Ilyen tárgyak például a nagy, fekete mezőgazdasági 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), az olajfoltok, pakura tavak (BERNÁTH *et al.* 2001), az épületek fényes üvegfelületei (KRISKA *et al.* 2008) és sajnos a napelemek is (HORVÁTH *et al.* 2010).

### **2.3. A rácshatás**

A napelemek minél magasabb hatásfokkal való működéséhez szükséges, hogy sötét felületűek legyenek, hiszen így képesek a lehető legtöbb energiát hasznosítani. Így viszont a vízirovarok óhatatlanul vízként detektálják azokat. Mivel a napelemeket olyan szögben szokták rögzíteni, hogy minél meredekebb szögben essenek rá a napsugarak, a rá szálló rovarok nagyon rövid időn belül szó szerint rásülnek, csökkentve a napelem hasznos felületét. Ráadásul a felületre lerakott peték is elpusztulnak, a bennük lévő aminosavak pedig kénsavvá alakulva károsítják a napelemet, így a vízpart mellett telepített berendezéseket gyakran kell tisztítani.

A mono- és polikristályos napelemeket több kisebb fekete cella alkotja, melyeket egy rendszerint fehér felületre rögzítenek, így kialakul egy világos rácsmintázat, az alapján véve sötét felületen (BOXWELL 2012). E napelemeket tehát nem összefüggő vízfelületként értelmezi a rovar, hanem több kisebb felületként, amire már nem éri meg rászállni és lepetézni, mert a víznek vélt felület mérete nem megfelelő a peték fejlődéséhez. A rácsozás tehát csökkenti a napelemek poláros fényszennyező hatását (Horváth *et al.* 2010). Az amorf szilícium napelemek viszont összefüggő fekete felületűek (HOUGH 2007), azok tehát nagyfokú poláros fényszennyezéssel bírnak és számos vízirovart vonzhatnak.



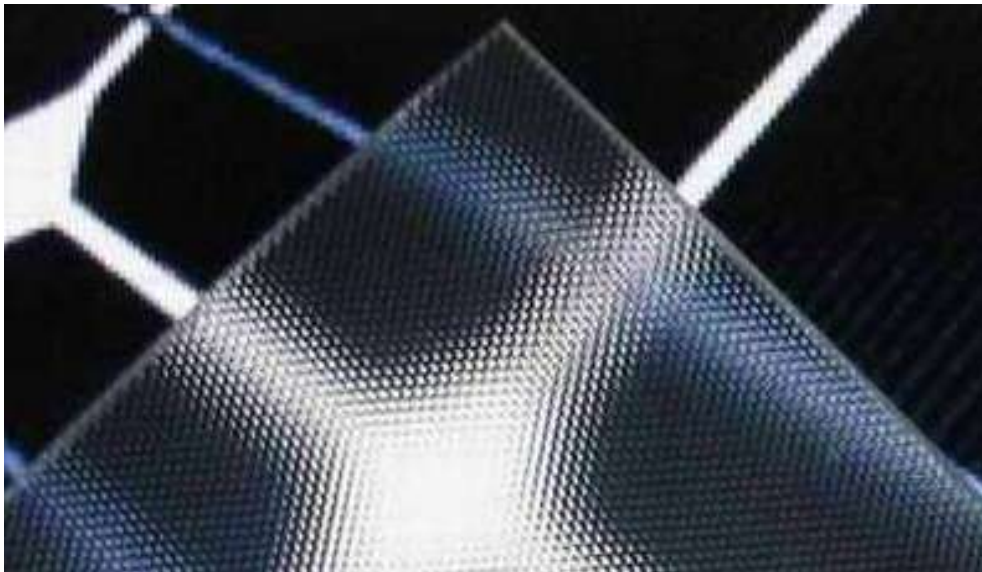
4. ábra: Amorf (balra), monokristályos (középen) és polikristályos (jobbra) napelemek ([5] <http://www.bio-info.hu> és <http://blogs.dailyrecord.com>)

### 3. Matt felületű napelemek

Az eddig bemutatott jelenségek mind fényes és sötét felületre voltak igazak, de környezetünkben nemcsak ilyen tárgyak vannak. Sok helyen terjed az olyan felületek alkalmazása, amiknek pont az a lényege, hogy egyáltalán ne legyenek fényesek. A legfurcsábbak és leglátványosabbak talán a közúton egyre gyakrabban megfigyelhető matt festésű személyautók, ám a napelemek között is feltűnnek matt felületűek.

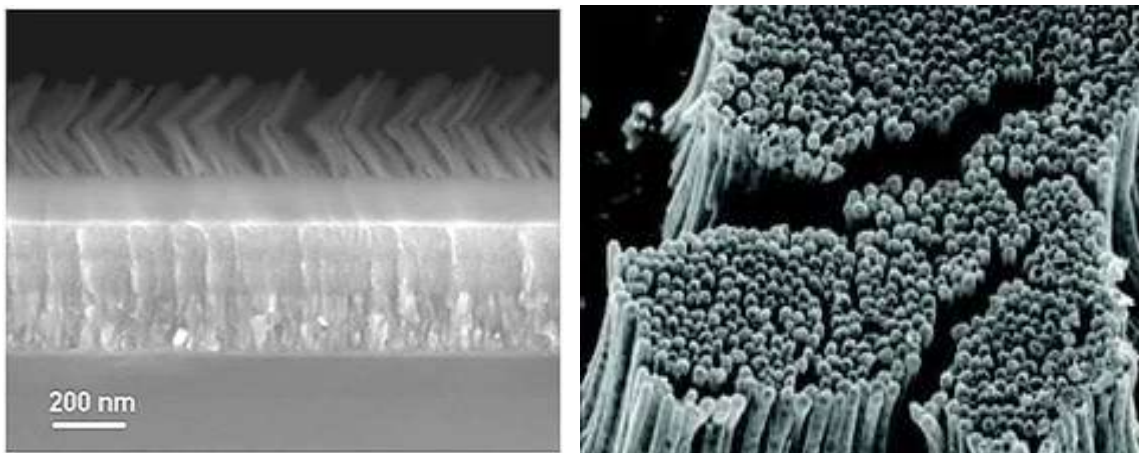
#### 3.1. Matt napelemek

A napelemek legfontosabb tulajdonsága, hogy a rájuk eső fény hány százalékát képesek hasznosítani. Ma a kereskedelmi forgalomban is kapható napelemek hatásfoka 17-18% körülire tehető, habár laboratóriumi körülmények között már 25 %-ot is sikerült elérni (PAULESCU *et al.* 2013). Adott egy elméleti határ, ami 31 %. Ezt minél jobban megközelítendő, az utóbbi években kifejlesztették az úgynevezett anti-reflektív, vagy matt felületű napelemeket. Ezek abban különböznek a hagyományos napelemtábláktól, hogy felületüket érdesé teszik (5. ábra). Az érdes felületnek köszönhetően a napelemekre eső fénysugarak kevésbé képesek visszaverődni, így nagyobb az elnyelt fotonok mennyisége, ami pedig hatékonyabb energiatermelést jelent.



5. ábra: Egy érdesített felületű üveglap ([6]: [www.solarfeeds.com](http://www.solarfeeds.com))

Az érdes felület előállításához az elkészült napelem külső felületét több rétegben 50 és 100 nm közötti hosszúságú  $\text{SiO}_2$  vagy  $\text{TiO}_2$  nanocsövekkel borítják be (KANG *et al.* 2009). A nanocsövek szabálytalanul, a tér minden irányába állnak, elősegítve ezzel, hogy a beeső fotonok az energia termelő felületre verődjenek (6. ábra).



6. ábra: Napelemet borító nanocsövek elektronmikroszkópos képe (bal kép forrása: KUO *et al.* 2008, jobb kép forrása: KANG *et al.* 2009)

A szabálytalan elrendezés azt is megelőzi, hogy az esetlegesen visszapattanó fotonok elhagyhassák a napelem felszínét: jó eséllyel újra visszaverik őket az energia termelő felület irányába.

Az érdes felületnek több energetikai előnye is van. Ezek az érdesített felületű készülékek a rájuk jutó napfény akár 96,2 %-át is képesek abszorbeálni (KUO *et al.* 2008), szemben a hagyományos napelemekkel, amelyek, ha a körülmények (leginkább a

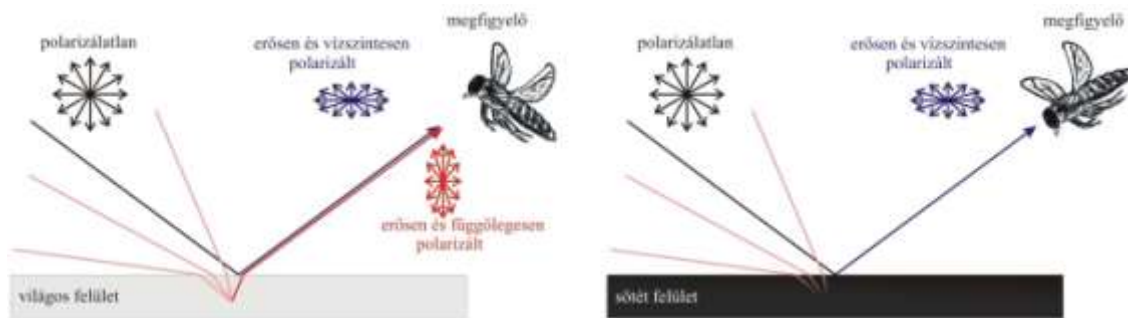
beesési szög) megfelelőek, akkor is csak maximum 2/3-át. Továbbá, a véletlenszerűen elhelyezkedő nanocsövek, bármilyen szögből is essen rájuk a foton, képesek azt az energiatermelő felületre irányítani, tehát feleslegessé teszik a nap pályáját követő, energiát fogyasztó motorok használatát. Végül, de nem utolsó sorban az is egy fontos szempont, hogy az előállításuk nem feltétlen olyan költséges, mint gondolnánk. Egy ausztráli cég, a *Brisbane Materials* például olyan módszerek kifejlesztésén dolgozik, melyekkel normál légköri nyomáson, szobahőmérsékleten is előállíthatóak lesznek az említett nanocsövek ([7]: <http://www.brismat.com>). Jelenlegi munkájukkal az antireflektív napelemekkel történő LED-es megvilágítás terén érnek el sikereket (a LED-es világítás sokak szerint a jövő, bizonyítja ezt az is, hogy az idei, 2014-es fizikai Nobel-díjat is a kék LED feltalálói kapták).

Mindezek összességében 2-3 %-al emelik meg a napelemek eddigi hatásfokát, ami kis javulásnak tűnhet, azonban jelenleg a piac legjobbjáivá teszik őket.

### **3.2. Matt felületek polarizáló 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, a fényt minden lehetséges irányba diffúzan verik vissza. Ez azt eredményezi, hogy a matt felületek által visszavert fény polarizációfoka alacsonyabb a véletlenszerűen elhelyezkedő fragmentumok által visszavert fény random polarizációirányainak kölcsönhatása miatt. Így elméletileg a vízirovarokra nem gyakorolnak olyan erőteljes vonzóhatást, mint a fényes, sima, fekete felületek.

A fényes fekete, sima felületek azért vernek vissza erősen poláros fényt, mert felületükről a fénynek két komponense is visszaverődik: (i) Az első a levegő-közeg határáról visszavert fény, ami részben lineárisan poláros. Ilyenkor a polarizációiránya a felszínnel párhuzamos. (ii) A második úgy alakul ki, hogy a beérkező fény a közeghatáron megtörik, bizonyos mélységig behatol az anyagba, majd onnan visszaszóródik, és újabb törés után kilép, melynek polarizációiránya erősen függőleges.



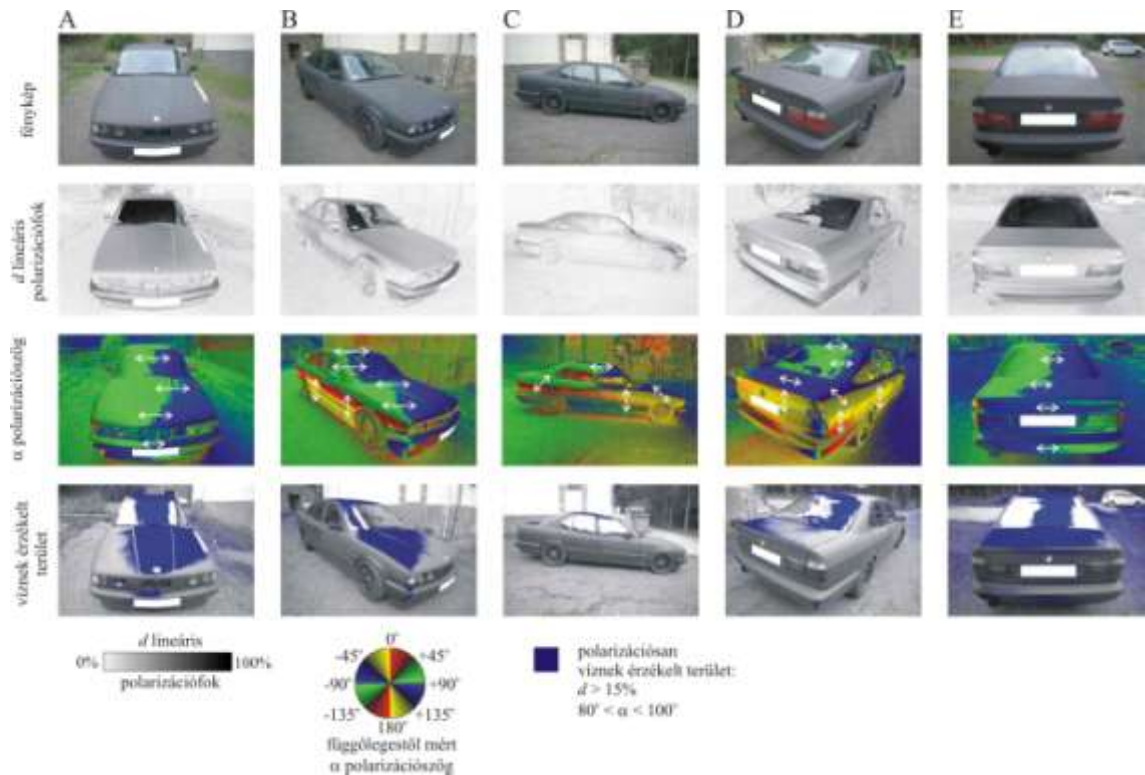
7. ábra: Vízirovarok reakciói világos és sötét felületekről visszaverődő fény esetén (EGRI 2014)

Egy fényes sima felület esetén az első komponens dominál, mert ilyenkor a második komponens a fekete közeg elnyeli. Az ilyenkor visszavert fény polarizációfoka magas lesz, így amennyiben a közeg felülete vízszintesen helyezkedik el, erős hatást fog gyakorolni a pozitív polarotaxissal rendelkező vízkereső vízirovarokra (EGRI 2014).

### 3.3. Matt autók poláros fényszennyezése: kísérleteink előzményei

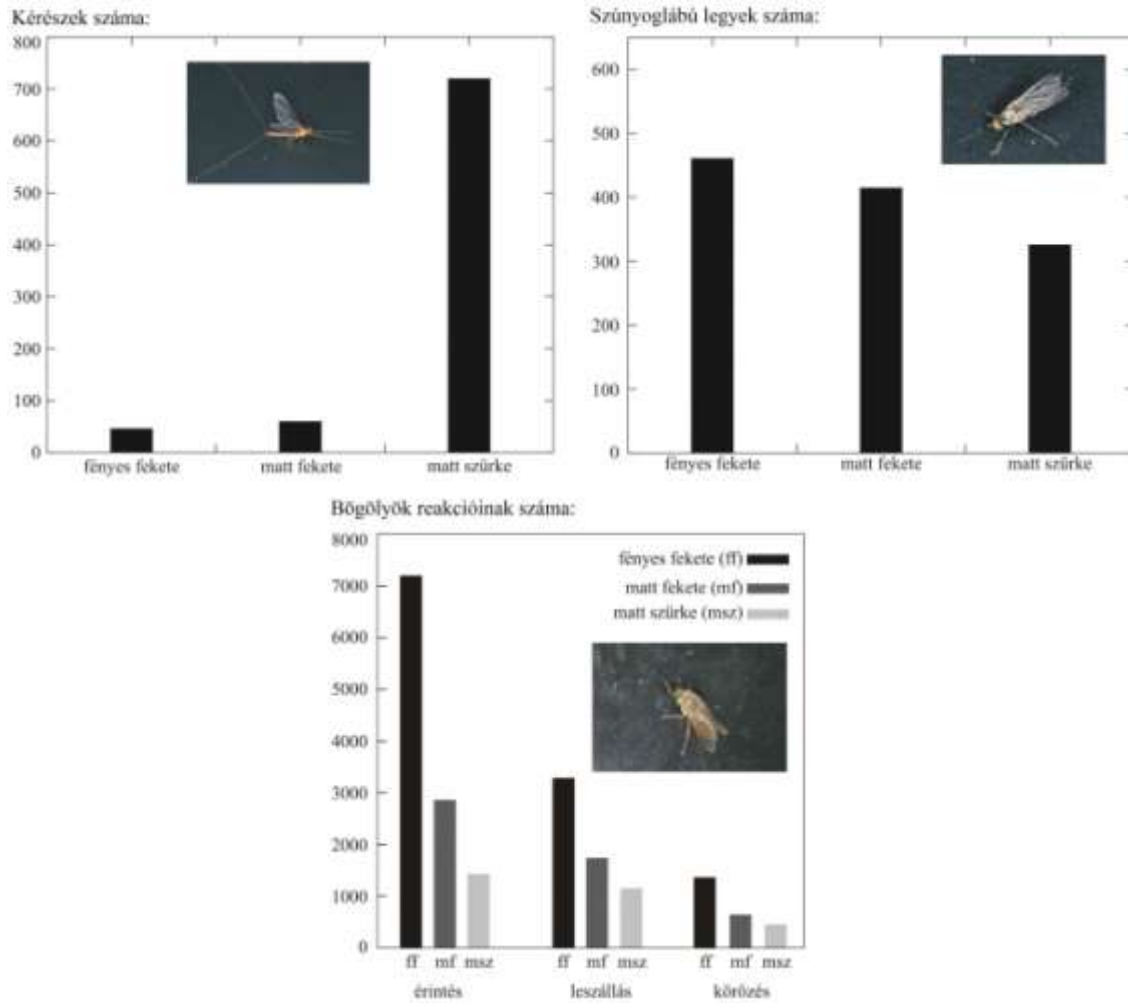
Nemrég kezdett hódítani az autósok körében az új divat, mely során járművük egész felületét, vagy csak egyes részeit (motorháztetőt, csomagtartót, stb.) matt felületű festéssel láttatják el, ezáltal kölcsönözve neki különleges megjelenést. Az első gondolatunk az lehetne, hogy egy olyan divathóbort kezd kibontakozni, amely a 3.1. fejezetben leírt okból csökkenti a poláros fényszennyező források számát, hiszen minél többen mattosítanak a fényes felületű, sötét festésű járművet (akár átfestéssel, akár fóliázással), annál kevesebb jármű lenne káros hatással a polarotaxissal vizet kereső rovarokra. Ezt az elképzelést 2013-ban BLAHÓ *et al.* (2014) tesztelte. Terepkísérletek során fényes fekete, matt fekete és matt szürke felületeket, továbbá több matt autót több bögöly, szúnyoglábu légy és kérészfajra kifejtett vonzókéességét vizsgálták. A bögölyök és a szúnyoglábu legyek valóban kevéssé repültek a matt felületekre, azok számára a fényes fekete felület szignifikánsan vonzóbb volt. Ám a várakozásokkal ellentétben azt is kimutatták, hogy egyes fokozottan védett kérészfajok számára egy nagyságrenddel vonzóbb volt a matt szürke felület, mint a másik kettő. BLAHÓ *et al.* (2014) ezt azzal magyarázza, hogy e kérészfajok petezésükhöz tökéletesen nyugodt vízfelszín keresnek, s a matt szürke karosszériaelemek polarizációs mintázata épp olyan, mint egy nyugodt vízfelszíné. Képalkotó polarimetriai mérések során az is kiderült, hogy a matt autók festése, bár alacsonyabb polarizációfokú fényt ver vissza,

mint maga a vízfelszín, annak iránya mégis erősen vízszintes, ennek következtében a pozitív polarotaxissal vizet kereső rovarok ugyanúgy vízként tekintenek rá, mint a fényes fekete autóra, s így hasonló viselkedést mutatnak közelükben, mint a vízeknél (pl. leszállás, körözés, territórium védelem, petézés) (8. ábra).



8. ábra: Egy matt fekete autó polarizációs mintázatai. 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) kísérlete megmutatta, hogy a matt felületek nem feltétlenül jelentenek megoldást a pozitív polarotaxissal vizet kereső vízirovarok megtévesztődésének problémájában, sőt, akár még rosszabb hatással is lehetnek rájuk.



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



## 4. Matt napelemtáblák vízirovarokra kifejtett hatásának vizsgálata

### 4.1. Kísérleti módszerek

A továbbiakban bemutatott terepkísérlet célja, hogy kiderítsük, hogy a nemrég kifejlesztett, matt felülettel rendelkező napelemtáblák vajon milyen hatást gyakorolnak a különböző polarotaktikus vízirovarokra. A kísérlethez a matt napelemtáblák külső borításaként használt, 40×40 cm-es, 3,2 mm vastagságú matt üvegfelületeket használtunk, melyeket a dán *Sunarc Technology* cég készített. Ugyanilyen méretben szereztünk be fényes üveglapokat is, majd egy asztalos mesterrel fakereteket készítettünk mindegyikhez. Ezek biztosították az üveglapok biztonságát a szállítás alatt és a terepen is. A keretek teljesen fekete színe adta azt a háttérrel, amilyen színű akkor lenne az üveg, ha alatta az energiát termelő egység helyezkedne el (10. ábra).



10. ábra: A kísérleteinkben használt fényes (bal) és matt (jobb) napelemtáblák

A kísérletekre 2014. július 5. és augusztus 1. között, a bögölyök aktivitásának időszakában, 11 kísérleti napon került sor a szokolyai lovas farmon. A Környezetoptika Laboratórium már több korábbi kísérletét is itt végezte el (pl. EGRI *et al.* 2012, 2013, HERCZEG *et al.* 2014), mert itt a lovak közelsége miatt nagy mennyiségben találhatóak pozitív polarotaxissal rendelkező bögölyök (Tabanidae). Maguk a kísérletek minden nap reggeltől délutánig tartottak. A kísérletek elvégzéséhez meleg, napos idő volt szükséges, hiszen a bögölyök más esetekben (pl. erős szélben) nem jelennek meg (HERCZEG *et al.* 2014). Minden kísérleti napon két megfigyelő vonult ki Szokolyára, és a kísérlet kezdeteként két matt és két fényes üveglap megfelelő elhelyezése következett. Az azonos fajtájúak egymás mellé voltak illesztve, a különböző típusok között pedig fél méter távolságot hagytunk. A felületeket fél óránként permutáltuk, hogy a helyhatást kizárhassuk (11. ábra).



11. ábra: A kísérleti helyszín és beállítás

A megfigyelők regisztrálták, amennyiben egy bögoly jelent meg az üveglapok felett. Három különböző (vízfelületeknél szokásos) bögolyreakciót különítettünk el:

- 1) Körözés: ha a bögolyök jellegzetes 8-as alakú köröket írnak le egy üveglap felett.
- 2) Vízérintés: ha érintik az üveglap felületét, de nem szállnak le.
- 3) Landolás: ha le is szállnak a felületre. Ennek hosszát másodpercben mértük.

Megjegyzendő, hogy egyes korábbi kísérletek során (pl. EGRI *et al.* 2012), amikor a különböző tesztfelületek vonzókéességét vizsgálták, a felületeket beragacsozták, így egyszerűen leszámolható volt egy hosszabb időszak után, hogy melyik felületre mennyi bögoly repült rá. Itt azonban a ragacsozás kizárandó, ugyanis a matt felületek ragaccsal való bekenése fényessé tenné a felületet, megszüntetve ezzel a mattságot. A megfigyelőknek tehát a kísérleti napok alatt folyamatosan fel kellett jegyezniük a bögolyök aktivitását.

Esetünkben nincs jelentősége annak, hogy pontosan milyen bögolyfaj jelenik meg a felületeknél, hiszen minden bögolyfaj rendelkezik pozitív polarotaxissal. A korábbi terepkísérletek során az alábbi fajokat írták le a területen (BLAHÓ *et al.* 2014): *Baetis rhodani*, *Epeorus sylvicola*, *Rhithrogena semicolorata* (kérészek), *Dolichopus unguatus*, *Dolichopus acuticornis*, valamint *Dolichopus agilis* (szúnyoglábu legyek).

## 4.2. Eredmények

Az így kapott eredményeket a következő táblázat tartalmazza:

Dátum (2014) Idő (GMT+2h)	Fényes napelem			Matt napelem		
	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)
<b>Összesen</b>	<b>511 (2386)</b>	<b>609 (3159)</b>	<b>681 (22610 s)</b>	<b>151 (539)</b>	<b>108 (420)</b>	<b>131 (3148 s)</b>

1. táblázat: A kísérletben használt fényes és a matt napelemtáblákon regisztrált bögölyviselkedési formák. A körözések és érintések darabszámban, a landolások pedig másodpercben értendők. Körözés, érintés és landolás esetén a felső számok a bögölyök számát, az alsó zárójeles számok pedig körözés és érintés esetén a bögölyök általi összes körözést, illetve érintést mutatják, míg landolásnál az összes landolás időtartamát.

Az 1. táblázatban mindenhol két értéket olvashatunk adott napon a fényes és a matt napelemek oszlopaiban. Körözésnél és érintésnél a felső szám azoknak a bögölyöknek a számát mutatja, melyek körözésbe kezdtek, vagy megérintették a napelemek felületét, míg alatta a zárójelben levő pedig azt, hogy mindezt hányszor tették. Tehát az első nap a fényes napelem felett 11 rovar összesen 53 kört írt le, illetve

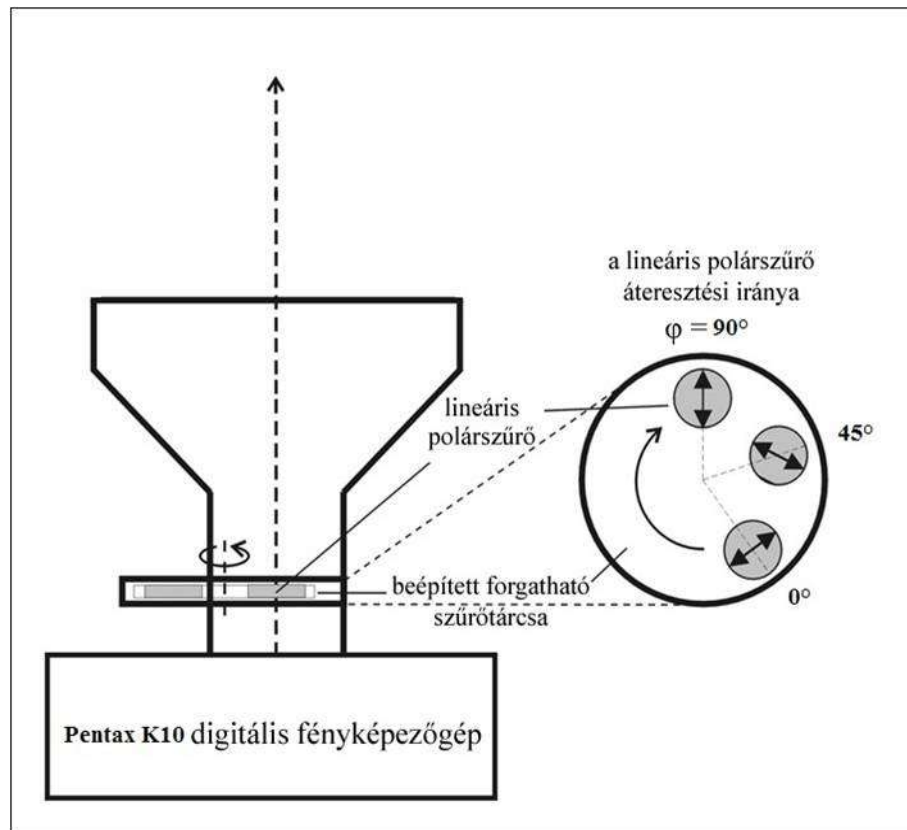
8 rovar összesen 39-szer érintette meg. A landolások oszlopaiban pedig a napelemen landolt rovarok száma, illetve az általuk ott összesen eltöltött idő látható másodpercekben.

Megjegyzendő, hogy ebben a kísérletben nem lehetett kiküszöbölni azt, hogy egy bögöly akár többször is megjelenjen a kísérleti felületek felett. Ezt csak a felületek ragasztóval való bekenésével lehetett volna megoldani, ami viszont (ahogyan már említettem) a matt felületek fényessé tételéhez vezetett volna. Mindazonáltal ez nem is lett volna szükséges, hiszen nem arra voltunk kíváncsiak, hogy milyen rovarokat vonzanak magukhoz a felületek, hanem arra, hogy a két különböző felület közül melyik vált ki bennük valamilyen reakciót. Továbbá beragasztózott felülettel azt se tudtuk volna megmondani, hogy a rovar csak érinteni akarta volna a felületet, vagy esetleg landolni, és ha az utóbbi, akkor mennyi ideig.

Az adatokból tisztán kitűnik, hogy a fényes felületű napelemek jóval több böglyöt vonzottak, mint a matt feketék. Két napon egyáltalán nem volt reakció a matt napelemek felett, bár megjegyzendő, hogy ezek közül az egyik egy rövid vizsgálati nap volt a viharos időjárás miatt. Az összesített adatokon jól látszik, hogy mind a körözés, mint az érintés egy nagyságrenddel kisebb volt a matt napelem tekintetében, mint a fényesnél.

### **4.3. Fényes és matt napelemtáblák polarizációs sajátosságai**

Szerettük volna megtudni, hogy a különböző üvegfelületekről visszaverődő fény vajon milyen irányban és mennyire poláros, így képalkotó polarimetria segítségével megvizsgáltuk őket. Az eljárás lényege, hogy egy Pentax digitális tükörreflexes fényképezőgéppel három különböző lineáris polárszűrő állásban ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) egy-egy képet készítünk az egyes napelemtáblákról (12. ábra), majd azokat erre a célra készített számítógépes szoftver (*Polarworks*) segítségével kiértékeljük.



12. ábra: A Pentax típusú fényképezőgépből készült képalkotó polariméter vázlata

A tesztfelületekről 24 képsorozat készült különböző időjárási körülmények között (derült, felhős és esős időben) és eltérő irányokból (Nap jobbról, balról, szemből, hátulról sütött). A képeket a spektrum vörös, zöld és kék tartományában értékeli ki a program a három különböző polárszűrő állást egy időben figyelembe véve. Megjelenítésre került az eredeti kép mellett a napelemtáblák felületének  $p$  polarizációfoka,  $\alpha$  polarizációiránya és végül, hogy adott feltételek mellett mely területeket érzékelik a polarotaktikus vízirovarok vízként (ahol  $p > 15\%$  és  $80^\circ < \alpha < 100^\circ$ ). Az így kapott képeket megfelelően rendszerbe illesztve megkaptuk a végeredményeket, melyek a Függelékben találhatóak.

A program segítségével a kapott eredményeket számszerűsítettük is: egy maszkot készítettünk, ami a képeken minden esetben csak a napelemek felületére korlátozódott, így a program csak azokat a pixeleket vette figyelembe kiértékeléskor, amik ezen a maszkon belülre estek, a környezet tehát nem befolyásolta a számítást. Eredményül megkaptuk az adott napelemtáblák  $p$  polarizációfokának és  $\alpha$  irányának átlagos értékét és annak szórását, melyeket a következő (2. és 3. táblázat) táblázatok foglalnak össze.

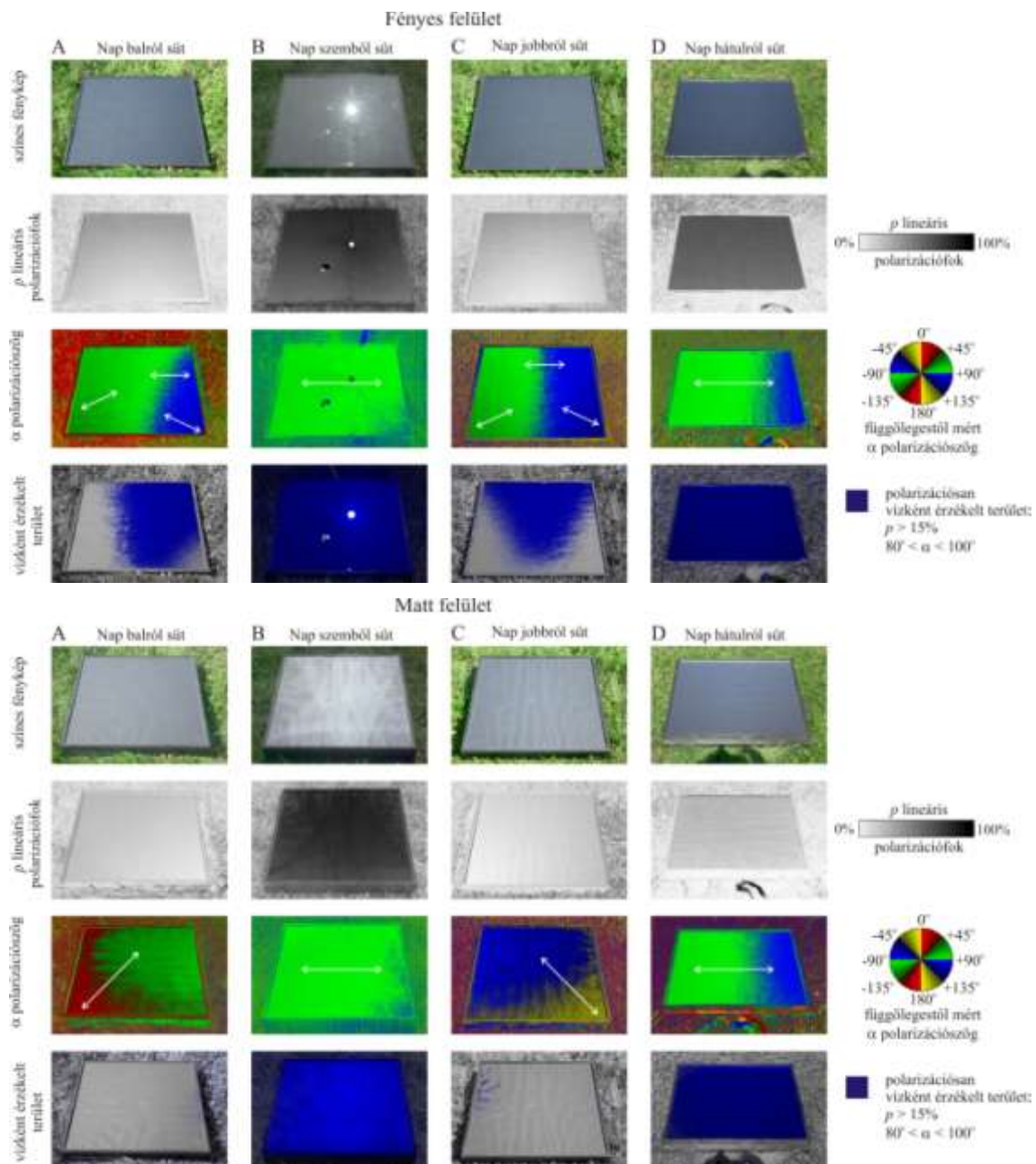
Napelem típusa	Megvilágítás iránya	$p$ polarizációfok és szórása (%)			$\alpha$ polarizációirány és szórása (°)		
		R	G	B	R	G	B
Fényes	Nap balra	18.7 ± 6.8	20.1 ± 6.4	25.9 ± 7.4	63.7 ± 14.3	71.4 ± 12.8	81.2 ± 12.3
	Nap balra	18.2 ± 6.9	17.4 ± 6.2	20.7 ± 6.7	53.7 ± 10.5	62.3 ± 10.3	74.8 ± 12.1
	Nap szemben	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, esős, 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, esős, 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

2. táblázat: A kísérletben használt fényes felületű napelemtáblákról visszavert fény átlagos polarizációfoka, iránya és ezek átlagos 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.

Napelem típusa	Megvilágítás iránya	$p$ polarizációfok és szórása (%)			$\alpha$ polarizációirány és szórása (°)		
		R	G	B	R	G	B
Matt	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

3. táblázat: A kísérletben használt matt felületű napelemtáblákról visszavert fény átlagos polarizációfoka, iránya és ezek átlagos 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.

Az adatok alapján készült polarizációs mintázatot a következő ábra mutatja (13. ábra). Első sorban az eredeti képek, alattuk a  $p$  polarizációfok, polarizációirány és végül a rovarok által víznek érzékelt terület látható. A fényes és matt napelemekről képzett polarimetria segítségével készült polarizációs mintázatok a Függelék F1-F10 ábráin láthatóak.



13. ábra: A kísérletben használt fényes és matt napelemtáblák fényképei és a spektrum kék (450 nm) tartományában mért polarizációs mintázata, valamint a polarotaktikus bögölyök által víznek érzékelt területei.

Az alábbi eredményeket kaptuk:

Amikor a Nap szemből sütött, a matt felületek polárosabbak voltak ugyan a fényeseknél ( $p_{\text{fényes}} = 70,9 \%$ ,  $p_{\text{matt}} = 80,8 \%$  átlagos polarizációfok a spektrum kék tartományában), ám a matt felületek polarizációirányának szórása magasabb volt ( $\alpha_{\text{fényes}} = 86,4 \pm 3,6^\circ$  és  $\alpha_{\text{matt}} = 84,4 \pm 7,5^\circ$ ), így az már nem volt vízként értelmezhető a bögöly számára.



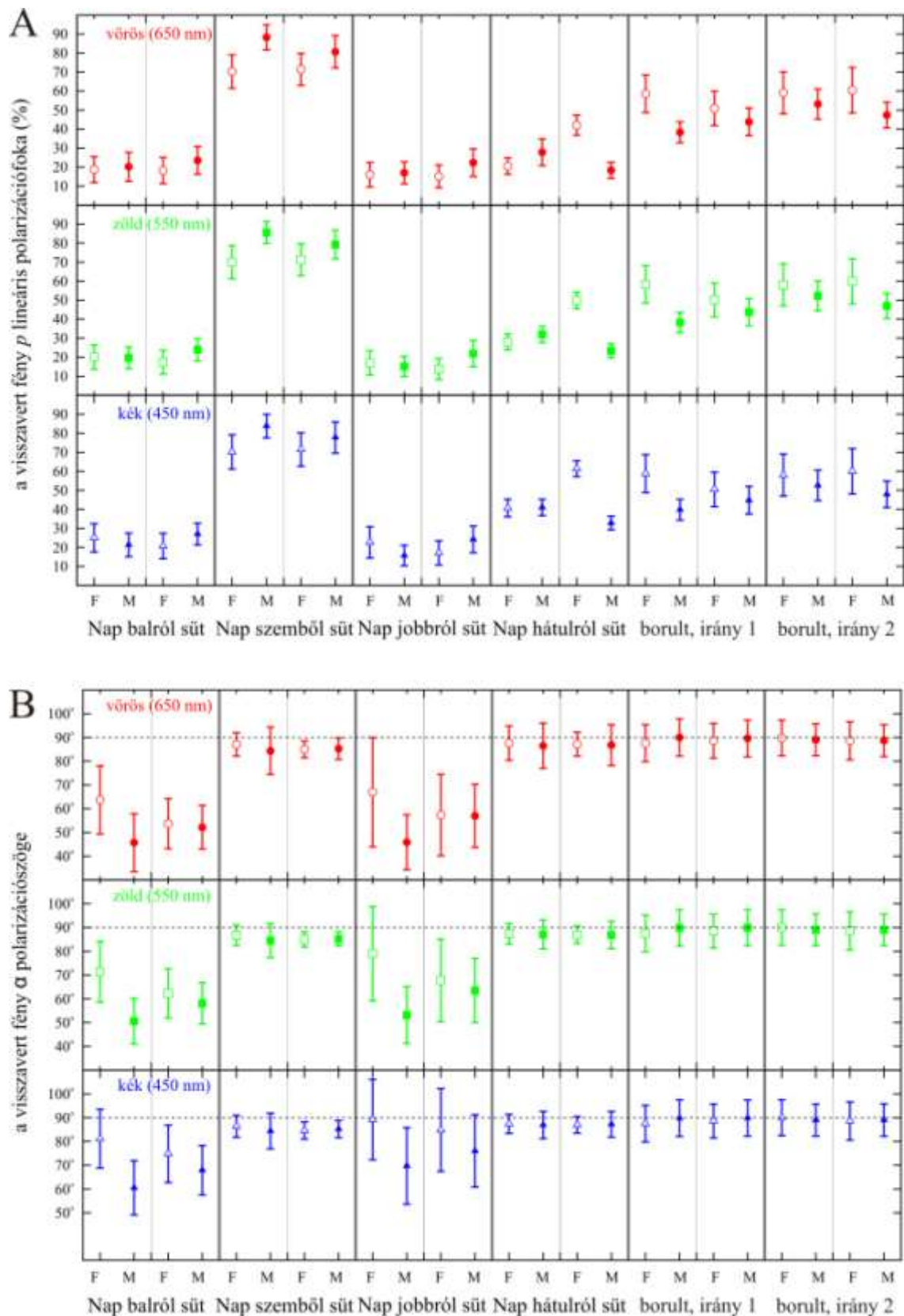
Amikor a Nap hátulról, vagy valamelyik oldalról süt, akkor a Nap erős fénye az üveglapok alatt lévő fekete papírfelületről diffúzan visszaverődő fény intenzitását növeli, ami az üvegből való kilépés után függőlegesen polárosná válik, így a megfigyelő felé haladó fénysugarak arányaiban több függőlegesen poláros komponenst fognak tartalmazni és a polarizációfok alacsonyabb lesz. Méréseink eredménye a 3. táblázatban láthatók. Ezekben az esetekben a tesztfelületek közül a fényes fekete felület polárosabb volt a mattnál a spektrum kék és zöld tartományában (a bögölyök a spektrum vörös tartományát nem érzékelik). Emellett a felületekről visszavert fény  $\alpha$  polarizációiránya jobban eltért a vízszintestől a matt esetében (pl. amikor a Nap jobbról sütött:  $\alpha_{\text{fényes}} = 87^\circ$  és  $\alpha_{\text{matt}} = 72,9^\circ$ ), így a bögölyök számára ebben az esetben is a fényes felület volt vonzóbb.

Borult égbolt esetén a fényes és a matt felületről is vízszintesen poláros fény verődött vissza ( $\alpha_{\text{fényes}} = 88,7^\circ$  és  $\alpha_{\text{matt}} = 89,4^\circ$ ), ám a bögölyök számára ez esetben azért lehetett vonzóbb a fényes felület, mert annak polarizációfoka magasabb volt ( $p_{\text{fényes}} = 56,9\%$ ,  $p_{\text{matt}} = 46,3\%$ ).

Statisztikát is végeztünk eredményeink helyességének ellenőrzésére. Mivel eredményeink nem normális eloszlásúak voltak, a nemparaméteres Mann-Whitney U tesztet használtuk. Ez a teszt az értékeknek ad egy-egy rangot, gyakorlatilag sorba rendezi őket és a mediánokat hasonlítja össze, hogy hibahatáron belül megegyeznek-e. Azt a valószínűséget, ami ehhez a határhoz tartozik nevezzük szignifikancia szintnek (p-level). Több ilyen szintet határoztak meg, leggyakrabban a  $p=0,05$ -el végzik a számításokat. Ha a statisztika alapján számolt p érték ennél kisebb, akkor szignifikáns a különbség, ha nagyobb, akkor nem. Az eredményeket a 4. táblázat tartalmazza.

Fényes vs. Matt	Reakció csoportok	Szignifikancia	Reakció csoportok	Szignifikancia
Körözés	U=24,5 Z=2,366 <b>p=0,018</b>	Szignifikáns	U=21 Z=-2,595 <b>p=0,0094</b>	Szignifikáns
Érintés	U=21 Z=2,599 <b>p=0,0093</b>	Szignifikáns	U=19 Z=-2,729 <b>p=0,0063</b>	Szignifikáns
Landolás	U=25 Z=2,337 <b>p=0,0194</b>	Szignifikáns	U=24 Z=2,399 <b>p=0,0164</b>	Szignifikáns

4. táblázat: Az 1. táblázat adatain Mann-Whitney U teszt alapján végzett statisztikai elemzés eredményei.



14. ábra: A 2. és 3. táblázat adatai a visszavert fény  $p$  lineáris polarizációfoka (%) és a függőlegestől mért  $\alpha$  polarizációs szöge függvényében ábrázolva.

## 5. Összefoglalás és következtetések

Az emberiség folyamatos technikai fejlődése egyre több energiát igényel mind ipari, mind háztartási szinten. Folyamatosan nő azon tárgyaink száma, melyek árammal működnek és a nap nagy részében be vannak kapcsolva (számítógépek, tabletek, mobiltelefonok, stb.). Létfontosságú tehát a „zöld” energiaforrások használatának elterjesztése, mint amilyenek a napelemtáblák és napkollektorok (szolárpanelek) is, hiszen ezek előállítására jár a teljes életciklust figyelembe véve a legkisebb környezetterheléssel. Ahogyan fejlődik a technika, egyre biztosabban egyre több villamos áramot lesznek képesek termelni ezek a berendezések, és amint lassan elterjednek a közéletben, úgy fog csökkenni az áruk, 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 vízirovarok kapcsán ritkán emlegetik, pedig fokozatos terjedésükkel egyre komolyabb ökológiai károkat okoznak e poláros fényszennyező felületek, főként vízpartok és vizes élőhelyek közelében. Éppen ezért fontos lenne, ha valamennyi piacra kerülő szolárpanel érdes, matt felületű lenne, mert – bár a mattságuk előállításával nem ez volt az eredeti cél – ezzel az eljárással e felületek poláros fényszennyezését lehet orvosolni úgy, hogy közben a berendezések hatásfoka még jelentős mértékben javul is, miáltal a felhasználók is és a környezet is jól jár.

További terveink között szerepel a polarotaktikus kérészek és szúnyoglábu legyek matt és fényes szolárpanelekhez való vonzódásának vizsgálata Dömörkapunál. Erre csak 2015 tavaszán kerülhet sor, mikor e rovarok rajzási időszaka elkezdődik.

A napenergia-hasznosító felületek poláros fényszennyezése Észak-Amerikában is problémát jelent, amire a további terepkísérleteink során kell megoldást találnunk. 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 naperómű környezetében szintén megfigyeltek tömegével megjelenő rovarokat és madarakat. E jelenséget nagy valószínűséggel az ottani, összesen 6.4 km<sup>2</sup>-en elhelyezkedő, 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 e tükrök felületét úgy, hogy ne váljanak ökológiai csapdává. Fontos megjegyezni, hogy e felületek bemattosítását nem tekinthetjük megoldásnak. A kaliforniai naperőmű ugyanis parabola keresztmetszetű (mindig 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 e tükörfelületeket mattá tennénk, akkor reflektivitásuk drasztikusan csökkenne, ami a rendszert működésképtelenné tenné. A szükséges intézkedések feltárása további kutatásokat igényel.

## **Köszönetnyilvánítás**

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

Nagyon hálás vagyok továbbá Kálmánczhelyi-Farkas Alexandrának, aki rengeteget segített munkám során és sok tanáccsal látott el.

Köszönettel tartozom Egri Ádámnak a rendelkezésemre bocsátott fényképfelvételekért és a hasznos szakmai tanácsokért, valamint Száz Dénesnek is köszönöm lelkes segítségét.

Köszönöm a Környezetoptika Laboratórium további tagjainak a mérésekben való részvételüket és segítségüket.

Végezetül köszönettel tartozom Viski Csabának, aki engedélyezte lovas tanyáján a terepkísérleteink 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 N. Spatiotemporal change of sky polarization during the total solar eclipse on 29 March 2006 in Turkey: polarization patterns of the eclipsed sky observed by full-sky imaging polarimetry/emature. *Conservation and Landscape Research* 40(2): 89-109

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 (PLoS ONE)* 9 (7): e103339 + electronic supplement (doi:10.1371/journal.pone.0103339)

BOXWELL M. (2012) Solar Electricity Handbook 2012 Edition. A simple, practical guide to solar energy – designing and installing photovoltaic solar electric systems. *Greenstream Publishing*. 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. (2014) Bögölyök gazdaállat-keresése, polarotaxisának kísérleti vizsgálata és polarizációs csapdái. *Doktori védés*. 2014. július 19.

EGRI Á. (2014) Experimental study of tabanid polarotaxis, host-tabanid interaction and polarization tabanid traps. *PhD Thesis*.

HERCZEG T., SZÁZ D., BLAHÓ M., BARTA A., GYURKOVSKY M., FARKAS R., HORVÁTH G. (2014) The effect of weather variables on the trapping number of both female and male horseflies in the continental climate of Hungary. *Parasitology Research* (submitted).

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
- HOUGH T. P. (2007) Recent Developments in Solar Energy. *Nova Publishers*. p. 368.
- KANG, T-S.; SMITH, A. P.; TAYLOR, B. E.; DURSTOCK, M. F. (2009) Fabrication of Highly-Ordered TiO<sub>2</sub> nanotube arrays and their use in dye-sensitized solar cells. *Nano letters* 2009, 9(2), pp 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-swarmed polarotactic caddis flies. *Naturwissenschaften* 95: 461-467
- 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 (21) 2527-2529.
- LARSEN, C.; BROOKS, B.; STARRS, T. (2000) *Connecting to the Grid - A guide to PV interconnection issues*. North Carolina Solar Center, third edition.
- PAULESCU, M.; PAULESCU, E.; GRAVILA, P.; BADESCU, V. (2013) Weather modeling and forecasting of PV systems operation. Springer-Verlag London 2013. pp. 3.
- SCHUBERT, E. F. AND KIM, J. K. (2007) World's First Ideal Anti-reflection Coating Could Lead To More Efficient Solar Cells, Brighter LEDs. *ScienceDaily*.

SCHWIND, R. (1995) Spectral regions in which aquatic insects see reflected polarized light. *Journal of Comparative Physiology A*, Volume 177, Issue 4 , pp 439-448.

SINKOVICS Cs.; GÁL J.; BERNÁTH B.; KRISKA G.; HORVÁTH G. (2012) *Épületek poláros fényszennyezése és annak kiküszöbölése*. Világítástechnikai Évkönyv 2012-2013: A fény és élettani hatásai. 146-156. oldal (szerkesztők: Barkóczi Gergely, Bolváry Gábor, Szabó Ferenc), Magyar Elektrotechnikai Egyesület Világítástechnikáért Társasága és Magyar Világítástechnikáért Alapítvány, Budapest, HU

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

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

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](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

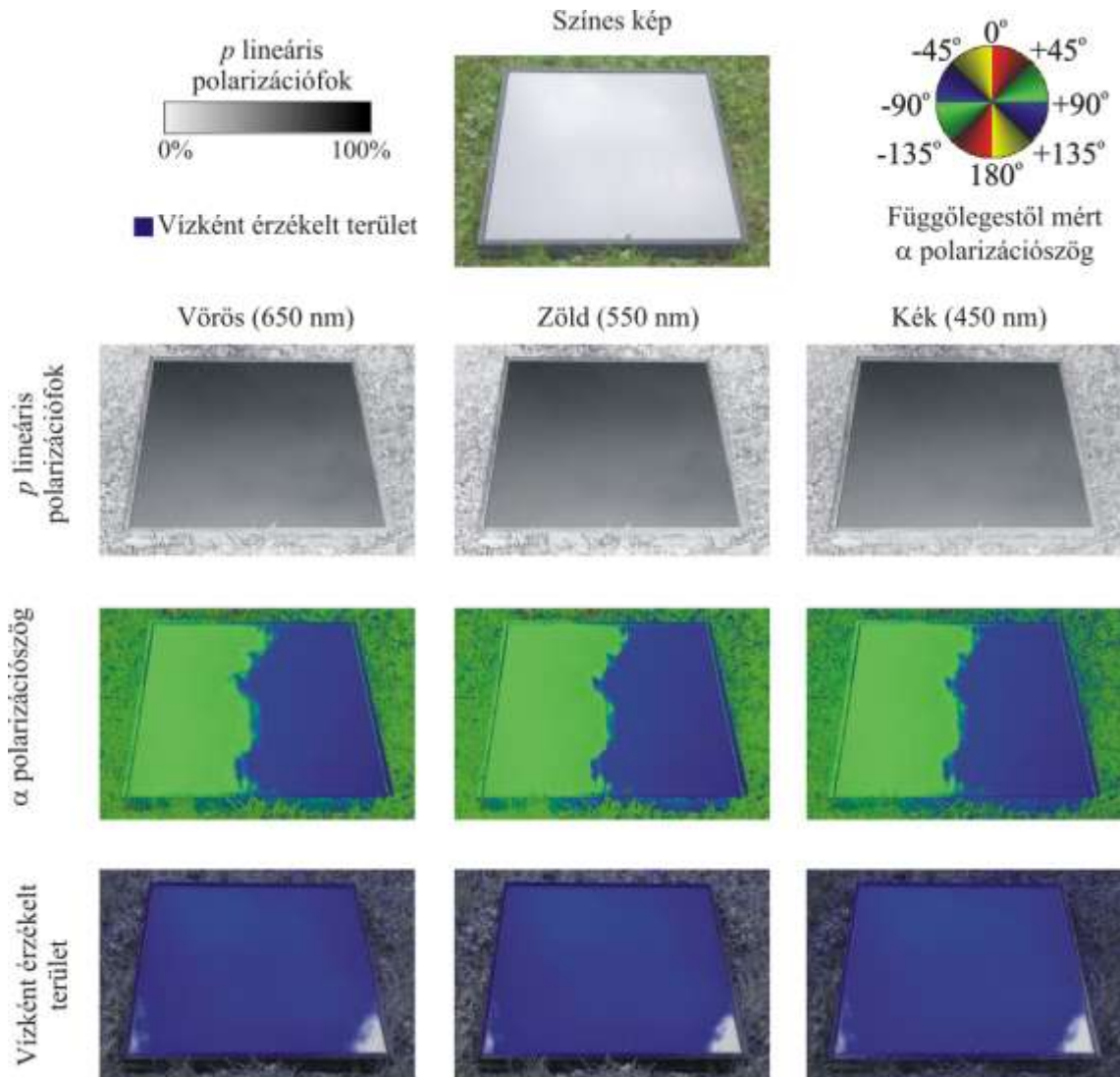
[6] <http://www.solarfeeds.com/multilayer-anti-reflective-coating-solar-cell-efficiency-special-sauce/>

[7] <http://www.brismat.com/technology>

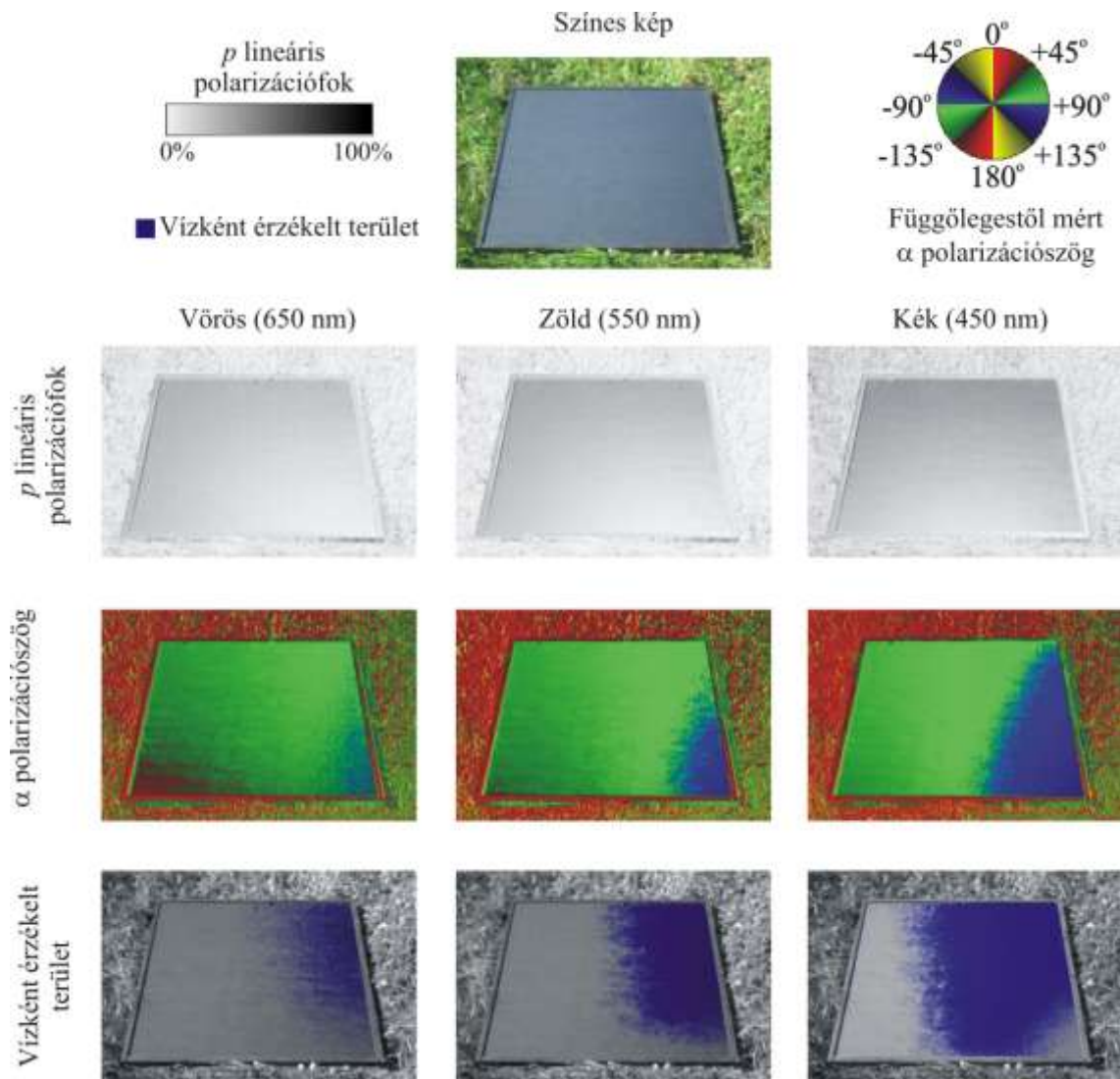


## Függelék

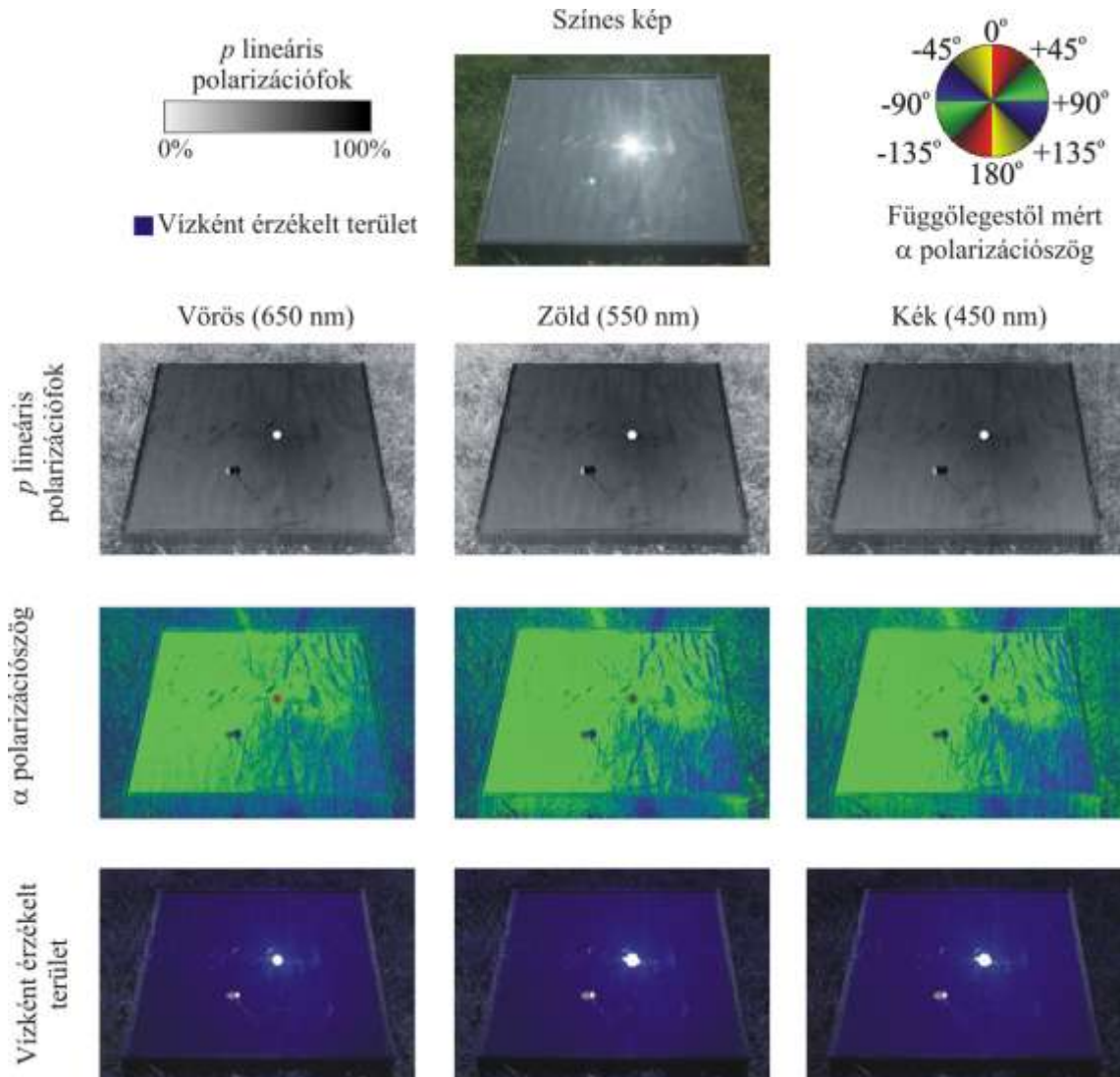
### Fényes napelemtáblák képalkotó polarimetriával mért polarizációs mintázatai



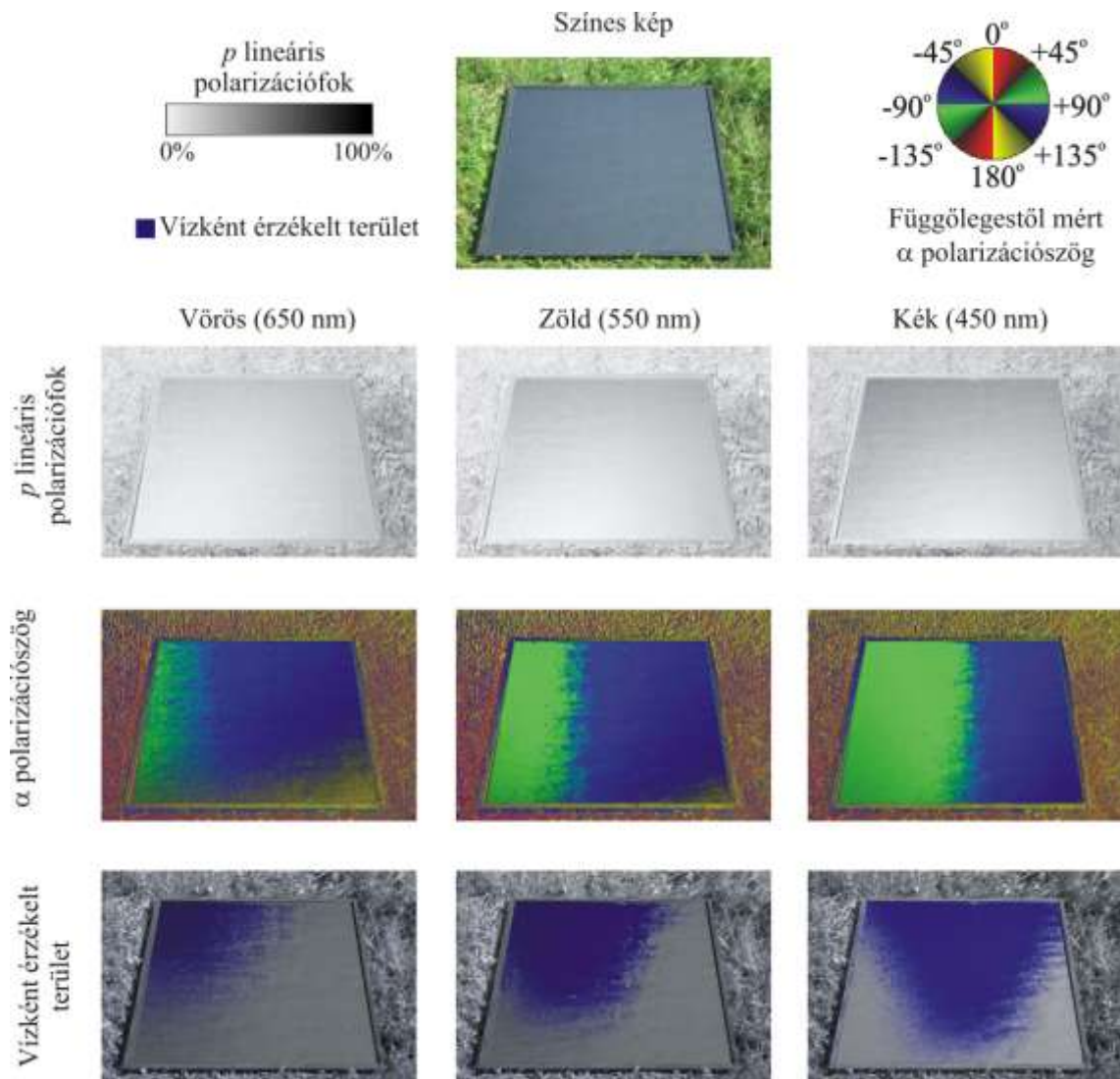
*F1 ábra:* Fényes napelemtábla polarizációs mintázatai borult időben.



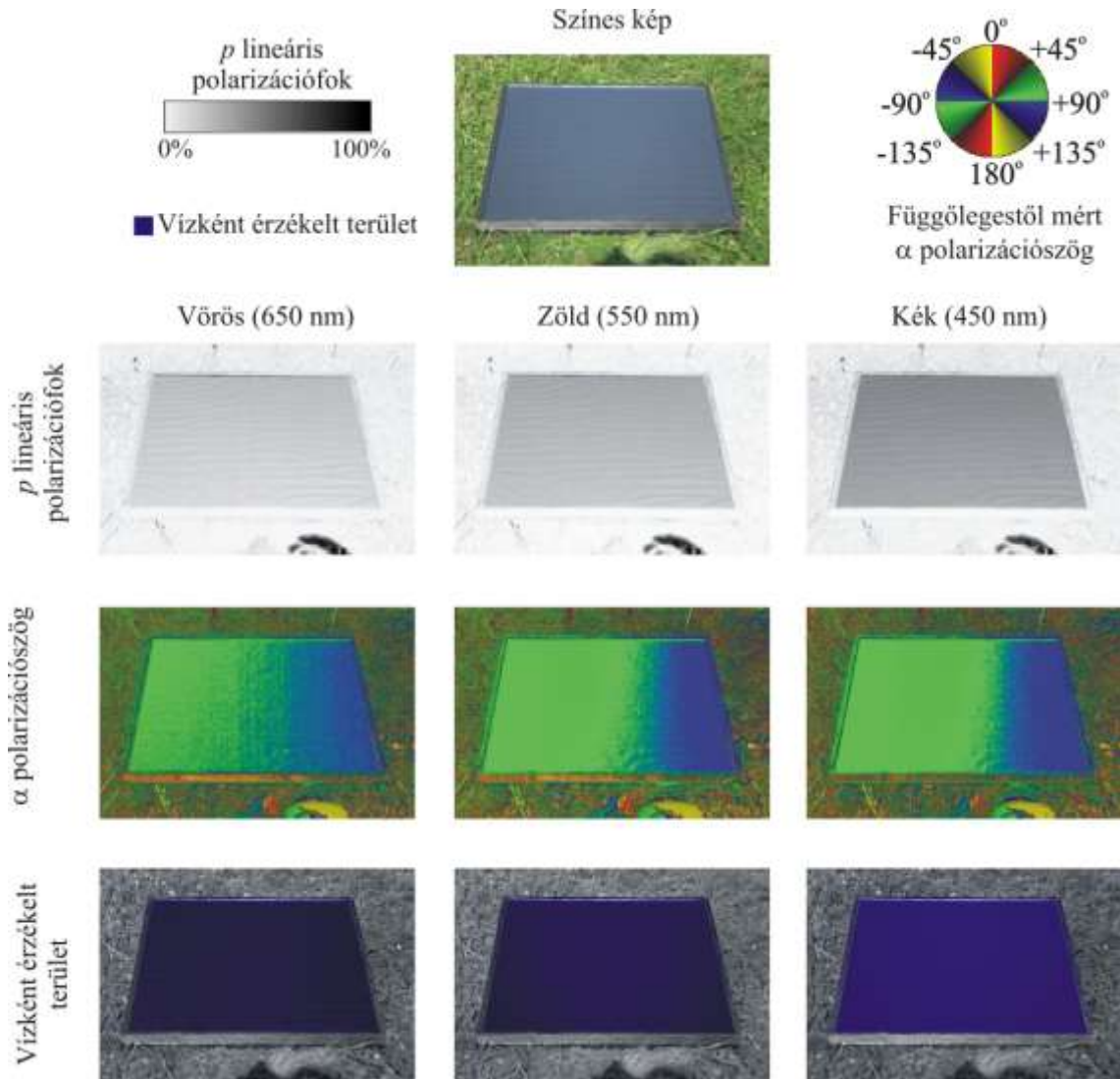
F2 ábra: Fényes napelemtábla polarizációs mintázatai napos időben, mikor a Nap balról süt.



F3 ábra: Fényes napelemtábla polarizációs mintázatai napos időben, mikor a Nap szemből süt.

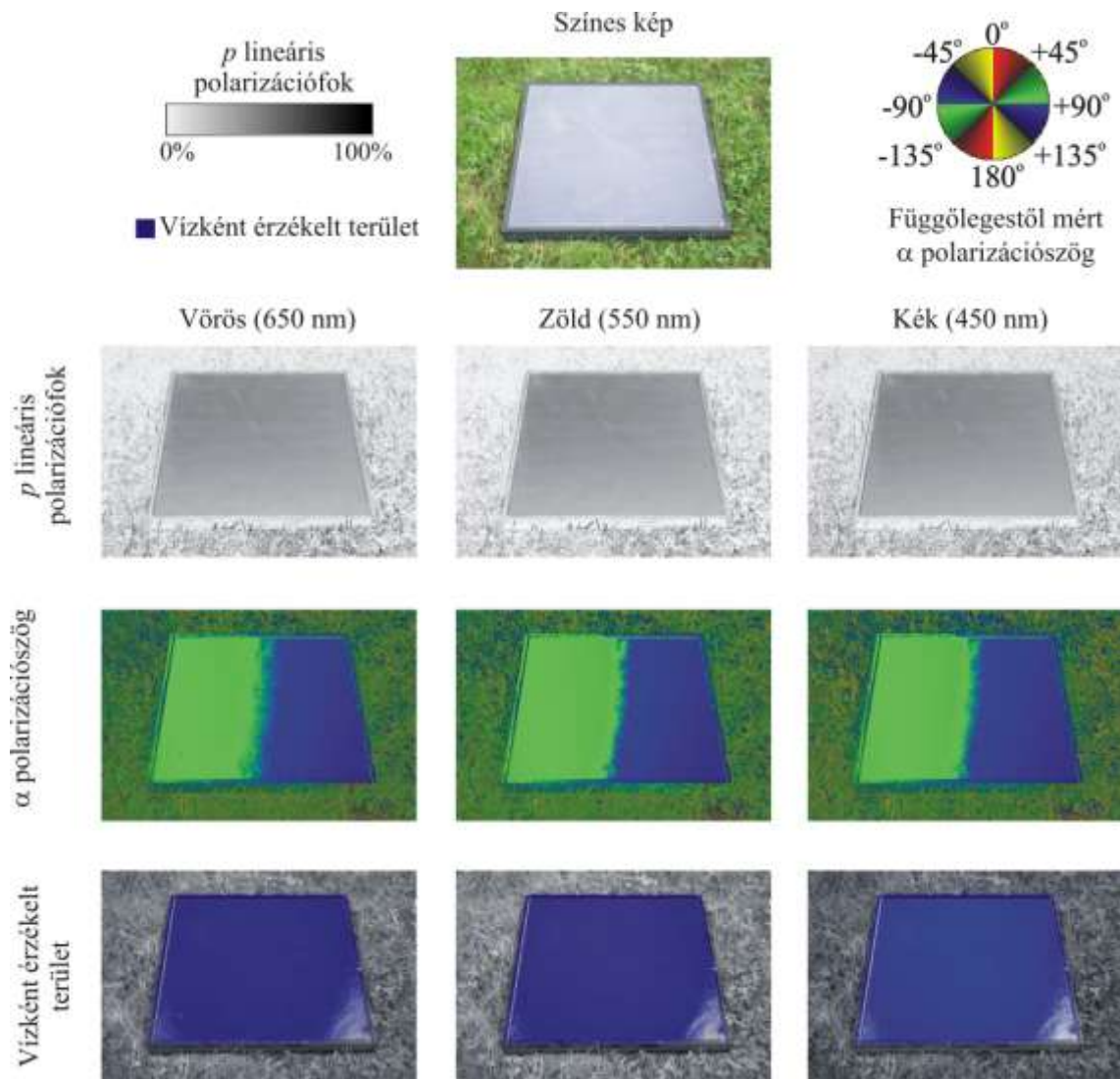


F4 ábra: Fényes napelemtábla polarizációs mintázata napos időben, mikor a Nap jobbról süt.



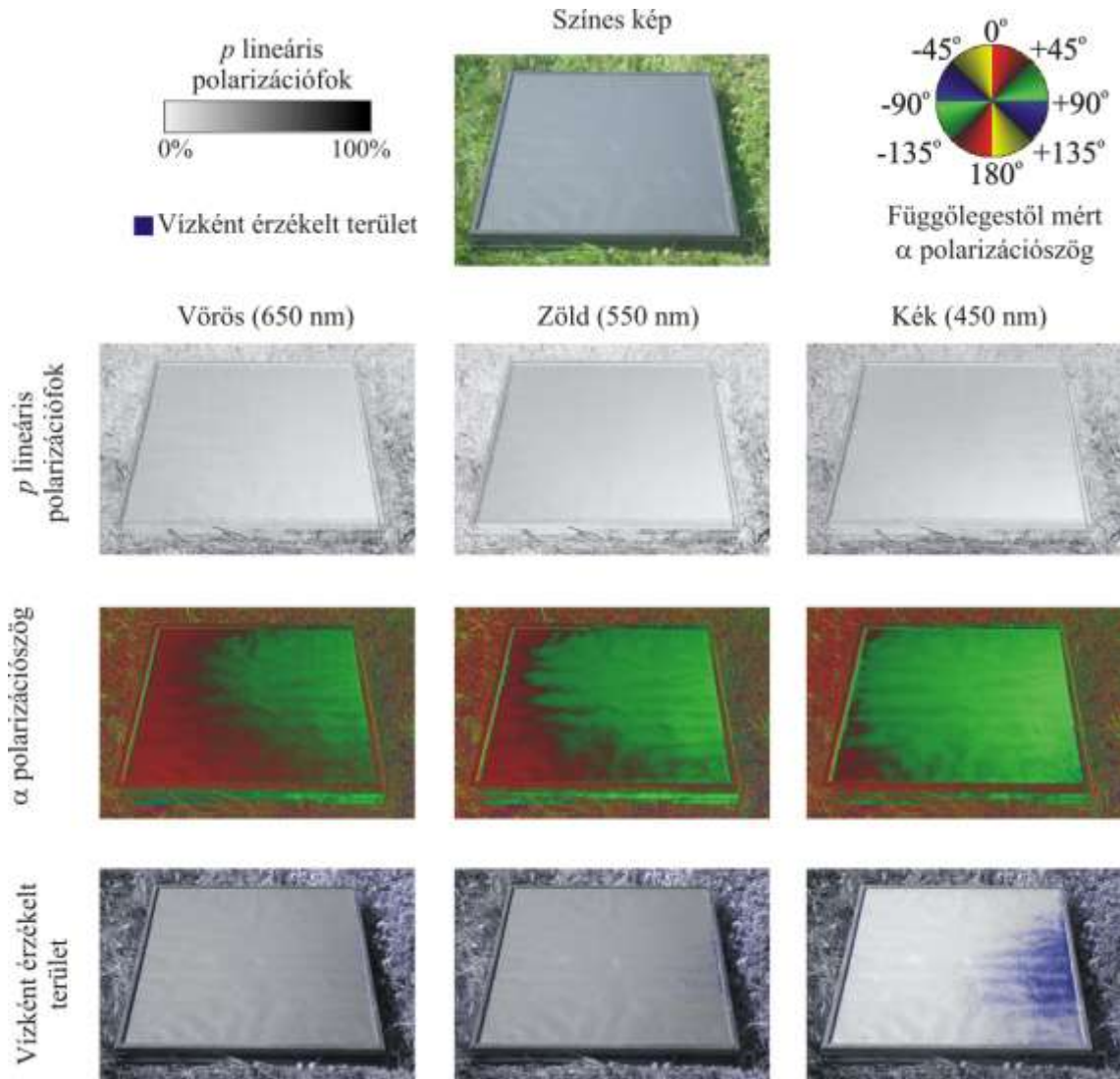
F5 ábra: Fényes napelemtábla polarizációs mintázatai napos időben, mikor a Nap hátulról süt.

## Matt napelemtáblák képképző polarimetriával mért polarizációs mintázatai

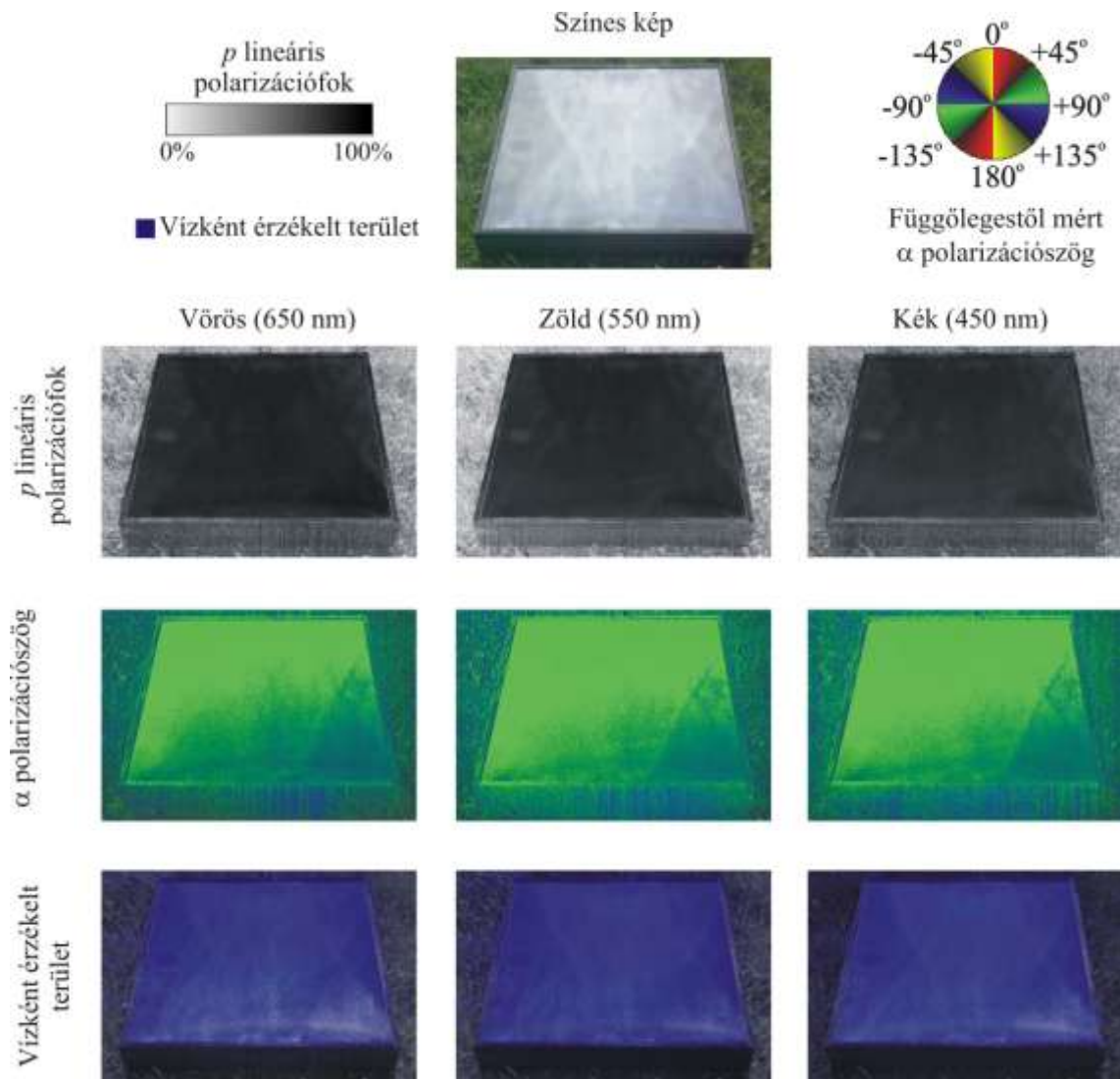


F6 ábra: Matt napelemtábla polarizációs mintázatai borult időben.

Mennyire „zöld” a napelem?



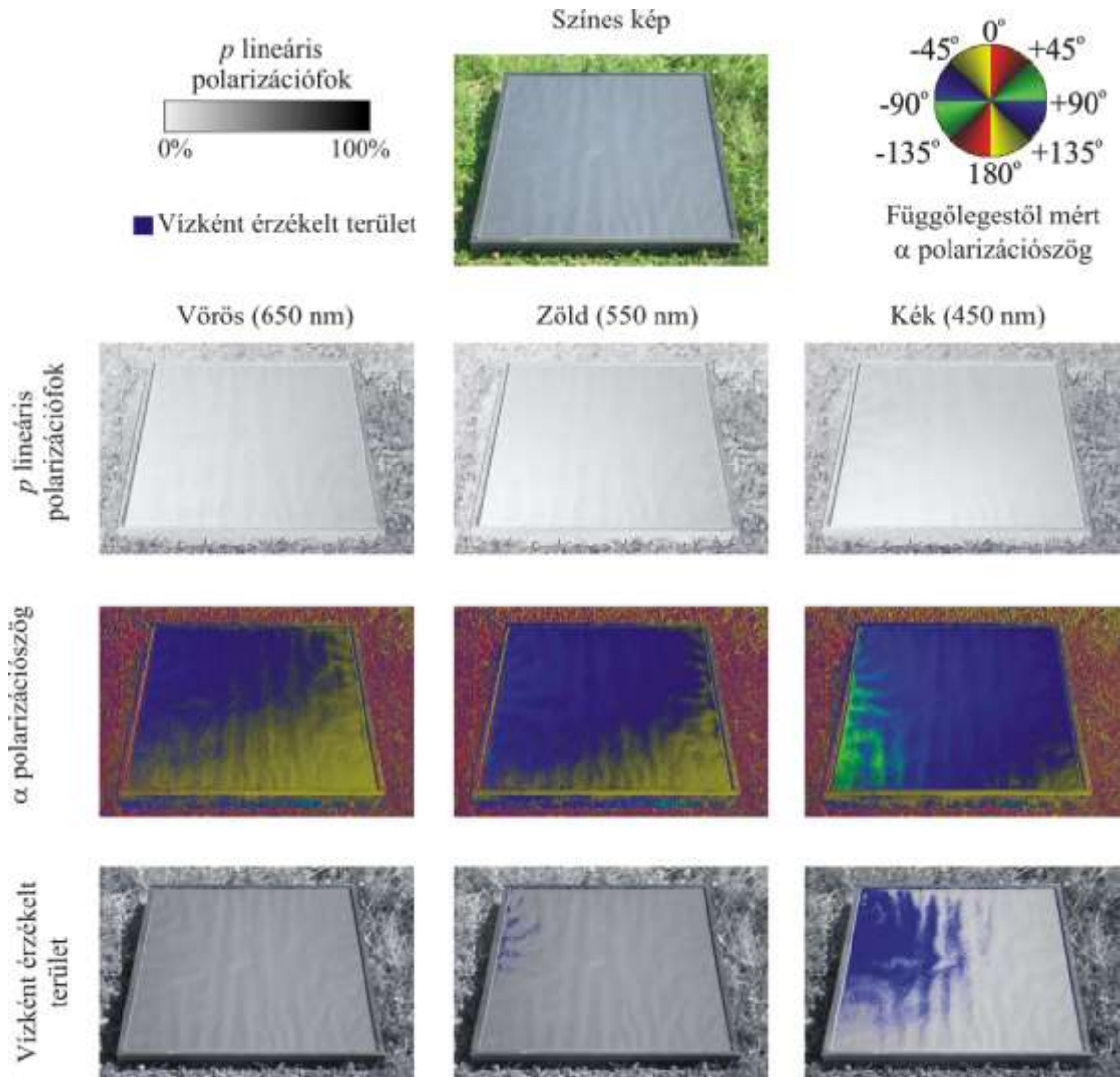
F7 ábra: Matt napelemtábla polarizációs mintázatai napos időben, mikor a Nap balról süt.



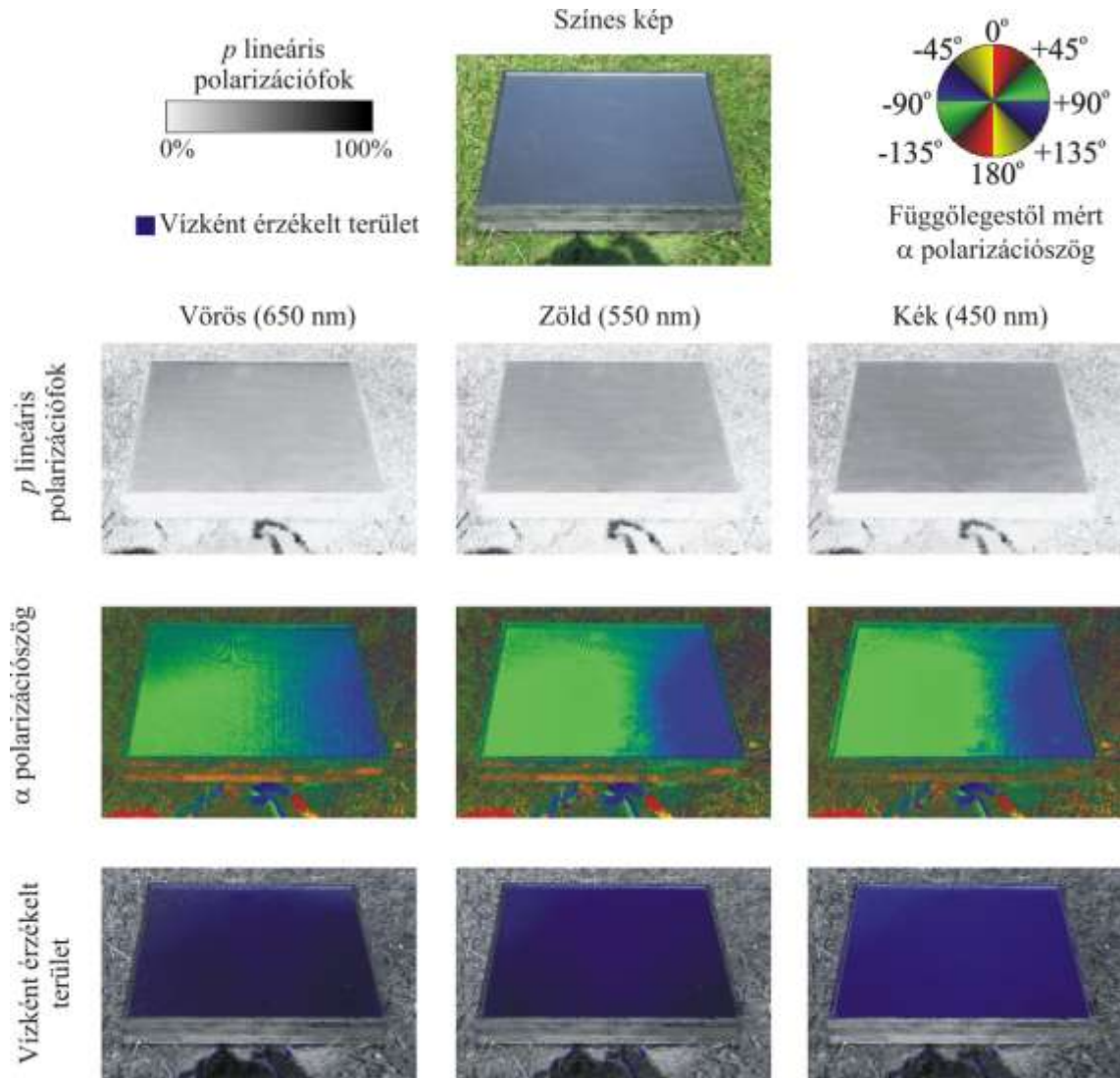
F8 ábra: Matt napelemtábla polarizációs mintázata napos időben, mikor a Nap szemből süt.



Mennyire „zöld” a napelem?



F9 ábra: Matt napelemtábla polarizációs mintázata napos időben, mikor a Nap jobbról süt.



F10 ábra: Matt napelemtábla polarizációs mintázatai napos időben, mikor a Nap hátulról süt.